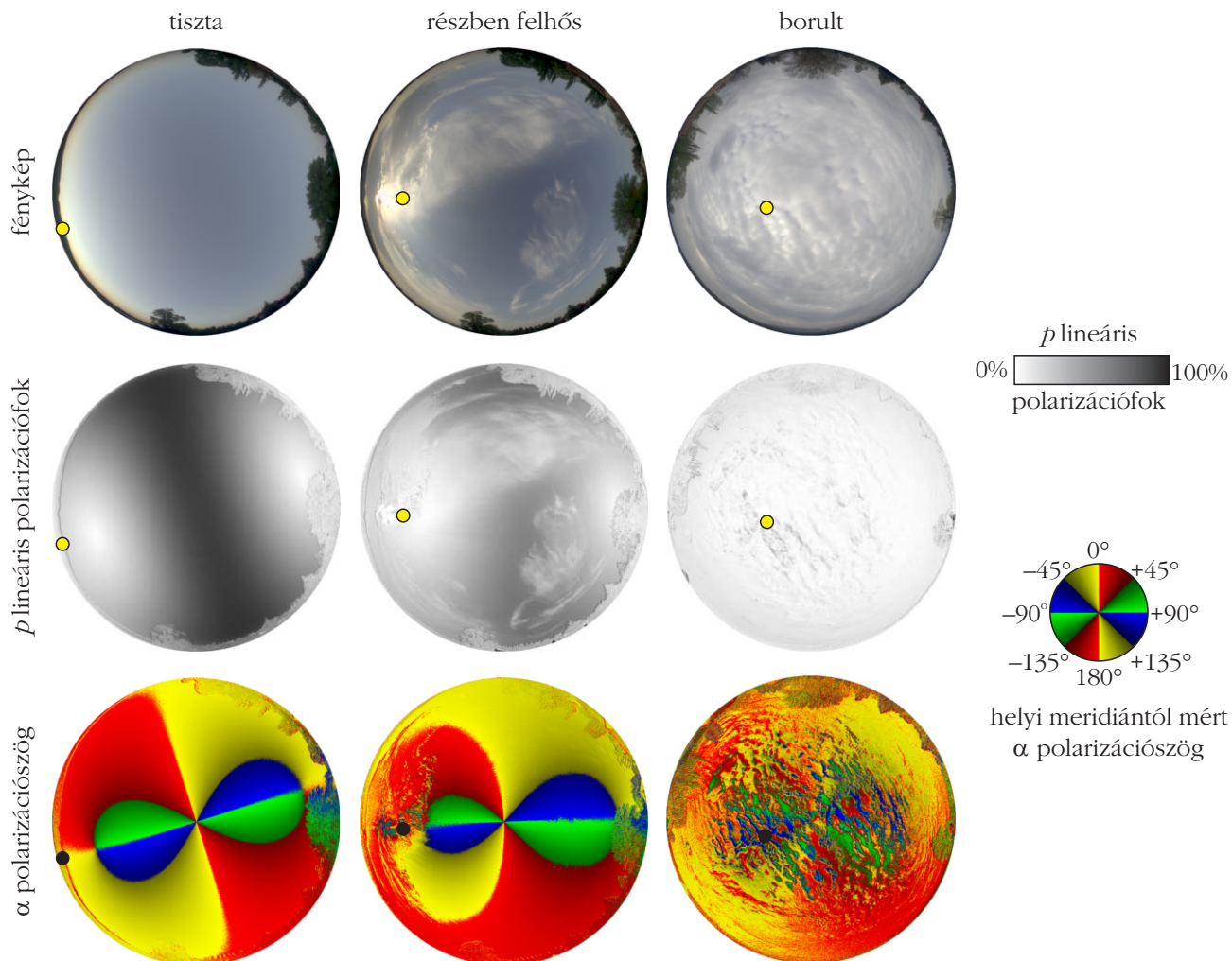


fizikai szemle

2018/2



3. ábra. Tiszta, részben felhős és borult ég fényképe, valamint a spektrum zöld (550 nm) tartományában 180° látószögű képalkotó polarimetriával mért p polarizációfokának és α polarizációs szögének mintázata a sárga vagy fekete pontokkal jelölt Nap horizont fölötti $\theta_N = 0^\circ$ (tiszta), $\theta_N = 26^\circ$ (részben felhős) és $\theta_N = 58^\circ$ (borult) szögtávolságai mellett. (Lásd Horváth Gábor és munkatársai írását a 39–44. oldalakon!)

A 2018. évi 61. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató

A 2018. évi ankétot március 14-től 17-ig Szegeden, a Tudományegyetem Fizikai Intézetében és az SZTE Gyakorló Iskolájában rendezzük meg.

Témák: fény – lézerek – csillagok.
Állandóan frissülő részletek a Társulat www.elft.hu honlapján.

A rendezvény 30 órás akkreditált pedagógus-továbbképzésnek minősül.

Előadások március 14–17-ig, műhelyfoglalkozások és eszközkiállítás március 15–16-án, kulturális program március 16-án, ünnepélyes díjátadások március 17-én.

ELFT Tanári Szakcsoportjainak vezetőiségei



2 m

4 m



A TÁRSULAT 2018. ÉVI RENDEZVÉNYEI

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2018-ban számos programot valósít meg. A legfontosabb rendezvényekről adok rövid, felsorolásszerű tájékoztatást.

A 127 éves múlttal rendelkező Társulat egyik legfontosabb feladata a tehetség-gondozásban fontos szerepet játszó tanulmányi versenyek, rendezvények, tanár-továbbképzések szervezése, lebonyolításuk támogatása. Társulatunk minden évben az általános és középiskolában oktató pedagógusok részére akkreditált továbbképzést szervez. Idén március 14-től 17-ig, Szegeden lesz a **61. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató**.

A Társulat – a National Instruments Hungary Kft.-vel – **myDAQ** pályázatot hirdetett az általános és középfokú oktatásban résztvevő fizikatanároknak azért, hogy az NI myDAQ eszközt minél szélesebb körben megismertesse, oktatási alkalmazásait elősegítse. Ennek érdekében a myDAQ eszközt és a hozzá tartozó LabVIEW szoftvert alkalmazó iskolai kísérletek kidolgozását vártuk – 2018. január 19-ig – a pályázóktól. Az ünnepélyes díjátadó március 17-én, a Fizikatanári Ankéton, Szegeden lesz.

Az ELFT Sugárvédelmi Szakcsoportja ebben az évben április 17–19. rendezi meg a **XLIII. Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyamot** Hajdúszoboszlón, a Hunguest Hotel Béke szállodában.

Idén is meghirdetjük **A fizika mindenkié 4.0** országos rendezvényünket. Az esemény számos, helyi kezdeményezésű program sokszínű együttese lesz, a kollégák kérésére idén is két naposra tervezzük: 2018. április 20–21.

Ifjú Kutatók Nemzetközi Konferenciája versenyre minden évben választunk diákokat. A végleges névsor január 31-én, a hazai válogatóversenyen alakult ki. Ők a nemzetközi versenyre Szerbiába április 19–26. között fognak elutazni.

Az **Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye** (IYPT) az egyik legrangosabb nemzetközi fizikaverseny, amelyen a diákok csapatban, valódi kísérleti és elméleti kutatómunkát végeznek, előre megadott fizikai problémák kapcsán. 2018 áprilisában, a válogató verseny második, szóbeli fordulóján kerülnek kiválasztásra az Ifjú Fizikusok Ausztriai Versenyén és az IYPT-n résztvevők. 2018. július 19–26. között Kínában rendezik meg a 31. IYPT-t.

A Társulat idén május 12-én, szombaton tartja éves **Küldöttközgyűlését**.

A 2017–2018-as tanévben 28. alkalommal hirdetjük meg az **Öveges József Kárpát-medencei Fizikaversenyt**. Az 1. (iskolai) fordulót (2018. február 6.) és a 2. (megyei/fővárosi) fordulót (2018. március 20.) követően május 25–27. között Győrben lesz a döntő. A háromfordulós versengésben valamennyi megye részt vesz, és a határon túli meghívott versenyzők is bekapcsolódnak a megmérettetésbe.

Az évente megrendezésre kerülő **Fizikus Doktoranduszok Országos Konferenciája** (2018. június 14–17. Balatonfenyves) a doktori képzésben résztvevő hallgatóknak biztosít lehetőséget, hogy megismerjék egymás munkáját, kitekintést nyerjenek a fizika más területeire, és megismerjék a doktori képzésbe bekapcsolódó hazai vállalatoknál és kutatóintézetekben folyó tevékenységet és kutatási irányzatokat.

A Kutatók Éjszakája keretében szeptemberben megrendezzük az **Öveges Tanár úr utódai – Fizikai kísérletek nem csak tudósoknak** eseményünket.

A **Science on Stage**, azaz a **Színpadon a Természettudomány** egy olyan nemzetközi fesztivál, amelyen a tanárok megoszthatják módszereiket, kísérleteiket, tapasztalataikat. Minden résztvevő ország megszervezi a találkozó nemzeti fordulóját, ahol kiválogatják a küldötteket. Idén októberben ismét kiválogatjuk a legjobb projektekből a 2019-es nemzetközi rendezvény résztvevői gárdáját.

Az adott évben vagy a következő évben érettségizőknek kiírt **Eötvös Loránd Fizikaversenyt** minden évben meghirdetjük, az idei versenyt 2018. október 12-én tervezzük megrendezni.

Az év egyik kiemelkedő eseménye lesz a Trefort-kertben elhelyezendő **Eötvös-empléktábla** felavatása 2018. október 12-én, amit összekötünk majd az EPS 50. évfordulójának megünneplésével.

A rendezvényekre mindenkit szeretettel várunk.


Groma István

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:
Lendvai János

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

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

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

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

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



A címlapon:

Körpanorámakép egy töről, erdős partjáról és a tiszta égboltról naplementekor. Középpont jól látszik az észak-dél irányban, a zeniten át húzódó, sötétkék égboltsáv – ahonnan függőlegesen poláros fény esik a tótükrökre – és az alatta lévő vízfelszínen kialakuló Brewster-féle sötét folt.

A polárszűrő nélkül készült kép függőlegesen majdnem háromszorosán nyújtott. Horváth Gábor és munkatársai írásához. (John Wood felvétele, <https://www.360cities.net/image/pro/twilight-at-white-pond>).

TARTALOM

A Társulat 2018. évi rendezvényei (<i>Groma István</i>)	37
<i>Horváth Gábor, Takács Péter, Barta András, David Pye</i> : A vízfelszín Brewster-féle sötét foltjának polarizáció-optikája – 1. rész <i>Egy szabad szemmel is sokszor észlelhető optikai jelenség részletes elméleti tárgyalása és modellezése</i>	39
<i>Cserháti Csaba, Parditka Bence, Tomán János, Csik Attila, Erdélyi Zoltán</i> : Szilárdtest-reakció nanoskálán <i>Szilárd balmazállapotú anyagokban lejátszódó csíráképződési folyamatokban, amikor a fázishatár közelében éles a koncentrációváltozás, akkor az átalakulási folyamatok leírásában az atomi szintű kinetikát is figyelembe kell venni</i>	45
<i>Radnóti Katalin</i> : Látogatás a csernobili atomerőműben – 2. rész <i>Helyszíni tapasztalatok a katasztrófa után három évtizeddel a lezárt terület belsejében</i>	51
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Gombkötő Balázs, Bokor Nándor</i> : Holográfia a tanteremben <i>Akár egy középiskolai tanteremben is felépíthető transzmissziós és reflexiós holografikus elrendezések bemutatása</i>	56
<i>Szabó Róbert</i> : Történelmi szimuláció: a távolsági ágyúzás fizikája <i>Fizika egy történelmi esemény, az 1918. márciusában felállított német csodafegyver, a Párizs-ágyú bevetésének tárgyalásában</i>	60
<i>Gyermán György</i> : Problémaalapú tanulás egy nyertes pályázat tükrében <i>Fizika- és informatikaórákon tanultak hasznosítása számítógépvezérelt biztonsági rendszerek megtervezésére és felépítésére egy településen</i>	65
KÖNYVESPOLC	
<i>Rajkovits Zsuzsanna</i> : Fizika az élő természetben (<i>L. J.</i>)	67
<i>Benkő József, Mizser Attila (szerk.)</i> : Meteor csillagászati évkönyv 2018 (<i>Füstöss László</i>)	69
HÍREK – ESEMÉNYEK	
<i>In memoriam Janszky József (Czitrovszky Aladár)</i>	71
<i>Utazási ösztöndíj nemzetközi Science on Stage Fesztiválon részt vett tanároknak</i>	72
<i>Az Eötvös Társulat kitüntetései és díjai – felhívás javaslatételre</i>	72
<i>The events of the Eötvös Society in 2018 (I. Groma)</i>	
<i>G. Horváth, P. Takács, A. Barta, D. Pye</i> : Polarization optics of the Brewster's dark patch visible on water surfaces – part I	
<i>Cs. Cserháti, B. Parditka, J. Tomán, A. Csik, Z. Erdélyi</i> : Solid state reactions on nano scale	
<i>K. Radnóti</i> : Excursion to the Chernobyl power plant – part II	
TEACHING PHYSICS	
<i>B. Gombkötő, N. Bokor</i> : Holography in the class room	
<i>R. Szabó</i> : Historical simulation: physics of long distance gun firing	
<i>Gy. Gyermán</i> : Problem based learning in the light of winning proposal	
BOOKS, EVENTS	

