

fizikai szemle

2017/9

KATTINTÁSRA
VIDEÓ NYÍLIK

„Tanároktól diákoknak, hallgatóknak és résztvevőknek, kicsiknek és nagyoknak”

Az Ericsson Magyarország Kft. **szeptember 29-én, pénteken**, a Kutatók Éjszakáján **15:45–22:30-ig** megnyitja a budai **Science Parkban** (Budapest, XI. kerület Irinyi József utca 4–20., a Petőfi híd budai hídfője közelében, A épület) lévő egyik laboratóriumát az érdeklődők, diákok részére, és meghív néhány lelkes fizikatanárt (akik közül többen már Ericsson-díjat is kaptak kiemelkedő pedagógusi munkájuk elismeréseként), hogy mutassák be legkedvesebb kísérleteiket.

A laboratórium látogatása és az előadások ingyenesek. **A diákok saját maguk is kísérletezhetnek!**

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat megbízásából, az Ericsson Magyarország Kft.-nek köszönhetően már **hatodszor** válhatunk Öveges József tanár úr utódaivá.

Program

15:45 – 16:00	Megnyitó – a program felvezetése	Jarosievitz Beáta – Ericsson-díjas Sükösd Csaba
16:00 – 16:30	Kutassunk együtt!	Nagy Anett – Ericsson-díjas
16:40 – 17:10	Elektromos és mágneses kísérletek	Bagosi Róbert Krisztián
17:20 – 17:50	Fizika a cirkuszban	Sinkó Andrea
18:00 – 18:30	Szívószál és a PET-palack – újratöltve	Szabó László Attila
18:40 – 19:10	Kísérletek XIX. századi eszközökkel	Berecz János – Ericsson-díjas
19:20 – 19:50	Zenéljünk fizikául, vagy fizikázzunk zenéül	Oláh Éva Mária
20:00 – 20:30	Légnyomás, no akkor nyomás!	Pál Zoltán – Ericsson-díjas
20:40 – 21:10	Hangoskodás és fényezés	Borbély Venczel
21:20 – 21:50	Nyíregyházi diákok a világhír küszöbén	Zsigó Zsolt – Ericsson-díjas
22:00 – 22:30	Tűz és víz!	Fülöp Csilla

Műsorvezetők, programgazdák: Jarosievitz Beáta és Sükösd Csaba

Élő közvetítés: www.galileowebcast.hu

További programok az Ericsson K+F Központjában:

Gyorsulj te is
5G-re!

Fényfedés

Droidfoci

Ericsson Drone
Challenge

Laborlátogatás

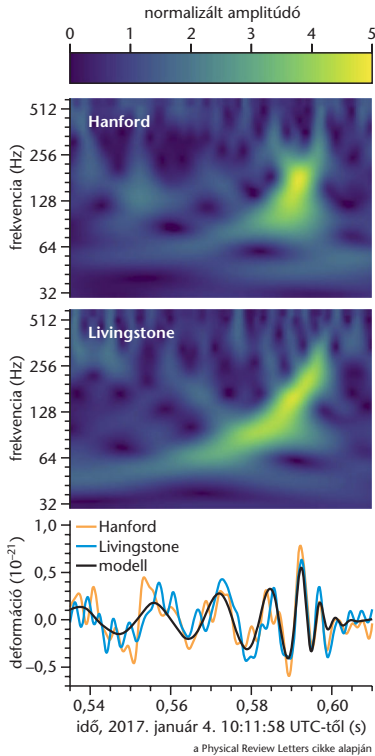
Telefonharc

Robtok világa

SZEPTEMBER



LIGO/Caltech/MIT/Sonoma State (A. Simonnet)



A gravitációs hullámok észlelésén dolgozó LIGO Scientific és Virgo Collaboration tudósai a *Physical Review Letters*ben június 1-jén megjelent cikkükben [PRL 118, 221101 (2017)] bejelentették harmadik gravitációs hullám észlelésüket. A GW170104 hullámot 2017. január 4-én detektálta az amerikai LIGO gravitációshullám-detektor. A jel elemzése szerint a hullám, a korábbi két esethez hasonlóan, két fekete lyuk összeolvadásából származik, ami a Földtől 3 milliárd fényév távolságban ment végbe. Ezidáig ez a legnagyobb távolságból detektált jel (az első kettő 1,5 és 1,3 milliárd fényévre volt). Az összeolvadó fekete lyukak együttes tömege körülbelül 50 naptömeg volt, ami a korábban detektált 62 és 21 naptömeges megfigyelések közé esik. A detektált jel elemzése azt valószínűsíti, hogy a két fekete lyuk forgásvektorának keringési síkjukra merőleges komponense ellentétes irányú volt. Az észlelés a LIGO jelenleg is folyó, 2016. november 30-án indított, második megfigyelési időszakában történt (előtte a LIGO közel egy évig, fejlesztési munkálatok miatt nem detektált). A korábbi két eseményt 2015. szeptember 14-én, illetve 2015. december 26-án észlelték. Ezen adatok alapján a közlemény megállapítja, hogy nagy számban léteznek $\geq 25M_{\odot}$ fekete lyukak, amelyek összeolvadási gyakorisága elegendően nagy ahhoz, hogy további hasonló események észlelésére számíthassunk. A PRL-ben megjelent közleményt több, mint 1000 kutató jegyzi, akik a LIGO Scientific és az európai Virgo együttműködés résztvevői.

Okos telefonoktól a szuper-számítógépekig a nagyobb sűrűségű adattárolás igénye napjaink egyik legfontosabb technológiai kutatási törekvése. Most a University of Manchester kutatói fontos előre lépésről számolnak be [Nature 548, 439–442 (24 August 2017)] megmutatva, hogy mágneses hiszterézis, ami elengedhetetlen feltétele a mágneses adattárolásnak, létezik lantanida atomokat tartalmazó egyetlen molekulából álló molekuláris mágnesekben egészen -213°C -os hőmérsékletig, ami már közel van a cseppfolyós nitrogén -196°C -os hőmérsékletéhez, így közelebb visz a viszonylag olcsó, cseppfolyós nitrogén hőmérsékleten megvalósítható egymolekulás adattároláshoz. A molekuláris adattárolással elérhető lenne a mai lehetőségeket két nagyságrenddel megnövelő 30 terabit/cm² tárolási hatékonyság. Korábban is lantanida atomokat tartalmazó molekulákkal érték el a legmagasabb működési hőmérsékleteket. A lantanidák ritkaföldfémek, amelyeket számos formában használnak a mindennapi elektronikus eszközökben, telefonokban, tabletekben, laptopokban, hibrid autókban stb. A manchesteri csoport diszpróziumot használt. Mostani eredményükkel a húsz éves -259°C -os hőmérsékleti rekordot javították meg jelentősen. A cikkben bemutatott tervezési módszerük továbbvitelével céljuk a nitrogén forráspontjánál magasabb hőmérsékleteken is működő molekuláris mágnesek kifejlesztése. A nagyobb adattárolási sűrűség például a nagy adattároló központok jelenleg egyre növekvő energiafelhasználását csökkenthetné. (Egyes becslések szerint az adattároló központok felelősek a világ üvegházhatású gáz kibocsátásának 2 százalékáért.) Az adattárolás egy, a fentitől eltérő alapon történő fejlesztésére irányuló kutatásról szól Gubicza Ágnes és szerzőtársai *A mesterséges intelligencia építőeleme – az Ag₂S memrisztor* című cikke (302–307. oldal).


Lendvai János
főszerkesztő

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:

Az első, immáron 50 éves hazai hologram 13 lemezéből már csak egy nyújt felismerhető képet, ezt láthatjuk Hartmann Péter felvételén.

Szeptember (<i>Lendvai János</i>)	293
<i>Horváth Zoltán György:</i> A magyar kézműves holográfia hőskora – 1. rész: kezdetek és tudomány <i>Az írás az 50. évfordulóhoz kapcsolódóan bennfentes történeti áttekintést ad hazai holográfia kezdetéről</i>	295
<i>Gubicza Ágnes, Geresdi Attila, Csontos Miklós, Halbritter András, Mibály György:</i> A mesterséges intelligencia építőeleme – az Ag ₂ S memrisztor <i>Kísérletek 20 nm vastagságú ezüst-szulfid rétegben kialakított ezüst nanoszálakból készített emlékező ellenállással</i>	302
<i>Pósfay Péter, Barnaföldi Gergely Gábor, Jakovác Antal:</i> Neutroncsillagok extrém anyagának vizsgálata új térelméleti módszerekkel <i>Neutroncsillagok belső szerkezetének vizsgálata egy egyszerűsített térelméleti modellel</i>	307
<i>Hózer Zoltán:</i> Balesetálló atomerőművi fűtőelemek fejlesztése <i>20 éves program indult a fűtőelemek balesetállóságának növelésére</i>	313
<i>Madas Balázs Gergely:</i> Radonexpozíció és a kis dózisok definíciója <i>Kis dózisú besugárzások egészségre gyakorolt hatása a sugárvédelem egyik alapvető problémája</i>	316

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Bokor Nándor:</i> Készítsünk napórát CD-ből! <i>Ötletek és részletes útmutatások napórák készítéséhez, amelyek szépek és tanulságosak</i>	318
<i>Komáromi Annamária:</i> Öt éve állították pályára a Masat-1-et <i>A magyar űrszonda példáján a fizika számos témaköre érdekesen tállalható</i>	324
<i>Tél Tamás:</i> Egy igaz tanár – Gruiz Márton (1972–2017)	328

HÍREK – ESEMÉNYEK

Kitüntetések augusztus 20-a alkalmából	328
----------------------------------------	-----

J. Lendvai: September

Z. G. Horváth: Heroic age of Hungarian handicraft holography
– Part I.: Beginning and science

Á. Gubicza, A. Geresdi, M. Csontos, A. Halbritter, G. Mibály: Ag₂S memristor
– building block of artificial intelligence

P. Pósfay, G. G. Barnaföldi, A. Jakovác: New field theory methods in the investigation of the extreme material of neutron stars

Z. Hózer: Development of accident resistant heating elements for nuclear power plants

B. G. Madas: Radon exposure and the definition of small doses

TEACHING PHYSICS

N. Bokor: Sun-dial from CD

A. Komáromi: Masat-1 Hungarian space probe launched 5 years ago

T. Tél: Márton Gruiz (1972–2017): a dedicated physics teacher

EVENTS



A MAGYAR KÉZMŰVES HOLOGRÁFIA HŐSKORA

1. rész: kezdetek és tudomány

Horváth Zoltán György

MTA Wigner Fizikai Kutatóintézet SzFI

1967 tekinthető a magyar holográfia születési évének. Az 50. évforduló alkalmából érdemes megemlékeznünk az úttörő kezdetekről. Ezt a korszakot a kézművesség, a klasszikus fotográfián alapuló – így visszatekintve, analógnak nevezhető – képrögzítési technika jellemezte.

Fényérzékeny fotolemezek, filmtekercsek, exponálás, előhívás, fixálás, szárítás... azután a képeket nézegetve néha csalódás, néha öröm és elégedettség. Ez volt a fényképészet anno, és pontosan ilyen volt a kezdeti holográfia is. Sőt! Először ködös, majd egyre szépülő „fekete-fehér” (a kezdeti He-Ne lézerek miatt inkább: semmi-piros foltos), később színes, sokszor térbeli, háromdimenziós látvánnyal (nem képekkel) és számtalan érdekes tudományos eredménnyel.

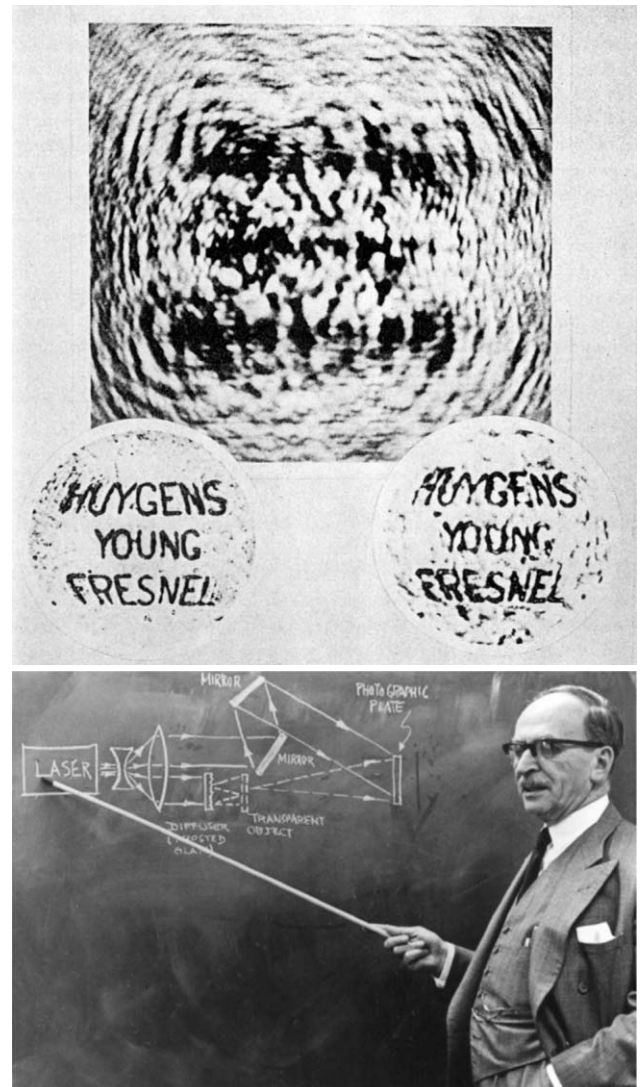
A cikk első részében főleg a tudományban, a másodikban pedig a látvány területén elért hazai eredmények rövid történetét szeretném felidézni. A „lötykölős” korszakot, aminek lezárultát a digitális képrögzítés, sokszorosítás és a digitális holográfia megjelenése jelentette.

Magyarországon szinte mindenki tudja, hogy a Nobel-díjas *Gábor Dénes* teremtette meg a holográfiát. Az elektronmikroszkópok képjavítási megoldásain elmélkedve arra a következtetésre jutott, hogy képalkotáshoz a tárgyról felénk érkező sugárzás intenzitáseloszlásának síkbeli rögzítése (fény esetén: fotográfia) helyett, a sugárzási tér fáziseloszlásának egy síkban rögzítésével is lehet rekonstruálni (újrakeltetni) a „látott” valóságot. Fény esetén az eredeti fényteret.

Az viszont már sokkal kevésbé köztudott, hogy az első optikai hologramot is maga Gábor Dénes készítette, még 1947-ben, jóval az egyszínű, koherens lézerek megszületése előtt. Hihetetlen szívóssággal oldott meg számtalan elméleti és technikai problémát, csak azért, hogy bizonyítani tudja, hogy a matematikailag ugyan korrekt, de akkoriban erősen futurisztikusnak, sőt inkább lehetetlennek tűnő elképzelése valóban megvalósítható. A fény fázisának rögzítéséhez nagy koherenciájú (hosszú ideig – kettéosztás, majd újraegyesítés során – nagy fényútkülönbségeket is elvisel-

ő, kötött fázisú) monokromatikus fényforrás kell. Akkoriban viszont az erre képes, ma lézereknek nevezett eszközök ötlete is csak elvi lehetőségként merült fel. Gábor Dénes kísérleteinél higanygőzlámpák egyszínű spektrumvonala volt a fényforrás. A jól gerjesztett atomi spektrumvonalakban már valami minimális fáziskötöttség fellelhető, ami lehetővé tette egy síkbeli tárgy (üveglemez, aminél nagy úthosszkülönbségek nincsenek) hologramjának elkészítését és rekonstrukcióját (1. ábra). A lemezen az optika azon óriásainak nevei olvashatók, akik munkái megalapozták a holográfia lehetőségének felismerését.

1. ábra. A világ első hologramja, amelyet Gábor Dénes higanylámpa erős spektrumvonalának fényével már 1947-ben(!) elkészített és rekonstruált [1] fölül, és a Nobel-díjas fizikus előadást tart a holográfiáról (alul).



Horváth Zoltán György 1969-ben szerzett fizikus diplomát az ELTE-n, s azóta a KFKI-ban (Wigner FK) dolgozik, jelenleg nyugdíjasként. 1992 óta kandidátus. Nagy intenzitású fény-anyag kölcsönhatással és lézerfizikával – sokfotonos folyamatok, pikoszekundum-mérő, síkban sugárzó (Halo) diszklézerek, biofotonika és új típusú, leképező ellipszometria – foglalkozott. Lézeres szakemberek oktatásán túl ismeretterjesztő cikkekkel, TIT-előadásokkal, rádió- és tv-műsorokkal népszerűsítette a fényfizikát.

Gábor Dénes számára az igazi szakmai sikert a holográfia szükséges feltételeinek majdnem tökéletesen megfelelő klasszikus lézerek megjelenése hozta meg, majd másfél évtizeddel később, a század hatvanas éveiben. Az elismerést pedig az 1971-es fizikai Nobel-díj. A díj rangját még az is emelte, hogy akkoriban már ritkaságnak számított, hogy valaki egyedül, azaz nem másokkal megosztva kapta ezt a különleges kitüntetést.

Néhány gondolat a holográfiáról

Gábor Dénes szakított azzal a technikával, amit a szemünk, a barlangfalra rajzoló ősemberek, a festők és fotográfusok használnak: világunkat sötét-világos, esetleg színes pontok, pöttyök, foltok, vonalak – tipikusan síkban elhelyezett – sokaságával próbálják helyettesíteni. Agyunk csodálatos képessége, hogy szemünk ideghártyájára szemlencsénkkel leképezett valóság változó intenzitású és elrendezésű ponthalmazból hihetetlen „látványt” varázsol.

A felfedező klasszikus görögös műveltségét jól mutatja az eljárás elnevezése: „holos” = teljes, „grafos” = leírás (lerajzolás, rögzítés), azaz a rögzített interferenciakép a valóság teljes optikai információját tartalmazza. A csodás név csak arról nem ad semmi információt, hogy mit és hogyan kell tennünk, ha holografálni szeretnénk. Ennek részleteit természetesen cikkek, könyvek, tankönyvek, sőt ma már youtube-videók sokaságában is megtalálhatja az érdeklődő olvasó. Legautentikusabb forrásként én mégis Gábor Dénes Nobel-díj átvételekor tartott előadását javasolnám, amely a tudós születésének 100. évfordulója alkalmából, 2000-ben jelent meg magyarul a *Fizikai Szemlében* [1].

Az elnevezést többen igyekeztek érthetőbbé – kis képzavarral –, kézzelfoghatóbbá tenni. Ilyen például, hogy a holográfia térbeli fényképezés. Igaz, mert a holográfia klasszikusan tényleg a 3D-s világot adja vissza, de manapság az úgynevezett leképező (képalakító-, képsík-) hologramok a legelterjedtebbek – főleg a másolásvédelemben –, és ezek csak minimális térinformációt hordoznak. Egy másik elterjedt név a lencse nélküli fényképezés. Elvben ez is igaz, mert akár ezek nélkül is készíthetünk hologramokat, de szigorúan véve hamis, mert a nyalábalakításhoz pontos lencsék kellene, így ezek használata nélkül a gyakorlati holográfia nem nagyon működik.

Én ennyi év elteltével a „hullámfront-rekonstrukciót” tartom a leginkább jellemző elnevezésnek. Röviden megindokolnám, hogy miért. Ha megvilágítunk egy tárgyat, az arról visszaverődött fény elektromágneses hullámfrontként jut el a szemünkbe. A látható valóságot ez a hullámfront hordozza. Attól látunk valamit, hogy ez a hullámfront a szemünkbe jutott. Mit is tesz a holográfia? Éppen ezt a hullámfrontot hozza újra létre, azaz rekonstruálja anélkül, hogy a valóság, az eredeti tárgy jelen lenne. Szinte hihetetlen, hogy ezt meg lehet csinálni. Ma már tudjuk, hogy ez

egy Nobel-díjat érő ötlet (no meg rengeteg előtanulmány, matematika és keserves munka).

A fénytér igen bonyolult hullámfrontjainak újraalkothatósága ámulatba ejtő lehetőség. Néhány évtizeddel korábban máson csodálkozott az emberiség. *Edison* (elődei és utódai) munkája eredményeként régóta ismerünk a holográfiához kicsit hasonló akusztikus megoldásokat. A hang is hullámjelenség. Egy zenekarban például sok-sok hangszer rezgeti a levegőt, és az általuk keltett hanghullámfront jut a fülünkbe. A hullámfront közvetít a hangszerek és a fülünk között. A hanghullámfront rekonstrukcióját a hangszórók (fülhallgatók) membránjának segítségével mára szinte tökéletesen megoldották. Egy egész zenekart lehet egy – kis túlzással – egyszerű lemezdarabka, és ezzel a levegő sűrűségének ügyes rezgetésével helyettesíteni. Az akusztikus hullámfront-rekonstrukció tehát sok-sok évvel megelőzte az optikai változatot. Természetesen a fény- és hanghullámok jellegének lényegi eltérése miatt a technika is egészen más elveken alapul, de az analógia talán jelzi, hogy a hologram tekinthető annak a „membránnak”, ami úgy tudja „megrezgetni” vagy inkább összekuszálni egy ismert fényforrás fényét, hogy az az eredeti fénytér tökéletesen újrateremtett mása lehet.

A megfigyelő számára (elvben) teljesen mindegy, hogy az a fénytér jut-e a szemébe, amely a valós tárgyról verődött vissza, vagy az azzal tökéletesen azonos, de mesterségesen keltett elektromágneses tér, amit egy ismert stabil forrás fényének ügyes modulálásával, a hologramon történt átengedésével (néha reflektálásával) állítottunk elő. Ha a valódi fénytér háromdimenziós volt, akkor természetesen a mesterséges is az lesz. Ez az a tulajdonság, amit az emberek többsége a holográfiához, azaz a fényhullámfrontok rekonstrukciójához társít.

Az „őskori” technika

Elborzasztó, egyúttal gyönyörű és tanulságos a fényírás, a fotográfia „felfedezésének”, kialakulásának, kezdeti lépéseinek dokumentumait olvasgatni. Ezekhez hasonlóan a kezdetben igencsak macerás volt a hologramok készítése is.

Fényforrásként leginkább – természetesen – a közkedvelt, jó koherenciatulajdonságokkal rendelkező, és akkoriban már 5-10-20 mW-os teljesítményt is stabilan produkálni képes piros hélium-neon lézereket használtak. Ezen készülékek életre lehelése, a stabil állapot elérése szinte minden nap több óra előkészületet igényelt. A holográfia minőségileg sokkal jobb és stabilabb lézereparamétereket kívánt, mint a szokásos „bekapcsoljuk és világít” állapot. Ezekben az akkori csúcsberendezésekben – 20-30 mW esetén – ugyanis akár 1-2 méter(!) hosszú, pár mm átmérőjű, sok ponton állíthatóan alátámasztott üvegkapillárisokban működött a gázkisülés. A kisülési csövek a hőmérséklet-változások (főleg ki-bekapcsolások) miatt sorra meggörbültek (az a fránya gravitáció) akár annyira is, hogy reggel már át

sem talált a fény a kapillárison, pedig előző nap még csodásan üzemelt. Ha már átjutott a beállításra használt próbafény a csövön, további hosszadalmas jusztlási feladat várt a méteres távolságra lévő különleges tükrökre is. Ilyen feltételek mellett kellett az egyetlen transzverzális (TEM₀₀) módusú, ideális esetben körülbelül körkeresztmetszetű „szép” eloszlású, időben is nagyon stabil, monokromatikus fényt kelteni.

Azon laboratóriumokban, ahol a hatvanas években lézerek készültek (léteztek), szinte mindenütt volt optikai spektrométer is. A halovány fényforrások nagy felbontású spektrumát különlegesen nagy vonalfelbontású fotolemezekre (1000-4000 vonal/mm) exponálták a spektroszkópok. Ezek a speciális spektrálemek voltak alkalmasak arra, hogy rögzíteni tudják a holografikus felvételi elrendezés során létrejött, a fényhullámhossz nagyságrendjébe eső – mikrométer alatti felbontású – interferenciacsík-rendszert.

A fotográfia egyik alaptörvénye szerint a fotanyagok fényérzékenysége és felbontása egyszerre nem növelhető. Az egyik csak a másik kárára javítható. Emiatt jó felbontás esetén az akkoriban rendelkezésre álló (folytonos) lézerekkel dolgozva is, nagyon hosszú (több másodperc, sőt inkább több perc) expozíciós időkre lehetett számítani. Ezalatt kellett a teljes rendszert (lézer, nyalábalakító optikák, terelő tükrök, a tárgy és a fotolemez) mikrométernél nagyobb pontossággal stabilan tartani. Levegőt venni is alig mertünk, pedig annak hatását nagyjából kiátlagolta a hosszú felvételi idő. Jénában például az éjjel szerencsére ritkán közlekedő villamos dübörgése miatt, annak menetrendjéhez kellett igazítanunk a felvételek idejét. Néhány év kellett, mire kialakultak a holográfia klasszikus rezgésmentes platformjai: a rengeteg homokba ágyazott vagy autógumibelsőkön, illetve teniszlabdákon nyugvó hatalmas és nehéz márvány- vagy vastag fémlapok.

Lézerekre és holográfiára kalibrált fénymérők nem voltak, így az expozíciós idő meghatározása kizárólag kísérleti úton történhetett.

A fényképezésnek „csak” a se túl világos, se túl sötét ne legyen a kép, optimális expozíció feltételeit kellett meghatározniuk. Az interferenciaképek esetén az interferenciacsíkok „szinuszosága” is fontos volt, hiszen például egy lépcsőfüggvény szerint változó csíkok rendszere sok zavaró mellékdiffrakciót tud generálni. Nagyon el kellett találni a fotolemezek feketedési görbéjének középső szakaszát. Azt a lineáris tartományt, ahol a kétszer erősebb fény kétszer akkora feketedést eredményezett. Ezt a kritikus szakaszt nem csak az emulzió minősége, az expozíció, hanem még az előhívási és fixálási folyamat kémiai és időbeli lépései is nagyon erősen befolyásolták. A fizika csak egy szempontból segített a holográfusoknak: az interferenciacsík-rendszerrel (ha az tökéletes) teljesen mindegy, hogy mely csíkok sötétek, és melyek világosak. Emiatt a szimmetria miatt nem kellett a negatív hologramokról pozitív másolatot készíteni.

Egy elviselhető minőségű hologram létrehozása előtt tehát számtalan próbát kellett elvégezni. A ket-

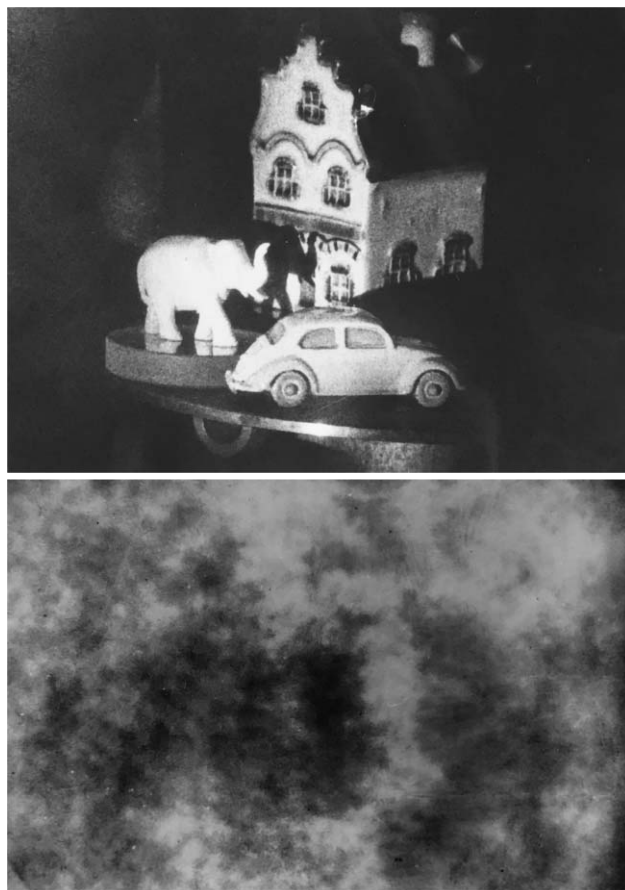
téoszott és önmagával a fotolemezen interferáló lézerefény volt a tipikus kalibrációs felvételek tárgya, ahol a fénysugarak találkozási szögével lehetett a vonalsűrűséget változtatni, azaz a fotolemez tényleges felbontását ellenőrizni, no és az expozíciós időt is széles skálán kellett változtatni. Csak az előhívott lemezek diffrakciós képeinek alapos vizsgálatával tudtuk megtalálni az optimumot. Tipikus esetekben a mérések végére (sokszor már előbb is) elfogytak a rendelkezésre álló fotolemezek, s a következő rendelésre – főleg itthon, távol a devizás gyártóktól, sok-sok hónap múlva – már egyáltalán nem biztos, hogy a korábbival azonos tulajdonságú fotoanyagot kaptunk. Amikor a holografálás világszerte kezdett elterjedni, a nagy gyártók már kifejezetten e célra kifejlesztett lemezek gyártásába kezdtek, ez nagyon leegyszerűsítette a munkát.

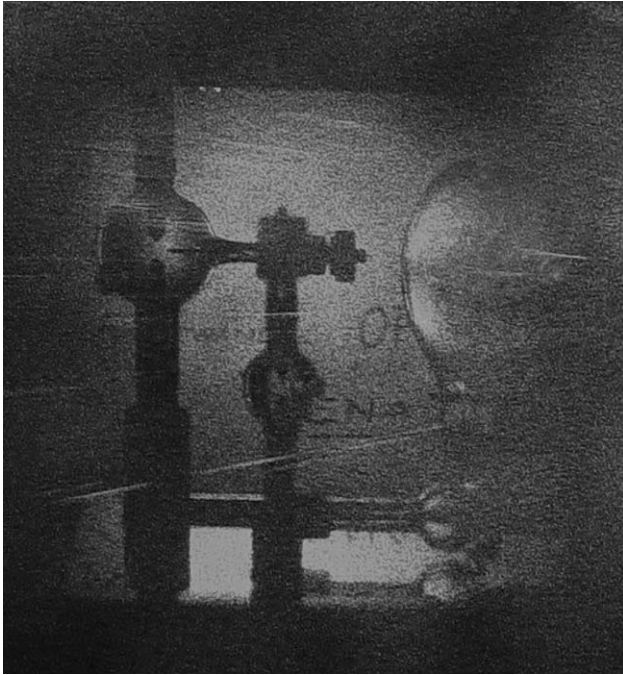
Körülbelül így nézett ki a hologramkészítés az 1960-as években.

Az első magyar lézeres hologramok

A lézerek megalkotása után néhány évvel, 1967-ben, egymástól teljesen függetlenül Jánossy Mihály, kollégái – köztük Tóth József – közreműködésével a KFKI-ban (2. ábra), valamint Sörlei Zsuzsa és a szerző –

2. ábra. Jánossy Mihály (KFKI) klasszikus hologramja 1967-ből fölül, alatta e hologram diffrakciós rácsa.





3. ábra. Sörlei Zsuzsa, Peter Zollner és Horváth Zoltán (Abbeanum, Jena) hologramja ugyancsak 1967-ből.

még egyetemistaként, egy úgynevezett: nyári gyakorlaton – a jénai Abbeanumban (Institute für Angewandte Optik) Peter Zollner vezetésével készítették az első magyar hologramokat (3. ábra).

A makettházikót, kisautót, elefántot, valamint a kis lámpácskák közvetlen és tükörképeit is egyszerre térben, három dimenzióban láttatni képes lemezek az akkori, igen népszerű hazai lézeres tudományos ismeretterjesztő (TIT) előadások bemutató részének slágerlemei voltak.

Egy „koszosnak” látszó üvegdarabkát lézerral megvilágítva, a bemutatókon résztvevők sejteni vélték, hogy valami fura, korábban elképzelhetetlen látvány tárul a szemük elé. Fontos megjegyezni, hogy a klasszikus hologramok élvezetéhez – a technika mellett – nagy szükség volt a megfigyelő emberek nagy vizuális fantáziájára is. Majdnem akkorára, mint ami egy síkbeli fénykép és a háromdimenziós valóság hasonlóságának elfogadásakor szükségeltetik. Gondoljuk csak meg, hogy tényleg köze van-e egy papíron vagy képernyőn lévő fekete-fehér vagy színes pontok, foltok halmazának az eredetileg látott teljes valósághoz? A rajzot, fényképet, televíziót már megszoktuk.

A hologramnál lebegett valami a semmiben, és egy kis mozgatásra más és más, korábban esetleg takarásban lévő részletek is láthatóvá váltak. Az addig ismert háromdimenziós, két képet kissé más irányból (a két szem távolságából) láttató eszközökhöz és „kacsintós” 3D-s képsíkokhoz szokott szemeknek a „mögé látás” lehetősége nem kis megdöbbenést okozott. Néhány hologram olyan látványt nyújtott, amely már nem csak a lemezen túl – mint egy ablakon átnézve –, de előtte is megjelenhetett a „kézzel fogható semmiben”.

Még azt is meg lehetett csinálni, hogy a lemez egy részét letakarva, továbbra is észlehető volt a teljes látvány. Mindent „tudott”, amit akkoriban a holográfiáról tanítottak: térbeli jelenség. A „kép” – a megszo- kott fényképekkel ellentétben – nincs lokalizálva a lemezen, azaz a hologram töredéke is tartalmazza a teljes információt. A páros esküvői fényképeket szokás a váláskor félbevágni. Az esküvői hologramok elvesztették ezt a néha hasznos funkciót. Azokat már nem lehet kettétörni, illetve lehet, de mindkettőn továbbra is rajta maradnak a szereplők.

Az akkoriban még nagyon híres csillebérci Központi Fizikai Kutató Intézet (KFKI) volt a hazai lézer- kutatás és fejlesztés központja. Természetes, hogy itt készültek az első magyar hélium-neon lézerek is. Sorra jelentkeztek az egyetemek, főiskolák, hogy léze- rekhez szeretnének jutni. Számos, a koherens fény- forrásokkal egyszerűen elvégezhető precíz mérés mellett, lassan-lassan a hologramkészítés is részévé vált a fizikai oktatás optikai gyakorlatainak. Ennek köszönhetően, a ma aktív fizikusok és fizikatanár- generációk számára kedves vagy épp kínos, nosztal- gikus emlékeket ébreszthet a „lötykölős” (előhívás, mosás fixálás) holográfia őskora.

Holografikus adatrögzítés

A holográfiával foglalkozó kutatókat a 3D-s rögzítés és megjelenítés mellett, a fénytérrogzítés új techniká- jában rejlő különleges lehetőségek tudományos alap- jai és azok alkalmazásai is érdekelték. A holográfia elvében rejlő különleges, speciális lehetőségek zömé- ről vajmi keveset tudnak az emberek. Azt még sokan tanulták, hogy a hologramok egyik változatánál az információ az egész lemezen „szét van kenve”. Nem lokalizált egy-egy képpontra, mint az a fényképeknél természetes.

Valóban, a részben letakart hologramon is a teljes valóságot láthatjuk. Talán csak annyi az eltérés, hogy egy teljes hologram olyan, mintha egy hologram mé- retű ablaküvegen néznénk keresztül, a részben leta- kart hologram pedig közel ugyanazt a látványt produ- kálja, egy kulcslyukon kukucskálishoz hasonló mó- don. Kicsit közelebb kell hozzá mennünk, és mindent láthatunk, csak természetesen csökkentett felbontás- sal. Mindez persze nem minden hologramra igaz. (Ké- sőbb megszülettek az optikai eszközök – tükör, len- cse – által leképezett tárgyról készített „image”, azaz képsík-hologramok is, amelyeknél ez a jelenség ter- mészetesen nem léphet fel.) Az információ szétkenhe- tőségének – akkori elképzeléseink szerint – alapve- tően módosítania kellett volna az adatrögzítés korábbi technikáját. A biteket, a különféle adattárolók egy-egy pontján szokás rögzíteni, de ezek sérülhetnek, hisz még a legszebben írt kódexre vagy házi feladatra is rácsöppenhetett egy tintapaca. Bármilyen lokális hiba az adott információ sérülésével, általában elvesztésé- vel jár. Ha holografikusan rögzítjük az adatokat, loká- lis hibák esetén nem kell adatvesztéstől tartanunk,

hiszen az szét van kenve a teljes adatlemezen. Az akár 100×100 -as mátrixokba (lapokra) is elrendezhető információk gyors holografikus rögzítése és kiolvasása csodás távlatokat sejtetett.

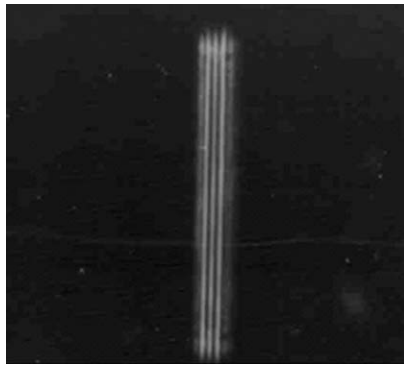
Az 1960-as évek vége, 70-esek eleje az egyre újabb, gyorsabb, nagyobb sűrűséget megengedő adatrögzítési eljárások kutatásának korszaka volt. Akik még emlékeznek a szocialista országok KGST-s munkamegosztására, talán azt is tudhatják, hogy a szocialista országokban hazánk – azon belül is főleg a Központi Fizikai Kutató Intézet – reszortja volt a számítógépek távlati memórialehetőségeinek kutatása. A mágneses, huzal, buborék, optikai, magnetooptikai kombinált folyamatok adatrögzítési lehetőségei közül az akkori Fizikai Optika Laboratórium munkatársai a bitenkénti és az esetleges holográfián alapuló optikai memóriákkal is foglalkoztak.

Hologramkészítéshez lézerekre volt szükség, de a kiolvasáshoz – elvben – már az egyszínű, inkoherens források is megfeleltek. Ez szinte azonnal a csak olvasható (read only) memóriák kategóriájára redukálta a lehetőségeket. A gyártóknál még feltételezhető a lézerek meglétét, de a felhasználóknál akkoriban ez elképzelhetetlennek tűnt. (Az élet ezt egy-két évtized múlva alaposan megcáfolta, de a CD/DVD-kbe épített lézerek még ma is alkalmatlanok holografálásra.)

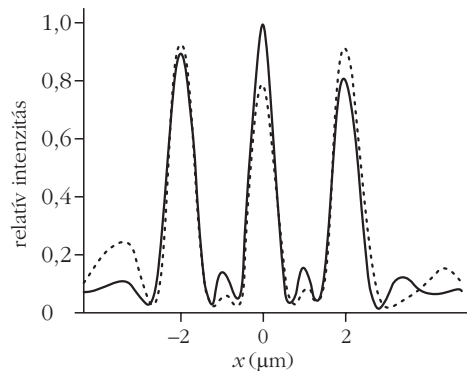
Kiss Gábor, Varga Péter, szovjet kutatók és Ákos György közös munkái világossá tették, hogy a sík lemezekon holografikusan tárolt adatsűrűség megegyezhet ugyan a pontonkénti optikai rögzítés sűrűségével, de a különféle lencsehibák, és a hologramok, források és detektorok fényhullámhossz-precizitású kölcsönös pozicionálása komoly műszaki problémát okoz, illetve jelentős adatvesztést jelenthet [3].

Az közismert, hogy a hologramlemez rögzítési felbontása mikrométer alatti, de az akkor még csak elvben volt triviális, hogy ez a felbontás a rögzített képeken is elérhető. Bányász István – részben Varga Péter irányítása mellett – mikronnál jobb felbontást ért el He-Ne lézerrel, mikroszkopikus tárgyak rekonstruált képein [6] (4. ábra).

A sok szép eredmény ellenére az eltelt idő bebizonyította, hogy ezidáig nem a holografikus adatrögzítés lett a nyerő. Pedig az optikai adatrögzítés és a szintén optikai holográfia szerencsés párosításnak tűnt. Az 1950-es, 60-as években szokásos néhány bit/cm^2 -es adatsűrűséghez képest a fényel elérhető 1-2 mikrométeres, sőt kisebb pontok sok nagyságrendes adatsűrűség-növekedést ígértek, és bizonyítottak is később a CD-k, majd DVD-k esetén. Az extrém precizitást igénylő holografikus adatrögzítést és kiolvasást nem sikerült üzletileg sikeressé tenni.



4. ábra. Egy háromelemű 1:1 kitöltésű Ronchi-rács egy mikron szélességű rekonstruált holografikus képének mikrofotója (balra) és mozgó részen kiemezett denzitása (jobbra).



Tudományos holografikus „photoshopok”

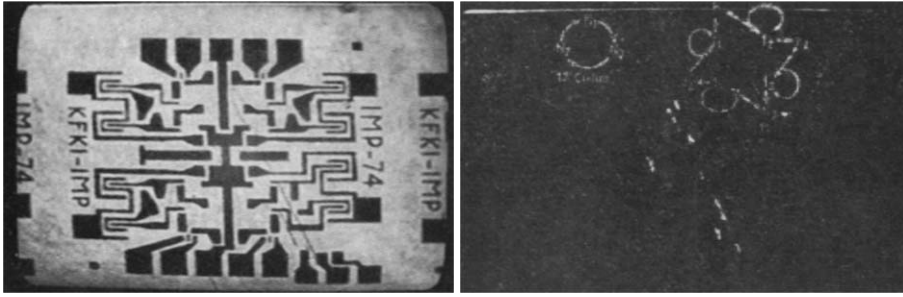
A fényképezésnél szinte a kezdetek óta megszokott volt a képek manipulálása, összeadása, kivonása, torzítása vagy éppen szépitgetése. Ez egyaránt történet és történik ma is művészi, szépészeti vagy éppen tudományos, esetleg mérés-technikai célokból. A photoshoppal és társaikkal manipulált képeknek lassan semmi közük a valósághoz. A valóságot rögzítő hologramok tudományos manipulálása – a „holoshop” – viszont sok műszaki és technikai érdekességet tartogat.

Itt nem csak a képekkel, hanem magukkal a fényterekkel is elvégezhető – erős egyszerűsítéssel – matematikai műveletek, például „összeadhatók” és „kivonhatók” egymásból. Számptalan kombinációban egy vagy több „valóság” és azok hologramjai között végezhetünk alap, de akár a szelektív asszociációit is súroló műveleteket.

Az „optikai számítások” eredménye tipikusan egy kép, ami kivonáskor például csak az eltéréseket mutatja. Azok és csak azok észlelhetők. Az eredmény első pillantásra „üvölt”, ha valahol valami eltérés van. A hologramokon a fényhullámhossz nagyságrendje, azaz mikrométer körüli is lehet a felbontás a teljes képen, amit korábban csak a mikroszkopikus felvételeknél remélhettünk. Az ultragyors, igen intenzív megvilágító lézerimpulzusok használhatósága pedig olyan további lehetőségeket teremtett, amelyek más formában ugyan, de messze túlszárnyalták a klasszikus fényképezés lehetőségeit.

Az integrált áramkörök gyártásánál használt levilágító és párologtató maszkok nagy precizitású bonyolult ábrákat tartalmaznak. A folyamatos gyártósori használat során ezek sérülhetnek, eltömődhetnek, ami miatt selejtes termékek sokasága keletkezhet. Hihetetlenül hosszú időt vesz igénybe ezek folyamatos, alapos, egyedi, pontonkénti ellenőrzése. Ekkor merült fel a maszkok ábráinak gyors, holografikus vizsgálati lehetősége. A KFKI-ban Bencze György és Hámori András foglalkozott a megközelítőleg két-dimenziós, lényegében sík tárgyak holografikus kivonással történő ellenőrzési problémájával [4].

Folytonos lézerekkel végezték a mesterhologram és az aktuális maszkok összehasonlítását. Megoldásuk azonnal jelezni tudta, ha a maszk megsérült, eltö-



5. ábra. Karchibás fotomaszk, és annak a mesterből holografikus kivonással készült hibaképe.

mődött, azaz bármiben is eltért az eredeti, standard állapottól (5. ábra).

Az interferencia a klasszikus optika egyik legfontosabb jelensége. Az interferométerekkel végzett alpmérések – főleg a lézerek megjelenése után – szerves részét képezték az optikai mérés technika oktatásának. Ennek a holográfiára kiterjesztett változataként született a holografikus interferometria.

A hologram – korrekt felvétel esetén –, mint említettük, hullámhossz pontossággal rögzíti a felvétel tárgyait. Ha – például – ugyanarról a tárgyról két hologramot készítünk egyetlen fotolemezre, és időközben semmi nem változik, „normális” (kétszeres, esetleg túlexponált) fényteret rekonstruálhatunk. Viszont akkor, amikor a fényforrás koherenciahossza által megengedett tartományon belül bármi, minimális változás is bekövetkezik időközben, az eltérés interferenciacsíkok formájában észlelhető a rekonstrukció során. Lényegében ez a holografikus interferometria alapötlete. Az éppen aktuális feladatok célszerű megoldása a mester és a vele névlegesen azonos tárgyak, azok hologramjai összehasonlításának számtalan kombinációját hívták életre. Ennek részletei például [5]-ben magyarul is megtalálhatók.

A Budapesti Műszaki Egyetem Fizika Tanszékén már a kezdetektől fogva az analóg holográfia lehetséges műszaki, mérés technikai alkalmazásainak kutatására koncentráltak. A digitális holográfia színrelépését (1995) követően a korábbi módszerek, eljárások alkalmazása új lehetőségeket és kihívásokat teremtett számukra, ennek bemutatása azonban már túlmutat a jelen cikkben tárgyalt korszakon.

Füzessy Zoltán és munkatársai a holografikus interferometria szinte teljes spektrumát művelték, oktatták és kutatták.

Hordozható rubinlézeres holografikus interferometriai mérőrendszert fejlesztettek ki, amellyel már nem csak laboratóriumban, de a megrendelő cégek, elsősorban szerszámgépgyárak telephelyein is képesek voltak felvételeket készíteni. A mérőrendszerrel háromdimenziós elmozdulások (deformáció, rezgés) vizsgálhatók; az interferogramok számszerű kiértékelését számítógép segítette. A 30–1500 mJ között változtatható energiájú megvilágító piros lézertény széles tartományban biztosította az optimális expozíciós értékek beállítását. A kereken 1 m-es koherenciahossz nagyobb méretű tárgyak (néhány m²) vizsgálatára is lehetőséget nyújtott. A körülbelül 20 ns-os impulzushossz pedig lehetővé tette

egyrészt a minták nagyon gyors változásainak detektálását, másrészt hologramok készítését zajos környezetben (gyári helyszínek) is. A készülék robusztus tömege ugyan nehezítette a szállítást, de kiválóan biztosította az interferometriai mérésekhez szükséges mechanikai stabilitást. A rendszer létrehozása mások mellett Ádám Antal, Bogár

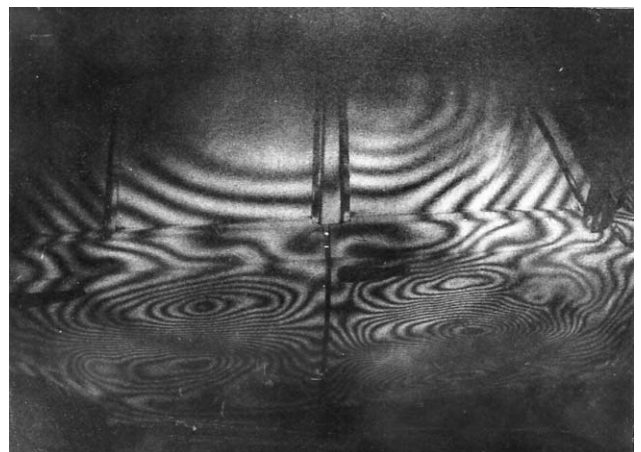
István, Füzessy Zoltán és Szarvas Gábor kiemelkedő munkájának gyümölcse.

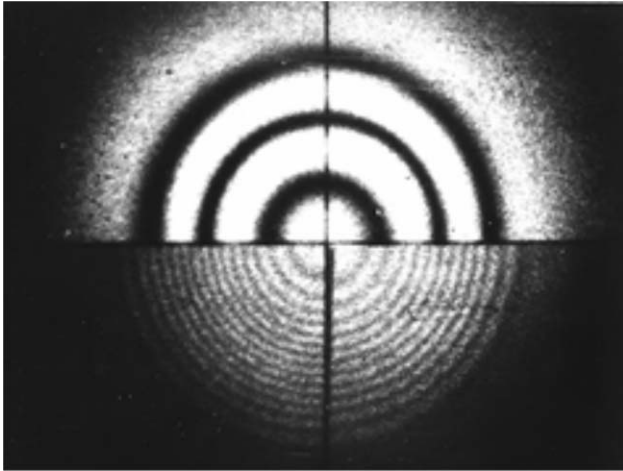
A mérések mérnöki szempontból legfontosabb célja és eredménye a különféle gépek, gépalkatrészek mechanikus terhelés vagy hő hatására bekövetkező deformációjának, rezgésének tanulmányozása volt. Ezt korábban kizárólag csak a polarizációt a mechanikus feszültségtől függően fordító, átlátszó mesterséges kis-minta-modelleken lehetett elvégezni (polarimetria). A holografikus interferometriai felvételek már az eredeti, valós szerkezeti anyagokból készültek, nagyobb méretű, háromdimenziós minták felületi változásait is láthatóvá tették. Ezzel a berendezéssel akár az üzemelő szerszámgépek, autómotorok és -karosszériák rezgéseit, deformációját is vizsgálni tudták. A 6. ábrán autókarrószeria rezgését tükröző csíkrendszer látható. Az interferenciacsíkok az azonos értékű rezgési amplitúdó mértani helyei. A felvétel adott motorfordulatszámú és szimulált útviszonyok mellett készült görgős vizsgálópadra helyezett gépkocsi jobb oldaláról.

A holografikus interferometria technikájának fejlesztésével, több hullámhosszon végzett mérésekkel sikeresen megoldották a képeken megjelenő csíkrendszer kalibrálását, ami a mechanikus változások mértékét, sebességét és irányát nem csak látványosan demonstrálta, de mérnöki pontossággal dokumentálta is.

A fenti holografikus interferometriai alkalmazásokban adott tárgy két állapot közötti különbséget határozták meg. Füzessy Zoltán és Gyimesi Ferenc megmutatták, hogy két különböző tárgy viselkedése opti-

6. ábra. A gépkocsiszekrény két ajtaján kialakuló rezgéseket tükröző interferenciakép.





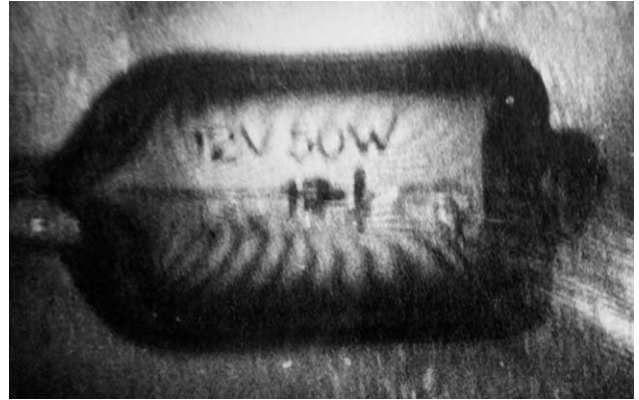
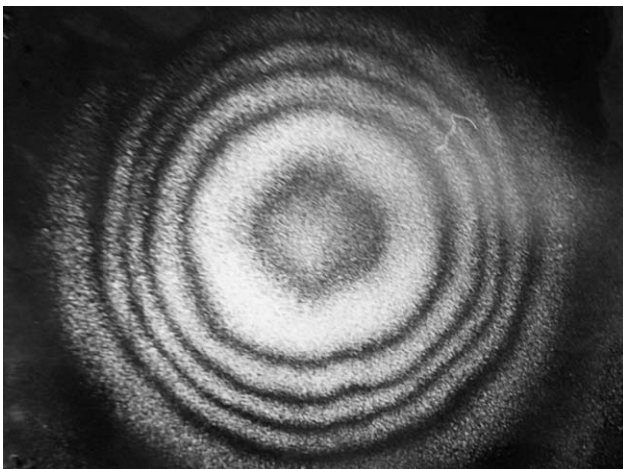
7. ábra. Két nyomásdévénynek különböző nyomásokhoz tartozó deformációjának összehasonlító mérése. A képen egyszerre figyelhető meg a mester- (bal alsó negyed), a teszt- (felső fél) és a különbségi interferogram (jobb alsó negyed) egy-egy része.

kai úton közvetlenül is összehasonlítható. Ezt szemlélteti a 7. ábra, ahol a csíkok két nyomásdévények (mester és teszt) deformációját és a deformációk különbségét tükröző csíkrendszerek részei láthatók: mester- (bal alsó negyed, 15 csík), teszt- (felső fél, 3 csík), a két fenékdeformáció különbségét kijelző különbségi interferogram (jobb alsó negyed, 12 csík) [5].

A KFKI-ban kifejlesztett, hatalmas pillanatnyi fényintenzitás-sűrűséget biztosító, kellő koherenciahosszal rendelkező, egymódusú impulzus rubinlézer már az erős fényt kibocsátó, azaz önmagukban fénylő „minták” holografikus vizsgálatára is lehetőséget teremtett. Ennek tipikus példái azok a Bakos József, Szigeti János és Sörlei Zsuzsa által készített holografikus interferometrikus felvételek, amelyek például egy világító autóizzóbúra alakjának, és a benne lévő gáz törésmutatójának a hőmérséklet növekedése miatt bekövetkezett változását is képesek voltak kimutatni (8. ábra).

Akkoriban csúcsteljesítménynek számított, hogy ugyanők az impulzuslézerrel levegőben keltett forró

9. ábra. Impulzuslézerrel levegőben keltett forró, fényes plazma szétrepülésének néhány nanoszekundumos felbontással készült interferometrikus hologramja.



8. ábra. Egy világító autóizzó két lézerimpulzussal exponált hologramja.

és fényes lézerplazmák nanoszekundumos időskálán lezajló szétrobbanásának folyamatát is láthatóvá tették úgy, hogy a plazmát keltő lézerimpulzus egy kis részét késleltetve használták a plazma interferometrikus hologramjának elkészítésére (9. ábra).

A számítástechnika fejlődésével és a digitális kép-rögzítés megjelenésével új korszak kezdődött nem csak a fényképezésben, de a holográfiában is. Ez a korszak is sok érdekes és fontos tudományos eredménnyel gazdagította a hazai holografikus kutatások történetét, ami – remélem – még a 100 éves évforduló előtt olvasható lesz a *Fizikai Szemlében*. Az ősholográfia látványos részével viszont talán már a következő számban találkozhat az érdeklődő olvasó.

Munkám során, sokszor terjedelmi okokból, de néha esetleg trehányáságból, az általános történelemírás szokásos receptjeit követtem. A történészek is csak emlékeztetik, és az általuk önkényesen választott források alapján dolgoznak. Jobbára csak az uralkodókat, no meg a győztes vagy vesztes csaták vezetőit szokták megemlíteni. A terhek zömét viselő emberek, harcosok milliói névtelenek. A holográfia (főleg) kutatási részében, szinte mindenütt nagy szak tudású munkatársakból álló teamek végeztek a munkát. Sok, itt nem említett kolléga vett részt a fenti eredmények elérésében, akiknek ezúton is köszönetet mondok, hisz nélkülük nem nagyon lett volna miről írnom. Köszönetet szeretnék mondani továbbá sokak mellett, az úttörők közül Füzessy Zoltánnak, Hámori Andrásnak és Sörlei Zsuzsának, akik kiemelkedő segítséget nyújtottak a cikk elkészítéséhez.

Irodalom

1. Gábor Dénes: Holográfia, 1948–1971. *Fizikai Szemle* 50 (2000) 181., <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0006/gdenes.html>
2. Jánossy Mihály: Holográfia. *Fizikai Szemle* 18 (1968) 268–271.
3. Gy. Ákos, G. Kiss, P. Varga: Effect of lens aberrations on the storage capacity of holographic memories. *Optics Communications* 20 (1977) 63–67.
4. Bencze György, Hámori András: Holografikus kivonás alkalmazása integrált áramkörök fotomaszkjainak ellenőrzésére. *Fizikai Szemle* 29/7 (1979) 248.
5. Füzessy Zoltán: *Optikai holográfia és holografikus interferometria*. Nemzedékek Tudása Tankönyvkiadó Zrt., Budapest, 2014.
6. Bányász István: Tökéletlen holográfia – a rögzítőanyag nemlineáritásának és véges feloldóképességének hatása a rekonstruált holografikus képre. *Fizikai Szemle* 67 (2017) 255–259.