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



A VÍZFELSZÍN BREWSTER-FÉLE SÖTÉT FOLTJÁNAK POLARIZÁCIÓ-OPTIKÁJA

1. rész: elmélet, modellezés

Horváth Gábor, Takács Péter – ELTE, Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium

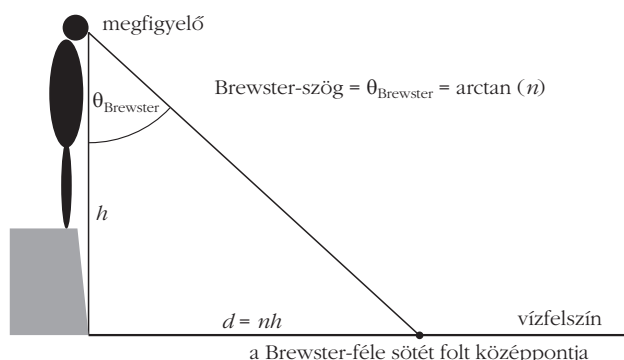
Barta András – Estrato Kutató és Fejlesztő Kft.

David Pye – Londoni Egyetem, Nagy-Britannia

Felhőtlen ég alatt napkelte vagy napnyugta közelében arccal észak vagy dél felé fordulva a függőlegetől 53°-ra nézd a víztükröt és megláthatod. Már korábban is többször észlelhetted, csak nem voltál vele tisztában, mit látsz. E cikkből megismerheted a gyakori, de csak kevesek által ismert Brewster-féle sötét folt optikáját.

A vízfelszínen látható Brewster-féle sötét folt

Fizikai optikában tanítják a felületi normálistól mért $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n)$ Brewster-féle szöget (1. ábra), amelynél egy n törésmutatójú közeg határfelületéről visszavert fénysugár merőleges a közegbe hatoló megtört sugárra. E beesési szögnél a felületre merőlegesen poláros fény nem verődik vissza, hanem behatol a közegbe, míg a felülettel párhuzamosan poláros fény egy része visszaverődik, a többi a közegbe hatol. E jelenséget a fényképészek jól ismerik és kihasználják, amikor például egy üvegvitrinben kiállított tárgyat fényképeznek és a kamera lencséje elé csavarható, forgatható lineáris polárszűrővel ki akarják iktatni az üvegről tükröződő fényt, ami zavarja a tárgyról érkező fényt. A kamera optikai tengelyét Brewster-szögben irányítják az üvegfelszínre és a polárszűrő át eresztési irányát az üvegre merőlegesre forgatják,



1. ábra. A vízfelszín Brewster-féle sötét foltjának (BSF) közepe a h szemmagasságú megfigyelőtől vízszintesen $d = h \tan \theta_{\text{Brewster}} = nh$ távolságra van, mert $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n=1,33) = 53^\circ$, ahol n a víz levegőre vonatkoztatott törésmutatója.

miáltal az üveglapról visszavert, vele párhuzamosan poláros zavaró fény teljesen kiszűrődik és tisztán láthatóvá válik az üveg mögötti céltárgy. A fotósok ugyanezen trükköt használják, amikor például a nap-sütötte növényzetet szeretnék minél zöldebbnek fényképezni. Ekkor is addig forgatják fényképezőgépük lineáris polárszűrőjét, amíg a levelekről visszavert, bizonyos polarizációirányú, a levelek saját zöld fényét elnyomó fehér napfényt ki nem szűrik. Ha valaki a levegőből fényképezi a víz alatti világot, akkor is zavaró a vízfelszínről tükröződő nap- és égfény, ami



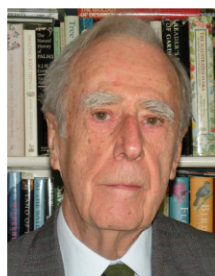
Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa.



Takács Péter a középiskolát a Debreceni Egyetem Kossuth Lajos Gyakorló Gimnáziumában végezte. BSc szakdolgozatát az ELTE-n írta a vikingek égbolt-polarizációs navigációjáról. Az ELTE végzős mesterszakos fizikus hallgatójaként diplomamunkáját a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában készíti, ahol több kutatásban is részt vesz.



Barta András az ELTE-n végzett fizikusként, majd ugyanott szerzett PhD-fokozatot biofizikából a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. A bio- és környezetoptikával kapcsolatos alap kutatásokon kívül ipari műszerek, elsősorban minőségellenőrző eszközök fejlesztésével foglalkozik az Estrato Kutató és Fejlesztő Kft. vezetőjeként. Számos kutatásfejlesztési pályázat előkészítésében és megvalósításában vett és vesz részt.

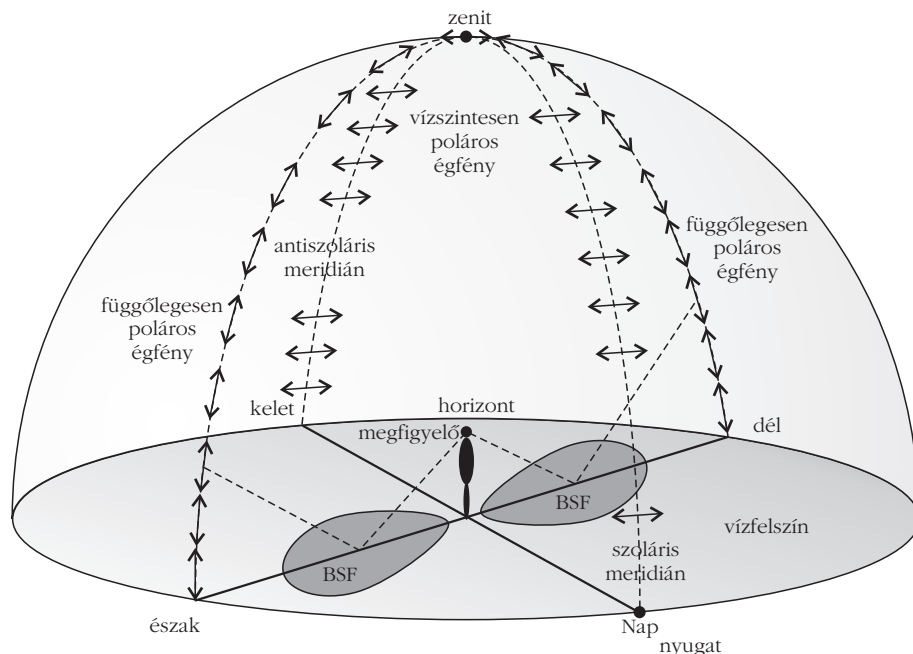


David Pye a Londoni Egyetem zoológus emeritus professzora. Fő érdeklődési területe az állatvilágban fellelhető fizikai elvek vizsgálata. Tanulmányozta az állatok ultrahangos kommunikációját, különös tekintettel a denevérek visszhangos tájékozódására és zsákmányszerzésére, majd az elektromágneses spektrum közeli ultraibolya-tartománya és a poláros fény állatvilágban játszott szerepét kutatta. A Zoological Society, Linnean Society, Institute of Physics és a Royal Institution tagja.

elnyomja a víz alól jövő fényt. Ekkor függőleges áteresztési irányú polárszűrőn át a függőlegestől Brewster-szögben nézve a vizet kiszűrhető a zavaró felszíni reflexió, miáltal a vízbe lehet nézni és tisztán látszanak a vízbeli tárgyak, növények és állatok.

A zavaró vízfelszíni tükröződések kiküszöböléséhez tehát általában lineáris polárszűrő kell. Kivételt egy esetben találunk, amikor maga a természet szolgáltat lineáris polárszűrőt a vízfelszín formájában és függőlegesen poláros beeső fényt az égből. A függőlegestől mért $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n=1,33) = 53^\circ$ Brewster-szögben (ahol n a víz törésmutatója) a vízfelszínről csak a vízszintesen polarizált fény verődik vissza, emiatt, ha függőlegesen poláros égfény esik a vízre, akkor az nem tükröződik. Mivel függőlegesen poláros fény reflektivitása csak lassan nő a Brewster-szögtől való szögeltéréssel, továbbá napnyugta és napkelte környékén a Naptól 90° -ra, a zeniten átmenő körkörös sávban közel függőlegesen polarizált az égfény, ezért tiszta ég alatt, horizontközeli (fölötti vagy alatti) Napnál egy kiterjedt, sötét folt látható a vízfelszínen, ha északra vagy délre nézünk a szoláris-antiszoláris meridiánra (a Napon és a zeniten átmenő függőleges égi főkörre) merőlegesen (2. ábra). Ekkor a függőlegesen poláros égfény nem vagy alig tükröződik a vízről a Brewster-szög közelében. Ez a *vízfelület Brewster-féle sötét foltja*. Amint a Brewster-szögtől egyre távolodunk, a tükröződő égfény fokozatosan fényesedik. A Brewster-féle sötét folt (a továbbiakban BSF) könnyen lefényképezhető és a szemfülesek néhány festményen is fölismerhetik.

Bár az égfény vízfelszínről történő visszaverődését már többen is részletesen tanulmányozták [1–8], a BSF polarizáció-optikájával korábban még nem foglalkoztak részletesen. Mint említettük, a fényképészek gyakran használnak polárszűrőt a kamerájuk előtt, hogy kiszűrjék a zavaró fénytükröződések, vagy esztétikailag javítsanak a fényképen (például sötétítsék a vízfelületet, zöldítsék a növényzetet). Azonban legtöbbször nem közlik, hogy egy adott kép elkészítésekor használtak-e polárszűrőt vagy sem. Így általában nem lehet tudni, hogy egy vízfelszínt megörökítő fotó sötét foltja valóban a BSF, vagy egy függőleges polárszűrő részlegesen/teljesen kiszűrte a vízfelszínről tükröződő vízszintesen polarizált fényt. E képeken többnyire a kamera látóiránya sem ismert a vízfelszínhez és a szoláris meridiánhoz képest, kivéve amikor a képen látható a Nap. A kamera szoláris meridiánhoz képesti látóirányára és a napmagasságra gyakran következtet-



2. ábra. A vízfelület Brewster-féle sötét foltja (BSF) kialakulásának geometriája, ha a megfigyelő északra vagy délre néz napnyugta vagy napkelte környékén, vagyis amikor a Nap közel van a horizonthoz. Kettősféjű nyilak szemléltetik az égfény polarizációirányát, ami vízszintes és függőleges a szoláris-antiszoláris meridián, illetve arra merőleges meridián mentén.

hetünk a fák és egyéb tereptárgyak árnyékából. Fák vagy épületek árnyékai bizony könnyen összekeverhetők a Brewster-féle sötét folttal. Ha egy képen az égbolt nem látszik, akkor annak jellemzői (tiszta vagy felhős) is ismeretlenek maradnak.

Tiszta ég alatt a BSF egy minden nap kétszer előforduló környezetoptikai jelenség, amit naplemente és napkelte környékén akkor észlelünk a vízfelszínen, ha északra vagy délre nézünk a szoláris meridiánra merőlegesen. Festőművészek is megörökíthetik e gyakori tümenényt tavakról vagy folyókról festett műveiken. Rengeteg festményt abból a szémszögből vizsgáltunk meg, hogy ábrázolják-e a Brewster-féle sötét foltot.

Cikkünknek három célja van: (i) Vizsgáljuk a BSF polarizáció-optikáját a napmagasság és felhőzsítság függvényében. (ii) Bemutatjuk a BSF polárszűrő nélkül készített néhány fényképét. (iii) Környezetoptikailag értelmezünk egy festményt, ami minden valószínűség szerint egy Brewster-féle sötét foltot is ábrázol. Mindezt tesszük a [9] cikkünk alapján.