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ÉPÍTŐELEME – AZ Ag_2S MEMRISZTOR

Gubicza Ágnes, Geresdi Attila, Csontos Miklós, Halbritter András, Mihály György
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, TTK Fizika Tanszék
és MTA–BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport

Emlékező ellenállás

Az angol „memory” és „resistor” szavak összetételéből képzett *memrisztor* egy olyan passzív áramkörü elem, amelynek ellenállása függ a rajta korábban átfolyó áramtól. Pillanatnyi értékét az határozza meg, hogy előzőleg milyen irányban és mennyi töltés haladt rajta keresztül. A legegyszerűbb memrisztor egy elektrokémia cella, aminek ellenállása megnő, ha az áramot szállító ionok kiválnak az elektródán, és lecsökken, ha ellenértés polarítás alkalmazásával visszaoldódnak. Az elektrokémiai cella kis feszültségen mért ellenállása olyan memória, amelynek értéke nem digitálisan változik, hanem folytonosan, és ezen *analóg memória* tartalma attól függ, hogy a korábbi folyamatok után éppen mekkora a rendelkezésre álló ionok koncentrációja.

A területen folyó kutatások az elmúlt 10 évben – amikor világhosszá vált, hogy a korszerű nanotechnológiai eljárásokkal létrehozott memrisztorok forradal-

masíthatják a számítástechnikát – gyorsultak fel. Fém- és félvezető-komponensekből sokféle felépítésű és különböző elvek alapján működő memrisztorokat hoztak létre (a példaként felhozott elektrokémiai cellától eltérően, ezekben az elektronok vezetik az áramot). A nanoméretű memrisztorokból épített hálózatokkal ambiciózus célok elérését tűzték ki célul. Az Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma kutatószerveletének részlege a DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) 2008-ban indított *Synapse* (Systems of Neuromorphic Adaptive Scalable Electronics) projektje ezidáig például több mint 100 millió USA dollárral támogatta egy olyan mesterséges intelligencia megvalósítását, amelynek építőelemei az emberi idegsejteket összekötő szinapszisokhoz hasonlóan működő memrisztorok. A szinapszisok folytonosan változó erősségéhez hasonlóan a memrisztor vezetőképessége is analóg módon hangolható, ráadásul az információ beírása ugyanazokon a kapcsolatokon keresztül történik, mint a kiolvasása (szemben például a tranzisztorokkal, ahol ehhez egy harmadik terminál is szükséges). Egy ilyen mesterséges *neuromorf architektúrát* ismertet a *Nature* 2015. májusi száma.

Ebben a cikkben a BME Fizikai Intézetében folyó memrisztor-kutatások legújabb eredményeit foglaljuk össze az ezüst-szulfid rétegben kialakított, vékony vezető szálakon végzett kísérletek bemutatásával. Az ezüst-szulfid réteg tipikus vastagsága ~20 nm, a ben-



Mihály György egyetemi tanár, az MTA rendes tagja, az MTA–BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport vezetője a BME Fizika Tanszéken. Kutatási területe kísérleti szilárdtestfizika, ezen belül különleges elektromos és mágneses tulajdonságú anyagokban megfigyelhető jelenségek vizsgálata. A cikk társszerzői témavezetésével készítettek diploma és doktori disszertációjukat.



Gubicza Ágnes az MTA–BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport tudományos munkatársa. Fizikus diplomáját és PhD fokozatát 2013-ban és 2017-ben szerezte a BME Fizika Tanszéken. Kutatási területe memrisztorok előállítása nanotechnológiai eljárásokkal és kapcsolási dinamikájuk kísérleti vizsgálata.



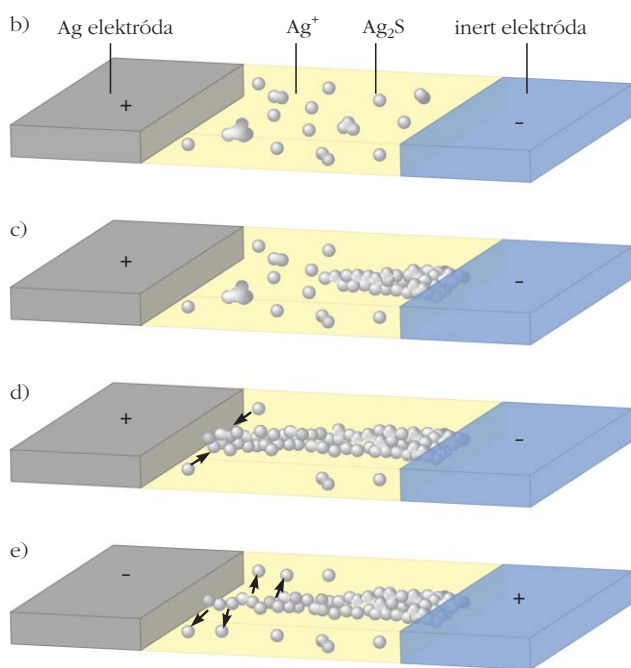
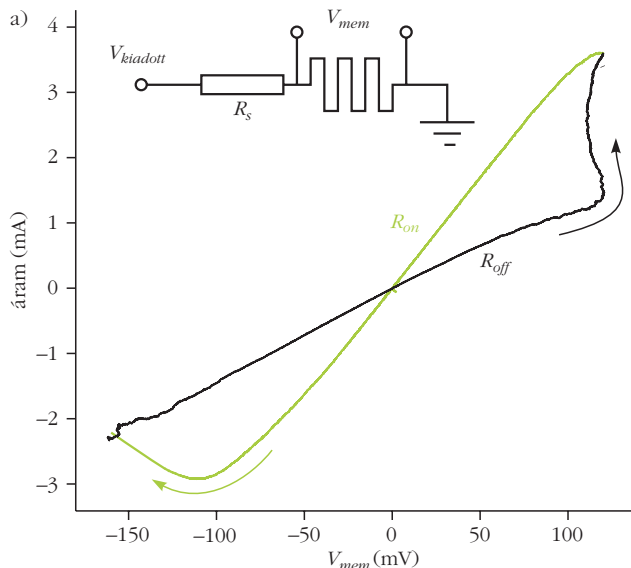
Csontos Miklós az MTA–BME Kondenzált Anyagok Fizikája Kutatócsoport tudományos főmunkatársa. Mérnök-fizikus diplomáját és PhD fokozatát 2002-ben és 2007-ban szerezte a BME Fizika Tanszéken. Kutatási területe az atomi méretskálájú memóriaszervezők tervezése, gyártása és kísérleti vizsgálata.



Geresdi Attila kutató a Delfti Műszaki Egyetem (Hollandia) QuTech intézetében. Mérnök-fizikusként végzett a BME Fizika Tanszéken 2007-ben és ugyanitt doktorált 2011-ben. Fő kutatási területe a szupravezetés kísérleti vizsgálata nanométer méretskálán.



Halbritter András egyetemi tanár, az MTA doktora, a BME Fizika Tanszék tanszékvezetője. Mérnök-fizikus diplomáját és PhD fokozatát 1999-ben és 2003-ban szerezte a BME Fizika Tanszéken. Kutatási területe az atomi és molekuláris nanovezetékek, valamint atomi méretű memóriák kísérleti vizsgálata.



1. ábra. a) Feszültség-áram karakterisztika háromszög meghajtás esetén. Fent: memrisztor és soros ellenállás kapcsolása. b)–e) vezetőlánc kialakulása a szigetelőben.

ne kialakuló, fémesen vezető ezüst nanovezeték keresztmetszete 3-10 nm. Ez a konstrukció egy olyan memrisztor, amelynek ellenállása az ezüst nanovezeték vastagságától függ. A nanovezeték kialakulását és ellenállásának aktuális értékét a korábban lejátszódott elektromos folyamatok – mint ahogy az alábbiakban részletesebben is ismertetjük – határozzák meg.

Az Ag_2S memrisztor feszültség-áram karakterisztikáját az 1.a ábra mutatja, működési elvét az 1.b–e ábrák szemléltetik. Az ezüst-szulfid vékonyréteget egy planáris ezüstelektroda felületén hozzuk létre, amihez egy hegyes tűt érintünk. Így jön létre az 1.b–e ábrákon látható rétegszerkezet, amelyben az inert elektróda az elektrokémiailag semleges tű hegye. Az ezüstelektroda és a tű hegye közti ezüst-szulfid réteg-

ben az ezüstionok könnyen diffundálnak. A tű hozzáérintése utáni kiindulási állapotban a memrisztor nagy ellenállású, hiszen a két oldalt csak az elektromosan rosszul vezető Ag_2S réteg köti össze. Ha az inert elektródára az ezüstelektrodához képest megfelelően nagy negatív feszültséget kapcsolunk, akkor az ezüstelektrodából Ag^{2+} ionok lépnek ki az ezüst-szulfid rétegbe, ott az elektromos tér hatására a másik elektróda felé mozognak, majd fémes ezüstként kiválnak. Mivel az elektromos erővonalak mindig a kivált Ag-réteg csúcsa felé mutatnak, önszerveződő módon egy keskeny Ag-nanovezeték kezd el nőni a két elektróda között. Ez egy idő után rövidre zárja a két elektródát, majd a két kontaktus között kialakult nanovezeték fokozatosan vastagodik és az elektródák között mérhető ellenállás lecsökken. Ellentétes feszültséget alkalmazva fordított folyamat játszódik le, azaz a nanovezeték vékonyodik, az ellenállás nő. Az alkalmazások szempontjából kedvező paraméterekkel rendelkező memrisztor esetében a két elektródát mindig összeköti az elektromosan jól vezető ezüst-nanovezeték, és a megfelelő feszültségekkel történő vezérlés során ennek keresztmetszete változik.

A memrisztor vezérlése az 1.a ábrán mutatott egyszerű kapcsolási rajz szerint történik (a meanderszimbólum a memrisztor nemzetközi jelölése). Az áramkörben fontos szerepet tölt be az R_s soros ellenállás, ami korlátozza a memrisztoron átfolyó áramot, ha annak ellenállása lecsökken. Kiindulási állapotban a memrisztor ellenállása a nagyobb R_{OFF} értéket veszi fel. Az ezüstelektrodára adott feszültséget növelve a két elektródát összekötő ezüst-nanovezeték egy küszöbfeszültségnél vastagodni kezd, az áram megnő, és a memrisztor az ON bekapcsolt állapotba kerül. A kisebb ellenállású R_{ON} értéke folyamatosan hangolható: minél nagyobb a kiadott feszültség (illetve a soros ellenállás által limitált áram), annál kisebb ellenállás érhető el. A feszültséget visszacsökkentve ismét egy közel lineáris feszültség-áram karakterisztika figyelhető meg. Megfelelően nagy negatív feszültségnél a nanovezeték elvékonyodik, és a memrisztor visszaállítható az eredeti OFF állapotba. Az ábrán jól látszik, hogy a memrisztor memóriaként működik: nagy pozitív vagy nagy negatív feszültséggel kapcsolhatunk az OFF és ON állapotok között, míg kis feszültségnél mindkét állapotban passzív ellenállásként viselkedik, azaz az állapot megváltoztatása nélkül kiolvashatjuk, hogy melyik memóriaállapotban van.

Mezozkopikus vezetés¹

Az 1. ábra egy olyan memrisztor működését mutatja, amelynek alacsony feszültségen mért ON és OFF ellenállásai a néhány száz ohmos tartományba esnek, és ezen ellenállásokat tizedvoltos feszültségekkel lehet kapcsolni, miközben az eszközön milliampere áram folyik. Ezen értékek mindenképp előtt azt jelzik,

¹ Ez egy nehezebb, átugorható fejezet.

hogy az Ag₂S memriszor a gyakorlati alkalmazás szempontjából ideális paraméterekkel rendelkezik. A számszerű értékek ugyanakkor egy súlyos kérdést is felvetnek: hogyan folyhat egy néhány nanométer átmérőjű vezetéken milliamperes áram? Az ehhez tartozó 10⁹-10¹⁰ A/cm²-es, hihetetlenül nagy áramsűrűséget egy szokásos (makroszkopikus) vezeték nem tudja szállítani, hiszen ~10⁴-10⁵ A/cm²-es értéknél a legjobban vezető fémről készült vezeték is megolvad az áram által keltett Joule-hőtől. És egyáltalán, honnan lehet tudni, milyen átmérőjű a nanovezeték?

Mindkét kérdésre választ ad a mezoszkopikus vezetési tulajdonságok Landauer-elmélet keretében történő értelmezése. Az elmélet az elektronok terjedését abban a mérettartományban vizsgálja, amely rövidebb az energiacserevel járó rugalmatlan ütközések távolságánál. Ilyen kis méreteknél nem alakul ki termikus egyensúly az elektronok és a nanovezeték atomjai között. Az elektronok terjedését ebben a nemegyensúlyi folyamatban – a szokásos fajlagos ellenállás helyett – a vezetéken való átjutás, azaz a T transzmissziós valószínűséggel lehet leírni. Azt, hogy hány különböző elektron haladhat át egyszerre a vezetéken, a nyitott csatornák M száma határozza meg. A vezetési csatornák száma az A keresztmetszettel arányos geometriai paraméter, és a fémbe terjedő elektronok λ hullámhosszából közvetlenül számolható, $M \sim A/\lambda^2$. A fenti elmélet keretében egy nanovezeték G vezetőképessége a több vezetési csatornára átlagolt transzmissziós valószínűség és a vezetési csatornák számának szorzatával arányos:

$$G = \frac{1}{R} = G_0 M T, \quad (1)$$

ahol

$$G_0 = \frac{2e^2}{h}$$

az úgynevezett vezetőképesség-kvantum, értékét az elektron e töltése és a h Planck-állandó határozza meg:

$$G_0 = \frac{1}{12,9 \text{ k}\Omega}.$$

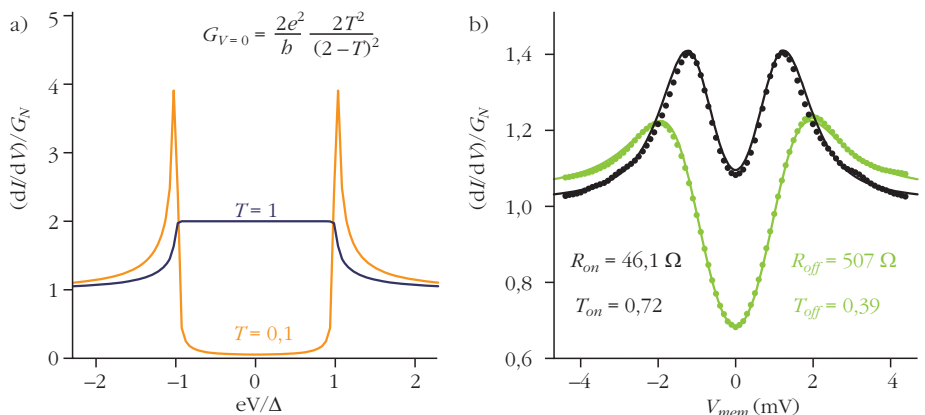
A nanovezeték M és T paramétereit egy szupravezető elektróda alkalmazásával egymástól függetlenül is meg lehet határozni. A szupravezető anyagokban a zérus ellenállású szuperáramot elektronpárok, az úgynevezett Cooper-párok viszik, minden párt két, egymáshoz képest ellentétes spinű elektron alkot. Egyedülálló elektronok csak egy bizonyos feszültség szint fölött, a Δ tiltott sáv energiájánál nagyobb energiával tudnak be-

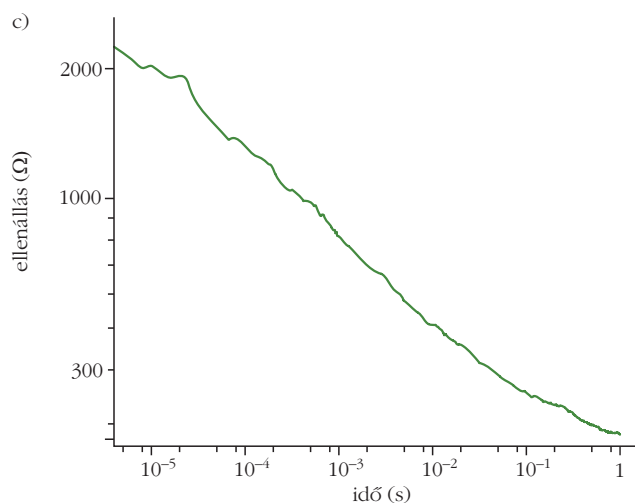
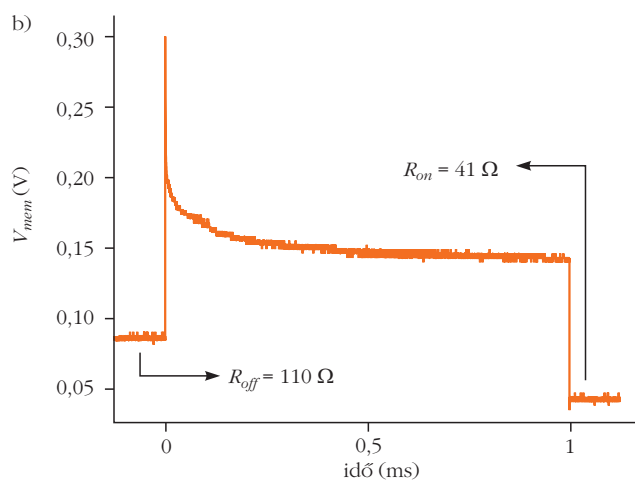
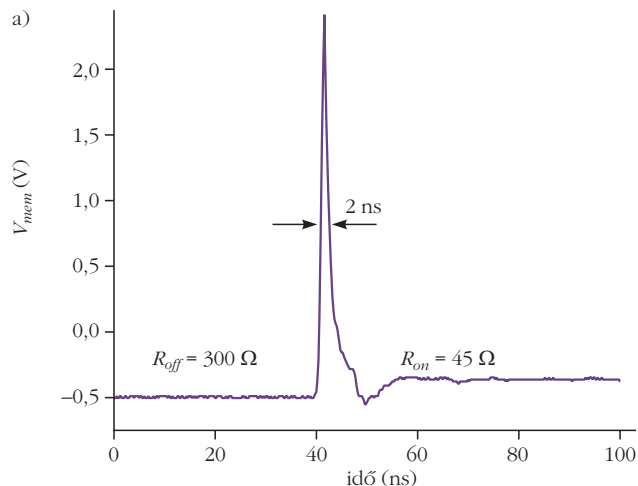
lépni a szupravezetőbe. Ha az inert elektródát szupravezető anyagból készítjük, akkor a vezetőképességet (és a differenciális vezetőképességet) nagy feszültségeknél továbbra is az (1) összefüggés írja le, ami egy egyszerű fémből készült tűre vonatkozott, azaz $G = G_N$ (az N index a „normál”, tehát nem szupravezető fémből készült tű alkalmazására utal). Szupravezető tű esetén azonban a néhány mV alatti feszültségeknél – amikor is az elektronok eV energiája kisebb, mint a szupravezetőre jellemző tiltott sáv – az elektronok csak az úgynevezett Andrejev-reflexió során keresztül juthatnak be a kontaktusba. Ez a folyamat formálisan annak felel meg, hogy beérkezik egy elektron a szupravezető határfelületére, belép egy Cooper-pár és egy, a bejövő elektronhoz képest ellentétes spinű „lyuk” visszaverődik. (Megjegyzés: ha egy szilárd testben elektronok haladnak negatív tömeggel valamilyen irányba, arra úgy is tekinthetünk, mintha pozitív töltésű „lyukak”, azaz elektronhiányok haladnának ellentétes irányba.) A differenciális vezetőképesség ekkor az úgynevezett Blonder–Tinkham–Klapwijk-elmélet segítségével írható le, ami egy vezetési csatornára nulla hőmérsékleten és zérus feszültség esetén az alábbi egyszerű összefüggést adja:

$$G = G_0 \frac{2T^2}{(2-T)^2}. \quad (2)$$

Ha a vezetési csatorna 100%-osan transzparens ($T = 1$), akkor a zérus feszültségnél vett vezetőképessége kétszerese a nagy feszültségen mért értéknek, ami annak felel meg, hogy valamennyi, határfelületre érkező elektron Andrejev-reflektálódik, azaz egy elektron beérkezése esetén két elektrontöltés halad át a határfelületen (egy elektron és egy „lyuk”). Egy $T \ll 1$ transzmissziójú alagútátmenet esetén viszont a kisfeszültségű vezetőképesség lényegesen lecsökken a nagy feszültségen várhatóhoz képest, hiszen az előbbi a két áthaladó töltés miatt az átmeneti valószínűség négyzetével, míg az utóbbi az átmeneti valószínűség skálázódik.

2. ábra. a) Szupravezető-normál kontaktus differenciális vezetőképessége a feszültség függvényében, nulla hőmérsékleten (elméleti számolás). b) Differenciális vezetőképesség egy memrisztor-szupravezető határfelületen a kapcsolás előtti és utáni állapotban (kísérleti eredmény). Az ON \rightarrow OFF kapcsolásakor a vezetőképesség több mint egy nagyságrendet csökken (az $R = 1/G_N$ ellenállás több mint egy nagyságrendet nő).





3. ábra. a) 500 ps pulzus hatására bekövetkező ellenállás-változás. b) 1 ms pulzus alatti feszültségesés. c) A memrisztor ellenállásának időfüggése, ha a memrisztorra és a soros ellenállásra konstans feszültséget kapcsolunk.

Egy széles feszültségtartományra a 2.a ábra mutatja a nulla hőmérsékletű határesetre végzett elméleti számolás eredményét. Véges hőmérsékleten az éles csúcsok kiszélesednek, és a BTK-formulának megfelelő függvény lekerekedik. A 2.b ábrán a teli karikák a nióbiumtűvel készített Ag₂S memrisztor kísérleti

pontjait jelzik, míg a folytonos görbék a BTK-formula illesztései. A Nb szupravezető tiltott sáv értéke (1,55 meV) és mérés hőmérséklete (4,2 K) ismert, az illesztési paraméter egyedül az átlagos transzmisszió nagysága. Az illesztésből meghatározott átlagos transzmissziók ismeretében az 1. egyenlet alapján kiszámolható a nyitott csatornák száma is. Ebből látszik, hogy az ON → OFF kapcsolásakor az átlagos transzmisszió lecsökken ugyan, de az ellenállás változását döntően a nyitott csatornák számának változása határozza meg. Ebben a kísérletben a nyitott csatornák száma 400-ról 60-ra csökken, ami a nanovezeték átmérőjének 10 nm-ről 3 nm-re csökkenését jelenti.

A szupravezető tűvel végzett kísérlet tehát igazolja, hogy az ezüst-szulfid memrisztorban kialakított ezüstvezeték néhány nanométer átmérőjű. Legalább ennyire fontos, hogy egyúttal alátámasztja a mezoszkopikus elmélet alkalmazásának szükségességét is, aminek alapvetése, hogy ilyen kis méreteknél nem alakul ki termikus egyensúly a vezetékben belül. Az elektronok csak a nanovezetéken történt áthaladás után, a sokkal nagyobb méretű kontaktusok tartományában kerülnek termikus egyensúlyba, emiatt a Joule-hő ott oszlik el. A folyamat teljesen más, mint amit makroszkopikus méreteknél megszoktunk: miközben a nanovezeték tulajdonságai határozzák meg az R ellenállás értékét, az ellenálláshoz tartozó $I^2 R$ Joule-hő nem a nanovezetékben keletkezik. A memrisztoron keresztül folyó áramsűrűség valóban hatalmas, 10^9 - 10^{10} A/cm², mégsem teszi tönkre az eszközt.

A kapcsolás dinamikája

Ahhoz, hogy a memrisztorok jól alkalmazhatók legyenek integrált memóriaelemként, a kis méret mellett fontos követelmény, hogy a kapcsolási folyamat megfelelően gyors legyen. Mivel a kapcsolás során a nanovezeték átmérője csupán néhány atomi réteggel változik és az elektromos tér által hajtott elmozdulások is atomi léptékűek, a kapcsolás diffúziós mechanizmusa kellően gyors lehet. Ugyanilyen fontos azonban, hogy az ON és OFF állapotokhoz tartozó ellenállások értékei alacsonyak legyenek, hiszen az elkerülhetetlen szórt kapacitások miatt egy nagy ellenállás nagy időállandójú RC-kört alkotna, ami egyfajta aluláteresztő szűrőként hatva megakadályozná a gyors működést. A fémesen vezető ezüst-szulfid memrisztorok e feltételnek is eleget tesznek: a 100 ohm körüli ellenállásértékek a tipikusan néhány pF-os áramköri szórt kapacitás mellett akár GHz feletti működést is megengednek. A 3.a ábra egy nagy amplitúdójú, 500 ps-os impulzussal kiváltott OFF → ON kapcsolást mutat. Az ábrán jelölt 2 ns-os szélesség a kísérletben alkalmazott oszcilloszkóp időbeli felbontását jelzi, ez egy felső határ a kapcsolási időre. A memrisztor kétségtelenül alkalmas nagy sebességű működésre.

Az Ag₂S memrisztor dinamikai tulajdonságai azonban ezen túlmutatóan is rendkívül érdekesek: a folyamatot nem egyetlen időállandó írja le, mint például

egy kondenzátor kisülését, ráadásul a kapcsolás sebessége szabályozható az alkalmazott feszültség nagyságával. Az alacsonyabb feszültség szinten végzett kísérletek rámutatnak egy sajátos visszacsatolási mechanizmusra: ahogy a kapcsoláskor csökken az ellenállás, a feszültség egyre nagyobb része a soros ellenálláson esik, így a memrisztoron eső feszültség is lecsökken, ami miatt fokozatosan lassul az elektromos tér által indukált diffúziós folyamat, lassul a vezető szál vastagodása. Ez az oka annak, hogy a folyamat nem egy szokásos exponenciális lecsengéssel zajlik, amit egyetlen időállandó jellemezne. Ugyanaz a memrisztor, ami a néhány voltos feszültség szinten akár 10^{-9} másodperc alatt is képes átkapcsolni (3.a ábra), néhány tizedvoltnál a milliszekundumos időskálán változik (3.b ábra), illetve a kapcsolási folyamat akár időben 5 nagyságrenden keresztül zajlik (3.c ábra).

Ezt a jelenséget egy másik módszerrel is vizsgálhatjuk, ha a feszültség-áram karakterisztikák mérésénél változtatjuk a meghajtó háromszögjel amplitúdóját és frekvenciáját. Kis amplitúdójú meghajtásnál a memrisztor adott állapotára jellemző egyetlen ellenállásértéket lehet mérni, nem látszik a kapcsolás, ahogy a 4.a ábra mutatja. Nagyobb feszültségeken végzett ciklusoknál lezajlik a kapcsolás, és 1-nél nagyobb R_{OFF}/R_{ON} arány mérhető. Ez az arány fokozatosan nő, ahogy a meghajtó háromszögjel amplitúdója növekszik. A kísérlet eredménye függ a háromszögjel frekvenciájától is: magas frekvenciákon nagyobb feszültség szükséges a kapcsoláshoz. A 4.b ábra az egyazon memrisztoron végzett tízezer mérés eredményét összefoglaló feszültség-frekvencia diagram. Az egyenletes szürke tartományban $R_{OFF}/R_{ON} = 1$, azaz a memrisztor nem kapcsol, míg a szaggatott vonal feletti részben a szürke árnyalat tónusa jelzi a kapcsolás nagyságát. Egy adott kapcsolási szintet jellemző tónus jó közelítéssel a

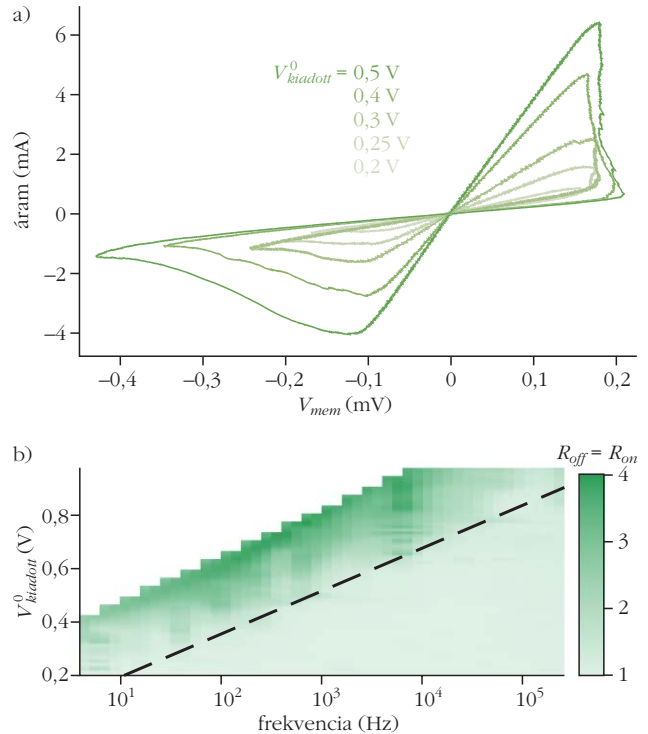
$$V = a \log f + b \quad (3)$$

amplitúdó-frekvencia kapcsolatot jelöli ki (az a és b az adott memrisztorra jellemző paraméterek). Tehát, ha lineárisan növeljük a feszültséget, akkor a kapcsolási folyamat exponenciálisan felgyorsul.

Az alkalmazások szempontjából is nagyon fontos tulajdonság, hogy a kapcsolási idő ennyire érzékenyen függ a meghajtás nagyságától. Emiatt néhány voltos feszültség hatására gyorsan tudunk írni, azonban az aktuális értéket tizedvoltos feszültségeken kiolvastva még sokkal hosszabb idő alatt sem okozunk változást. Valamint ez a tulajdonság teszi alkalmassá a memrisztorokat a neurális hálózatok építésére, amiről a következő fejezetben olvashatunk.

Neurális hálózatok

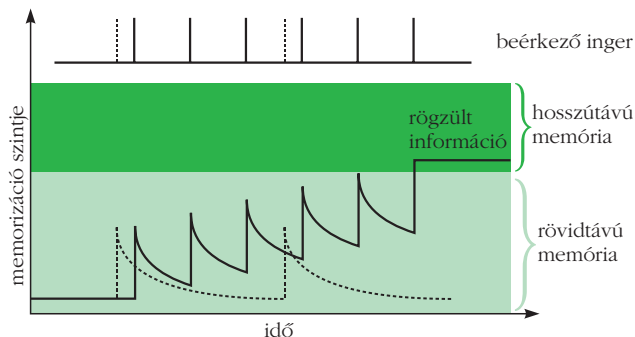
Az emberi idegrendszer legkisebb egysége a neuron, amit egy idegsejt és annak nyúlványai alkotnak. Feladata az ingerfelvétel és az ingerületvezetés. A két neuron közti kapcsolatot, és azt a térrészt, ahol



4. ábra. a) Feszültség-áram karakterisztikák egyre növekvő amplitúdóval. b) Az ellenállás-változás aránya a meghajtó háromszögjel frekvenciájának és amplitúdójának függvényében.

az információáramlás lezajlik, szinapszisnak nevezük. Az átáramló információt kémiai anyagok vagy elektromos jelek továbbíthatják, ettől függően beszélhetünk kémiai vagy elektromos szinapszisoról. Az előbbi körülbelül 20-30 nm, míg az utóbbi mérete 2-3 nm közötti. Ha egy szinapszis kémiai vagy elektromos vezetőképessége nagy, akkor az általa összekötött neuronok között erős kapcsolat van. Az emlősök központi idegrendszerét kémiai szinapszisok alkotják, elektromos szinapszis például a szív izmaira jellemző. A neurális hálók memrisztorokkal történő modellezése során a szinapszisok kémiai vagy elektromos vezetőképességét a memrisztorok elektromos vezetőképességével azonosítjuk. A külső ingert a memrisztorra kapcsolt feszültség, vagy a rajta átfolyó áram jelenti. Azért nagy jelentőségű, hogy a memrisztorok vezetőképessége analóg módon változik, mert a szinapszisok erőssége is folytonosan hangolható.

Az emberi agyat tekintve megkülönböztethetünk rövid- és hosszútávú memóriát. A rövidtávú emlékezés esetén a neuronok közti szinapszis vezetőképessége csak ideiglenesen erősödik meg, míg a második esetben hosszútávú a változás. Egy új információ érkezésekor, ha az inger erőssége nagy, az információ rögtön a hosszútávú memóriába kerül. Azonban, ha az inger nem elég erős, akkor a szinapszis vezetőképessége valamilyen függvény szerint lecsökken, és visszaáll kiindulási állapotába (5. ábra, szaggatott vonal). Abban az esetben, ha a vezetőképesség még nem csökkent le teljesen, és újabb inger éri a szinapszist, akkor az információ felerősödik. Így kicsi, de



5. ábra. Különböző ingerek hatására az emberi memóriában lezajló változás. Szaggatott vonal: ritkán ismételt ingerek között az információ elfelejtődik. Folytonos vonal: gyorsan ismételt ingerek hatására az információ rögzül.

ismétlődő ingerekkel is képesek vagyunk memorizálni valamit, ha a lecsengés elegendően hosszú időskálára terjed ki (5. ábra, folytonos vonal). A „lassú felejtés” szükséges feltétele annak, hogy a téves vagy felesleges információk eltűnjenek. Az agykutatók körében ismert, hogy a felejtés nem egy egyszerű exponenciális lecsengés, hanem a mérhető jel időben több nagyságrenden keresztül is megmarad.

Az általunk vizsgált Ag_2S memrisztor „gyorsan írható – lassan felejtő” memóriaként működik (3. ábra). Az ismétlődő pulzusok hatására bekövetkező tanulási folyamat miatt memrisztorokon alapuló mesterséges intelligencia alkalmas lehet nagy erőforrás-igényű számítástechnikai feladatok új elveken történő, gyors és hatékony elvégzésére (például a mintázatfelismerés). Agykutatási alkalmazási lehetőséget jelent a szinapszis által összekötött neuronok bonyolult kapcsolat

látat leíró úgynevezett plaszticitási függvény (spike timing dependent plasticity – STDP) tanulmányozása memrisztorokból készített hálózatok segítségével.

Összefoglalás

A fent bemutatott eredmények alapján elmondható, hogy az ezüst-szulfidban kialakuló fémes, néhány nanométer átmérőjű vezető szálak ellenállása folyamatosan változtatható nanoszekundum alatti időskálán. A kis méret és a memóriával analóg viselkedés lehetővé teszi, hogy gyors és kompakt memóriát építsünk ezüst-szulfidon alapuló cellák hálózatából. A különleges dinamikai tulajdonságok miatt az Ag_2S memrisztorok nemcsak számítógépes adattárolásra, de új típusú „felejtő” neurális hálózatok építésére is alkalmasak.

Irodalom

- A. Gubicza, D. Zs. Manrique, L. Pósa, C. J. Lambert, G. Mihály, M. Csontos, A. Halbritter: Asymmetry-induced resistive switching in $\text{Ag-Ag}_2\text{S-Ag}$ memristors enabling a simplified atomic-scale memory design. *Scientific Reports* 6 (2016) 30775.
- A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter, G. Mihály: Non-exponential resistive switching in Ag_2S memristors: a key to nanometer-scale non-volatile memory devices. *Nanoscale* 7 (2015) 439.
- A. Gubicza, M. Csontos, A. Halbritter, G. Mihály: Resistive switching in metallic Ag_2S memristors due to a local overheating induced phase transition. *Nanoscale* 7 (2015) 11248.
- A. Geresdi, M. Csontos, A. Gubicza, A. Halbritter, G. Mihály: Fast operation of nanometer-scale metallic memristors: highly transparent conductance channels in Ag_2S devices. *Nanoscale* 6 (2014) 2613.
- A. Geresdi, A. Halbritter, A. Gyenis, P. Makk, G. Mihály: From stochastic single atomic switch to nanoscale resistive memory device. *Nanoscale* 3 (2011) 1504.

NEUTRONCSILLAGOK EXTRÉM ANYAGÁNAK VIZSGÁLATA ÚJ TÉRELMÉLETI MÓDSZEREKKEL

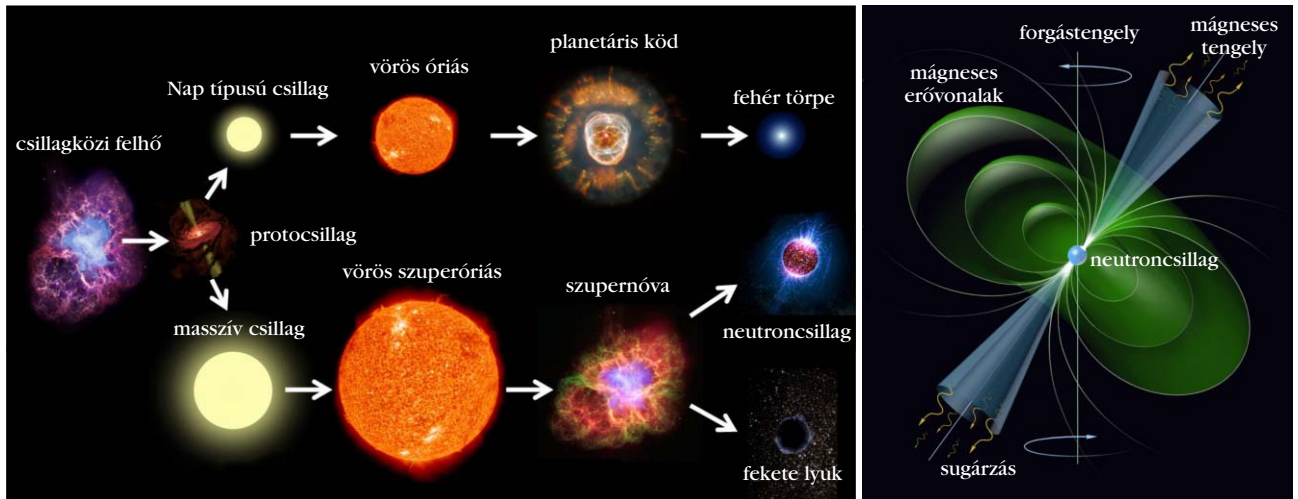
Pósfay Péter – MTA Wigner FK RMI, ELTE TTK
 Barnaföldi Gergely Gábor – MTA Wigner FK RMI
 Jakovác Antal – ELTE TTK Fizikai Intézet

Kompakt égi objektumoknak nevezzük a nagy tömegű csillagvégállapotokat, amelyek fehér törpék, neutron- vagy kvarkcsillagok, esetleg fekete lyukak [1]. Ezek mindegyikének elméleti leírása újabb és újabb fizikai és matematikai modelleket, megoldási technikákat kíván mind analitikus, mind numerikus oldalról. Ennek oka alapvetően abban keresendő, hogy két olyan fizikai modell együttes alkalmazása szükséges

A szerzők köszönetüket szeretnék kifejezni az NKFIH OTKA K120660, K104292, K104260 pályázatoknak, valamint az MTA NKM-81/2016 MTA-UA bilaterál mobilitási programnak. Barnaföldi Gergely Gábor és Pósfay Péter köszönettel tartozik a NewCompStar (MP1304) és THOR (CA15213) COST akciópályázatok nyújtotta támogatásért.

az elméleti leírások során, amelyek értelmezési tartományai nehezen összeegyeztethetők. E két modell a geometriai alapú, lokálisan a téridő szerkezetét meghatározó gravitációelmélet, valamint mikroszkopikus kvantumvilágot leíró kvantumtérelmélet. Míg előbbi nagy skálájú viselkedést modellez lokálisan, erősen görbült téridőben, az utóbbi a mikrovilág sík téridőbeli „globális” leírására épül. A statisztikus termodinamika beillesztése ebbe a kettős leírásba további nehézségeket teremt.

Kutatásunk célja a neutroncsillagok (1. ábra) belső szerkezetének modellezése, amely mindmáig nagy kihívást jelent: (i) hiszen földi körülmények között nem állítható elő e kompakt csillagbelső – a feltétele-



1. ábra. A neutronsillagok keletkezése és közeli kozmikus környezetük. A világítótorony-effektus [2].

zéseknek megfelelő – hideg, erősen kölcsönható anyaga; (ii) elméleti számolások esetén sem álltak rendelkezésre olyan egzakt módszerek, amelyekkel a barionos anyag ilyen állapota tárgyalható.

Jelen cikk egy, a szerzők által kifejlesztett eljárást mutat be egy egyszerűsített térelméleti modellen keresztül, amellyel nemcsak egzakt megoldás adható, de – azonos számolási keretben – különböző szintű közelítések is összehasonlíthatók. Az új eljárás a

Funkcionális Renormálási Csoport (FRG) módszerét használja nagy sűrűségű (véges kémiai potenciálú) valamint nulla hőmérsékletű közelítésben – ahol általánosan alkalmazható egzakt megoldási eljárás eddig nem létezett [3, 4].

Neutronsillagok: extrém sűrű maganyag hideg égi laboratóriumokban

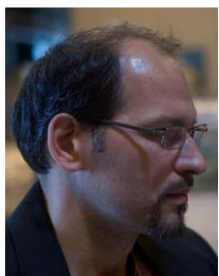
Napjaink leginkább kutatott kérdése, hogy a neutronsillagok vizsgálatával miként következtethetünk a maganyag tulajdonságaira? Erre jelenleg csak közvetett módszerek állnak rendelkezésünkre: az extrém sűrű maganyagra felteszünk egy fizikailag motivált anyagmodellt, és kiszámítjuk, hogy milyen tulajdonságokkal rendelkeznek azok a neutronsillagok, amelyeket a modellünk által leírt anyag alkot [5]. Az eredményt összehasonlítva megfigyelésekkel következtetéseket tudunk levonni modellünk alkalmazhatóságáról¹.

Számunkra legfontosabb mérhető fizikai (csillagászati) paraméterek a neutronsillag R sugara, M tömege, P forgási periódusa és dP/dt lassulása. A sugár meghatározása nagyon összetett feladat, mindemellett még nem állnak rendelkezésre kellően pontos mérési adatok ahhoz, hogy jelentősen megszorítsák az elméleti leírásokat.

Az utóbbi időben rengeteg erőfeszítést történt a sugár mérésének pontosítására, azonban a mérések indirekt módszerekkel történnek, így az eredmények modellfüggők. A közvetett eredményekből annyit biztosan tudhatunk, hogy a neutronsillagok sugara megközelítőleg 10 km [6, 7]. A tömeg mérésére nagyon kifinomult módszerek állnak rendelkezésre, ezt paramétert valóban nagy pontossággal ismerjük, köszönhetően a kettős neutronsillag-rendszerekben megfigyelhető speciális gravitációs effektusoknak [8]. A mai el-



Pósfay Péter 2014-ben szerzett fizikus diplomát az ELTE-n és azóta az ELTE fizika doktori tanulója, valamint a Wigner Fizikai Kutatóközpont elméleti osztályának munkatársa. Disszertációjának témája a térelméleti módszerek alkalmazása asztrofizikai jelenségek esetében.

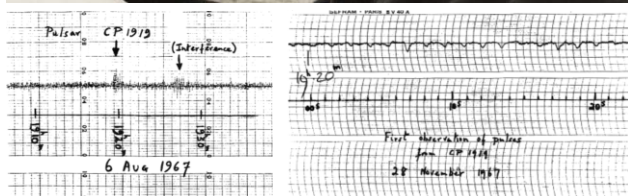


Barnaföldi Gergely Gábor, PhD, az MTA Wigner FK, Nehézionfizika Kutatócsoport és az Magyar ALICE Csoport vezetője. Kutatási témái: nagyenergiás nehézionfizika, kompakt csillagok vizsgálata, erősen kölcsönható anyag fázisszerkezete.



Jakovác Antal, PhD, egyetemi tanár az ELTE Atomfizikai Tanszékén. Kutatási témák: véges hőmérsékletű és nemegyensúlyi térelméletek, erősen kölcsönható anyag fázisszerkezete, egzakt renormálási csoport.

¹ A probléma látszólag invertálható, azonban a csatolt differenciálegyenlet komplexitása miatt mindmáig nem megoldott.



2. ábra. Jocelyn Bell Burnell és az első, 1967. augusztus 6-án mért pulzáradat-sor.

méletek számára az egyik legnagyobb kihívás, hogy egyre több nehéz, a Napunknál közel kétszer nagyobb tömegű neutroncsillagot detektálnak [9]. Figyelembe véve a 10 km-es sugarat, ezek rendkívül nagy sűrűségű objektumok. Ilyen sűrű anyag nem áll rendelkezésre a Földön, ezért laboratóriumban nem tudjuk közvetlenül megvizsgálni, így elméleti leírásuk várat magára.

Érdeemes megemlíteni, hogy a gravitációs hullámok felfedezésével egy új, független mérési módszer vált elérhetővé a neutroncsillagok szerkezetének vizsgálatára. Két egymás körül keringő neutroncsillag lassanként energiát veszít, egyre közelebb kerül egymáshoz, mígnem összeütköznek, és egy fekete lyukat vagy egy új neutroncsillagot alkotnak. Eközben nagy energiájú gravitációs hullámokat bocsátanak ki, amiket elemezve az őket alkotó anyag tulajdonságairól szerezhetünk információt, amelyet modelljeink tesztelésére és finomítására használhatunk fel. Neutroncsillag-kettősökből származó gravitációs hullámokat még nem detektáltak, de a várakozások szerint a fenti módszer hamarosan fontos szerephez jut majd, hiszen az egyes neutroncsillag-állapotegyenletek nagyon erőteljesen befolyásolják az összeolvadó kettősök által keltett gravitációs hullámok jeleit [10].

A neutroncsillagok (pulzárak) legegyszerűbben, közvetlenül megfigyelhető tulajdonsága a forgási periódus, annak ellenére, hogy egy-egy fordulat a másodperc tört része alatt lezajlik. Felfedezésük és megfigyelésük egyik kulcsa a kozmikus világitótorony-effektus (1. ábra), amely háttérben a mágneses és forgási tengelyek közötti eltérés áll [1]. Idén ünnepeljük az ezen jelenség alapján felfedezett pulzárak felfedezésének 50. évfordulóját (2. ábra) [11]. Jelenleg mintegy 2000 pulzár forgási periódusa áll rendelkezésünkre, amelyek – feltételezésünk szerint – neutron- vagy kvarkcsillagok. Jeleiket széles elektromágneses tartományban mérhetjük, leggyakrabban rádió-, röntgen- vagy gamma-teleszkópokkal.

A kompakt csillagok (mikroszkopikus) belső szerkezte azonban közvetlen módszerekkel nem mérhe-

tő. Éppen ezért érdekes, hogy a fenti makroszkopikus mennyiségek megfigyelésével és csillagászati adataikat elemezve, majd összehasonlítva az elméleti magfizikából számolt állapotegyenletekkel, közvetett módon jellemezhető a hideg, nagy sűrűségű, erősen kölcsönható anyag mikroszkopikus szerkezete is.

Az erősen kölcsönható anyag vizsgálata neutroncsillagokban

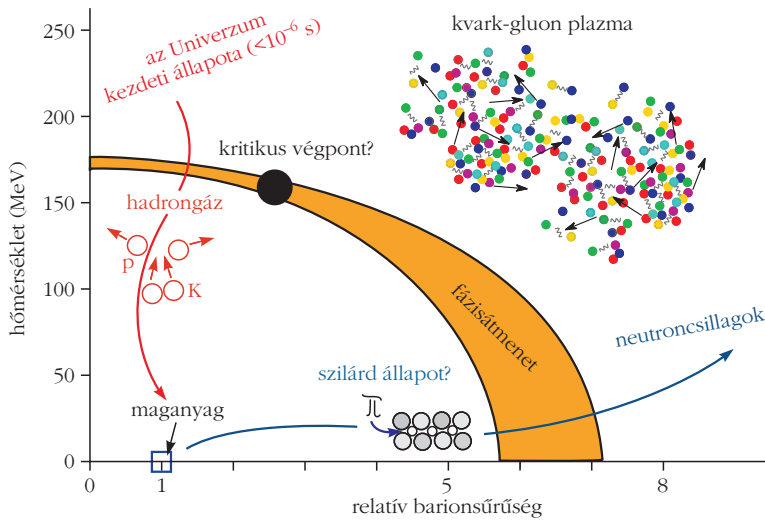
Minden anyagnak saját, rá jellemző fázisszerkezete van. A legközismertebbek például a víz különböző fázisai, halmazállapotai: a légköri nyomáson a víz 100 °C felett gőz halmazállapotú, 0 °C alatt szilárd jég, a kettő között pedig folyékony. Ezeket a fázisokat fázisátmenetek (halmazállapot-változások) választják el egymástól, a különböző fázisokban a víz fizikai tulajdonságai jelentősen eltérnek.

Jelent tudásunk szerint az Univerzum anyaga – fejlődése során – több fázisátmeneten ment keresztül. Történetének kezdetén, az Ősrobbanás első mikromásodperceiben nagyon sűrű, forró, ideálshoz közeli folyadékállapotban volt az anyag. Tágulásának következtében hűlt és a sűrűsége egyre csökkent, míg el nem érte a ma tapasztalható, alapvetően hideg és kis sűrűségű állapotát – ahol a térelméleti modellekkel jól tárgyalható a hadronikus, barionos anyag. A fejlődés korai szakaszában a hőmérséklet olyan magas volt, hogy az atommagot alkotó hadronok belsejéből kiszabadult kvarkok úgynevezett kvark-gluon plazmaállapotot (QGP) hoztak létre. Ezt kell vizsgálnunk, ha mélyebb betekintést szeretnénk nyerni az Univerzum fejlődésének történetébe.

A kvarkok és gluonok között ható erős kölcsönhatást leíró fizikai elmélet a kvantum-színdinamika (QCD), amelyet a forró anyag leírásához véges hőmérsékleten kell alkalmaznunk, azaz a kvantummechanikai effektusok mellett figyelembe kell vennünk a termodinamikát is. Ezen vizsgálatokban központi szerepet játszik az erősen kölcsönható anyag fázisszerkezetének vizsgálata, azaz a hadronikus és partonikus állapotok közötti átmenet folyamatának megértése.

Az erősen kölcsönható anyag esetében hasonlóan kell eljárunk: több fázist feltételezünk, például maganyag, kvark-gluon plazma, színes szupravezető fázis stb. és tudni szeretnénk, hogy ezek milyen körülmények között valósulnak meg és hogy milyen típusú fázisátmenetek választják el őket egymástól. A QCD fázisdiagramot hagyományosan két paraméter – a hőmérséklet és a sűrűség – által kifeszített síkon szokták ábrázolni (3. ábra).

Az erősen kölcsönható anyag fázisdiagramjának egyes részeit más és más kísérleti módszerekkel vizsgálják. A magas hőmérsékletű és kis sűrűségű tartomány kísérletileg részecskegyorsítók segítségével térképezhető fel, amelyek protonok és nehéz atommagok egymással való ütköztetése során érik el az Univerzum korai állapotát jellemző fizikai körülményeket. A fázisdiagram nagy sűrűségekhez és kis hőmérséklet-



3. ábra. Az erősen kölcsönható anyag feltételezett fázisszerkezete.

hez tartozó tartománya azonban földi körülmények között nem vizsgálható. A maganyag ilyen extrém állapota pulzárók, neutroncsillagok és a nagyon erős mágneses terű magnetárok belsejében fordulhat elő, ezért ezeket az égi objektumokat vizsgálva nyerhetünk információt a hideg kvark/hadron anyagról is.

Kvantumfluktuációk térelméletekben, renormálás

Az anyag mikroszkopikus leírása a kvantumelméleteken alapszik. A részecskefizika szokásos leírásának matematikai alapja a kvantumtérelmélet, amely egyszerre foglalja magában a részecskék kvantummechanikai természetét és a kölcsönhatások fizikai mezőkkel történő leírását. Például az elektromágnesesség esetében a töltések forrásai az elektronok és a protonok – kvantummechanikai részecskék –, az elektromágneses tér pedig fizikai mező. Az elektromosság ezen tulajdonságait figyelembe vevő térelmélet a kvantum-elektrodinamika (QED).

Célunk olyan effektív térelméletek megalkotása, amelyek a neutroncsillagokban előforduló nagy sűrűségek és kis hőmérsékletek esetén jól használhatók az erősen kölcsönható anyag leírására. Elméletünk effektív, ugyanis nem arra törekszünk, hogy valamilyen alapvető fizikai elméletből vezessük le a modelünket (amely jelen esetben a QCD), hanem egy egyszerűbb és emiatt hatékonyabban alkalmazható elméletet találunk ki, ami nagy sűrűségek esetén hűen visszaadja a QCD legfontosabb tulajdonságait. Munkánk eredményességét az elmélet neutroncsillagokra vonatkozó következményei és a megfigyelések összehasonlításából tudhatjuk meg. Nagy sűrűségek esetén a kvantum-szindinamikát egyelőre nem tudjuk megoldani, így egy jól működő effektív elmélet új nézőpontból világíthatja meg a kvarkok és gluonok elméletének ilyen extrém körülmények közötti viselkedését, és talán közelebb visz minket egy pontosabb megoldáshoz.

Az effektív elméletek finomításának szempontjából fontos lépés – a kölcsönhatások mező jellege mellett – a részecskék kvantumviselkedésének figyelembevétele. E mikroszkopikus effektusok hatását a kvantumtérelméletek nyelvén fluktuációknak hívják. Szemléletesen: a Heisenberg-féle határozatlansági reláció alapján egy részecske helyét és impulzusát nem ismerhetjük teljesen pontosan, a mennyiségek között a következő összefüggés áll fenn:

$$\Delta x \Delta p \leq \frac{\hbar}{4\pi}. \quad (1)$$

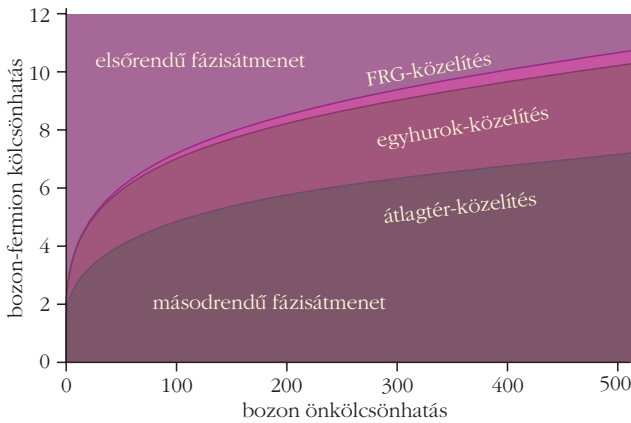
Hasonló összefüggés áll fenn a részecske energiája és az idő (életideje) között is:

$$\Delta t \Delta E \leq \frac{\hbar}{4\pi}. \quad (2)$$

Az (1) és (2) formulák szemléletes jelentése, hogy minél kisebb tér- és időintervallumban szeretnénk megfigyelni a részecske viselkedését, annál nagyobb bizonytalanságot (fluktuációt) tapasztalunk impulzusában és energiájában.

A mikroszkopikus részecskék a kvantumtérelmélet által megengedett kölcsönhatásokban vesznek részt. A kvantumfluktuációk hatását figyelembe vevő eljárást *renormálásnak* hívják, amely nevét onnan kapta, hogy fluktuációk hatására a fizikai mennyiségek értékei megváltoznak, *renormálódnak*. Ennek szemléltetésére képzeljük el, a következő hétköznapi helyzetet: éjszaka a lámpa köré rovarok gyűlnek és ezzel leárnyékolják a lámpa fényét. Ha valaki messziről nézi a lámpát és nem tud a rovarokról, akkor azt hiheti, hogy a lámpa eredeti fénye a rovarok által árnyékolva, halványabb fényerejű. Ezt a tévedést nem veszi észre egészen addig, amíg egy másik lámpát be nem kapcsolunk, ugyanis ekkor a rovarok ahhoz is szeretnének közel repülni, így az eredeti lámpa mellett kevesebb marad. A távoli megfigyelő számára az eredeti lámpa egyszer csak fényesebb lesz, pusztán attól, hogy egy másikat felkapcsoltunk! Ebben a példában a fluktuációknak a rovarok fényhez való vonzódása felel meg, és az emiatt megváltozott fizikai mennyiség pedig a lámpa fényessége.

A módszer, amivel effektív elméletünkben figyelembe vesszük a kvantumfluktuációk hatását, a *Funkcionális Renormálási Csoport* eljárás (röviden FRG). E módszer előnye, hogy nem perturbatív, azaz alkalmazhatósága nem függ a leírandó kölcsönhatás erősségétől. Esetünkben, amikor a nagy sűrűségek és erős kölcsönhatások tartományában mozgunk, ez különösen hasznos. Az FRG a kvantumeffektusokat egy skála segítségével veszi figyelembe, amely a nagy energiákat és az általunk megfigyelt energiatartományt köti össze. A skála folytonos átmenetet biztosít a mikroszkopikus világ (elemi részecskék és kölcsönhatások) és a makroszkopikus (számunkra megfigyelhető) folyamatok közt, miközben figyelembe veszi a részecskék kvantumviselkedéséből adódó hatásokat, azaz



4. ábra. A fázisátmenetek típusa a kölcsönható fermiongáz esetén. Vízszintes tengelyen a bozon önkölcsönhatásának erőssége, a függőleges tengelyen pedig a bozon-fermion kölcsönhatás erőssége – dimenziótlanított csatolási egységekben – szerepel.

a kvantumfluktuációkat. A módszer így betekintést nyújt abba, miként hozzák létre az anyagot alkotó részecskék azokat a fázisokat (halmazállapotokat), amelyeket meg tudunk figyelni, sőt a fázisátalakulások során tanulmányozhatjuk a mikroszkopikus folyamatok szerepét.