Vizsgálati módszerek

A Brewster-féle sötét folt modellezése

A BSF elméleti alakjának (amikor nincsenek felhők és vízparti tereptárgyak) meghatározására a következő módszerrel éltünk: bemeneti adatként a tiszta ég $I_{\text{ég}}$ fényintenzitásának, $p_{\text{ég}}$ lineáris polarizációfokának és $\alpha_{\text{ég}}$ polarizációs szögének mintázatát vettük, amit a Berrry és munkatársai [10] által kifejlesztett modelltől számítottunk a horizonttól mért θ_N napmagasság függvényében. E modell paraméterei a következők voltak: (i) az égfény $p_{\text{max}} = 50\%$ -os maximális polari-

zációfoka 90° -ra a Naptól. (ii) A Babinet- és Brewster-féle neutrális (polarizálatlan) pontok közti szögtávolság $\Delta(\theta_N = 0^\circ) = 20^\circ$, amikor a Nap a horizonton van, és $\Delta 20^\circ$ -ról lineárisan csökken $\Delta(\theta_N = 90^\circ) = 0^\circ$ -ra, amint a horizonttól mért θ_N napmagasság 0° -ról 90° -ra nő. 180° látószögű képalkotó polarimetriával [11] mértük tiszta, részben felhős és borult égboltok $I_{\text{ég}}$, $p_{\text{ég}}$ és $\alpha_{\text{ég}}$ -mintázatait a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában (3. ábra az első belső borítón).

Az ég számított és mért $I_{\text{ég}}$, $p_{\text{ég}}$ és $\alpha_{\text{ég}}$ -mintázataiból kiszámítottuk a vízfelszínről tükröződő égfény $I_{\text{víz}}$, $p_{\text{víz}}$ és $\alpha_{\text{víz}}$ -mintázatait és a víz R reflektivitásmintázatát. A vízfelszínre beeső, lineárisan poláros, zérus cirkuláris polarizációjú égfény Stokes-vektora [2]:

$$\mathbf{S}^{\text{ég}} = I_{\text{ég}}[1, -p_{\text{ég}} \cos(2\alpha_{\text{ég}}), p_{\text{ég}} \cos(2\alpha_{\text{ég}}), 0]. \quad (1)$$

A vízfelület Mueller-mátrixa [4]:

$$\mathbf{M} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \tan^2 \theta_- \\ \sin^2 \theta_+ \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_-^2 + c_+^2 & c_-^2 - c_+^2 & 0 & 0 \\ c_-^2 - c_+^2 & c_-^2 + c_+^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2c_- c_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2c_- c_+ \end{pmatrix}, \quad (2)$$

ahol $\theta_- = \theta_b - \theta_v$ és $\theta_+ = \theta_b + \theta_v$, valamint c_- és c_+ rendre $\cos \theta_-$ és $\cos \theta_+$, továbbá θ_b és θ_v a függőlegestől mért beesési és visszaverődési szögek. A Snellius–Descartes-féle fénytörési törvény szerint:

$$\theta_v = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_b}{n}\right), \quad (3)$$

ahol $n = 1,33$ a víz törésmutatója $\lambda = 550$ nm hullámhosszon. A vízről tükrözött fény Stokes-vektora:

$$\mathbf{S}^{\text{víz}} = \mathbf{M} \mathbf{S}^{\text{ég}}, \quad (4)$$

amiből a vízfelszínről visszavert fény polarizációs paraméterei:

$$I_{\text{víz}} = S_0^{\text{víz}}, \quad (5a)$$

továbbá

$$p_{\text{víz}} = \frac{\sqrt{(S_1^{\text{víz}})^2 + (S_2^{\text{víz}})^2 + (S_3^{\text{víz}})^2}}{(S_0^{\text{víz}})^2} \approx \frac{\sqrt{(S_1^{\text{víz}})^2 + (S_2^{\text{víz}})^2}}{(S_0^{\text{víz}})^2}, \quad (5b)$$

mivel $S_3^{\text{víz}} \approx 0$ és végül

$$\alpha_{\text{víz}} = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2^{\text{víz}}}{-S_1^{\text{víz}}}\right), \quad (5c)$$

ahol $S_i^{\text{víz}}$ ($i = 0, 1, 2, 3$) a Stokes-vektor i -edik eleme. A vízfelszín $R = I_{\text{víz}}/I_{\text{ég}}$ reflektivitását képpontonként számítottuk az elméleti és mért égpolarizációs mintázatokra. Továbbá meghatároztuk a Brewster-pontot, mint a vízfelszínen lévő azon pontot, ahol az R minimális. Végül a Brewster-féle sötét foltot úgy definiáltuk, mint azon vízfelszíni pontok összességét, ahol $R \leq R^* = 2\%$.

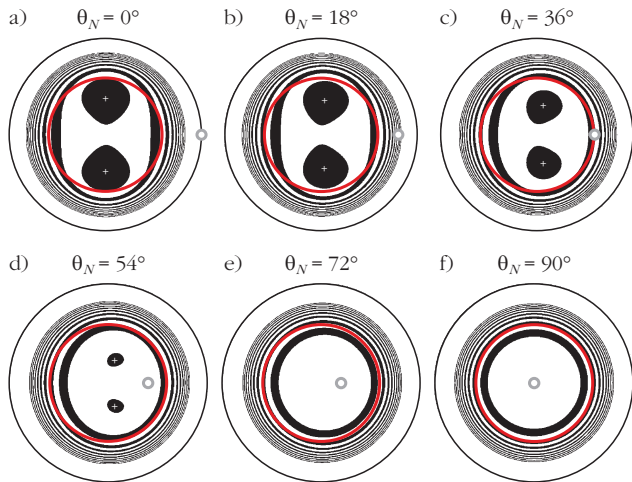
Az ég és vízfelszíni tükröződése szintetikus képeinek számítása

Az ég sima víztükrörben látható képét a következő módon állítottuk elő: 180° látószögű képalkotó polarimetriával [11] mértük az égfény $I_{\text{ég}}$, $p_{\text{ég}}$ és $\alpha_{\text{ég}}$ -mintázatát a spektrum vörös (650 nm), zöld (550 nm) és kék (450 nm) tartományában. Ezután Stokes–Mueller-formalizmussal [2, 4] kiszámítottuk az égbolt vízfelszíni tükrképének $I_{\text{víz}}$ intenzitását a vörös, zöld és kék spektrális tartományokban, majd ezekből egy színes képet komponáltunk. Mivel e tükrkép mindig nagyon sötét volt, ezért 50-szeres fényesítést alkalmaztunk, vagyis az $I_{\text{víz}}$ értéket mindhárom spektrális tartományban 50-nel szoroztuk. Ha az égfény túl gyöngye volt, akkor ábrázoláskor 5-szörös fényesítést végeztünk rajta, vagyis az $I_{\text{ég}}$ értékét mindhárom spektrális tartományban megszoroztuk 5-tel. 24 bites színkódolást használtunk, amikor I értéke 0 (fekete) és 255 (fehér) közé esett. Ha a fényesítést követően valamelyik I -érték nagyobb lett, mint 255, akkor I -t 255-ön rögzítettük. Ezáltal a kép egy része fehér lett, vagyis mindhárom spektrális tartományban túlexponált. A kivilágosított égbolton és vízfelszíni tükrképén a szoláris meridiánra merőlegesen két 90° nyílászögű és a horizonttól mért 72° vastagságú kör-cikkgyűrűt vettünk, amelyeket téglalap alakítottunk. Az ég és tükrképének téglalapját egymás alá helyeztük, amely képpár azt hivatott szemléltetni, amit egy megfigyelő lát, amikor a szoláris meridiánra merőlegesen nézi az eget és tükrképét.

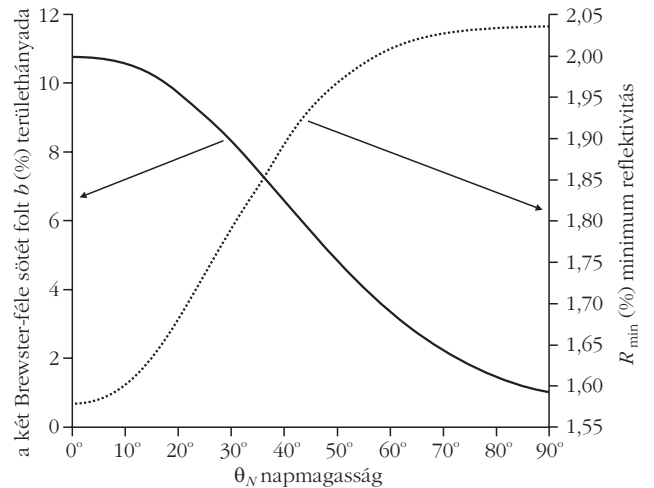
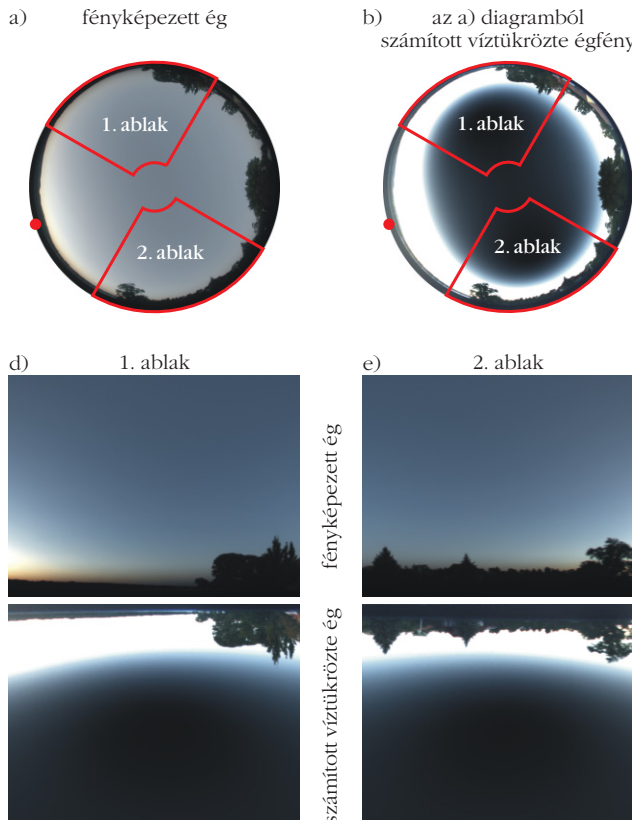
Eredmények

A Brewster-féle sötét folt alakja a napmagasság függvényében

Az 1. ábra annak geometriáját mutatja, amikor egy megfigyelő (fényképész vagy festő) h szemmagasságból és a függőlegeshez képest $\theta_{\text{Brewster}} = \arctan(n=1,33) = 53^\circ$ -ban nézi a vízfelszínt. Mivel $\tan \theta_{\text{Brewster}} = n$, ezért a BSF közepének a megfigyelőtől mért vízszintes távolsága $d = nh$. Például $h = 2\text{--}10$ m esetén $d = 2,66\text{--}13,3$ m. A 3. ábra egy tiszta, részben felhős és teljesen borult ég fényképét és polarizációs mintázatait szemlélteti.



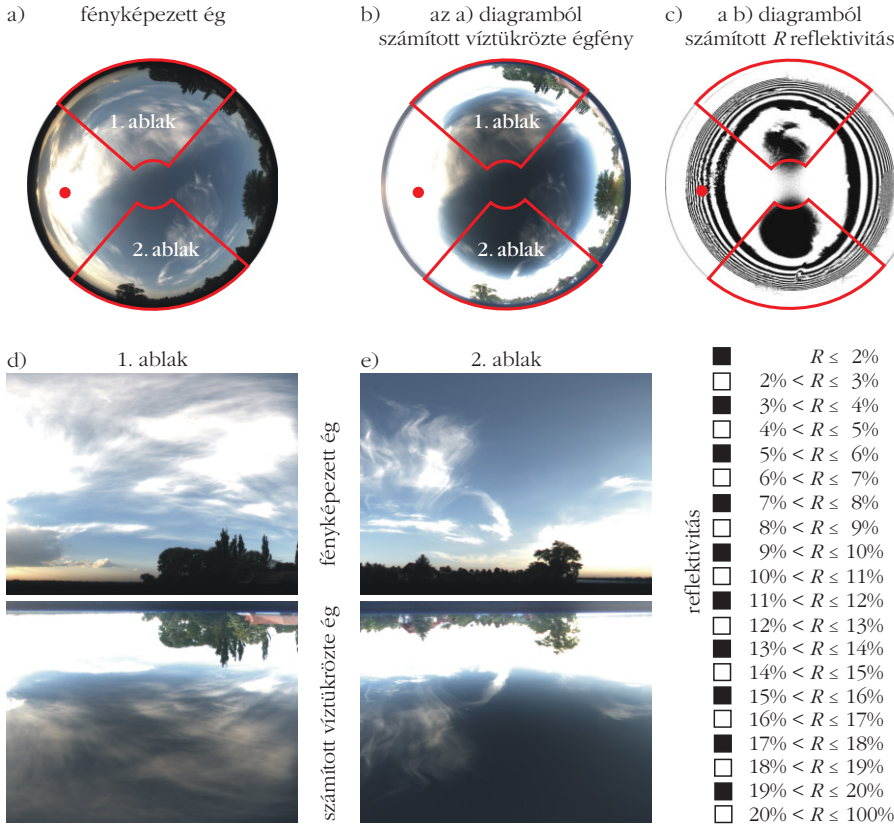
4. ábra. Tiszta ég alatti vízfelület számított R reflektivitásmintázata $\theta_N = 0^\circ$ (a), 18° (b), 36° (c), 54° (d), 72° (e) és 90° (f) horizont fölötti napmagasság mellett. A Nap tükörképét fehér közepű szürke kör jelöli, a nadírtól (zenit tükörképétől) mért $\theta_{\text{Brewster}} = 53^\circ$ sugarú Brewster-kört egy piros kör, a Brewster-pontot, vagyis az R_{min} legkisebb reflektivitású helyet pedig a Brewster-féle sötét folt közepén egy fehér + jel. Az a)–d) ábrákon a két középső, körte alakú fekete folt reflektivitása $R \leq 2\%$, a változóan fehér-fekete régiókra $2\% < R \leq 3\%$, ..., $19\% < R \leq 20\%$, a legkülső fehér gyűrű esetén pedig $20\% < R \leq 100\%$.



5. ábra. Folytonos görbe (balra lévő függőleges skálával): a vízfelszín Berry és munkatársai [10] polarizációs égboltnemzettel számított két Brewster-féle sötét foltjának $b(\%)$ felülete a vízfelszínhez képest a horizont fölötti θ_N napmagasság függvényében tiszta égbolt alatt. Pontozott görbe (jobbra lévő skálával): tiszta ég alatti vízfelszín legkisebb, R_{min} reflektivitása θ_N függvényében.

A 4. ábrán a vízfelszín R reflektivitásmintázata látható tiszta égbolt alatt $\theta_N = 0^\circ, 18^\circ, 36^\circ, 54^\circ, 72^\circ$ és 90° napmagasság mellett. A vízfelszín nadírtól (a zenit tükörképétől) mért $\theta_{\text{Brewster}} = 53^\circ$ sugarú Brewster-körének belsejében lévő két BSF egymáshoz közelít és kissé a Nap irányába tolódik, amint θ_N nő. Nagyobb θ_N esetén a BSF gyakorlatilag eltűnik (4.d-f ábra). A BSF területe akkor a legnagyobb, amikor a Nap a horizonton van, és a napmagasság növekedésével folyamatosan csökken, majd $\theta_N > 54^\circ$ esetén gyakorlatilag eltűnik (4. ábra). A 4. ábrán +-szal jelölt, a BSF közepének számító R_{min} minimális reflektivitású Brewster-pontok θ_N növekedésével

6. ábra. a) Tiszta ég 180° látószögű halszemoptikás kamerával készített fényképe $\theta_N = 0^\circ$ napmagasság esetén. b) Az a) ég tükörképe: az ég képalkotó polarimetriával mért polarizációs mintázatának felhasználásával és 50-szeres fényesítéssel számított szintetikus kép. c) A vízfelszín a) égbolt alatt számított R reflektivitásmintázata, ahol a középső, két tojásdad, fekete terület a Brewster-féle sötét folt. Az a)–c) képeken a Nap és tükörképének helyét piros pont jelöli. d)–e) Felül: az a) égbolt 1. és 2. ablakbeli részének téglalap alakú kinagyítása, ami egy megfigyelő (művész) által látottakat szemlélteti, amikor a szoláris meridiánra merőlegesen figyeli az eget. Alul: az ég b) tükörképe 1. és 2. ablakbeli részei téglalap-pa nagyítva. Az 1. és 2. ablak vízszintes és függőleges szögkiterjedése 90° és 72° . A fényképet Horváth Gábor készítette Gödön (Magyarország, $47^\circ 70' \text{ N}$, $19^\circ 15' \text{ E}$) 2012. augusztus 7-én 20:15-kor (UT + 2 óra).



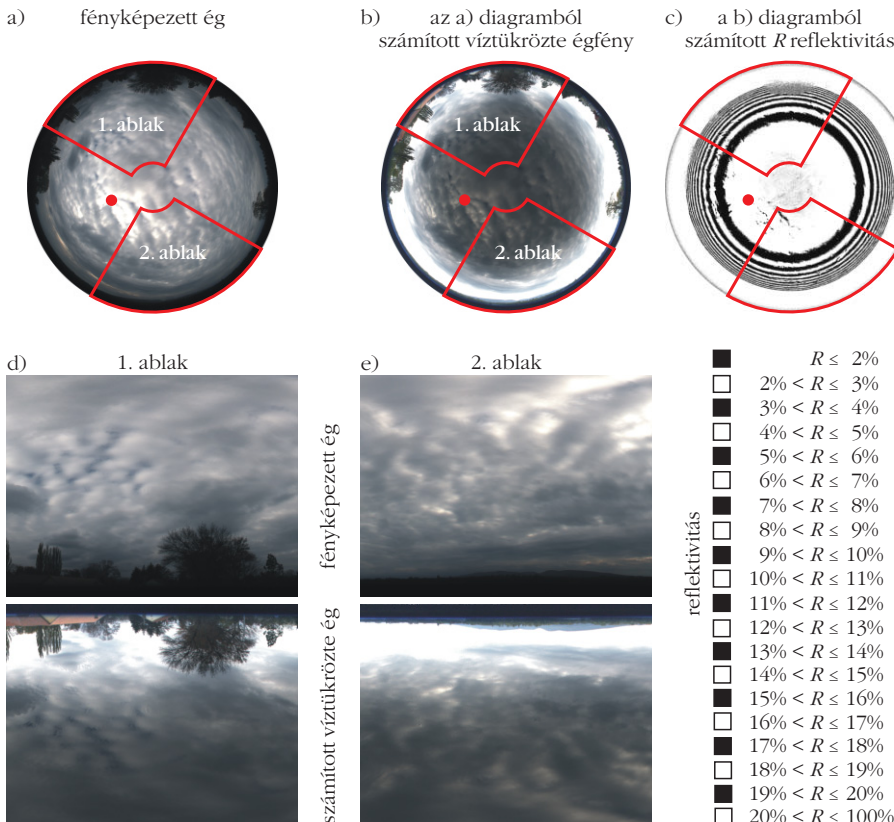
egymáshoz közelítenek és a Brewster-kör Nap felőli oldala irányába tolódnak el. A tojásdad alakú Brewster-féle sötét foltok $\theta_N = 0^\circ$ esetén tükörszimmetriku-

lektivitását mutatja a θ_N napmagasság függvényében: $\theta_N = 0^\circ$ mellett $R_{\min} = 1,58\%$, majd a θ_N napmagassággal rohamosan nő és $\theta_N > 60^\circ$ esetén $2,04\%$ -hoz tart.

7. ábra. Mint a 6. ábra, de most részben felhős égre $\theta_N = 26^\circ$ napmagasság mellett 2012. május 1-jén 16:38-kor (= UT + 2 óra), mikor a Brewster-féle sötét folt jól látható a vízfelszín 2. ablakában.

sak a szoláris meridiánra, és θ_N növekedtével egyre aszimmetrikusabbá válnak.

A 5. ábra folytonos görbéje a két BSF vízfülethez viszonyított összterületének b hányadát mutatja a θ_N napmagasság függvényében tiszta égbolt alatt, amikor az égfény polarizációját a Berry és munkatársai [10] modelljével számoltuk. Ha $\theta_N = 0^\circ$ (Nap a horizonton naplementekor vagy napkeltekor), akkor $b = 11,5\%$, majd θ_N növekedtével rohamosan csökken, végül $\theta_N > 58^\circ$ esetén 0-hoz közelít. Ebből kifolyólag megállapítható, hogy a BSF gyakorlatilag csak $\theta_N < 58^\circ$ esetén létezik. A 5. ábra pontozott görbéje a tiszta ég alatti vízfelszín $R_{\min}$ minimális reflektivitását mutatja a θ_N napmagasság függvényében:



Poláros égbolt és tükörképe szintetikus képei

A 6.a ábrán egy tiszta égbolt 180° látószögű halveszemoptikával készült fényképe látható, amikor a θ_N napmagasság 0° . A 6.b ábra ezen ég számított vízfelszíni tükörképét mutatja 50-szeres fényesítést követően. A 6.c ábra a vízfelület számított R reflektivitásának mintázatát szemlélteti a szóban forgó tiszta ég alatt. A 6.d és 6.e ábra azt mutatja, hogy mit látna az ember a vízparton, ha a szoláris-antiszoláris meridiánra merőlegesen tekintve nézne az eget és tükörképét. A 6.d és 6.e téglalap alakú képek a 6.a ég és 6.b tükörképe 1. és 2. körkígyűrű alakú ablakainak

8. ábra. Mint a 6. ábra, de most teljesen borult égre $\theta_N = 58^\circ$ napmagasság mellett 2012. április 15-én 14:30-kor (= UT + 2 óra), mikor a Brewster-féle sötét foltok nem láthatók.

képi információiból származnak. A 6.c ábra szerint mindkét BSF beleesik az 1. és 2. körcikkgyűrűablakba, miáltal a sötét foltok a 6.d és 6.e ábra vízfelületén jól láthatók. Egy realiztikus festőnek a 6.d és 6.e ábrán láthatókhoz hasonló képet kell festenie, ha hűen kívánja megörökíteni a vízparton észlelteket, amikor arccal északra vagy délre fordulva, a szoláris-antiszoláris meridiánra merőlegesen tekint napnyugtakor vagy napkeltekor a vízre.

A 7. ábrán egy részben felhős eget és annak vízfelszíni tükörképét láthatjuk $\theta_N = 26^\circ$ napmagasságnál. A 7.c ábra alapján mindkét Brewster-féle sötét folt a körcikkgyűrűablakokba esik, azonban csak a 7.e ábra vízfelszíni ablakában tűnik fel egy sötét folt, mivel a 7.d ábra vízi ablakában a cirrusfelhők fénye nagyon alacsony $p < 8\%$ polarizációfokkal bír, miáltal a gyakorlatilag polarizálatlan felhőfény vízszintesen poláros összetevője a Brewster-szögben és környékén visszaverődik. A 7. ábra jól demonstrálja, hogy a BSF csak felhőtlen, tiszta ég alatti vízfelületen látszik, és csak egy gyengén poláros vagy polarizálatlan tárgy (jelen esetben cirrusfelhő) tükröződhet a Brewster-szög közeléből, aminek eredményeként nagy a fényesség- és szíkontrasztkülönbség a BSF és az alig poláros tárgy világos tükörképe között. Azonban fontos megjegyezni, hogy a felhőfény nem teljesen polarizálatlan, és a vízcseppeket tartalmazó felhők a szivárványszórás irányába viszonylag nagy polarizációfokú fényt szórnak. A képalkotó polarimetriát alkalmazó POLDER/PARASOL műhold e szivárványszórás magas polarizációfoka alapján különíti el a jégfelhőket a vízfelhőktől [12, 13]. A borult ég vastag felhőiből a földfelszínre (esetünkben a vízfelszínre) érkező fény a felhőbeli depolarizáció – ami a felhőrészecskék többszörös fényszóródásának eredménye – miatt csak igen gyengén poláros ($p < 6\%$).

A 8. ábrán egy teljesen borult ég és vízfelszíni tükörképe látható $\theta_N = 58^\circ$ napmagasság mellett. Ekkor a 8.d és 8.e ábrán nem látható a BSF, mivel a 8.c

ábra tanúsága szerint e folt – a felhőfény nagyon alacsony, $p < 6\%$ polarizációfoka miatt – gyakorlatilag nem létezik.