Kvantumfluktuációk hatása a fázisdiagramra

A kvantumfluktuációk figyelembevételére tett első lépésünk egy olyan modell vizsgálata volt, amely a későbbi finomításhoz tartalmazza a legfontosabb összetevőket, de még elég egyszerű ahhoz, hogy láthassuk, a kvantumos fluktuációknak köszönhetően milyen effektust kapunk [4]. A legegyszerűbb kölcsönható Fermi-gáz-modellt vizsgáltuk, amely kétféle részecskét tartalmaz: egy fermiont és egy bozont. A fermionok felelnek meg a nukleonoknak, kölcsönhatásuk a bozonokkal az erős kölcsönhatást modellezi. Ebben a képből a bozonok még önmagukkal is képesek kölcsönhatni, amit teljesen kvantumosan szeretnénk figyelembe venni, azaz a bozonok önkölcsönhatásából fakadó kvantumfluktuációk hatását vizsgáljuk a fizikai mennyiségekre.

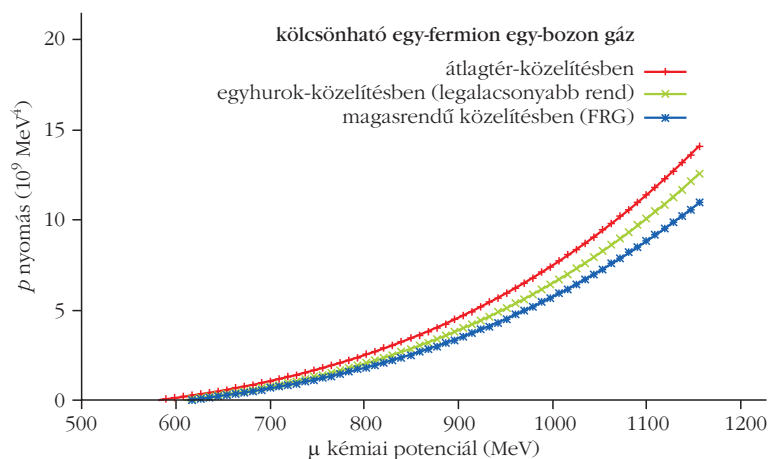
Az FRG-számolás végrehajtására saját technikát használunk, amely jelentősen lecsökkenti az aritmetikai számolások bonyolultságát. A probléma fő nehézségét a fermionok természete adja: a fermionok a Fermi-Dirac-eloszlásnak megfelelően viselkednek, amely alacsony hőmérsékleten azt jelenti, hogy egy adott energiaszint felett egyáltalán nem található meg a rendszerben, viszont alatta minden energiaszintet betöltenek. Energia szerinti eloszlásuk emiatt egy gyorsan változó, úgynevezett lépcsőfüggvény, amelynek deriváltjai határesetben olyan nagyok, hogy külön matematikai formalizmust (disztribúciók) igényelnek. Az aritmetikai megoldás emiatt egyre összetettebb lesz, különösen,

ha egyre jobb közelítést szeretnénk elérni. A fentebb említett FRG-módszer ehelyett úgy közelít a megoldáshoz, hogy két külön egyenlettel dolgozik: egyfelől abban az esetben, amikor a fermionok egyáltalán nincsenek jelen az adott energián, egy másikkal pedig akkor, amikor vannak és járuléku végese. A nehézség abban rejlik, hogy a határokon megfelelő módon egyeztetni kell a két egyenletet. Ebben az egyszerűsített modellben elvégezve a számolást a 4. ábrán látható fázisdiagramot kapjuk.

A 4. ábra vízszintes tengelyén a bozon önkölcsönhatásának erőssége, a függőleges tengely pedig a bozon és fermion kölcsönhatásának erőssége – dimenziótlanított csatolási egységekben – található. A modellben két fázis van, amelyek abban különböznek, hogy mekkora a fermion tömege. Az elsőben a fermion tömege nulla, a másikkban pedig a nukleon tömegével egyezik meg. Ennek a fázishatárát különböző közelítésekben jelölik a fázisdiagramon felvett görbék. A tömeget a fermionok bozonnal való kölcsönhatása határozza meg: ha a bozonikus mező felvesz egy – az önkölcsönhatása által meghatározott – adott értéket, akkor a fermion tömeges részecskévé válik. A folyamat részleteit az FRG-módszer írja le úgy, hogy az FRG-skála nagyenergiás részén a bozonikus mező értéke nulla, így a fermion tömege is nulla. Ahogy csökkentjük a skálát, a kvantumfluktuációk együttes hatása megváltoztatja a bozonikus mező nagyságát, aminek végeredménye az, hogy a fermion a bozon-fermion kölcsönhatáson keresztül tömeget kap. Az erős kölcsönhatást leíró kvantum-szindinamikában a fermionok – ehhez hasonló módon – a királis fázisátmenetnek köszönhetően kapnak tömeget, így egyszerű modellünk ennek effektív leírása.

Mi elsősorban a 4. ábra fázisdiagramján szemléltetett két fázis közötti átmenet jellegét szeretnénk vizsgálni, mert ezek között kísérletileg lehet különbséget tenni, így fontos paraméternek számítanak. Megvizsgáltuk, hogy különböző közelítések esetén milyen típusú fázisátmenet látható a rendszerben:

5. ábra. A kölcsönható egy-fermion egy-bozon gáz modell állapotegyenlete különböző közelítésekben számolva átlagtér, egyhuruk és az egzakt FRG esetben számolva.



- az átlagtér-közelítés annak felel meg, amikor a kvantumfluktuációk hatását elhanyagoljuk,
- az FRG-számolás során a bozon önkölcsönhatásából származó fluktuációkat teljesen figyelembe vettük,
- az egyhurok-közelítés a két szélsőség között helyezkedik el: itt a fluktuációkat csak a legalacsonyabb, vezető rendű közelítésben számoljuk.

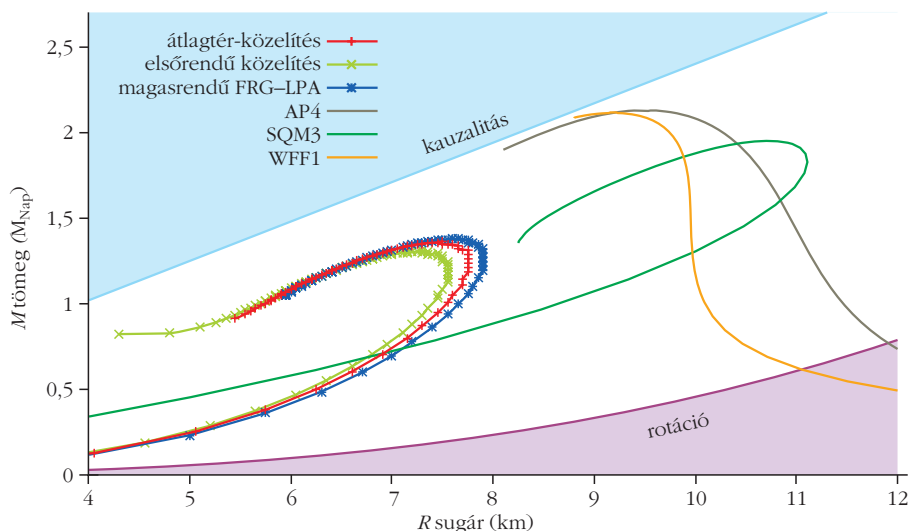
Megfigyelhetjük, hogy a közelítés jelentősen befolyásolja fázisátmenet típusát: adott erősségű kölcsönhatások mellett – a kvantumfluktuációkat is figyelembe véve –, átlagtér-közelítés esetén az elsőrendű fázisátalakulás másodrendű lesz. Az is látható, hogy az FRG- és az egyhurok-közelítés nagyon közeli eredményt ad, és mindkettő jelentősen eltér az átlagtér-közelítéstől, amiben nem szerepelnek kvantumfluktuációk. A 4. ábra egyik fő üzenete, hogy a kvantumfluktuációk alapszintű figyelembe vétele is jelentősen csökkenti az elhanyagolásukkal okozott eltérést.

Megvizsgálhatjuk, hogy ezen számítási eljárások mennyiben befolyásolják a hideg, kétkomponensű (egy-fermion, egy-bozon) anyag állapotegyenletét (5. ábra). Nagy kémiai potenciál-értékek esetében mintegy 5%-os eltérés mutatkozik az egyes közelítések között. A kémiai potenciál a sűrűséggel áll kapcsolatban, hiszen a nyomás kémiai potenciál szerint vett deriváltja a sűrűség:

$$n = \frac{dP}{d\mu}. \quad (3)$$

Ez a derivált az 5. ábrán látható görbék meredekségét jelenti, azaz minél gyorsabban nő egy görbe, annál nagyobb sűrűségek tartoznak hozzá. A három görbe kis kémiai potenciálok esetén közel halad egymáshoz, majd a kémiai potenciál növekedésével különbségük is nő, azaz változási sebességük (meredekségük, deriváltjuk) a kémiai potenciál növekedésével egyre jobban eltér. A kvantumfluktuációk figyelembe vétele tehát az anyag sűrűségét is megváltoztatja. Ez a

6. ábra. Kompakt csillagok $M(R)$ tömeg-sugár diagramja a kölcsönható egy-fermion egy-bozon gáz modell állapotegyenletével számolva különböző közelítésekben. Összehasonlítás céljából felrajzoltuk más modellek eredményeit is [7, 12–14].



neutroncsillagok esetében – ahol az anyag sűrűsége határozza meg a gravitációs energiát, és ezen keresztül a neutroncsillag méretét és tömegét – különösen fontos. Felmerül a kérdés, a kvantumfluktuációknak mekkora hatása lehet a kompakt csillagok megfigyelhető makroszkopikus tulajdonságaira?

Kvantumfluktuációk hatása a kompakt csillagokra

Fentiekben meghatároztuk, hogy a kvantumfluktuációk figyelembevétele, azaz a különböző közelítésben végzett számolások mennyiben változtatták meg az állapotegyenletet és a fázisdiagram szerkezetét. A fenti három esetre – ugyanazon modellben végigszámolva – meghatározhatók a kompakt csillagmodellekbe építhető állapotegyenletek. Cikkünk fő kérdését – miszerint látható-e ennek hatása a kompakt csillagok megfigyelhető mennyiségeiben – megválaszolandó, a Tolman–Oppenheimer–Volkov-egyenletet alkalmazva, a fentebb említett három közelítésben kapott állapotegyenleteket felhasználva, kiszámítottuk a lehetséges kompaktcsillag-konfigurációk $M(R)$ csillagtömeg-csillagsugár összefüggését.

A 6. ábrán látható, hogy a három fenti közelítésben számolt állapotegyenlet milyen $M(R)$ görbékre vezet. A görbék menetéből kitűnik, hogy nagy sűrűségeknél már mutatkozik eltérés az állapotegyenletek számítási közelítésében. Ez akár 3% eltérést is eredményezhet a lehetséges kompakt csillagállapotok tömegében és sugarában. Ábránkon összevetésként felrajzoltuk más szerzők által használt realiztikus állapotegyenleteket is [7, 12–14]. Tekintve, hogy egyszerű modellünk nagyságrendileg azonos tartományban van ezekkel az állapotegyenletekkel, sejthető, hogy összetett, realiztikusabb modellekben hasonló nagyságú effektust figyelhetünk majd meg. Ennek bizonyítása jelenleg is folyó kutatásunk célja, mindamelllett, hogy

modellünk a kísérleti mérésekből ismert tömeg- és sugárértékekkel is összhangban legyen.

Konklúziók

Egyszerűsített Yukawa-jellegű csatolást alkalmazó, egy-fermion egy-bozon modellünk alapján azt várjuk, hogy a kvantumfluktuációk szerepe – akár 5%-os effektusként – más effektív elméletek esetében is érezhető. Az itt alkalmazott technikát felhasználva a fluktuációk szerepét bonyolultabb esetekben is figyelembe vehetjük. Sőt, nem csak a nagyenergiás fizikában, a maganyag leírására használhatjuk, hanem

bármilyen kölcsönható Fermi-gázzal modellezhető rendszer esetében. Ez az első lépés volt a kvantumfluktuációk hatásának vizsgálatára a hideg sűrű anyag esetében, és az eredmények alapján a következő lépés a módszer alkalmazása lesz realiztikusabb modellekben.

Irodalom

1. Karsai Sz., Barnaföldi G. G., Forgácsné Dajka E., Pósfay P.: Neutroncsillagok – a világegyetem legnagyobb atommagjai. *Nukleon VIII* (2015) 185.
2. http://astro.elte.hu/icsip/csill_elete/csillagok_elete/index.html
<https://apatruno.wordpress.com/neutron-stars/>
http://www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/archive/EducationResource/Universe/framed_e/lecture/ch16/ch16.html
3. P. Pósfay, G. G. Barnaföldi, A. Jakovác: FRG Approach to Nuclear Matter at Extreme Conditions. *PoS EPS-HEP2015* (2015) 369.
4. G. G. Barnaföldi, A. Jakovác, P. Pósfay: Harmonic expansion of the effective potential in a functional renormalization group at finite chemical potential. *Phys. Rev. D* 95/2 (2017) 025004.
5. V. Graber, N. Andersson, M. Hogg: Neutron stars in the laboratory. *Int. J. of Modern Physics D* 26/8 (2017) 1730015.
6. S. Guillot, M. Servillat, N. A. Webb, R. E. Rutledge: Measurement of the Radius of Neutron Stars with High Signal-to-noise Quiescent Low-mass X-Ray Binaries in Globular Clusters. *The Astrophysical Journal*, 772/1 (2013) 7.
7. F. Özel, D. Psaltis, T. Guver, G. Baym, C. Heinke, S. Guillot: The Dense Matter Equation of State from Neutron Star Radius and Mass Measurements. *Astrophys. J.* 820/1 (2016) 28.
8. F. Özel, P. Freire: Masses, Radii, and Equation of State of Neutron Stars. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 54 (2016) 401–440.
9. P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts, J. W. T. Hessels: A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay. *Nature* 467 (28 October 2010) 1081–1083.
10. L. Rezzolla, K. Takami: Gravitational-wave signal from binary neutron stars: a systematic analysis of the spectral properties. *Phys. Rev. D* 93/12 (2016) 124051.
11. A. Hewish: *Pulsars. Ann. Rev. of Astron. and Astrophysics* 8 (1970) 265.
12. M. Prakash, J. R. Cooke, J. M. Lattimer: Quark-hadron phase transition in protoneutron stars. *Phys. Rev. D* 52 (1995) 661.
13. R. B. Wiringa, V. Fiks, A. Fabrocini: Equation of state for dense nucleon matter. *Phys. Rev. C* 38 (1988) 1010.
14. A. Akmal, V. R. Pandharipande: Equation of state of nucleon matter and neutron star structure. *Phys. Rev. C* 58 (1998) 1804.

BALESETÁLLÓ ATOMERŐMŰVI FŰTŐELEMENEK FEJLESZTÉSE

Hózer Zoltán

MTA EK Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium

A világon napjainkban működő több mint négyszáz atomerőmű többsége urán-dioxid-tablettákat tartalmazó, cirkóniumburkolattal ellátott fűtőelemekkel üzemel. Ez az üzemanyag nagyon jól használható az erőművek normál üzemelése során, amit több mint ezer reaktorév tapasztalata is bizonyít. Az urán-dioxid-üzemanyagban a besugárzás során végbemenő változások nem akadályozzák meg, hogy egészen magas kiégéseket lehessen elérni. A jó korrózióállósággal, mechanikai szilárdsággal és sugárállósággal rendelkező cirkóniumburkolattal pedig több évig lehet üzemelni úgy, hogy közben a fűtőelem ne veszítse el integritását, és utána a kiégett üzemanyag még a több évtizedes átmeneti tárolás és a végleges elhelyezés során fellépő terheléseket is képes elviselni.

Üzemzavarok és balesetek során a felhevült fűtőelemekben számos kedvezőtlen folyamat léphet fel. A cirkóniumötvözet magas hőmérsékleten intenzív reakcióba lép a vízgőzzel. Az exoterm reakcióban hidro-

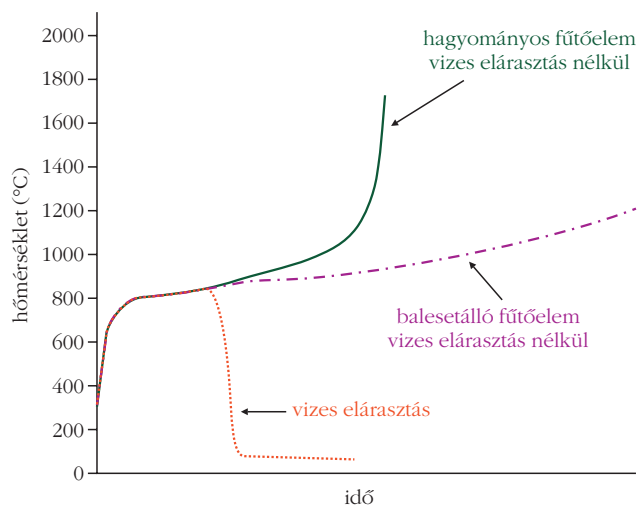
gén keletkezik, az oxidált fém pedig elridegedik és mechanikai terhelés hatására eltörhet. A szerény hővezető-képességgel rendelkező urán-dioxid középponti hőmérséklete normál üzemelés során is meghaladja az 1000 °C-ot, de baleseti körülmények között még ennél is magasabbra emelkedhet. Ha ez nem is éri el a baleset során az UO₂ olvadáspontját (2800 °C), a hőmérséklet növekedésével a hasadási termékek kikerülése a tablettából fokozódik, ami potenciálisan növeli a környezeti kibocsátást.

Az atomerőművek biztonsági rendszerei megakadályozzák azt, hogy tervezési üzemzavarok során a fűtőelemek épsége olyan mértékben sérüljön, aminek komoly környezeti hatása lenne. A kis valószínűségű, súlyos balesetek során bekövetkezhet a fűtőelemek jelentős mértékű sérülése és akár a zóna megolvadása is. Ekkor a környezeti kibocsátást az erőmű további védelmi gátjai (elsősorban a konténment) hivatott garantálni. A régebben tervezett atomerőművek egy részét nem látták el a súlyos balesetek kezeléséhez szükséges rendszerekkel, sajnos ezek közé tartoztak a fukusimai balesetben sérült blokkok is.

A 2011. évi balesetben a fukusimai reaktorok túléltek a földrengést és a cunamit. A dízelgenerátorok elvesztése és a külső áramforrás hiánya miatt azonban a vészhűtőrendszerek szivattyúi nem tudták biztosítani a maradványhő elvezetését. A burkolat forró felületén beindult a cirkónium vízgőzös oxidációja, és a kémiai reakcióban reaktoronként több száz kg hidrogén keletkezhetett. A néhány nappal később bekövetkezett hidrogénrobbanások három blokkon



Hózer Zoltán az MTA doktora, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratóriumának vezetője. Több mint két évtizede foglalkozik fűtőelemes kutatásokkal. Vezetésével több kísérleti programot hajtottak végre a paksi atomerőműben használatos cirkóniumburkolatok normál üzemi és üzemzavari viselkedésének jobb megismerésére.



1. ábra. Hagyományos és balesetálló fűtőelemek jellemző hőmérséklete baleseti folyamatok során vizes elárasztással és elárasztás nélkül.

az épületek sérüléséhez vezettek, és ez lehetővé tette, hogy nagy mennyiségű radioaktív izotóp jusson ki a környezetbe.

A baleset után szakértői fórumokon [1, 2] felmerült, hogy az atomerőművekben olyan fűtőelemekre lenne szükség, amelyek sokkal jobban elviselik a baleseti körülményeket, mint a cirkóniumburkolatos urándioxid-üzemanyag.

Elvárások a balesetálló üzemanyaggal szemben

Amerikai szakemberek szerint a balesetálló üzemanyag – azon túl, hogy biztonságosan használható normál üzemelés során – az alábbi négy követelménynek kellene, hogy megfeleljen [3]:

a) El kell kerülni vagy minimálisra kell csökkenteni azokat a kémiai reakciókat, amelyek a zóna fokozott felmelegedéséhez vezethetnek. A burkolat-vízgőz reakció kevésbé intenzív és kevésbé exoterm legyen, mint a jelenlegi cirkóniumburkolat esetében. Így elkerülhető a gyors hőmérséklet-megszaladás a zónában és a hűtés nélkül maradt fűtőelemek felmelegedését csak a maradványhő befolyásolja (1. ábra).

b) A baleseti helyzetekben keletkező hidrogén mennyiségét minimalizálni kell a burkolat-vízgőz reakció intenzitásának csökkentésével és a keletkező hidrogén megkötésével, kémiai átalakításával.

c) A burkolat magas hőmérsékletű mechanikai tulajdonságait javítani kell a zóna hűthetőségének biztosítására és a hasadási termékek fűtőelemen belüli visszatartására. A burkolat felhasadása csak az eddigieknél magasabb feszültségeken történjen meg, legyen magasabb a burkolat olvadáspontja, jobban álljon ellen a hideg víz beáramlásakor fellépő termikus és mechanikai terhelésnek és hidrogén jelenlétében ne ridegedjen el.

d) Javítani kell az üzemanyag-tabletta hasadási termék-visszatartó képességét, csökkenteni kell a tablettá baleseti fragmentációját és szétszóródását. El kell

kerülni a burkolat belső felületének oxidációját. Az üzemanyag alacsonyabb hőmérsékletet érjen el normál üzemelés alatt és balesetek során nagyobb tartálékkal rendelkezzen az olvadáspontig.

2011-ben, nem sokkal a fukusimai baleset után az USA Energiaügyi Hivatala (*Department of Energy*) egy fejlesztési programot (*Enhanced Accident Tolerant Fuel Development Program*) indított el azzal a céllal, hogy húsz éven belül balesetálló üzemanyagra lehessen cserélni a mai atomerőművi fűtőelemeket. A program keretében 2022-ig el akarják készíteni az erőművi besugárzásra alkalmas első tesztkazettákat. Az amerikai kezdeményezéssel párhuzamosan több más országban is intenzív kutatási programok kezdődtek a balesetálló fűtőelemek kifejlesztésére [4–6].

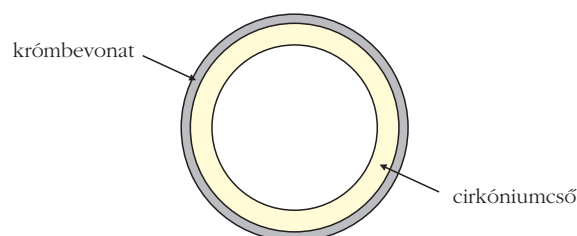
Balesetálló burkolatok

A balesetálló fűtőelemek burkolatának kifejlesztésékor több szóba jöhető konstrukcióval is számolnak.

Az egyik lehetőség a cirkóniumburkolat bevonása olyan anyagokkal, amelyek megakadályozzák az intenzív cirkónium-vízgőz reakciót magas hőmérsékleteken. Így a burkolat sokkal kevésbé oxidálódik, kevesebb hidrogén fejlődik és a burkolat szerkezetében sem jönnek létre olyan anyagszerkezeti változások, amelyek az elridegedéshez vezetnek. Az egyik lehetőség a krómbevonat alkalmazása, amelyet jó korrózióállóság jellemez és a gyártástechnológia is viszonylag egyszerű (2. ábra). A balesetálló VVER fűtőelemek fejlesztéséhez cseh szakemberek 5–20 μm vastag Cr és CrN bevonatokkal ellátott cirkóniumcsövek vizsgálatát kezdték meg [7]. A Zr-Al-C komponensekből álló bevonat neutronfizikai szempontból nagyon ígéretes, mivel mind a három elem kis neutronbefogási hatáskeresztmetszettel rendelkezik. A ZrO_2 és Al_2O_3 rétegek vízben és gőzben egyaránt védőréteget képeznek a felületen. Vizsgálják a háromkomponensű (úgynevezett MAX kerámiák), mint például a Zr_2AlC és Zr_3AlC_2 alkalmazásának a lehetőségét is. Egy további ötlet oxidokkal (például Y_2O_3) megerősített (*ODS – oxide dispersion strengthened*) cirkóniumréteg létrehozása a burkolaton, ami jelentősen növeli a burkolat szakítószilárdságát és csökkenti a magas hőmérsékletű képlékenységet.

Rozsdamentes acélok használatával már az első atomerőművek tervezésekor is számoltak és most, a balesetálló burkolatok fejlesztése során – mint lehetséges megoldás – újra felmerültek. Például a FeCrAl

2. ábra. Krómbevonatos cirkóniumburkolat.



ötvezetek rendkívül jó korrózióállósággal rendelkeznek vizes közegben és vízgőzben is nagyságrendekkel lassabban oxidálódnak, mint a cirkónium. Mechanikai tulajdonságaik is jobbak, mint a cirkóniumé. Olvadáspontjuk alacsonyabb, mint a cirkóniumé, de baleseti körülmények között megolvadásuk mégis később várható, mivel a csekély oxidációs hő miatt nem lép fel hőmérséklet-megszaladás. Ugyanakkor üzemeltetési szempontból kellemetlen, hogy a nagy neutronbefogási hatáskeresztmetszet miatt az acélburkolatos fűtőelemnek több hasadóanyagot kell tartalmaznia.

A fémburkolatok helyett elképzelhető kerámiából készült burkolatok használata is. Legperspektivikusabb anyagnak a nagy keménységű, jó hővezetéssel rendelkező SiC tűnik. Baleseti körülmények között 1700 °C hőmérsékletig csak egészen kis mértékben oxidálódik, és épségét akár 2500 °C-ig képes megtartani. A kerámiaacso azonban nagyon rideg, ezért az erőművi alkalmazásokhoz monolit csövek helyett inkább többrétegű, szálmegerősítésű szerkezeteket fejlesztenek. A SiC burkolattal kapcsolatban számos gyártástechnológiai kérdés is felmerül, például a burkolatcsövek lezárásához szükséges speciális hegesztési eljárás kidolgozása és a hermetikusan záró rétegek létrehozása a többrétegű szerkezetben. A SiC burkolattal – annak előnyös tulajdonságai miatt – a gázhűtésű reaktorok újabb generációjának terveiben és számolnak. A vízű reaktorokban egyelőre vizsgálatok tárgyát képezi, hogy milyen vízkémiai körülményeket kell ahhoz kialakítani, hogy a SiC vizes korróziója minél kisebb mértékű legyen. A korróziós folyamat eredményeként ugyanis a burkolat felületén nem képződik oxidréteg, hanem a korróziós termékek oldódnak a vízben, és így a burkolat vastagsága időben csökken.

Üzemanyag-tabletták a balesetálló fűtőelemekhez

Az urán-dioxidot és a plutóniumot is tartalmazó, de ugyancsak oxidalapú MOX tabletták mellett az atomreaktorokban már korábban is teszteltek nitrid és karbid tablettákat is. Ezek az anyagok sokkal jobb hővezető-képességgel rendelkeznek, mint az oxidok – így hőmérsékletük sokkal alacsonyabb mind normál üzemi, mind baleseti körülmények között. Magas olvadáspontjuk (2480 °C a karbid és 2780 °C a nitrid) következtében baleseti helyzetekben komoly tartalékkal rendelkeznek. Gyártásuk azonban nem egyszerű: mindkét anyag gyúlékony, ezért a tabletták előállításához olyan gépsorok szükségesek, amelyek inert atmoszférában üzemelnek. Az utóbbi években az U_3Si_2 tabletták vizsgálata is megkezdődött a balesetálló üzemanyagok fejlesztéséhez. A szilicid is jó hővezető, nem gyúlékony, viszont olvadáspontja (1665 °C) sokkal alacsonyabb, ezért egy baleset során gyorsabban bekövetkezhet a zónaolvadás. A Westinghouse fűtőelemgyártó balesetálló fűtőelemes terveiben is

U_3Si_2 tabletták jelennek meg. A karbid, nitrid és szilicid tabletták további előnye, hogy fajlagos hasadóanyag-tartalmuk magasabb, mint az oxid üzemanyagé. Ezért a fűtőelemgyárakban általános 5%-os ^{235}U dúsítási limit alatt lehet maradni úgy, hogy közben növelik a hasadóanyag-tartalmat, amit például a cirkóniumnál több neutron elnyelő, új burkolatok tehetnek szükségessé.