Irodalom

1. Können G. P.: *Polarized Light in Nature*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1985) 30. és 34.
2. Azzam R. M. A., Bashara N. M.: *Ellipsometry and Polarized Light*. North-Holland, Amsterdam, New York (1992)
3. Schwind R., Horváth G.: Reflection-polarization pattern at water surfaces and correction of a common representation of the polarization pattern of the sky. *Naturwissenschaften* 80 (1993) 82–83. + címkép
4. Collett E.: *Polarized Light. Fundamentals and Applications*. Marcel Dekker Inc., New York (1994)
5. Horváth G.: Reflection-polarization patterns at flat water surfaces and their relevance for insect polarization vision. *Journal of Theoretical Biology* 175 (1995) 27–37.
6. Horváth G., Varjú D.: Polarization pattern of freshwater habitats recorded by video polarimetry in red, green and blue spectral ranges and its relevance for water detection by aquatic insects. *Journal of Experimental Biology* 200 (1997) 1155–1163.
7. Gál J., Horváth G., Meyer-Rochow V. B.: Measurement of the reflection-polarization pattern of the flat water surface under a clear sky at sunset. *Remote Sensing of Environment* 76 (2001) 103–111.
8. Horváth G.: Chapter 16. Polarization patterns of freshwater bodies with biological implications. In: G. Horváth (editor): *Polarized Light and Polarization Vision in Animal Sciences*. Springer: Heidelberg, Berlin, New York (2014) 333–344.
9. Takács P., Barta A., Pye D., Horváth G.: Polarization optics of the Brewster's dark patch visible on water surfaces versus solar height and sky conditions: theory, computer modelling, photography and painting. *Applied Optics* 56 (2017) 8353–8361.
10. Berry M. V., Dennis M. R., Lee R. L.: Polarization singularities in the clear sky. *New Journal of Physics* 6 (2004) 1–14.
11. Gál J., Horváth G., Meyer-Rochow V. B., Wehner R.: Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle. *Proceedings of the Royal Society A* 457 (2001) 1385–1399.
12. Deschamps P. Y., Bréon F. M., Leroy M., Podaire A., Bricaud A., Buriez J. C., Seze G.: The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 32 (1994) 598–615.
13. Fougnie B., Bracco G., Lafrance B., Ruffel C., Hagolle O., Tinel C.: PARASOL in-flight calibration and performance. *Applied Optics* 46 (2007) 5435–5451.

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY A FIZIKA BARÁTJA!



**Támogasd jövedelemadód
EGY százalékaival
az Eötvös Loránd Fizikai Társulatot!**
Adószámunk: 19815644-2-43

SZILÁRDTEST-REAKCIÓ NANOSKÁLÁN

Cserhádi Csaba,¹ Parditka Bence,¹ Tomán János,¹ Csik Attila,² Erdélyi Zoltán¹

¹Debreceni Egyetem TTK Szilárdtest Fizikai Tanszék

²MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

A technikai eszközök méretének drasztikus csökkenésével került előtérbe a szilárd testekben lejátszódó reaktív diffúziós folyamatok kezdeti szakaszának vizsgálata, amelynek során nagy szerepet játszik az új fázisok nukleációja és azok növekedése. Fontosságuk ellenére ezen folyamatok mikroszkopikus (atomi) részletei nem tisztázottak. Különösen igaz ez azokban az esetekben, amikor nagy a ∇c koncentrációgradiens a kialakított vagy kialakult határfelületeken. Ebben az esetben ugyanis az új fázis keletkezését és növekedését nemcsak a termodinamika, hanem a folyamat kinetikája is befolyásolja. Az irodalom háromféle nukleációs módot különböztethet meg: a polimorfikus, a keresztirányú és a teljes keverési sémát [1–3].

Polimorfikus módban az új intermetallikus fázis csírai az anyafázisok eredeti határfelületénél keletkeznek, miután a beinduló kölcsönös diffúzió hatására kialakuló koncentrációprofil gradiense elég kicsivé válik. Az új fázis csírája ekkor az atomok lokális átrendeződése során jön létre anélkül, hogy a koncentrációprofil menete megváltozna. Ez a fázisképződési

mód akkor játszhat szerepet, ha az összetevők az anyafázisban megfelelően nagy oldékonysággal rendelkeznek, valamint a keletkező fázisban az egyik összetevő jóval mozgékonyabb, mint a másik. A nagyobb mozgékonyság ahhoz szükséges, hogy a gyors lokális átrendeződés anélkül mehessen végbe, hogy a teljes profil menete megváltozna. Ebben a nukleációs sémában az éles koncentrációprofil akadályozza a csíráképződést.

Amennyiben a kiindulási anyagokban az oldékonyság erősen korlátozott, a csíráképződés végbemehet úgy, hogy a szomszédos tartományból az embrió irányába a koncentrációgradiensre merőlegesen áramlik az anyag. Ez a keresztirányú, más néven transzverzális nukleációs mód. Éles koncentrációgradiens esetén ez a séma sem garantálja az új fázis gócainak kialakulását.

Ha a képződő új fázisban mindkét összetevő diffúziója jóval nagyobb, mint a kiindulási anyagokban, a ∇c irányában folyó kölcsönös diffúzió elég anyagot szállít az embrió kialakulásához. Ezt az esetet teljes keverési sémának hívják. Ebben az esetben a határfelületi éles koncentrációgradiens növeli az új fázis kialakulásának hajtóerjét.

Kevés olyan méréssel találkozni az irodalomban, amelyek alapján megbízhatóan lehet különbséget tenni ezen növekedési módok közt [2], mivel az ilyen vizsgálatokhoz nano, vagy még inkább atomi felbontású mérésekre van szükség.

Még ennél is kevesebbet lehet tudni, mi történik a kezdeti növekedési szakaszban, vagyis a csírák kialakulása és az állandósult növekedés közti időszakban.



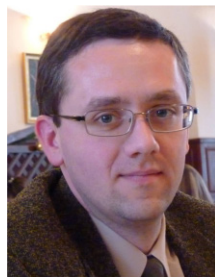
Cserhádi Csaba egyetemi docens, okleveles fizikus, 1989-től a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Intézetének munkatársa. Több külföldi egyetemen volt vendégkutató. Kutatási tevékenysége a szilárd testekben különböző méretskálán lejátszódó diffúziós, valamint szilárdtest-reakciós jelenségek – elsősorban kísérleti – vizsgálata. Az ELFT Anyagtudományi szakcsoportjának elnöke.



Parditka Bence István egyetemi adjunktus. 2014-ben szerezte PhD fokozatát Franciaországban anyagtudományból, a Debreceni Egyetemen pedig fizikából. Jelenleg a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékének munkatársa. Kutatási területe félvezető- és oxidalapú vékonyrétegek gyártása fizikai (porlasztás és párologtatás) és kémiai (ALD) módszerekkel, illetve ezen vékonyrétegekben végbemenő szilárdtest-reakciók vizsgálata.



Tomán János egyetemi tanársegéd, okleveles anyagkutató. 2016-tól a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékének munkatársa. Kutatásának gerincét a szilárd testekben lejátszó atommozgási folyamatok különböző módszerekkel történő számítógépes szimulációja képezi. Tagja a háromdimenziós sztochasztikus kinetikus átlagtermodell (SKMF) fejlesztőcsapatának. Jelenleg az Új Nemzeti Kiválóság Program ösztöndíjasa.



Csik Attila okleveles fizikus, az MTA Atommagkutató Intézet tudományos főmunkatársa. Kutatási tevékenysége vékonyrétegek és rétegrendszerek magnetronos porlasztással történő előállítására, röntgendiffrakciós és tömegspektrometriás vizsgálata. Az ELFT Vákuumfizikai Szakcsoport és a Magyar Vákuumtársaság titkára.



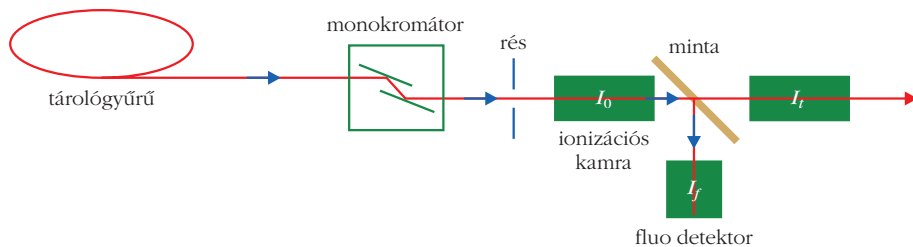
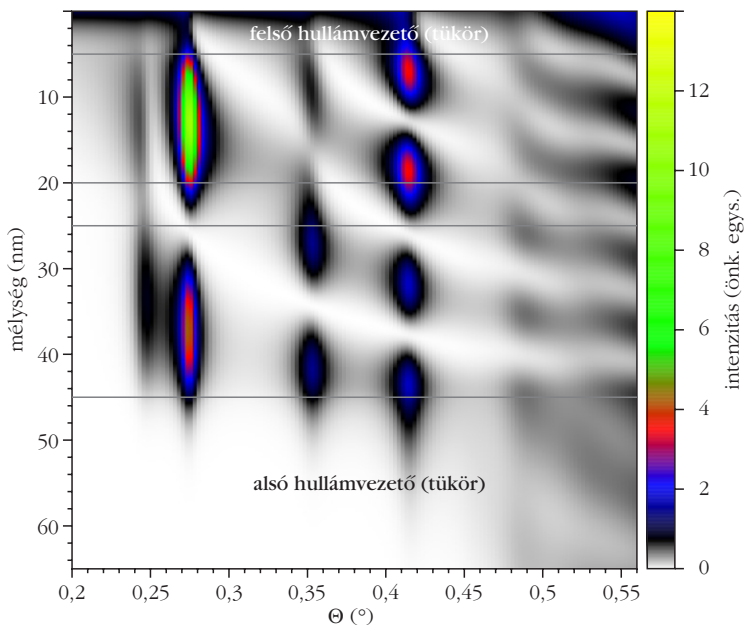
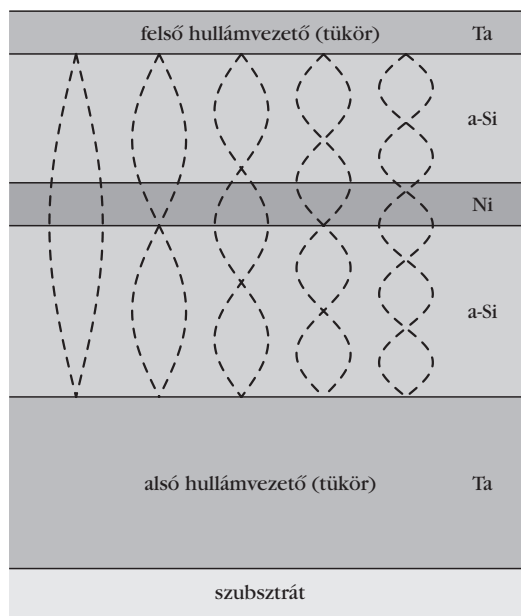
Erdélyi Zoltán az MTA doktora, a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára. PhD fokozatot anyagtudományból Franciaországban, fizikából a Debreceni Egyetemen szerzett. Több európai és egy japán egyetemen volt vendégprofesszor, vendégkutató. Főbb kutatási területe az atommozgási folyamatokkal összefüggő jelenségek kísérleti és elméleti vizsgálata. Munkásságát Selényi Pál-díjjal ismerték el.

Különböző kísérleti technikákat, valamint számítógépes szimulációs módszert használva próbáltunk ismereteket gyűjteni a fázisnövekedés ezen szakaszáról. A kísérleti technikák közül kiemelendő a sűrűdő beeséses röntgenfluoreszcencia-analízis (GIXRF) és a kiterjesztett röntgenabszorpció finomszerkezet (EXAFS) vizsgálatának kombinációja, amely módszert csoportunk elsőként alkalmazta Co-Si kétalkotós rendszerben intermetallikus fázis növekedésének vizsgálatára [4].

Kísérletek

A mérésorozat mintáit az ATOMKI és a Debreceni Egyetem Szilárdtest Fizikai Tanszéke közös Anyagtudományi Laboratóriumában készítettük és minősítettük. Magnetronos porlasztással Ta (5 nm) / a-Si (12 nm) / Ni (10 nm) / a-Si (14 nm) / Ta (30 nm) / SiO₂ (szubsztrát) szerkezetű vékonyfilm-geometriájú mintákat készítettünk (a-Si: amorf Si). A Ta-réteget egyrészt azért választottuk, mert nagy rendszáma miatt jó hullámvisszaverő tulajdonságú anyag, másrészt a Ta/Si határfelületen nem történik diffúzió, mivel ezen anyagok termodinamikai okok miatt nem keverednek egymással. A mintákat vákuumban ($\approx 10^{-5}$ Pa) 463 K és 503 K hőmérsékleten, különböző ideig hőkezeltük. Ezen mintákat a GIXRF-EXAFS mérésekben használtuk fel. Ezen kívül készítettünk (Ni₂₀ nm/Si₂₀ nm) 10 multiréteg-szerkezetű mintákat is, amelyeken hőkezelés közben szimultán röntgendiffrakció (XRD) és 4-pontos ellenállásmérést (4WR) is végeztünk. A GIXRF-EXAFS méréseket a

2. ábra. Balra a hullámvezető szerkezet látható. A Ta-tükrök között helyezkedik el az a-Si/Ni/a-Si szerkezet. A hullámvezető szerkezetben az első öt lehetséges módust ábrázoltuk. Jobbra a 8,4 keV fotonenergiaánál számolt elektromos tér intenzitását ábrázoltuk. A különböző módusokat a beesési szög függvényében ábrázoltuk.



1. ábra. Mérési elrendezés a GIXRF reflektivitás- és EXAFS-mérésekhez.

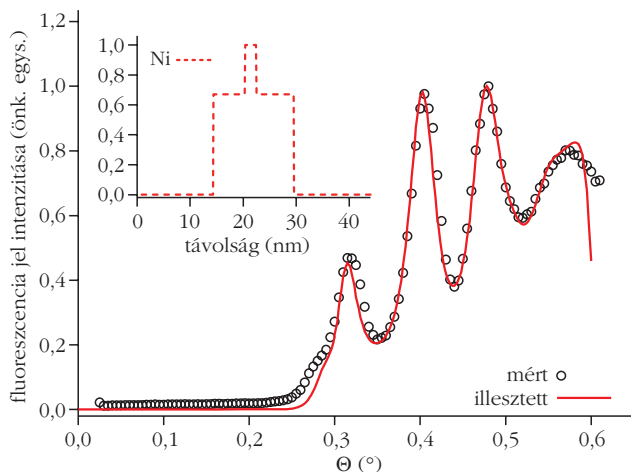
Bessy II (Helmholtz-Zentrum Berlin) szinkrotronforrás KMC2 minősített monokromatikus nyalábcatornáján, míg a XRD-4WR méréseket a 7TWPW nagy áramú és fluxusú nyalábcatornáján végeztük. A mérések részleteit a [4] publikációban fejtettük ki, a mérési összeállítást az 1. ábra mutatja.

GIXRF-mérések hullámvezető struktúrában

Az első módszer, amit alkalmaztunk, a GIXRF-módszer volt, amit röntgen állóhullámmódszerrel egészítettünk ki. A technika alkalmazása során a vizsgálni kívánt diffúziós párt két Ta-réteg közé rétegeztük. A Ta, nagy rendszámú elem lévén, kis beesési szögeknél tükröként viselkedik. A geometriának köszönhetően röntgen állóhullám alakul ki a Ta-tükrök között, mivel azokon a beeső sugárzás teljes visszaverődést szenved, és önmagával interferálva meghatározott beesési szögeknél állóhullámot generál. A rezonancia feltétele:

$$\Theta_m = \frac{(m+1)\pi}{kd}, \quad (1)$$

ahol k a beeső röntgensugárzás hullámszámvektorának abszolút értéke, d pedig a tükrök közötti távolság. Ezen feltétel mellett jön létre az m -edik transz-



3. ábra. GIXRF mért (körök) és illesztett (piros vonal) adatok. A mintát 503 K-en 4,5 órás hőkezelésnek vetettük alá. Az inzert az illesztésnek megfelelő Ni-koncentrácioprofil mutatja.

verzális elektromos módus (TE). A 2. ábra mutatja a kialakult elektromos teret. A beeső és a visszaverődő nyaláb által alkotott síkra merőlegesen egy energiadiszperzív röntgendetektort helyeztünk el, amely a keletkezett röntgenfluoreszcencia-jelét méri. A jel a kialakult elektromos állóhullám és a mérni kívánt (esetünkben Co, illetve Ni) elemek által elfoglalt térfogat átlapolásakor keletkezik. Ahhoz, hogy fluoreszcenciajelet kapjunk, a beeső röntgennyaláb energiáját úgy állítottuk be, hogy az csak a számunkra érdekes elemet gerjessze (például $E_{beam} = 8,33$ keV nyalábenergia esetén csak a Ni $K\alpha$ vonala gerjesztődik). *Parrot* [5] módszere alapján – a minta geometriájának ismeretében – a struktúrában keletkező állóhullám, valamint a generált fluoreszcenciajel intenzitása is kiszámítható [6, 7]:

$$I(\Theta) = \int_0^L c(x) E^2(\Theta, x) dx, \quad (2)$$

ahol c a keresett anyag koncentrációja (Co vagy Ni), E az elektromos tér amplitúdója, L a teljes mintavastagság (tükrökkel együtt) és Θ a nyaláb beesési szöge. A beesés szögét változtatva az elektromos tér és így az állóhullám módusa is változik. Ugyanígy változik az előbbieken leírt átlapolt zóna helyzete és mérete, vagyis a fluoreszcenciajel intenzitása (3. ábra). Eszerint a minta geometriájának ismeretében, a (2) egyenlet felhasználásával a fluoreszcenciajel intenzitása a röntgennyaláb beesési szögének függvényében kiszámítható. A számításokhoz kifejlesztett programunk az IMD 4.1.1 optikai adatbázist használja [8]. A mért és számolt intenzitásértékeket a minta szerkezetének finomhangolásával lehet illeszteni [4, 9].

EXAFS

Ha a mintára beeső röntgenfotonok energiája megegyezik, vagy nagyobb a vizsgálandó elem valamely elektronjának kötési energiájánál, az elnyelt röntgen-

fotonok száma drámaian megnő, a röntgenfluoreszcencia intenzitása csökken. A röntgensugárzás abszorpciós spektrumát mérve ez a jelenség az abszorpciós él megjelenéséhez vezet. Az abszorpciós együttható fluoreszcenciaelrendezésben arányos a fluoreszcencia és a beeső röntgennyaláb intenzitásának hányadosával:

$$\mu(E) \propto \frac{I_f}{I_0}. \quad (3)$$

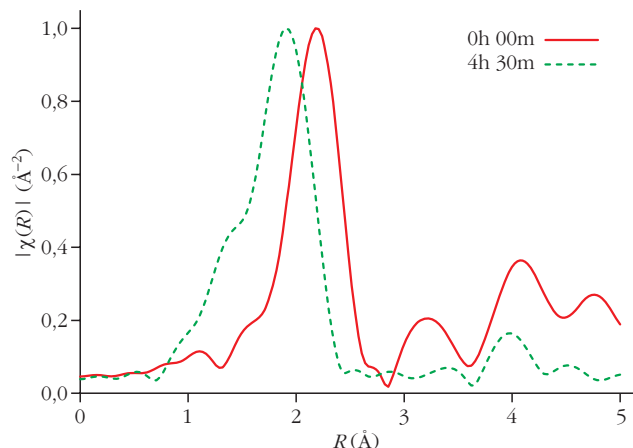
Az EXAFS-spektrum az abszorpciós együtthatót ábrázolja az energia függvényében az abszorpciós él feletti 50–1000 eV tartományban. A röntgenabszorpció hatására az atom fotoeletront emittál, amelynek kinetikus energiája a beérkező foton energiájának és az elektron kötési energiájának különbsége. Az emittált fotoelektron-hullám szóródik a környező atomokon. Könnyen elképzelhető, hogy a visszazórt elektronhullám különböző módusokat létrehozva önmagával interferál. Ez az interferencia befolyásolja a beérkező röntgenfoton abszorpciójának valószínűségét és oszcillációként jelenik meg a mért abszorpciós spektrumon. Az oszcilláció paraméterei – többek között – a legközelebbi atomok távolságától, koordinációs számától, valamint rendszámától függenek. A duzzadóhelyek, illetve a csomópontok helyét a keletkezett fotoelektron hullámhossza, valamint a megtett út (a gerjesztett atomtól a legközelebbi szomszédokig és vissza) határozza meg aszerint, hogy az interferencia során erősítés vagy kioltás jön létre. Az EXAFS-jel valójában az abszorpciós együttható normált oszcilláló része:

$$\chi(E) = \frac{\mu(E) - \mu_0(E)}{\Delta\mu(E_0)}, \quad (4)$$

ahol $\mu(E)$ a mért abszorpciós együttható, $\mu_0(E)$ egy izolált atom abszorpciós együtthatója, $\Delta\mu(E_0)$ pedig az abszorpciós együttható ugrása az E_0 abszorpciós élnél. A sugárirányban különböző távolságokban lévő szóró atomokhoz tartozó oszcillációk az EXAFS-jel Fourier-transzformálásával szeparálhatók. Az abszorpciós spektrum mérése során változtatni kell a beeső röntgennyaláb energiáját. Ennek hatására a hullámvezetőben keletkezett állóhullám is megváltozik. Az állóhullám módusának fixen tartásához folyamatosan kell változtatni a nyaláb beesési szögét. Ezzel a módszerrel a minta adott mélységéből (a korábban leírt információs térfogatból), körülbelül 2 nm-es vastagságból kémiai információt kapunk. Az elektromos tér módusát változtatva az információs térfogat helye változik, így a határfelület(ek) környéke feltérképezhető.

Mérési eredmények

503 K-en, különböző ideig hőkezelt mintákat vizsgáltunk. A 3. ábra a mért és a számolt GIXRF-intenzitásdiagramot mutatja (4,5 óra hőkezelési idő után), az inzert pedig a rekonstruált Ni-koncentrácioprofil.



4. ábra. A (4) egyenletben definiált $\chi(k)$ 1-re normált Fourier-transzformáltjának abszolút értéke. A folytonos vonal a hőkezeletlen, a szaggatott pedig a hőkezelt (503 K, 4,5 óra) minta görbéje. Az első nagy csúcs a legközelebbi szomszédok átlagos távolságát jelzi.

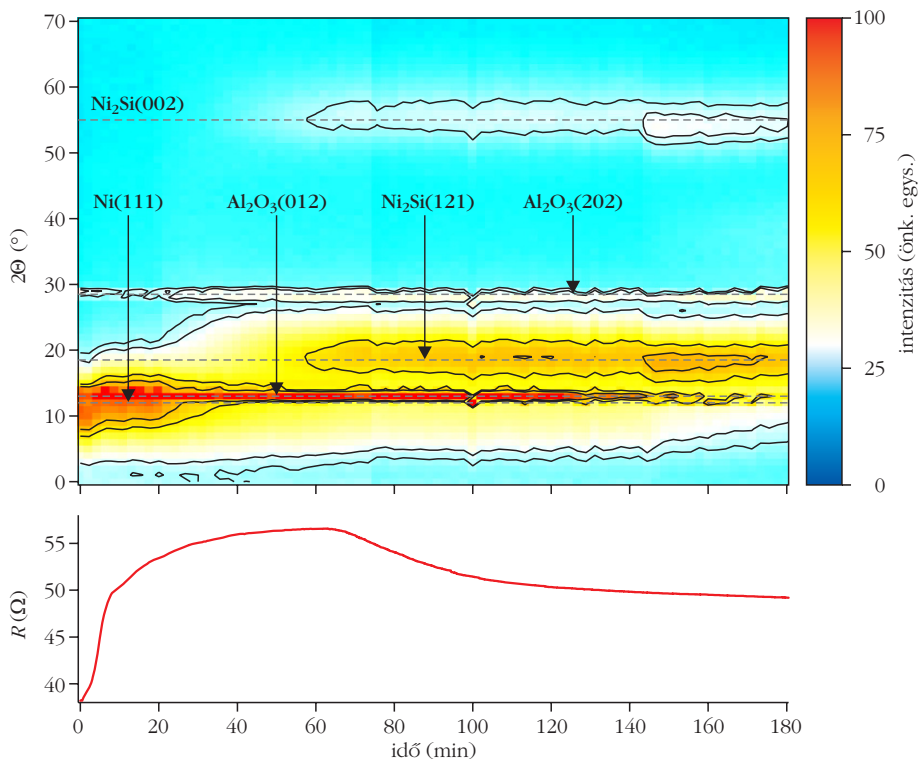
A mérések tanúsága szerint már a hőkezeletlen mintákban is 2:1 arányú összetételben találni Ni- és Si-atomokat (amorf vagy kristályos szerkezetben) a Ni-réteg mindkét oldalán. A jelenség nem ismeretlen, a magnetronos porlasztással készített minták esetében gyakran előfordul [10–12]. EXAFS-méréseket végeztünk a Ni abszorpciós élének közelében. A 4. ábra egy hőkezeletlen és egy hőkezelt (4,5 óra) minta Fourier-transzformált EXAFS-spektrumát mutatja.