A mikrokapszulás üzemanyagban a körülbelül 100-500 μm nagyságú üzemanyagdarabokat önálló bevonattal látják el. A bevonat megakadályozza, hogy a szemcséből radioaktív hasadási termékek kerüljenek ki. Ilyen üzemanyagot korábban sikeresen alkalmaztak több gázhűtésű reaktorban is, ahol az UO_2 szemcséken a bevonatot grafit és SiC rétegek alkották. Hasonló megoldást jelent a fém- vagy kerámiamátrixban diszpergált üzemanyag is. A mátrix egyrészt jó hővezetést biztosít, és ezzel csökkenti az üzemanyag hőmérsékletét, másrészt akadályozza a hasadási termékek kijutását. Ezekben az üzemanyagokban a fajlagos hasadóanyag-tartalom kisebb, mint a szokásos tablettákban, így a megfelelő hasadóanyag-mennyiség biztosításához magasabb dúsításra lehet szükség. Súlyos balesetek során ezek a heterogén szerkezetű tabletták csökkentik a hasadási termékek kikerülését és késleltetik a zóna megolvadását.

A balesetálló üzemanyag bevezetése

A balesetálló fűtőelemek fejlesztésének fő kérdése jelenleg az, hogy miként viselik el az új fűtőelemek a balesetek során várható körülményeket. Ha sikerül belátni, hogy a tervezett anyagokkal az atomreaktor súlyos baleseteinek sokkal szerényebb következményei lehetnek, mint a jelenlegi üzemanyaggal, akkor az nagyon komoly eredmény lesz, de ez csak az első lépést jelenti a balesetálló erőművi üzemanyag bevezetéséhez. Az alkalmasnak bizonyult anyagokkal számos előzetes mérést kell végezni, majd besugárzásukat kutatóreaktorokban kell megkezdni. El kell készíteni – a megfelelő gyártástechnológiák kifejlesztésével párhuzamosan – a fűtőelemek prototípusait, amelyeket a besugárzások után alapos vizsgálatnak kell alávetni. Ezek után kerülhet sor a tesztkazetták gyártására és erőművi besugárzására.

A biztonsági elemzésekhez használt számítógépes programok modelljeiben – várhatóan – számos továbbfejlesztésre lesz szükség. Az újabb anyagok jellemző paramétereinek megadásához további méréseket kell majd végezni, és a modellek validálásához is kísérleti programok kellene.

Komoly kihívást jelent majd a balesetálló üzemanyag hatósági engedélyezése is. Az új fűtőelemekre a jelenleg érvényes előírások közül az általános – például kritikusságra, hűhetőségre vonatkozó – követelményeket alkalmazni lehet, de a cirkónium- és urán-dioxid-specifikus kritériumokat (például a burkolat megengedhető maximális hőmérséklete, vagy az üzemanyag entalpiája) újabb limitekkel kell kiváltani.

A kiégett üzemanyag tárolása, kezelése új eszközöket és eljárásokat igényelhet, különösen akkor, ha az új fűtőelemek reprocessálásával is számolnak.

Következtetések

A balesetálló fűtőelemek fejlesztése a világ számos laboratóriumában folyik és a fűtőelemgyártók többsége hosszú távon tervezi ilyen üzemanyag gyártását. Számos új burkolatanyagot és tablettatípust vizsgálnak, és több olyan perspektivikus konstrukció van, amelyek kutatóreaktori besugárzása már megkezdődött. Várhatóan négy-öt éven belül kezdődhet meg az első erőművi kazetták tesztelése.

A balesetálló atomerőművi fűtőelemeknek – amellet, hogy sokkal jobban ellenállnak az üzemzavari és baleseti állapotokban fellépő terheléseknek – természetesen a normál üzemelés során is legalább olyan jól kell majd teljesíteniük, mint a jelenleg használatos üzemanyagoknak.

Irodalom

1. Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactors. *IAEA-TECDOC-1797*, Proceedings of a Technical Meeting held at Oak Ridge National Laboratories, United States of America, 13–16 October 2014 (<http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1797web.pdf>)
2. Increased Accident Tolerance of Fuels for Light Water Reactors. NEA/NSC/DOC (2013) 9, Workshop Proceedings OECD/NEA Headquarters Issy-les-Moulineaux, France 10–12 December 2012.
3. S. J. Zinkle, K. A. Terrani, J. C. Gehin, L. J. Ott, L. L. Snead: Accident tolerant fuels for LWRs: A perspective. *Journal of Nuclear Materials* 448 (2014) 374–379.
4. Hyun-Gil Kim, Jae-Ho Yang, Weon-Ju Kim, Yang-Hyun Koo: Development Status of Accident-tolerant Fuel for Light Water Reactors in Korea. *Nuclear Engineering and Technology* 48 (2016) 1–15.
5. Masaki Kurata: Research and Development Methodology for Practical Use of Accident Tolerant Fuel in Light Water Reactors. *Nuclear Engineering and Technology* 48 (2016) 26–32.
6. Shannon Bragg-Sitton: Development of advanced accident tolerant fuels for commercial LWRs. *Nuclear News* (March 2014) 83–91.
7. M. Sevecek, J. Krejci, L. Cvrcek: Development of Chromium and Chromium Nitride Coated Cladding for VVER Reactors. 2017, the Water Reactor Fuel Performance Meeting, September 10–14, 2017, Korea

RADONEXPOZÍCIÓ ÉS A KIS DÓZISOK DEFINÍCIÓJA

Madas Balázs Gergely

MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Környezetfizikai Laboratórium

A sugárvédelmi kutatások egyik alapvető kérdése, hogy milyen a kis dózisú besugárzások egészségre gyakorolt hatása. Ennek megfelelően mind Európában, mind az Egyesült Államokban jelentős forrásokat biztosítottak a kis dózisok hatásainak vizsgálatára. De mik is azok a kis dózisok?

Szórtan ionizáló, azaz kis LET-értékű (LET: linear energy transfer, lineáris energiaátadási tényező) sugárzások esetén általában a 100 mGy-nél kisebb elnyelt dózisokat szokás kis dózissnak tekinteni, míg a sűrűn ionizáló, azaz nagy LET-értékű sugárzásoknál

a kis dózisok tartományának felső határa egy nagyságrenddel alacsonyabb. Első ránézésre a definíció egyértelmű.

Kérdések a kis dózisok definíciójával kapcsolatban

A definíciót jobban megvizsgálva rájövünk, hogy néhány kérdés nyitva maradt. Az egyik, hogy az időbeli eloszlástól független-e, hogy valamit kis dózissnak tekintünk vagy sem. Ezzel kapcsolatban azt találjuk, hogy a kis dózisok vonatkozásában a releváns dózisteljesítmény-tartomány 100 mGy/h szórtan ionizáló sugárzásokra, míg a sűrűn ionizálóakra, például alfa-részecskékre, pedig ismét egy nagyságrenddel alacsonyabb. Bár továbbra is nyitott az a rendkívül fontos kérdés, hogy a dózisteljesítmény miként befolyásolja az egészségi hatást, fontos megjegyezni, hogy ezt a sugárvédelem rendszere igyekszik figyelembe venni a „dózis-dózisteljesítmény csökkentési tényezővel” (DDREF: dose and dose rate effectiveness factor) [1]. Emiatt is a továbbiakban nem erre, hanem egy másik kérdésre összpontosítunk. Ugyanis nemcsak az a kérdés, hogy milyen időtartam alatt éri egy adott dózis az embert, hanem az is, hogy a dózist mekkora térfogatban mérjük.

A sztochasztikus hatások vizsgálatakor az elnyelt dózist a szervek, illetve a szövetek egészére átlagol-

Köszönet illeti *Drozdik Emesét* a kézirat átolvasásáért. A kutatás részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával (VKSZ 14-1-2015-0021), részben pedig a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése országos program című kiemelt projekt keretében zajlott (A2-EFPK-13-0160). A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.



Madas Balázs 2007-ben szerzett diplomát mérnök-fizikus szakon a BME-n, majd 2009-ben ugyanitt végzett egészségügyi mérnökként. Doktori fokozatát 2013-ban az ELTE Fizika Doktori Iskolájában szerezte. Értekezését, amelynek címe „Az ionizáló sugárzás biológiai hatásainak szövetszintű modellezése” *Balászházy Imre* témavezetésével készítette. Kutatásainak fő kérdése, hogy a biológiai rendszerekre hogyan hat az ionizáló sugárzás, különös tekintettel azok változékonyságára.

jük. Belső terheléskor több esetben (tüdő, emésztőrendszer, csontfelszín, bőr) figyelembe vesszük a radionuklidok és a sugárérzékeny célsejtek térbeli eloszlását. Ugyanakkor az elnyelt dózist ebben az esetben is az adott szerv vagy szövet összes célsejtjére kell átlagolni. Ez azt jelenti, hogy a sugárvédelem ugyanazt a kockázatot rendeli a célsejtekben adott átlagos elnyelt dózist eredményező besugárzásokhoz, attól függetlenül, hogy az ionizáló energia egyenletesen vagy egyenetlenül oszlik el az adott szervben vagy szövetben. Az effektív dózis és ennek megfelelően a besugárzáshoz rendelt kockázat ugyanakkora, ha egy adott szerv egyetlen célsejtje nyel el 0,001 J energiát vagy az adott szerv 10^{11} célsejtje nyel el egyenként 10^{-14} J energiát. Ugyanakkor a biológiai hatás és ennek megfelelően a várható egészségi következmények minden bizonnyal különbözőek, ha egy sejt nyel el nagyjából 10^9 Gy dózist, vagy 10^{11} sejt mindegyike nyel el 10 mGy dózist.

Ez az ellentmondás, hogy ugyanazt a kockázatot rendeljük nagyon különböző besugárzásokhoz, és feltehetően nagyon különböző biológiai hatásokhoz is, sokkal mélyebben gyökerezik, mint azt elsőre gondolnánk. Tulajdonképpen a dózismennyiségek definíciójából már levezethető, ugyanis ezek a lineáris, küszöb nélküli dózis-hatás összefüggés feltételezésén alapulnak (LNT-hipotézis). Mivel a lineáris dózis-hatás összefüggés kizárja annak lehetőségét, hogy az ugyanolyan érzékenyséű sejtek közötti dóziseloszlást figyelembe vegyük, az ellentmondás a sugárvédelem jelenlegi rendszerén belül első közelítésben nem feloldható. Ezt korábban mi is bemutattuk [2].

A fenti példa tekinthető úgy, mint egy érdekes elméleti kérdés. Fontos azonban, hogy a sugárvédelem célja gyakorlati problémák megoldása. Kérdés tehát, hogy a térben egyenetlen terheléseloszlásoknak van-e bármilyen gyakorlati jelentősége.

Egyenetlen térbeli dóziseloszlás a gyakorlatban

Az aeroszolok légúti kiülepedése igen egyenetlen. Mivel a radonleágyelemek jelentős részben az aeroszol szilárd részecskéihez kötődnek, a térbeli egyenetlenség az aktivitáseloszlásban is megmutatkozik. Az alfa-részecskék rövid hatótávolsága miatt az egyenetlen aktivitáseloszlás egyenetlen dóziseloszlást eredményez [3].

Az uránbányászok radonterhelésének jellemzésére régen gyakran használták a munkahónapszint mennyiséget (WLM: working level month). 1 WLM expozíció megfelel annak, hogy valaki egy munkahónapon, azaz 170 órán keresztül 1 WL (working level) koncentrációjú levegőt lélegez be. 1 WL koncentráció pedig olyan levegő-összetételt jellemez, amelynek 1 literében a radonleágyelemek tetszőleges kombinációjából összesen $1,3 \cdot 10^5$ MeV alfa-energia szabadulhat fel.

1 WLM (ami egyébként $3,54 \cdot 10^{-3}$ Jh m⁻³-nek felel meg) 12 mSv effektív dózist eredményez. Tekintsük a kisdózistartomány felső határát alfa-részecskékre 10 mGy-nek, ami éppen megegyezik a hazánkban meghatározó *Sugárvédelem* című könyv által megadott 200 mSv-es felső határnak [1]. Ha csak az alfa-részecskékből származó, tüdőben elnyelt dózist vesszük figyelembe, akkor a kisdózistartomány felső határának 2 WLM expozíció felel meg. Ugyanakkor ez a radonterhelés a hörgők sugárzásnak leginkább kitett $0,14 \text{ mm}^2$ -én $39,4$ Gy lokális dózist eredményez, ha a mukociliáris tisztulást nem vesszük figyelembe [4].

Lakásokban 2 WLM expozíciót 500 Bq m^{-3} radonkoncentráció 1 év alatt eredményez, ha az egyensúlyi tényező 0,7, és az idő 40%-át töltjük otthonunkban. Mivel más a belélegzett részecskék méreteloszlása és a légzés módja lakásokban és bányákban, a dóziseloszlás kevésbé lesz egyenetlen [3], és így a lakásokban a fenti makroszkopikus terhelés csak $10,6$ Gy lokális dózist eredményez a hörgők sugárzásnak leginkább kitett $0,14 \text{ mm}^2$ -én. A mukociliáris tisztulást itt sem vettük figyelembe.

Az előbbi számok jól mutatják, hogy a radonterhelés nagyon is gyakorlativá teszi a sugárterhelés térbeli eloszlásának problémakörét. Ha ehhez hozzávesszük, hogy a radont a dohányzás után a második legfontosabb tüdőrák okozó tényezőnek tekintjük, illetve hogy a radon hozzájárulása a természetes sugárterhelésből származó effektív dózishoz körülbelül 50% [1], akkor világosan látható, hogy a gyakorlati sugárvédelem számára is rendkívül fontos lehet, hogy a sugárterhelés térbeli eloszlása miként befolyásolja az egészségi hatást.

Konklúzió

Ha a közelítőleg 2 WLM-mel jellemzett radonterhelés tekinthető kisdóziskutatásnak, akkor megállapítható, hogy kis dózisok hatásainak megértéséhez olyan vizsgálatokra is szükség van, amelyekben a szövet kis részeit nagy dózissal sugarazzuk be, miközben a szövet egészének dózisa alacsony marad. A lokálisan nagy dózisok nagy valószínűséggel eredményeznek sejtpusztulást, maguk az elpusztult sejtek pedig nem növelik a rákkockázatot, ezért a sejtszintű kísérletektől nem várható, hogy segítenek megérteni, miként növeli a radon a rákkockázatot. Ehelyett olyan kísérletekre van szükség, ahol magasabb szerveződési szintet (szövetet, szervet) sugarazzunk be, és e magasabb szerveződési szint sugárválasztát határozzuk meg.

Bár a fenti vizsgálatokból a kis dózisok hatására vonatkozó általános következtetések nem várhatók, a radon jelentősége miatt ezek a kutatások a sugárvédelem számára legfontosabbak közé tartoznak. A szövet fókuszált besugárzása miatt olyan jelenségek léphetnek fel (mint például a hyperplasia kialakulása), amelyek nem jellemzőek egyenetlen térbeli eloszlású, kis dózisú besugárzásokra. Ez nem jelenti azt, hogy az

egyenetlen terhelések kockázata szükségképpen nagyobb lenne, mint az egyenletes terheléseké, de azt valószínűsíti, hogy a radon által kiváltott rákkelkezés mechanizmusainak megértéséhez a lokálisan nagy dózisok hatását is szükséges vizsgálni.

Irodalom

1. Fehér István, Deme Sándor: *Sugárvédelem*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2010.

2. Madas B. G., Balásházy I.: Szerven belül egyenetlen dóziseloszlások és az LNT-modell. *Sugárvédelem* 6 (2013)7-14. http://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem/docs/V6i1/Madas_V6i1.pdf
3. Balásházy I.: *Aeroszolok légúti kiülepedésének és a kis dózisok biofizikai hatásainak vizsgálata*. Doktori értekezés (DSc), Magyar Tudományos Akadémia, Budapest (2010) http://real-d.mtak.hu/239/4/Balashazy_Imre_5_Mu.pdf
4. Madas B. G.: *Az ionizáló sugárzás biológiai hatásainak szövet-szintű modellezése*. Doktori értekezés (PhD), Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest (2012) http://teo.elte.hu/minosites/ertekezes2012/madas_b_g.pdf

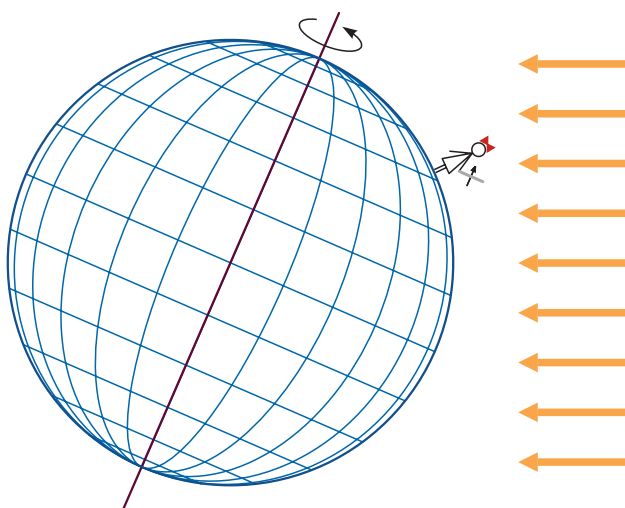
A FIZIKA TANÍTÁSA

KÉSZÍTSÜNK NAPÓRÁT CD-BŐL!

Bokor Nándor
BME, Fizikai Intézet

Az ekvatoriális napóra

A napóra legalább három és fél ezer éves múltra visszatekintő időmérő eszköz. Alapelve zseniálisan egyszerű. Központi csillagunk reggeltől estig folyamatosan változtatja helyét az égbolton (valójában a Föld forog a tengelye körül, de ezt nem kell tudni hozzá), és mivel ez a (látszólagos) mozgás megbízhatóan és kiszámíthatóan ismétlődik, időmérésre alkalmas. Az évezredek során megalkotott napórák sokfélesége, szépsége a mai szemlélőt is lenyűgözi. Túlnyomó többségük fény-árnyék jelenségen alapul: egy bot, az úgynevezett gnómon árnyékot vet egy megfelelően kalibrált skálára, és az árnyékot „óramutatóként” használva a skáláról leolvashatjuk az aktuális időt. Az épített környezet geometriai sajátosságaira gondolva érthető, hogy kertekben, parkokban általában vízszintes számlapú, míg paloták, templomok falára szerelve többnyire függőleges számlapú (sokszor művészi kivitelezésű) elrendezéssel találkozhatunk. Pedig a legegyszerűbb elvű, legkönnyebben érthető geometriát az *ekvatoriális* elrendezés adja: ilyenkor a napóra beskálázott számlapját nem vízszintesen és nem is függőlegesen, hanem az Egyenlítő síkjával párhuzamosan orientáljuk. (Az ekvatoriális napórák számlapja az egyenlítőnél függőleges, a sarkokon vízszintes, Budapesten pedig $90^\circ - 47,5^\circ = 42,5^\circ$ -os



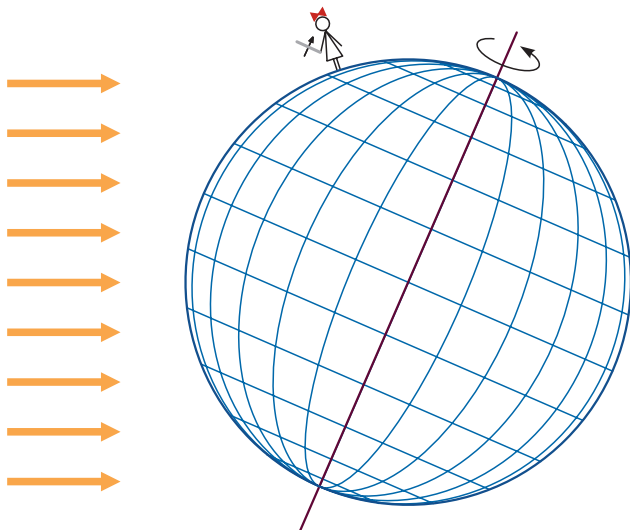
1. ábra. Az ekvatoriális napóra az északi féltekén, nyáron.

szöveget zár be a vízszintessel.) Az 1. ábra egy ekvatoriális napórát mutat az északi féltekén, nyári használat közben.

Az ábrán szürke vonal jelzi a megfigyelő kezében tartott napóra kalibrált számlapját, amely párhuzamos az Egyenlítő síkjával. A számlap közepébe merőlegesen szúrt gnómon (az ábrán kis fekete egyenes nyíl) párhuzamos a Föld forgástengelyével, tehát a Sarkcsillag felé mutat. Az ábrán látható, hogy a gnómon felülről vet árnyékot a számlapra, tehát az időt a számlapra felülről ránézve lehet leolvasni. Mivel a Föld óránként 15° -os szöveget fordul el a tengelye körül, a számlapra szabályosan, 15° -onként kell az óra-beosztásokat felrajzolni. (Megjegyzés: a helyzetet kicsit bonyolítja, hogy a Föld nem kör-, hanem ellipszispályán kering a Nap körül, ezért keringési sebessége nem állandó, illetve hogy forgástengelye nem merőleges a keringési síkra, hanem $23,5^\circ$ -os szöveget zár be a merőlegessel. Ezek hatásáról később lesz szó.)



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



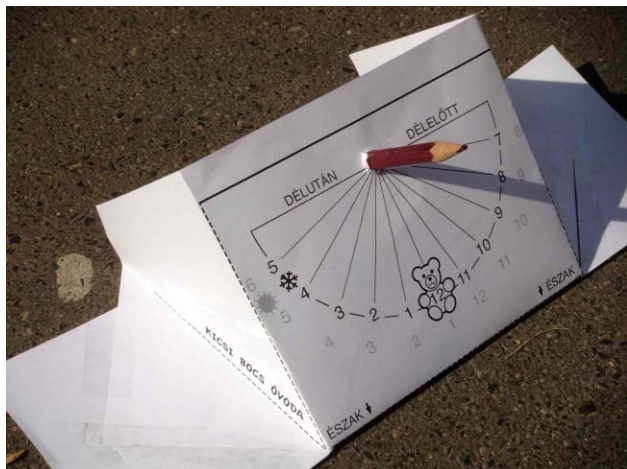
2. ábra. Az ekvatoriális napóra az északi féltekén, télen.

A 2. ábra ugyanezt a napórát fél évvel később, téli használat közben mutatja. (Az ábrán a felhasználó a kezében tartja az eszközt, de a gyakorlati használat úgy képzelendő el, hogy a napórát az 1. ábrának megfelelő tájolással letelepítettük egy szabadteri helyszínre, és most fél évvel később ismét ránézünk.) Mint az ábrán látható, a gnómon árnyéka télen *alulról* vetül a számlapra. A napfény számlapra felülről, illetve alulról érkezése közötti átmenetek a tavaszi és őszi nap-éj egyenlőség napjain történnek. Ezen a két napon a napfény sűrű beeséssel érkezik a számlap síkjára.

A számlapra alulról rávetülő árnyék okoz némi bonyodalmat, mert a napóra alá bebújni általában kényelmetlen. Vannak megoldások arra, hogy az időt ilyenkor is egyszerűen le tudjuk olvasni. Az egyik megoldás, ha a számlap áttetsző anyagból készül. Erre mutat példát a 3. kép.

Ezen a – ferencvárosi Kicsi Bocs óvoda nagycsoportosai számára tervezett – napórán a számlap egy egyszerű papírlap, amely áttetsző annyira, hogy a ceruza-gnómon árnyéka tisztán látható felülről a téli félévben is, amikor a fény a számlap alsó oldala felől

3. kép. Áttetsző számlapú napóra a téli használathoz.



érkezik. Az ilyen – egész évben használható – napórák számlapját érdemes a téli és a nyári időszámításnak megfelelő órabeosztással is ellátni. A 3. kép napóráján a téli időszámítást fekete számokkal és hópihe-szimbólummal, a nyári időszámítást szürke számokkal és Nap-szimbólummal jeleztem.

Ekvatoriális CD-napóra

A cikk hátralevő részében egy olyan egyszerűen elkészíthető, elegáns elven működő napórát mutatok be – többféle változatban –, amely ekvatoriális elrendezésű, de a megszokottól eltérő módon, az optikai rácsra eső fény *elhajlását* (*diffrakcióját*) kihasználva mutatja a pontos időt [1]. A CD-k és DVD-k, mint adattárolók kora nagy valószínűséggel leáldozóban van, de reflexiós optikai rácsokként még sokáig nagyszerűen használhatók lesznek az oktatásban. A rácsrajzolatot az adattároláshoz kialakított sűrű, koncentrikus körök alkotják, amelyek távolsága, azaz a rácsállandó CD-ken 1600 nm, DVD-ken 740 nm, tehát a látható fény hullámhosszának (~400-700 nm) nagyságrendjébe esik, de annál nagyobb. Egy ilyen rácsot fehér fényvel megvilágítva a visszavert fény gyönyörű, szivárványszínű színekkomponensekre felbontva érkezik a szemünkbe. Ráadásul – ami most számunkra különleges jelentőségű – a rácsvonalak körkörös geometriája miatt egy távoli pontszerű fényforrás diffrakciós képe *éles, sugárirányú vonalként* jelenik meg a CD vagy DVD felületén. A *CD-napóra* ezt az éles, sugárirányú fényvonalat használja „óramutatóként” egy kalibrált számlapon. A 4. képen egy ekvatoriális CD-napóra látható, szintén a Kicsi Bocs óvoda nagycsoportosainak tervezett számlappal, amint kevéssel délután fél 4 utáni időpontot mutat. (A Műegyetem F. épületét előrelátó módon pontosan észak-dél, kelet-nyugat tájolására építették, ezért napközben mindig lehet olyan ablakot találni, amelynek párkányához illesztve a napóra elülső éle könnyedén a pontos északi irányba állítható. Egy ilyen ablakpárkányon készült a fotó egy áprilisi dél-

4. ábra. Nyáron használható ekvatoriális CD-napóra.



utánon.) A geometriai elrendezés nagyon hasonlít a 3. képen szereplő hagyományos, gnómonos változathoz: a számlap – itt tehát maga a CD is – az Egyenlítő síkjával párhuzamos, és a „gnómon” – ez esetben a CD középpontját a megfigyelő szemével összekötő képzeletbeli egyenes – a Sarkcsillag felé mutat. Míg a hagyományos változat (3. kép) elkészítésekor külön ügyelni kell arra, hogy az árnyékot vető gnómon pontosan merőlegesen dőlje át a számlapot, a CD-napórán az ennek megfelelő követelmény, tehát hogy a számlapra pontosan *merőlegesen nézzünk rá*, minden erőfeszítés nélkül, egyszerűen teljesíthető. A CD csillogó felülete ugyanis tükrözi a megfigyelő arcát, tehát csak arra kell ügyelnünk, hogy a számlapot fél szemmel nézve a nyitott szemünk „tükörképe” épp a CD közepén levő lyukra essen.

A CD-napóra számlapját – ebben az alapváltozatban legalábbis – elég a nyári időszámítás szerinti óra-beosztással ellátni, mert szeptember 23-tól március 21-ig a Nap alulról világítja meg az átlátszatlan számlapot, és a napóra nem használható.

A helyi idő és zónaidő

Mint a 3. kép mutatja, a maci-szimbólummal is kiemelt 12-es osztás (nyári időszámításkor a délután 1 órás osztás) éppen északi irányba néz, tehát erre a számra akkor vetül a ceruza árnyéka, amikor a Nap pontosan dél felől süt. Ugyanez olvasható le a 4. képről, a csak nyári óraskálával ellátott CD-napóra számlapjáról is: a délután 1 órás – tehát a szokásos, téli időszámítás szerint déli 12 órának megfelelő – osztás éppen a számlap tetején van, tehát a fényes csík akkor mutat erre a számra, amikor a Nap pontosan déli irányból süt. Ez logikus, hiszen elvárjuk, hogy a Nap definíció szerint *délben* süssön *dél* felől, viszont így az óra nem egészen pontos. Ez a 12 óra ugyanis csupán az úgynevezett *helyi dél*. A helyi dél szemléletes, de mindennapi életünkben nem igazán hasznos fogalom. Hogy miért, annak megértéséhez elég arra gondolni, hogy a Föld forgása például Nyíregyházát 11 perccel előbb fordítja be a Naphoz képest ugyanabba a pozícióba, mint Budapestet, tehát Budapestben a helyi dél 11 perccel később érkezik el, mint Nyíregyházán. Szombathely még nyugatabbra fekszik, ott a helyi dél a budapestinél még 10 perccel később érkezik el. Amíg a közlekedési eszközök nem voltak túl gyorsak – a 19. század közepéig – ez nem okozott gondot, minden település a saját helyi déléhez igazított *helyi idő* szerint élte az életét. A vonatközlekedés nagy változást hozott: az utasok ép elméjének megőrzése – és a balesetek elkerülése – érdekében elkerülhetetlenné vált a sokféle helyi idő felváltása egyetlen *szabvány idővel*, az úgynevezett *vasútidővel*. Ilyen módon a vonaton utazóknak nem kellett állomásonként néhány perccel arrébb állítaniuk zsebórájukat, és nyilvánvaló volt, hogy ha a menetrendben szerepel egy időpont, az az egységesített vasútidőt jelenti. Korunkban, amikor akár föld-

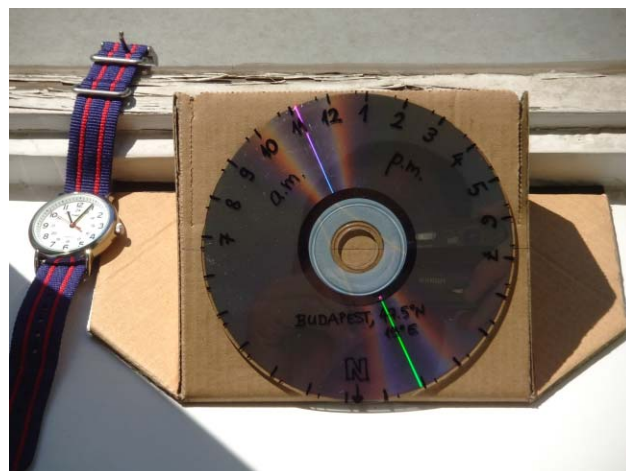
részek között is mindössze néhány óra az utazási idő (a kommunikáció pedig a másodperc törtresze alatt zajlik bármely két pont között), az egyes országok szabványidejét is összehangoljuk, és *zónaidőnek* nevezzük. A Nap ugyan mindenhol a helyi idő szerint „jár”, de életünket – a vonatok és repülőgépek menetrendjét, az egyetemi előadások kezdetét, a randevúkat – már a zónaidőhöz igazítjuk. (A szabványidő szélsőséges példája Kína, amelynek legkeletibb pontján majdnem 4 órával korábban van a helyi dél, mint legnyugatibb pontján, mégis egyetlen szabványidőt használ az egész ország.)

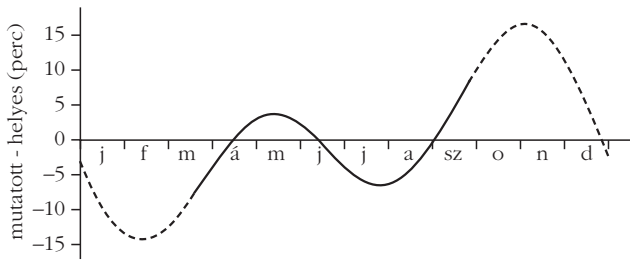
Egy napórától természetes elvárás, hogy ne a helyi időt, hanem a sokkal hasznosabb zónaidőt mutassa. Ennek érdekében a számlapon az óraskálát *el kell forgatni*. Budapest például a keleti szélesség 19°-án helyezkedik el. Ha pontosan a 15°-nál helyezkedne el, akkor a 0°-os hosszúsági körön fekvő Greenwich déli 12 órája előtt pontosan 1 órával lenne Budapesten a helyi dél, így azonban ennél mintegy

$$(19^\circ - 15^\circ) \frac{60 \text{ perc}}{15^\circ} = 16 \text{ perccel}$$

még *korábban*. Tehát a greenwichi 12 óra előtt pontosan 1 órával, abban pillanatban, amikor a budapestiek és általában a Magyarországon bárhol tartózkodók karórája egységesen éppen delet mutat – és amikor azt szeretnénk, hogy napóránk is delet mutasson –, akkor a Nap Budapesten már 16 perce kimozdult a pontos Dél-égtájnak megfelelő irányból, Nyugat felé. Emiatt napóránk számlapján az osztásokat a 4. képen látható korrigálatlan változathoz képest $19^\circ - 15^\circ = 4^\circ$ -kal a *későbbi* időpontok felé, azaz *az óramutató járásával megegyező irányba* el kell forgatni. Egy ilyen korrigált napórát mutat az 5. kép délelőtt 11 óra 5 perckor. Ezen a napórán a számlapot magára a CD-re rajzoltam. A kerületre rajzolt rövid vonalak az eredeti, helyi időnek megfelelő osztásokat jelzik, a hosszabb vonalak a számokkal együtt pedig a korrigált, elforgatott skálát, amelyről a zónaidőt olvashatjuk le.

5. kép. A helyi és a zónaidő közti különbség korrigálása CD-napóra elforgatásával.





6. ábra. Az időegyenlet-korrektció grafikonja.

Az időegyenlet (időegyenleg, időkiegyenlítés)

Elkészítettük pontos ekvatoriális CD-napóránkat: a számlap dőlésszögét az adott szélességi körhöz igazítottuk, a számlap óráskáláját pedig a hosszúsági körnek megfelelően fordítottuk el. Napóránk az időt – körülbelül 5 perc leolvasási pontosságon belül – március végéig szeptember végéig teljesen pontosan mutat. ... *ná, ha a Föld Nap körüli pályasebessége állandó lenne, és ha a Föld forgástengelye merőleges lenne a Nap körüli pálya síkjára.* Ha így lenne, akkor egy adott helyre telepített napóra *Naphoz viszonyított sebessége* – ami a Föld pályasebességének és a Föld forgásából adódó kerületi sebességnek vektori összege – az év minden napján egy adott órában ugyanakkora lenne.

(1) A Föld azonban ellipszispályán kering a Nap körül, és emiatt a Nap körüli pályasebessége nem állandó (télén nagyobb, nyáron kisebb).

(2) A Föld forgástengelye nem merőleges a pálya síkjára, hanem attól $23,5^\circ$ -kal eltér, és emiatt a pályasebesség és a forgásból adódó kerületi sebesség az év különböző napjainak ugyanabban az órájában más és más szöget zár be egymással (például helyi déli 12 órakor a nyári és téli napforduló napján a két sebességvektor éppen ellentétes irányba mutat, az őszi és tavaszi nap-éj egyenlőség napján pedig $180^\circ - 23,5^\circ = 156,5^\circ$ -os szöget zár be egymással).

A fenti kétféle – éves, illetve körülbelül féléves periódussal rendelkező – hatás eredőjeként a Földön nyugvó megfigyelő Naphoz viszonyított sebessége *ingadozik* az év során, és ez azt okozza, hogy egy adott helyszínen az év folyamán nem pontosan 24 óránkénti periódussal van déli pozícióban a Nap. A

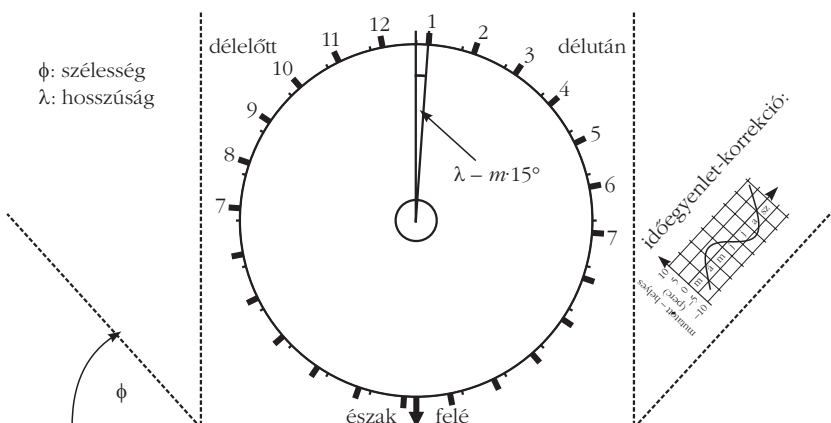
pontos számítások eredménye az úgynevezett *időegyenlet* [2], amelynek grafikonját a 6. ábra mutatja. A vízszintes tengelyen a hónapok szerepelnek, a függőleges tengelyen pedig az, hogy mekkora járulékos korrekcióra van szükség, hogy az 5. képen láthatóhoz hasonló napóráról valóban a helyes zónaidőt olvassuk le. A grafikon azon szakaszát, amely a tavaszi és az őszi nap-éj egyenlőség közé esik, folytonos vonallal rajzoltam: az átlátszatlan számlapú CD-napórán – amely csak a nyári félévben használható – az időegyenlet-grafikonnak csak ezt a szakaszát kell figyelembe vennünk. Az 5. fénykép például május 19-én készült, és a napóra számlapja körülbelül 11 óra 10 percet mutat rajta. A 6. ábra grafikonjáról látható, hogy ezen a napon a napóra a pontos időnél körülbelül 4 perccel többet mutat, tehát a pontos zónaidő körülbelül 11 óra 6 perc. Ez a következtetés a leolvasási pontosságon belül jól egyezik a képen a karóra által mutatott *valódi* pontos zónaidővel, 11 óra 5 perccel.

A fentiek figyelembevételével most már valóban elkészíthetjük teljesen helyesen működő és egyszerű CD-napóránkat. A tervrajzot – ϕ szélességi és λ hosszúsági körre – a 7. ábra mutatja.

Használati utasítás: a lakóhelyünknek megfelelő λ és ϕ hosszúsági és szélességi szögeket használva készítsük el a 7. ábrát A4-es méretben (a nagy kör CD-méretű legyen), és nyomtassuk ki. Ragasszuk rá egy kartonlapra, majd a két vastag vízszintes vonal mentén vágjuk be. Az öt szaggatott vonal mentén hajtsuk be, és ragasszuk össze belőle a 4–5. képeknek megfelelő elrendezést. Ügyeljünk arra, hogy a napóra két oldalsó felülete a ragasztás után pontosan függőleges legyen. (A 7. ábrán a jobb oldali oldallapra került az időegyenlet-korrektció grafikonja.) Így a számlap dőlésszöge a vízszinteshez képest $90^\circ - \phi$ lesz, azaz a napórát az alsó nyíl szerint észak felé befordítva a számlap párhuzamos lesz az Egyenlítő síkjával. A számlap skálázását a fent leírtaknak megfelelően készítsük el, azaz a teljesen szimmetrikus elrendezéshez képest akkora szöggel fordítsuk el, amennyivel a saját helyzetünk λ hosszúsági köre eltér az időzónánk közepét jelző (és a 15° egész számú többszöröseként felírható) hosszúsági körtől; ha a különbség pozitív, az óramutató járásával megegyező irányba, fordított

esetben az ellenkező irányba. Budapesten például $\lambda = 19^\circ$, és $m = 1$, tehát $\lambda - m \cdot 15^\circ = +4^\circ$, a skálát tehát az óramutató járásával megegyező irányba kell elforgatni. (A zónaidők szabványosításában nem csak észérvek döntöttek. Az egész-órás szabályhoz igazodó, Greenwich-hez képest +5 óras eltérést alkalmazó Pakisztán szomszédja, India például +5 és fél órával igazítja odébb óráját, Nepál pedig +5 óra 45 perccel. Az ilyen kivételes esetekre érvényes helyes számlapskálázás élvezetes agytornát kínáló probléma, amelyet megnégyez az olvasónak.)

7. ábra. A teljesen helyesen működő, egyszerű CD-napóra tervrajza.





8. kép. A CD hámozása.

Átlátszó, egész évben használható változat, szemléltető földgömbbel

A CD-napóra egyszerű, kisméretű, elegáns eszköz, de eddig leírt változatában csak a nyári félévben használható. Szerencsére ezen a hiányosságon is lehet segíteni. Az interneten számos oktató videó található arról, hogyan lehet az átlátszatlan réteget egy CD felületéről eltávolítani. A technika nagyon egyszerű: a nyomtatott rétegre késsel rövid karcot kell ejteni, ezután a réteg celluxszal vagy más ragasztószalaggal a karcolt él mentén elkezdve könnyen lefejthető, amint a 8. kép mutatja.

Az eredményül kapott *átlátszó CD* transzmissziós és reflexiós optikai rácsként egyaránt működik, mégpedig szinte azonos diffrakciós hatásfokkal, azaz visszavert fényben és átmenő fényben szinte azonos fényerővel mutatja a szivárványszínű sugárirányú becsillogást. A számlapra ilyen CD-t szerelve napóránk *egész évben* használható lesz. A 9. kép egy ilyen, átlátszó CD-vel felszerelt napórát mutat.

Az 5. képpel összevetve látszik, hogy ezúttal a kartonvázon lyukakat vágtam, így a napsugarak a téli félévben eléri a CD alsó felületét. A 10. kép ugyanezt a napórát működés közben mutatja. A fénykép június 6-án készült. A számlapon leolvasott érték körülbelül 13 óra 50 perc (± 3 perc), amit a 6. ábra időegyenlet-grafikonjával korrigálva, tehát körülbelül 2 percet levonva jól visszkapjuk a karórán mutatott zónaidő-értéket.

Ezt a napórát pedagógiai célokkal egy kis földgömbbel is kiegészítettem. Földgömbként egy – térképoltban kapható – szivacsból készült labdát használtam, amit az Egyenlítő síkjában késsel félbevágtam, és a két félgömböt megfelelően illesztve a CD felső, illetve alsó felületére ragasztottam. A kis labda természetesen nem komoly mérés-technikai eszköz: a hosszúsági és szélességi köröket, valamint az országokat elég pontatlanul nyomtatták rá. Szerencsés körülmény viszont, hogy a hosszúsági köröket éppen 15° -onként ábrázolja. Ez napóránk szempontjából ideális, hiszen – amint a 10. képen látható – a CD-re a sugárirányú



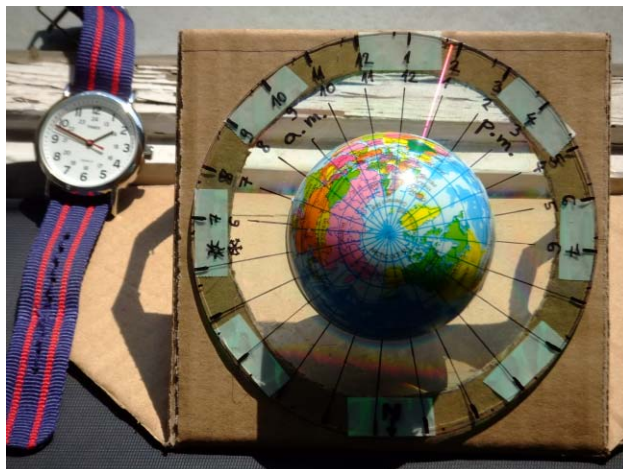
9. kép. A télen és nyáron is használható, átlátszó CD-napóra.

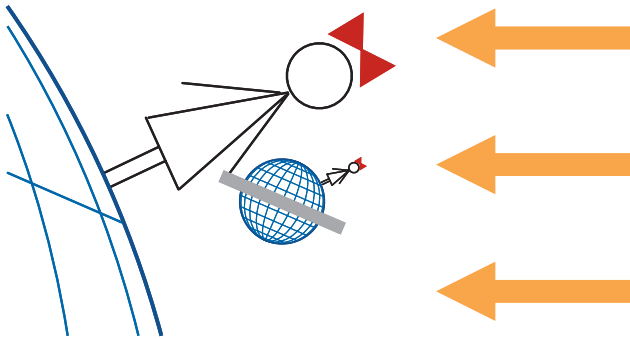
órábeosztásokat úgy tudtam rárajzolni, hogy azok felülről nézve épp a hosszúsági körök „meghosszabbításai” legyenek. A kis földgömb számos pedagógiai haszonnal jár:

1. A napóratervezés kérdéseit egyszerűen megfoghatóvá, szemléletesé teszi. A napóra számlapját párhuzamossá kell tenni az Egyenlítő síkjával? A kis földgömb ezt azonnal szemlélteti, hiszen a CD-számlappal a labdát pont az Egyenlítője mentén szeltük ketté. A hosszúsági körünknek megfelelő mértékben kell a számlap órábeosztását elforgatni? A földgömb labdán ez is egyszerűen leolvasható: úgy kell a labdát az észak-dél tengely körül beforgatni, hogy rányomatott lakóhelyünk *éppen a tetején legyen*. Ezután a CD-számlapra az órábeosztásokat úgy kell rárajzolni, hogy azok épp a kis földgömbön 15° -onként elhelyezkedő hosszúsági körök meghosszabbításai legyenek, és a rányomatott hosszúsági körök közül a saját zónaidőnknek megfelelő éppen a (téli időszámítás szerinti) déli 12 óras osztás felé mutasson.

2. Ellentétben az asztali szemléltetőeszközként használt földgömbökkel (amelyek tengelye általában $23,5^\circ$ -kal dől a függőlegeshez képest, és az asztal síkját képzeljük hozzá a Föld pályasíkjának) ez a kis labdaföldgömb *pontosan olyan tájolású a térben,*

10. kép. A napóra működés, azaz merőleges ránézés közben.





11. ábra. A napórára szerelt kis földgömb ugyanolyan tájolású a térben, mint a Föld.

mint a bolygó, amin élünk. Ha tehát a napórát budapesti használatra terveztük (vagyis ennek megfelelően választottuk a 7. ábrán λ és ϕ értékét), akkor Budapest parányi pöttye éppen a napórára szerelt kis földgömb tetején lesz, érintősíkja tehát vízszintes, azaz párhuzamos a talajjal, amin állunk. Ha a labda-Budapestbe merőlegesen gombostűt – vagy egy kis figurát – szúrunk, akkor a kis figura velünk párhuzamosan fog állni. Ezt a jelenséget a 11. ábra szemlélteti. Mivel a kis földgömb ugyanolyan tájolású, mint az igazi Föld, a ráeső napfény pontosan mutatja, hogy *mi történik ugyanabban az időpillanatban tényleges bolygónk és a Nap viszonylatában.* A kis földgömbön – mint kicsinyített maketten – leolvasható, hogy abban a pillanatban, amikor épp ránézünk, melyik hosszúsági kör mentén, mely országokban van helyi dél (ott, ahová a CD-n a becsillanó vonal mutat), vagy hol van éppen naplemente és napfelkelte (azon vonal mentén, ahol a labdaföldgömbön elválik a napfényes rész az árnyékban levőtől). A becsillanó vonallal átellenes irány (az árnyékban levő rész közepe) megmutatja, melyik délkör mentén van éppen helyi éjfél. A kis földgömbre ránézve láthatjuk, hogy – a nyári félévben – melyik északi szélességi kör fölött nem nyugszik le aznap a Nap, illetve – a téli félévben – melyik északi szélességi kör fölött nem kel fel aznap a Nap.

A 10. fényképen levő napóráról így például a pontos időn kívül az is leolvasható, hogy amikor a fotó készült, Anglia és Algéria egyes helyein helyi dél volt, Montréalban nemrég kelt csak fel a Nap, Pekingben már le is nyugodott, Alaszkától északra pedig éppen *fehér éjszaka* volt.

3. A kis földgömbre az *időzónák* – általában országhatárokat követő, bár néha igen szórakoztató rajzolatok mentén haladó – választvonalait is bejelölhetjük, így a napórával szemléltethető lesz akár a helyi idő és a zónaidő közötti különbség is.

Záró megjegyzések

A 10. képen látható átlátszó CD-napóra egész évben működik, tehát ha az időegyenlet-korrektációs grafikonnal el akarjuk látni, akkor a 6. ábrán látható teljes grafikont kell hozzá mellékelni.

A pontos leolvasáshoz erre a napórára is *pontosan merőleges irányban* kell ránézni. Itt azonban nem működik az a trükk, amit az 5. kép CD-napóráján használtunk, mert az átlátszó CD-ben arcunk tükörképe nem látszik jól (különösen, ha a számlap közepére ragasztottunk egy labdát). Ilyenkor nézőpontunkat úgy kell tájolni, hogy a kis földgömbön levő délkörök (hosszúsági körök) sugárirányú egyeneseknek, a szélességi körök koncentrikus köröknek látszódjának (10. kép). Ez a leolvasási mód azonban kevésbé pontos, mint a tükröződésen alapuló. Egy pontosabb megoldás az, ha a kis földgömb északi sarkába merőlegesen vékony tűt szúrunk. A helyes leolvasáshoz tartozó nézőpontot akkor kapjuk, ha félszemmel nézve ezt a tűt egyetlen pontnak látjuk.

A 10. képen érdekes felfedezést tehetünk. *A labdaföldgömb önmagában is napóra!* A Nap fehéren becsillanó kis foltja a kis földgömb felszínén éppúgy – bár kicsit nagyobb leolvasási pontatlansággal – jelzi az időt, mint a CD felületén megjelenő vékony diffrakciós csík. (Ez átlátszatlan földgömb esetén csak a nyári félévben működik, mert csak akkor látjuk felülről a Nap becsillanó foltját a kis földgömb északi féltekéjén.) Ha hajlandók vagyunk némi mérési pontosságot feláldozni a letisztultabb pedagógia kedvéért, akkor a CD-től akár meg is szabadulhatunk. Napóránk ekkor egyetlen kis földgömbből fog állni, amelyet pontosan abba az irányba tájolunk, amerre a valódi Földünk áll (11. ábra), számlapját pedig maga a kis földgömb adja, amelyen az órabeosztásokat egyszerűen a 15° -onként rányomtatott hosszúsági körökre kell ráírni. Elvében talán a legegyszerűbb, legletisztultabb napórát kapjuk így: mintegy lekicsinyítjük a Sarkcsillag felől Földünket szemlélő „isteni nézőpontot”. Ott a számlap a Föld (nálunk a helyes tájolású makettje), az óramutató pedig a Nap becsillogó képe, amint megvilágítja a Földet (nálunk annak makettjét).

Az egész cikkben azzal a – nem feltétlenül jogos – feltevéssel éltem, hogy a napóra használója az északi féltekén él. A déli féltekén működő CD-napóra-változatok végiggondolását a motivált olvasóra bízom.

Irodalom

1. M. Catamo, C. Lucarini: „Light as shadow – sundials without gnomons”, *Compendium. J. N. Am. Sundial Society* 3 (1999) 19–23.
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Equation_of_time

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 főtítkárr, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

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

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

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulathoz vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú 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)

ÖT ÉVE ÁLLÍTOTTÁK PÁLYÁRA A MASAT-1-ET

Komáromi Annamária

Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium, Budapest

Immár több mint öt éve, 2012. február 13-án bocsátották pályára az első magyar tervezésű és építésű mesterséges holdat, a Masat-1-et, amelyet a francia guyanai Kourou melletti űrközpontból az Európai Űrügynökség (ESA) Vega hordozórakétája állított Föld körüli pályára. A Masat-1 (1. ábra) mindössze 1 kg tömegű, 10 cm élhosszúságú kocka alakú műhold volt.

A mostanában középiskolába kerülő diákok közül egyre kevesebben ismerik történetét. Fontosnak érzem, hogy mondjuk el fizikaórán, ezt az űreszközt oktatási céllal tervezték és készítették a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatói és oktatói az ESA Cubesat programjának keretében. Büszkék lehetnek rá tervezői és készítői, hiszen a kis mesterséges hold a tervezett 3 hónapos élettartamot messze meghaladóan, a számítások alapján a lehető leghosszabb ideig, majdnem 3 évig működött. Első hallásra talán meglepő, hogy a Masat-1 azon túl, hogy kiválóan alkalmas a műszaki pálya iránti érdeklődés felkeltésére, milyen sok témakörben felhasználható fizikatanításunk során. Éppen ezért a jelen cikkben nem csupán a hagyományos területeken (például Kepler-törvények) történő alkalmazásra utalok röviden, hanem olyan témakörökben is mutatok lehetőségeket, amelyekre – talán – nem is gondolnánk. Ilyen például az elektrosztatika, a termodinamika, vagy például a mechanikai rezgések.

A Masat-1 pályája

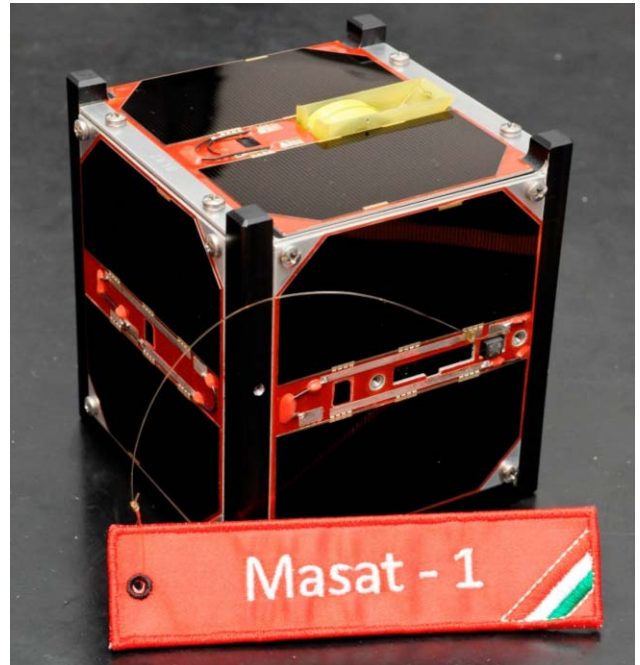
A Masat-1 elliptikus pályán keringett a Föld körül. Pályájának földtől legtávolabbi és Földhöz legközelebbi pontjainak ismeretében kiszámítjuk a pálya geometriai jellemzőit, keringési idejét, illetve a mozgás során előforduló legkisebb és legnagyobb sebességet.

Földközeli pont (perigeum): $r_{\min} = 300$ km, földtávololi pont (apogeum) $r_{\max} = 1450$ km. Az ellipszis alakú pálya geometriai jellemzői: a az ellipszis nagytengelyének fele, b a kistengely fele, c a fókuszpontok távolságának fele, e a numerikus excentricitás.

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tanszék-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.



Komáromi Annamária a budapesti Balassi Bálint Nyolcévfolyamos Gimnázium matematika-fizika szakos tanára és az ELTE Fizika Tanítása Doktori Iskola hallgatója. Az ELTE-MTA Fizika Tanítása Kutatócsoport tagja.



1. ábra. A Masat-1 „repülő példánya” a start előtt.

$$a = \frac{r_{\min} + r_{\max}}{2} = R + \frac{b_{\min} + b_{\max}}{2} = 6371 + \frac{300 + 1450}{2} = 7246 \text{ km,}$$

$$c = \frac{r_{\max} - r_{\min}}{2} = \frac{b_{\max} - b_{\min}}{2} = \frac{1450 - 300}{2} = 575 \text{ km,}$$

$$e = \frac{c}{a} = \frac{575}{7246} = 0,079,$$

$$b = \sqrt{a^2 - c^2} = \sqrt{7246^2 - 575^2} = 7223 \text{ km.}$$

Kepler III. törvénye,

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(M + m)}{4\pi^2}$$

segítségével számíthatjuk ki a keringési időt. Tekintettel a Masat-1 mindössze $m = 1$ kg-os tömegére, a számítás során ettől a tömegtől eltekinthetünk. Szerecsés, ha minél több olyan feladattal találkozunk a diákok, amelyben előkerül az összemérhetőség, illetve összemérhetetlenség fogalma, és megbeszéljük, hogy mikor lehet például elhagyni egy tagot. A G gravitációs állandó értéke: $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, a

Föld M tömege $5,97 \cdot 10^{24}$ kg. Így a Masat–1 keringési ideje:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{G(M+m)}} \approx 2\pi a \sqrt{\frac{a}{GM}} =$$

$$= 6,28 \cdot 7246 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{\frac{7246 \cdot 10^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24}}} =$$

$$= 6,14 \cdot 10^3 \text{ s} \approx 102 \text{ min.}$$

Mozgása során előforduló legnagyobb és legkisebb sebességet a földközeli és földtávoli pontokban éri el, és ezeket az alábbi összefüggés alapján lehet kiszámítani:

$$v^2 = GM \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right), \text{ ahol}$$

$$GM = 6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24} = 3,98 \cdot 10^{14}, \text{ így}$$

$$v_{\text{közeli}} = \sqrt{3,98 \cdot 10^{14} \cdot \left(\frac{2}{6371 + 300} - \frac{1}{7246} \right)} \cdot 10^{-3} =$$

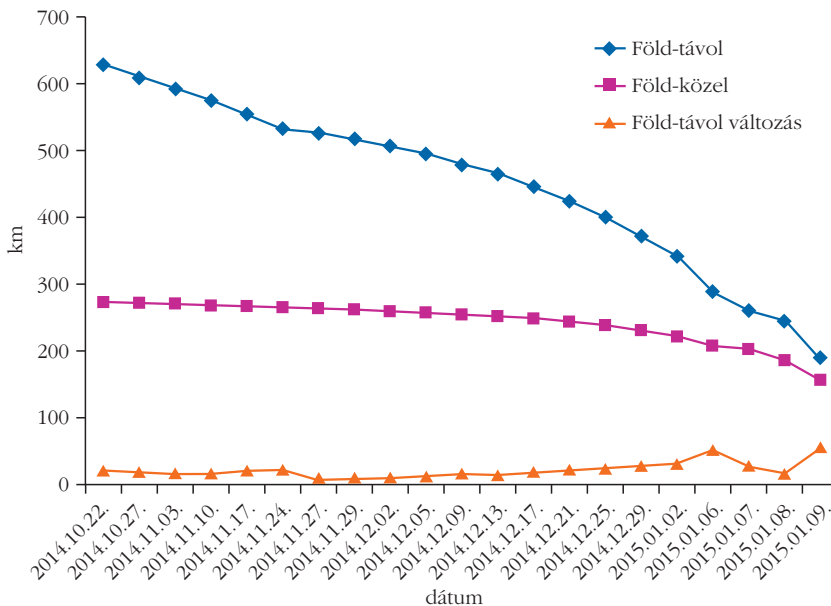
$$= 0,13 \cdot 10^5 = 13000 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right),$$

$$v_{\text{távoli}} = \sqrt{3,98 \cdot 10^{14} \cdot \left(\frac{2}{6371 + 1450} - \frac{1}{7246} \right)} \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,068 \cdot 10^5 = 6800 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}} \right).$$

Ezek után érdekes elemezni, miként változott a Masat–1 pályája az utolsó időszakban. A 2. ábrán megfigyelhető, hogy a Masat–1 életének utolsó pár

2. ábra. A Masat–1 pályája (saját szerkesztés <http://www.ha5mrc.hu/hamsat/sats.html> alapján).



hónapjában pályájának földtávoli pontja fokozatosan közelebb került a felszínhez, míg a földközeli pont alig változik, így pályának alakja egyre inkább körhöz közelített.