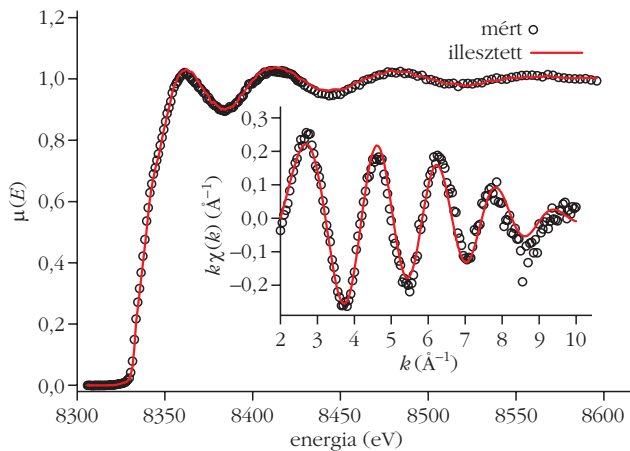
A legközelebbi szomszédok átlagos távolságát az első csúcs maximumának helye mutatja. Látható, hogy a hőkezelés hatására a legintenzívebb csúcs helye a kisebb R értékek felé tolódik, jelezve, hogy a legközelebbi szomszédok átlagos távolsága csökkent. Ez a tapasztalat egyrészt összhangban van azzal az elvárással, miszerint a hőkezelés során a diffúziós zónában Ni_2Si intermetallikus fázis keletkezik; másrészt arra is utal, hogy a hőkezeletlen mintában a határfelületeken a Ni- és Si-atomok ugyan 2:1 arányban vannak jelen, de a két anyag csak valamilyen, valószínűleg amorf szerkezetű keveréket alkot. Ezt a feltevést támasztja alá az XRD-4WR mérés is (5. ábra). Az ábra felső részén a hőkezelés során felvett diffrakciós görbék láthatók, a függőleges tengelyen a diffrakciós szög, a vízszintes tengelyen pedig a hőkezelési időt ábrázoltuk. A csúcsok intenzitását a jobb oldali skála jelzi. Az ábra alsó része a minta hőkezelés közben mért ellenál-

lását mutatja. A diffrakciós görbén kezdetben csak a Ni (111) csúcsa látható. A hőkezelés megkezdésével e csúcs intenzitása csökkenni kezd, a minta ellenállása pedig növekszik. Ez a folyamat egészen addig tart, amíg a hőkezelés hatására (~60 percnél) megjelennek a Ni_2Si -fázis csúcsai. Ekkor a minta ellenállása csökkenni kezd. A megfigyelés azt a korábbi feltevést támasztja alá, miszerint kezdetben a kis ellenállású Ni-fázis mennyisége csökken és egy jóval nagyobb ellenállású Ni-Si keverék jön létre. Amikor ez a keverék Ni_2Si -formában kristályosodni és növekedni kezd, az ellenállás is csökken.

A 6. ábra a (3) egyenletben definiált abszorpciós együttható illesztését mutatja (503 K, 4,5 óra). Az ismeretlen összetételű mintán mért spektrum illesztését Ni- és Ni_2Si -etalonokon mért abszorpciós spektrumok felhasználásával végeztük el, amihez az ATHENA-ARTEMIS szoftvercsomagot [14] használtuk. Ez egy tudományos célra kifejlesztett, első elvén alapuló FEFF-módszert [15] használó interaktív grafikus felület, kísérleti EXAFS-adatok illesztéséhez. Az illesztéssel meghatároztuk a minta kristályos Ni- és rendezett Ni_2Si -fázisának relatív mennyiségét. A szoftvercsomag segítségével a (4) egyenletben definiált EXAFS-jel k hullámszámmal súlyozott spektrumát is illesztettük. Az analízis során kristályos Ni-, rendezett Ni_2Si - és 2:1 arányban kevert rendezetlen Ni-Si szerkezetekből indultunk ki [13]. A különböző anyagok relatív mennyiségeit változtatva illesztettük a mért spektrumot. Az analízis megmutatta, hogy a

5. ábra. Az ábra felső része a hőkezelés során (467 K) felvett diffrakciós görbék, az alsó rész a minta hőkezelés közben mért ellenállását mutatja. A hőkezelés elején a Ni (111) csúcsának intenzitása csökken, a minta ellenállása pedig növekszik. A Ni_2Si (002) és (121) csúcsának megjelenésével az ellenállás csökkenni kezd. Az Al_2O_3 -csúcsok a szigetelő anyagú hordozótól származnak.



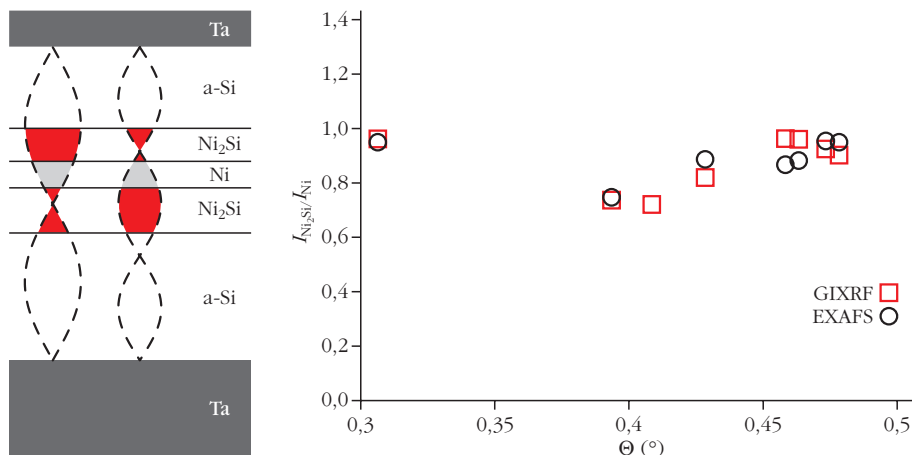


6. ábra. Az EXAFS-adatok illesztése $\Theta = 0,4285^\circ$ -nál. A Ni- és Ni_2Si -etalonok súlyozása 0,113, illetve 0,887 volt. Az inzert a hullámszámvektor nagyságával súlyozott EXAFS-jel illesztését mutatja. Az illesztés során használt kristallográfiai paramétereket a [13] tartalmazza.

határfelületeket a hőkezeletlen mintában csak egy rendezetlen, 2:1 összetételű Ni-Si keverék, míg a hőkezelt mintákban a rendezett Ni_2Si -fázis fedti. Továbbá azt találtuk, hogy 5,5 óra hőkezelés után, a teljes Ni-réteg Ni_2Si -fázissá alakul át. Ez a tapasztalat összhangban van a GIXRF-, valamint az XRD-4WR méréseinkkel is.

A fluoreszcens jel mind a GIXRF-, mind az EXAFS-mérések esetében abból az információs térfogathoz származik, ahol a tiszta Ni és a keletkezett Ni_2Si átfed a Ta-tükrök között kialakult elektromos állóhullámmal (7. ábra). A Ni_2Si -ből, illetve a tiszta Ni-ből származó intenzitások $I_{\text{Ni}_2\text{Si}}/I_{\text{Ni}}$ hányadosa meghatározható a GIXRF-mérésekből és illesztésekből, mivel ez egyenlő kell legyen a Ni_2Si által átlapolt terület $2/3$ -ával (a Ni_2Si $2/3$ -a Ni-atom) és a Ni által átlapolt terület hányadosával. Másrészt pedig az $I_{\text{Ni}_2\text{Si}}/I_{\text{Ni}}$ hányados egyenlő az EXAFS-mérések etalonos illesztéséből kapott súlyfaktorok hányadosával. A két mérés eredményei minden hőkezelési időnél jó egyezést mutat (7. ábra).

7. ábra. A bal oldali ábra a fluoreszcenciajel forrását ábrázolja két különböző állóhullámmódus esetén. A teljes jel a tiszta Ni (szürke tartomány), illetve a Ni_2Si (piros tartomány) által elfoglalt térfogat, valamint az állóhullám átfedéséből keletkezik. A jobb oldali ábrán az egyes információs térfogatokban keletkezett intenzitások hányadosát az EXAFS-mérések illesztéséből kapott adatokkal együtt ábrázoltuk. A mintát 503 K -en $4,5$ óráig hőkezeltük.



1. táblázat

A fémes réteg két oldalán keletkezett fázis vastagsága, valamint azok különbsége a hőkezelési idővel együtt

	idő (óra)	a-Si/fém	fém/a-Si	kül. (nm)
Ni-Si	0	5,4	6,2	0,8
	4,5	6,0	7,1	1,1
	4,75	6,6	8,1	1,5
	5,5	6,7	8,5	1,8
Co-Si	0	0,0	0,9	0,9
	1	0,5	2,5	2,0
	3	1,5	3,5	2,0

A hőkezelés hőmérséklete a Ni-Si rendszer esetén 503 K , a Co-Si rendszerénél 500 K volt.

Összegezve, a GIXRF-mérések kiértékelésnél fel kellett tételeznünk, hogy a magnetronos porlasztás során eltemetett Ni-réteg mindkét oldalán (amorf vagy kristályos) 2:1 arányú Ni-Si keverék keletkezik. Az XRD-4WR mérések megmutatták, hogy ez a fázis rendezett, intermetallikus Ni_2Si -fázissá alakul a hőkezelés során, és egészen addig növekszik, amíg a Ni nem fogy. A mérések során az is kiderült, hogy a Ni két határfelületén a keverékréteg vastagsága nem egyforma. Az alsó, hordozóhoz közelebbi oldalon a réteg vastagsága mintegy $0,8\text{ nm}$ -rel nagyobb, mint a felülethez közelebb lévő oldalon. A jelenség az úgynevezett dinamikus szegregáció következménye [16], vagyis amikor Ni-atomokat rétegezzünk a Si tetejére, a Si a felület felé igyekszik, mivel a rendszer számára energetikailag kedvezőbb, ha a Si a felületre szegregál. Amennyiben azonban Si-atomokat rakunk a Ni-rétegre, a Si a felületen marad a Ni pedig alatta. Keveredés csak a felületre érkezés nagy energiája miatt történhet. Eszerint a hordozóhoz közelebb a dinamikus szegregáció segíti, míg a felülethez közel gátolja a Ni-Si keverék létrejöttét.