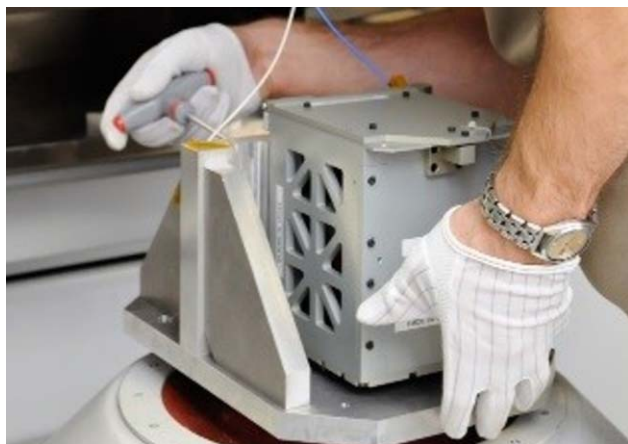
Mechanika: sűrűség, rezgések

A mechanika témakörében foglalkozunk a sűrűség fogalmával. A Masat–1 képét kivetítve, tömegét és méretét ismertetve, megkérdezhetjük sűrűségét. Igazából itt nincs szükség számolásra, hiszen azonnal adódik, hogy a víz sűrűségével egyező értéket kapunk. Itt tisztázhatjuk az átlagsűrűség fogalmát. Továbbfűzve az előbbi feladatot, elmondhatjuk, hogy a Masat–1 borító lemezét 1 mm vastag speciális repülőgép-alumíniumból készítették, így újabb feladatot adhatunk fel a diákoknak, amelyben a kocka méretének, illetve a lemez vastagságának figyelembevételével kiszámoltathatjuk a borításhoz felhasznált alumínium tömegét. A számítás során a $m = \rho V$ összefüggést alkalmazva a számítás eredményeként 162 gramot kapunk. Az alumínium sűrűségét a függvénytáblázatból véve utalhatunk arra, hogy számításunk hozzávetőleges, hiszen nem vettük figyelembe, hogy itt egy speciális repülőgép-alumíniumról van szó.

A rezgések tárgyalásakor érdemes felhívni a figyelmet, hogy a valóságban a mechanikai rezgések túlnyomórészt nem tisztán harmonikus rezgések. Például a Masat–1 a rakétában, a startnál és pályára állítása során igen komoly, többnyire szabálytalan rezgéseknek volt kitéve. Éppen ezért a minősítési eljárások során rázópadon tesztelték (3. ábra), hogy az alkatrészek kibírják-e azokat az extrém körülményeket, amelyek a rakétában az út során kialakulnak. A rázópadon a tesztelést a Vega hordozórakéta profiljának megfelelő paramétereket beállítva végezték.

Elektrosztatika

Az elektrosztatikában hangsúlyos szerepe van a Faraday-kalitkának, illetve a hozzáfűzhető jelenségeknek. A Masat–1 földi vezérlőállomásának átalakításának bemutatása kiváló példa a gyakorlati életben történő alkalmazásra. A távolság az antennák és a vezérlőállomás berendezései között eredetileg 40 m volt. Így, amikor 2012 nyarán villámcsapás érte az antennákat, amelynek során az antennarendszer egynegyede tönkrement és az antennarendszer használhatatlanná vált, a nagy távolság miatt nem kellett félni attól, hogy a műszerek is tönkremennek. Egy elkerülhetetlen költözés miatt azonban a berendezéseket közel helyezték az antennákhoz. Ezért nagy



3. ábra. Rázópad a Masat-1 vizsgálatához [1].



4. ábra. A vezérlőállomást védő Faraday-kalitka építése [1].

figyelmet kellett fordítani annak a végiggondolására, hogy egy esetleges újabb villámcsapás ne tegye tönkre a beltéri egységeket is, sőt egy esetleges tragikus baleset is bekövetkezhetett volna a nagy áramerősség (30-50 ezer amper) következtében. Emiatt a berendezéseket tartalmazó helyiséget leárnyékolták, azaz létrehoztak egy Faraday-kalitkát. A Faraday-kalitkát lehet lemezes borítással is kialakítani, de – mint azt jó néhány erre vonatkozó oktató videóban is látni – meg lehet oldani sűrű fémháló alkalmazásával is. Itt is ezt a módszert alkalmazták. A kalitkához 5×5 cm-es 6 mm vastag acélhálót használtak (4. ábra). Természetesen akkor beszélhetünk Faraday-kalitkáról, ha az ablakokat is berácsozzák és az ajtók fémborításúak. Igen ám, de a Faraday-kalitka alkalmazása maga után vonta, hogy a helyiségbe elektromos áram alatt levő vezetékeket nem lehet bevinni. Ilyen módon tehát csak a kikapcsolt berendezéseket lehet a villámcsapástól megvédeni. Másképpen fogalmazva, csak viharmentes, villámmentes időben szabad ezeket a beltéri egységeket használni. Miután a műhold vezérléséhez folyamatos üzemre van szükség, így e problémára megoldást kellett találni. A tetőn úgynevezett rack szekrényeket alakítottak ki, amelyek igazából egy olyan automatizált állomást alkotnak, ahol emberek nem tartózkodnak. Ahhoz, hogy ez az automatizált és távvezérelt állomás független lehessen az épület elektromos hálózatától, négy napelemtábla segítségével önálló energiaellátó rendszert alakítottak ki [1].

Energia

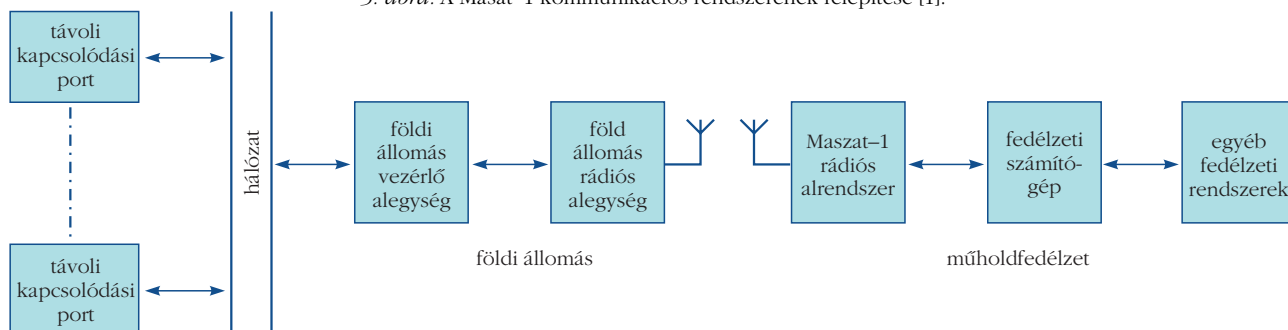
A Masat-1-nél a napelemek mellett szükség volt egy másodlagos energiaellátó rendszerre is, ami egy lítiumion akkumulátor, ez tette ki a kocka térfogatának egyharmad részét és annak tömegében is nagy arányt képviselt. Segítségével volt biztosítva a műhold energiaellátása olyankor is, amikor az a Föld árnyékos oldalán haladt. Az energia szétosztását a fedélzeti számítógép vezérelte.

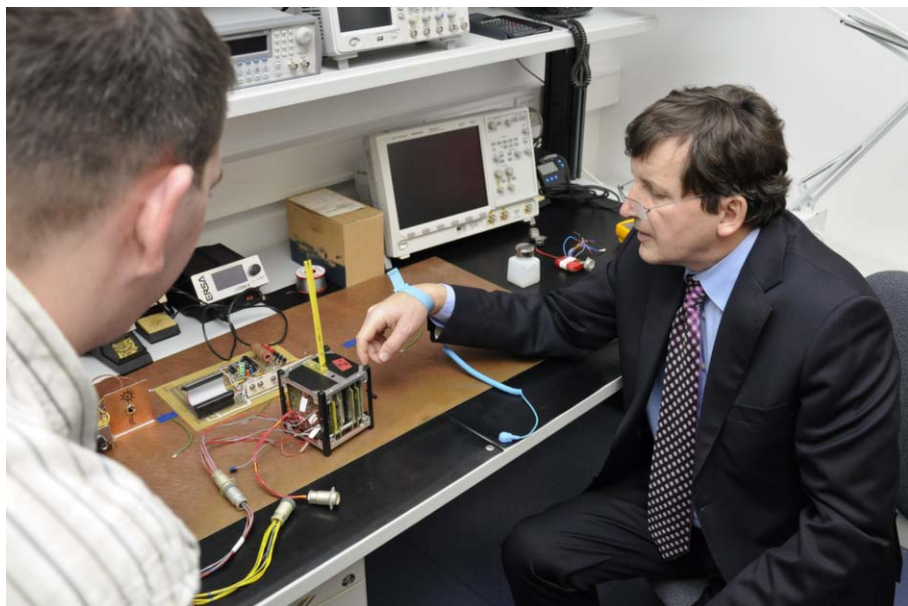
Megbeszélhetjük, hogy a Li-ion akkumulátor az akkumulátortípusok közül az egyik legdinamikusabban fejlődő típus, nevét onnan kapta, hogy benne a lítiumionok biztosítják a töltéstárolást. Egyre szélesebb körben alkalmazzák az űrparban [2].

Félvezetők

A félvezetők témakörében megemlítjük a napelemeket, amelyek jelentősége nem csak a Földön említésre méltó, hanem az űrben is. Az űreszközök esetében meghatározó tényező a Nap sugárzásából származó energia, amelyet napelemek segítségével alakítanak át elektromos energiává. A Masat-1 esetében a kocka mind a hat oldalán elhelyeztek napelemet, ez volt az elsődleges energiaforrás. Elmondhatjuk, hogy szigorú nemzetközi előírások szabályozzák, milyen lehet egy műhold elsődleges energiaforrása. A Masat-1 esetében is úgynevezett űrminősített napelemekről beszél-

5. ábra. A Masat-1 kommunikációs rendszerének felépítése [1].





MO-72, jelezve ezzel, hogy a Masat-1 a világon a 72-es számú rádióamatőr műhold. Az elsőt 1961-ben magánpénzből bocsátották fel.

Az OSCAR mozaikszó jelentése angolul: *Orbiting Satellite Carrying Amateur Radio* [3]. A megadott hivatkozásnál el lehet olvasni az OSCAR szám kiadásának feltételeit.

Külön szót érdemel a Masat-1 antennája, amely nem űrminősített anyagból készült, de ennek ellenére kifogástalanul működött. Az antenna egy – minden barkácsboltban kapható – fém mérőszalag 17 cm-es darabja. Előzetesen természetesen tesztelték, és tapasztalták a tervezők, hogy ez a fém mérőszalag tökéletesen működik űrbeli körülmények között is.

6. ábra. 2011. május 30. Charles Simonyi, kétszeres űrhajós-úrturista a Masat-1 mérnöki példánya fölött beszélget Marosy Gáborral, az űreszköz egyik alkotójával (fotó: Czifra Dávid, forrás: Index).

hetünk. Megemlíthetjük, hogy egyedül ezek voltak az első magyar műhold nem magyar gyártású alkatrészei. Érdekességképpen megjegyezhetjük, hogy a napelemeket a Budapesti Operettszínház színpadán a színház erős reflektoraival tesztelték.

Elektromágneses hullámok

Az elektromágneses hullámok gyakorlati alkalmazásánál nagy figyelmet érdemelnek a műholdak. Minden műholdnak – ha lehet ilyet mondani – a lelke a távérzékelés, amely az általa észlelt, illetve kibocsátott elektromágneses hullámok érzékelését foglalja magában. A Masat-1 esetében ezt a kommunikációs alrendszer testesíti meg, amelyből a többi létfontosságú alrendszerhez hasonlóan – üzembiztonsági okokból – kettő volt. Tömege 75 g, működési hőmérsékleti tartománya $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -tól $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ig terjedt.

Nemzetközi frekvenciaengedélyezési okok miatt a műhold két egymástól független frekvencián üzemelt: a 437 és a 145 MHz-es rádióamatőr frekvenciákon. Ennek következtében a budapesti irányító központ folyamatosan megkapta a Masat-1 jeleit, mert az észlelt jeleket a rádióamatőrök világszerte az ingyen letölthető szoftver segítségével továbbították a központnak. Érdekességképpen elmondhatjuk, hogy felbocsátása után 3 nappal megkapta az OSCAR számot:

sen működik űrbeli körülmények között is. A műszaki leírásból megtudhatjuk, hogy a CubeSat típusú űreszközökből kinyúló fedélzeti eszközökre is szigorú nemzetközi előírások vonatkoznak, és különböző teszteknek kell megfelelniük. Adódik egy újabb egyszerű számítási feladat, ha 437 MHz a rádióvevő frekvenciája, akkor ez a 17 cm a hullámhossz hányadrészének felel meg? Tekintettel arra, hogy ismerjük az elektromágneses hullámok terjedési sebességét, így a $c = \lambda f$ összefüggést alkalmazva megkapjuk, hogy az antenna megközelítően a hullámhossz negyede. A műszaki adatok leírásánál olvashatjuk, hogy a Doppler-eltolódás értéke $\pm 10\text{ kHz}$ [3].

A fentiekből látható, hogy tanításunk során egy-egy konkrét műszaki alkotás is sok-sok hivatkozási, alkalmazási lehetőséget rejthet magában.

Irodalom

1. http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2012_cikkek/54_Dudas_Levente-Varga_Lajos.pdf
2. <http://cubesat.bme.hu/projektek/masat-1/muszaki-bemutatas/>
3. <https://www.amsat.org/?s=Masat>
4. K. Woellert, P. Ehrenfreund, A. J. Ricco, H. Hertzfeld: Cubesats: Cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations. *Adv. Space Res.* 47 (2011) 663–684.
5. A. Komáromi: With space research for more lovable physics classes, In A. Király, T. Tél (ed.): Proceedings of the International Conference Teaching Physics Innovately. *PARRISE TPI-15*, 17–19. Aug. 2015, ELTE Budapest (2016) 157–162., http://parrise.elte.hu/tpi-15/papers/Proceedings_of_TPI_15.pdf



**Az Eötvös Társulat
főnt van a facebook -on!**



EGY IGAZ TANÁR – GRUIZ MÁRTON (1972–2017)

„Senki sem különálló sziget; minden ember a kontinens része, a szárazföld egy darabja; ha egy göröngyöt mos el a tenger, Európa lesz kevesebb, éppúgy, mintha egy hegyfokot mosna el, vagy barátaid házát, vagy a te birtokod; minden halállal én leszek kevesebb, mert egy vagyok az emberiséggel; ezért hát sose kérdezd, kiért szól a harang: érted szól.”

John Donne (1572–1631)

Gruiz Mártonnal közvetlen munkatársamat vesztettem el hirtelen, akivel két évtizede bensőséges munkakapcsolatban voltunk. Azok számára, akik személyesen nem ismerték, munkásságát különleges megvilágításba helyezi az a tény, hogy kamaszkora óta mozgássérültként élt. Ezzel mások számára is példát mutatott küzdeni tudásból. Csofálatra méltóan önálló életet tudott megvalósítani, s a hétköznapi nehézségei ellenére tanári és tudományos munkának szentelte életét.

Már egyetemi hallgatóként kitűnő és gondolkodásával, olyan valaki volt, akit a kutatási témák is érdekeltek. Alapos számítógépes, informatikai ismeretei közrejátszhattak abban, hogy érdeklődést mutatott kutatási területem, a kaotikus jelenségek vizsgálata iránt. Leendő fizikatanárként is elsődlegesen az vezette, hogyan lehet ezt a szokatlan és nehéz témát tanár kollégák és diákok számára hozzáférhetővé tenni. Sikeres szakdolgozata után elhatároztuk, hogy új speciális előadást indítunk a Mártonnál fiatalabb matematika-fizika tanárszakos hallgatók számára *Kaotikus mechanika* címmel. Ezt a két féléves kurzust több éven át tartottuk, s az órákon rendszerint mindketten ott voltunk, akármelyikünk tartotta is éppen. A tapasztalatokat utána ketten megbeszéltük, és amit hasznosnak találtunk, beépítettük a következő év anyagába. Bevezettük azt, hogy a vizsga nem tételes felelésből áll, hanem a hallgató által készített számítógépes program lefutásából, amely a káosz tulajdonságait mutatja be az általa választott fizikai rendszerben. Ezen tapasztalatok birtokában kezdtük el egy magyar nyelvű alsóéves egyetemi hallgatóknak és tanároknak szóló tankönyv írását. Már a kilencvenes évek elején megfogalmazódott bennem, hogy ez szükséges lenne, de megfelelő munkatárs, azaz Márton megtalálása előtt nem mertem belevágni. A *Kaotikus dinamika* tankönyv 2002-ben jelent meg, s utána felmerült egy angol változat lehetősége. A *Chaotic Dynamics*, amelyet több új fejezettel tettünk meg teljesebbé, 2006-ban meg is jelent.

Mindkét könyvre, és minden közös írásunkra is igaz, hogy nem volt bennük egyetlen gondolatmenet, szó, képlet, ábra, feladat, amelyet többszörösen ne beszél-

tünk volna át. Márton volt az, aki érzéke és tanári képzettsége alapján is pontosan látta, mi az, ami tanárok számára vonzó lehet, vagyis még nem túl elvont vagy bonyolult. Így, néha többszörös nekifutás után, elérte, hogy amit el szeretnénk volna mondani, az a legegyszerűbben és a leginkább odaillő módon kerüljön bemutatásra, az általa készített rendkívül precíz ábrákkal illusztrálva. Ezt a körülményt, odaadó tanítási módszert Márton egyéniségéhez tartozott, magántanítványai esetén is alkalmazta. Örömmel vállalt ismeretterjesztő előadásokat a KöMaL ankétokon, s emlékezetes az *Atomoktól a csillagokig* sorozatban tartott előadása. Szívesen segített bárkinek, aki hozzá fordult káosszal kapcsolatos kérdésekkel. Ahol pedig a tanítás kapcsán felmerült probléma mélyebb megismerést igényelt, szakterületi kutatókba is bekapcsolódott, külföldi társszerzőkkel, s nívós folyóiratokban publikált.

Doktori fokozatát a két könyv alapján nyerte el. Ezután természetesen adódott, hogy a 2007-ben indult és aktív tanár kollégáknak szóló Fizika tanítása doktori programnak is előadója legyen a káosz tanítása témában. Utolsó előadását, amely különösen jól sikerült, ez év május 10-én tartotta. Márton, aki balesete miatt sohasem taníthatott iskolában,

a kaotikus jelenségek szakértőjeként aktívan részt vett a tanárképzésben és a tanári PhD-képzésben, s doktori témavezetést is vállalt.

A halála előtt folytatott telefonbeszélgetéseink fő témája az volt, hogyan lehet a következő PhD előadásokat még inkább vonzóvá tenni. Pontos terveket is megfogalmaztunk, és hogy ennek kapcsán június végen személyesen is találkozunk. Sajnos erre már nem kerülhetett sor.

Márton műveltsége nagyon sokoldalú volt: minőségi tudásra törekedett. Gyakran beszélünk zenéről, társadalmi kérdésekről, konyhaművészetről, ő indított el a borok felfedezése irányába, de kaptam saját készítésű limoncellójából, kenyeréből, süteményéből is.

Márton váratlan elvesztése kapcsán most mélyen átérzem a fiatal koromban *Hemingway* révén megismert és fent idézett gondolatot: „a harang érted szól”. Halála veszteség a magyar fizikatanár-társadalom számára is.

Tél Tamás

Gruiz Márton publikációi

Gruiz Márton: *A vízszintesen gerjesztett inga kaotikus mozgása*. Diákköri dolgozat, ELTE TTK, 1997.

Gruiz Márton: A kaotikus mechanika kapcsolata Platónnal és a levelestésztával. *Természet Világa* 129/9 (1998. szeptember) 389–393.

- Gruiz Márton: *Pörgettyűk kaotikus mozgása*. Szakdolgozat, ELTE TTK, 2000.
- Tél Tamás, Gruiz Márton: Mi a káosz? (És mi nem az) *Természet Világa* 133/7(2002. július) 296–298.
- Tél Tamás, Gruiz Márton: *Kaotikus Dinamika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 2002, 366 old.
- Gruiz Márton, Tél Tamás: A káosz. *Fizikai Szemle* 55/5 (2005. május) 191–193.
- Gruiz Márton, Tél Tamás: Káosrról, kicsit bővebben. *Fizikai Szemle* 55/6 (2005. június) 218–220.
- Gruiz Márton, Radnai Gyula, Tél Tamás: A rugalmas fonalú ingáról mai szemmel – Vermes Miklós emlékezetére. *Fizikai Szemle* 56/10 (2006. október) 337–343.
- Tamás Tél, Márton Gruiz: *Chaotic Dynamics, an Introduction Based on Classical Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge, 2006, 415 old.
- T. Tél, Y-C. Lai, M. Gruiz: Noise-induced chaos: a consequence of long deterministic transients. *Int. J. Chaos Bif.* 18(2008) 509–520.
- Gruiz Márton: *A nemlineáris jelenségek és a káosz oktatásának bevezetése az egyetemi alapkollégiumokba és a középiskolába*. ELTE Pedagógiai Kar, PhD dolgozat, 2009 (témavezetők: Tasnádi Péter, Tél Tamás).
- Gruiz Márton: Érdekes kaotikus mechanikai rendszerek. in: *Fizika-tanítás tartalmasan és érdekesen*, szerk.: Juhász A., Tél T., ELTE Fizikai Doktori Iskola, 2010, 311–316.
- Gruiz Márton: A káosz fizikája. Előadás az *Atomoktól a csillagokig* sorozatban, 2010. január 14., <http://www.atomcsill.elte.hu/program/kivonat/2009-2010/7> (itt az előadás videófelvétele is megtalálható)
- A. Motter, M. Gruiz, G. Károlyi, T. Tél.: Doubly transient chaos: the generic form of chaos in autonomous dissipative system. *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 194101(1–5)
- Gruiz Márton: Káosz mint komplexitás. A mágneses inga újra a káoszkutatás frontvonalában. *Természet Világa* 2013/II külön-szám, 8–14.
- Gruiz Márton, Meszéna Tamás, Tél Tamás: Kaotikus vagy csak összetett? – Labdák pattogása lépcsőn. *Fizikai Szemle* 66/4 (2016. április) 128–136.
- M. Gruiz, T. Meszéna, T. Tél.: Chaotic or just complicated? Ball bouncing down the stairs. *Eur. J. Phys* 38 (2017) 055003(15)

HÍREK – ESEMÉNYEK

KITÜNTETÉSEK AUGUSZTUS 20-A ALKALMÁBÓL

Magyar Érdemrend Középkereszt polgári tagozat kitüntetést vehetett át

Sólyom Jenő, Széchenyi-díjas és állami díjas fizikus, a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont és az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Karának professor emeritusa, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöke.

Magyar Érdemrend Tisztikereszt polgári tagozat kitüntetésben részesült

Staar Gyula, a *Természet Világa* tudományos ismeretterjesztő folyóirat nyugalmazott főszerkesztője,

Szabados László, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetének kutató professor emeritusa, a *Fizikai Szemle* szerkesztőbizottságának tagja, folyóiratunk gyakori szerzője.

Magyar Érdemrend Lovagkereszt polgári tagozat kitüntetést vehetett át

Dávid Gábor István, a Stony Brook University kutatóprofesszora, a Debreceni Egyetem vendégprofesszora, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont külső munkatársa.

Magyar Arany Érdemkereszt polgári tagozat kitüntetést kapott

Andrási Andor, az MTA Energiatudományi Kutatóközpontjának nyugalmazott tudományos osztályvezetője.

Magyar Ezüst Érdemkereszt polgári tagozat kitüntetésben részesült

Cserháti András László, a Magyar Villamos Művek Paksi Atomerőmű Zrt. műszaki főszakértője.

Gratulálunk a kitüntetetteknek!

Országos csillagászati verseny és diákolimpiai válogató 2017/18

A 2018-as Nemzetközi Csillagászati és Asztrofizikai Diákolimpia magyar keretének kialakítására válogatóversenyt rendez a magyar munkacsoport a hazai és határon túli magyar ajkú, a 2017/2018. tanévben középiskolába járó diákok számára. **Első forduló már 2017. október 3-án!**

A részletek letölthetők a *Fizikai Szemle* honlapjáról, e szám ingyenesen elérhető cikkeinél.

További információk, hasznos tudnivalók a <http://www.bajaobs.hu/IOAA> honlapon.

Mindenkinek minél nagyobb lelkesedésű részvételt és sikeres versenyzést kívánunk!

XVI. **mnt** Nukleáris Technikai

ISSN 0163-25-7
9 770015 323009 17009

Sz i m p ó z i u m

Nukleáris tájékoztatás és tájékozódás!

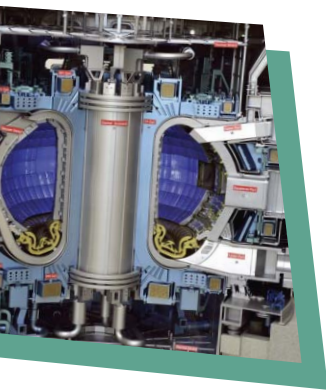
Fórumot biztosítunk a szakembereknek, kutatóknak, a szakma ifjabb művelőinek a műszaki- és tudományos eszmecserére, kapcsolatépítésre.

KIEMELT TÉMÁINK:

1. radioaktív hulladékok és üzemanyagciklus zárása,
2. nemzeti Nukleáris Kutatási Program újabb eredményei,
3. az új paksi blokkokhoz kapcsolódó előadások.

de várjuk az előadásokat az alábbi témakörökhöz kapcsolódóan is:

nukleáris technikák || új generációs reaktorok || fúziós technológia ||
vegyészet || hulladékkezelés || leszerelés és transzmutáció || reaktorfizika
|| termohidraulika || reaktoranyagok || nukleáris biztonság || informatikai
biztonság || sugár- és környezetvédelem || üzemeltetés és hatósági szabályozás
|| oktatás || PR és HR || új atomerőművi blokkok építése.



Idén is lehet pályázni a legjobb **poszter** díjra!

November 23-án, az A38 Hajó Éttermében vacsorára várjuk a résztvevőket.

November 24-én Kerekasztal beszélgetésre hívunk, illetve sajtótájékoztatót tartunk.

Minden érdeklődőt szeretettel várunk a XVI. Nukleáris Technikai Szimpóziumon!

Regisztrálni már most lehet: www.nuklearis.hu
(minden egyéb adat, információ a honlapon megtalálható)

2017. NOVEMBER
23-24.

GELLÉRT HOTEL, 1114 Budapest, Szent Gellért tér 2.