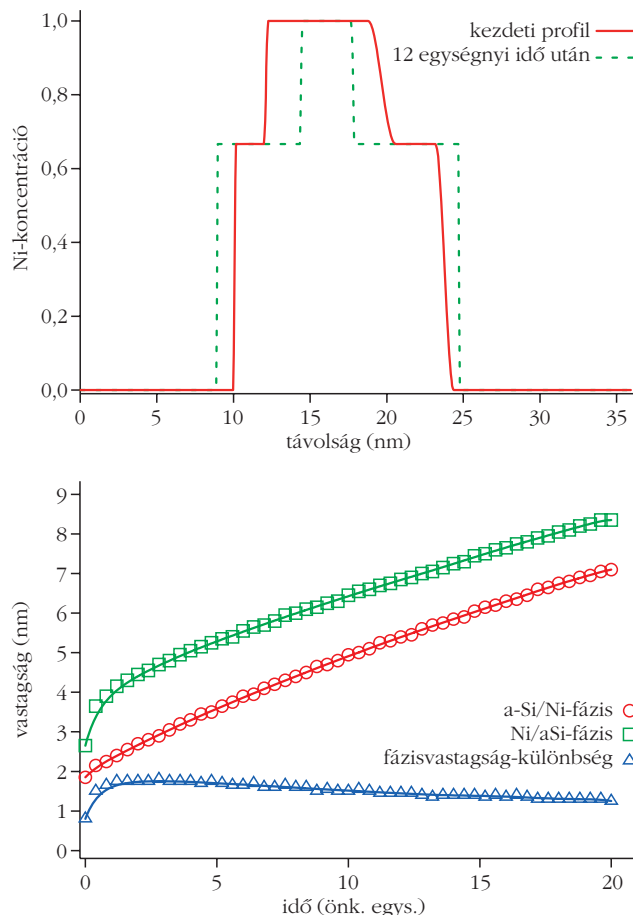
A mérések meglepő módon arra engednek következtetni, hogy a vastagabb réteg gyorsabban vastagszik, mint a vékonyabb (1. táblázat), holott az ellenkezőjét várnánk. A diffúzió alapegyenletei alapján tegyük fel ugyanis, hogy az intermetallikus réteg x vastagsága a hőkezelési idő négyzetgyökével arányosan növekszik:

$$x \propto \sqrt{t},$$

úgynevezett parabolikus növekedés. Ekkor a növekedés sebessége a vastagság reciprokával változik:

$$\frac{dx}{dt} \propto \frac{1}{\sqrt{t}} \propto \frac{1}{x},$$

azaz a hőkezelés során a vastagabb réteg lassabban növekszik. Amennyiben a másik



8. ábra. Fölül a Ni koncentrácioprofilját rajzoltuk fel a folyamat kezdetén és kis idővel később (12 időegység). A kiinduló állapotként a Ni-réteg bal oldalán 0,2 nm-es diffúz réteget, 1,8 nm vastag intermetallikus réteget és 0,3 nm vastag elmosott réteget állítottunk be. A 6,5 nm vastag Ni-réteg másik oldalán az 1,8 nm vastag elmosott réteget 2,6 nm-es Ni_2Si -fázis követi, majd 1,2 nm diffúz réteg ismét a tiszta szilíciumig. Alul a két oldalon keletkező intermetallikus réteg vastagságát és különbségüket ábrázoltuk a szimulációs (hőkezelési) idő függvényében. A diffúziós együtthatók 100-szor, illetve 1000-szer nagyobbak voltak a Ni_2Si -, illetve az a-Si fázisokban, mint a tiszta Ni-ben.

határesetet tételezzük fel, azaz $x \propto t$ (úgynevezett lineáris kinetika), a dx/dt sebesség állandó, amely szerint a kezdeti vastagságkülönbség nem változhat. Ugyanilyen viselkedést tapasztaltunk a korábban vizsgált [4] a-Si/Co/a-Si rendszerben is (1. táblázat). A megoldást a számítógépes szimulációs kísérletek adták. A modell részleteit [17] mellőzve, B/A/B réteges szerkezetben számoltunk, ahol B és A az a-Si, illetve a Ni- vagy Co-rétegeket jelentik. A kísérleteknek megfelelően az egyik határfelületre vastagabb, míg a másikra vékony Ni-Si (2:1), illetve Co-Si (1:1) keveréket

raktunk. A modellben szereplő diffúziós együtthatókat reálisan megválasztva, a kialakuló fázisban az együtthatókat 5–500-szor, míg az a-Si-ban 1000–10 000-szer nagyobbak vettük, mint a fémek anyagában. Ezen paraméterekkel mindkét rendszerre tudtuk reprodukálni a kísérletben kapottakat. A Ni-Si rendszerre számolt eredményt a 8. ábra mutatjuk. Látható, hogy a kezdeti 0,8 nm-es vastagságkülönbség a folyamat elején egészen 1,8 nm-ig növekszik, majd lassan csökkenni kezd.

A szimuláció tehát azt mutatja, hogy ha a határfelületen lévő átmeneti fázis vastag, ott több A (Ni vagy Co) és B (Si) anyag van, így könnyebben keletkezik és növekszik az új fázis, vagyis a kezdeti növekedési sebességek különbsége ezzel magyarázható. Ugyancsak lényeges, hogy az intermetallikus fázisban gyors a diffúzió. A számítások azt is megmutatták, hogy ha a keletkezett fázisban a diffúzió gyorsabb, akkor a kezdeti maximális vastagságkülönbség nagyobb lesz. Mindez azt mutatja, hogy az intermetallikus fázis növekedésének időbeli lefolyását a kezdeti koncentrácioprofil alakja, azaz a kezdeti határfelület szélessége, valamint a kialakult fázisbeli diffúzió sebessége együttesen befolyásolja. A határfelület kezdeti szélessége – ami összefügg a szerkezet előállítási módjával – és a rendszerbeli atomi mobilitások különbözősége eszerint fontos szerepet játszanak a nanotechnológiai folyamatok tervezésében és megvalósításában.

Irodalom

- Hodaj, F., Gusak, A., *Acta Materialia* 52 (2004) 4305.
- Pasichnyy, M., Schmitz, G., Gusak, A., Voyk, V., *Phys. Rev. B* 72 (2005)
- Gusak, A., Zaporozhets, T., Lyashenko, Y., Kornienko, S., Pasichnyy, O., Shirinyan, A.: *Diffusion-controlled Solid State Reactions: in Alloys, Thin-Films, and Nanosystems*. John Wiley & Sons (2010) ISBN 9783527408849.
- Erdélyi, Z., Cserhádi, C., Csik, A., Daróczi, L., Langer, G., Balogh, Z., et al., *X-ray Spectrometry* 38 (2009) 338.
- L. G. Parratt, *Phys. Rev.* 95 (1954) 359.
- D. L. Windt, *Comput. Phys.* 12 (1998) 360.
- S. K. Ghose, B. N. Dev, *Phys. Rev. B* 63 (2001) 245409.
- D. L. Windt, *Comput. Phys.* 12 (1998) 360.
- A. Gupta, C. Meneghini, A. Saraiya, G. Principi, D. K. Avasthi, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* 212 (2003) 458.
- Oukassi, S., Moulet, J., Lay, S., Hodaj, F., *Microelectron. Eng.* 86 (2009) 397.
- Mattoso, N., *J. Matter. Sci.* 30 (1995) 3242.
- Clevenger, L., Thomson, C., *J. Appl. Phys.* 67 (1990) 1325.
- Villars, P.: *Pearson's handbook: crystallographic data for intermetallic phases*. Materials Park, OH: ASM International; (1997)
- Ravel, B., Newville, M., *J. Synchrotron. Rad.* 12 (2005) 537.
- J. J. Rehr, R. C. Albers, *Rev. Mod. Phys.* 72 (2000) 621.
- Ibrahim, M., Balogh, Z., Stender, P., Schlesiger, R., Greiwe, G. H., Schmitz, G., et al., *Acta Materialia* 76(0) (2014) 306–313.
- Erdélyi, Z., Schmitz, G., *Acta Materialia* 60(4) (2012) 1807–1817.



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



LÁTOGATÁS A CSERNOBILI ATOMERŐMŰBEN

2. rész: helyszíni tapasztalatok

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

Csernobilban, a reaktorban és az azt körülölelő 30 km sugarú zónában – e lezárt terület két részből épül fel: a 10 km sugarú zónamagból és a 30 km sugarú ellenőrzött részből – több expedíció is járt hazánkából.

1991 decemberében *Marx György* és *Szabó Árpád* szervezésében egy 10 főből álló csoport – amelynek jelen cikk szerzője is tagja volt – közel 2 órányi látogatást tett az atomerőműben és a 30 km sugarú, zárt, biztonsági zónában [5]. 2005. május végén, június elején a Magyar Nukleáris Társaság (MNT) és annak fiatal szakcsoportja szervezett több napos tudományos expedíciót *Aszódi Attila* vezetésével [6, 7]. 2017 júniusában az MNT Fialatok a Nukleáris Energiáért szakcsoportja szervezett tanulmányutat a csernobili atomerőműbe és a körülötte kialakított, lezárt zóna megtekintésére.

Az 1991-es út során meglepetésként ért minket, hogy a 30 km-es zóna belseje nem kihalt, és ma sem az. Egyrészt körülbelül 1500 kitelepített idős ember visszaköltözését engedélyezték, hogy hátralévő éveiket itt éljék le. De Csernobil városában is van élet. A zónán belül abban az időben és most is több munkacsoport dolgozott. Az erőművi csoport tagjai az akkor még működő blokkokat üzemeltették. Ezeket azóta leállították, így az erőmű leszerelése és az új szarkofág megépítése lett a feladatuk. Az erőműtől körülbelül 50 km-re egy új várost, Szlavuticsot építettek fel, amely azóta kifejezetten szép kisvárossá fejlődött. Innen is sokan járnak dolgozni a zónába. A szarkofágnál látogatóközpontot építettek, ahol a szarkofág építésével és jelenlegi állapotával kapcsolatos legfontosabb információk kaphatók és az erőmű részletes makettje látható. Az expedíció résztvevői mindhárom alkalommal különböző dózismérőkkel voltak felszerelve. Megnyugtató, hogy a résztvevők egyik esetben sem kaptak a megengedettnél nagyobb, de még csak ahhoz közeli dózisterhelést sem.

A 2017-es látogatás

A látogatóknak szigorúan megszabott öltözetet írtak elő, amely hosszú nadrág, zárt cipő és hosszú ujjú felső volt. Belépéskor ellenőrizték az útleveleket,



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



7. ábra. Félkész hűtőtorony a soha be nem fejezett blokkokhoz.

majd két kísérő csatlakozott hozzánk. Összesen 7 órát töltöttünk a lezárt zónában. A zónába érkezés után a táj teljesen olyan volt, mint előtte hosszú kilométereken keresztül. Szép, fákkal szegélyezett út vezetett Csernobil városába. Itt természetvédelmi területet fognak kialakítani.

Csernobil és környéke a középkortól lakott terület volt. A település első írásos említése (Csornobil néven) 1193-ból származik, 1362-től a Litván Nagyhercegséghez tartozott, 1793-ban az Orosz Birodalom része lett. A polgárháború idején jelentős hadműveletek folytak a város környékén. A II. világháború alatt a német csapatok kétszer is megszállták a települést. A háború után a lakosság száma lassan növekedett, járási székhely lett. Az atomerőmű építkezéséhez kapcsolódóan komoly közműfejlesztések kezdődtek. A hetvenes évek közepétől Csernobil Pripjaty mögött a háttérbe szorult. A város 1991-ben az önállóvá vált Ukrajna része lett.

A baleset után Pripjaty 12 500 lakóját kitelepítették. A város meglévő infrastruktúrája miatt a mentesítési

8. ábra. Az 5. és a 6. „épülő” blokk maradványai.





9. ábra. A kiegészített nukleáris üzemanyagok épülő, száraz típusú hulladéktárolója.

munkák vezetési központja Csernobil lett. Mivel az erőmű személyzete számára épült Pripjaty város a baleset következtében lakhatatlanná vált, az erőmű dolgozói az új alvóváros – Szlavutics – felépítéséig Csernobilba költöztek.

A balesetet követően 1986 nyarán–őszén Csernobil területén jelentős sugármentesítést végeztek annak érdekében, hogy a város adminisztratív központként továbbra is használható legyen, és látogatásunk idején is az volt.

Csernobilban folyamatosan körülbelül 3500 ember dolgozik, akik ideiglenesen laknak a városban. A személyzet tizenöt napos váltásokban dolgozik, azaz 15 napot töltenek az övezetben, 15 napot az övezeten kívül, akárcsak 26 évvel ezelőtti ottjártamkor. A városban az átmenetileg ott lakó alkalmazottak számára szükséges szolgáltatások működnek. A kitelepített övezetbe önként visszatelepülteknek Csernobilban van az egyetlen bevásárlási lehetőség, illetve az övezeten belül csak itt található kórház és szakorvosi

11. ábra. A buszból feltűnik az ezüstösen fénylő új szarkofág.



10. ábra. A busz szélvédőjén át látszik a vizes csatorna, jobb oldalt az új szarkofággal.

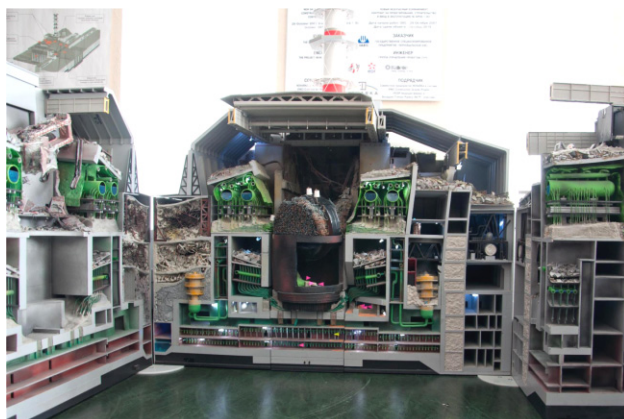
rendelő. Sok, a balesettel összefüggő eseménynek emléket állító szobrot is láttunk az út mentén.

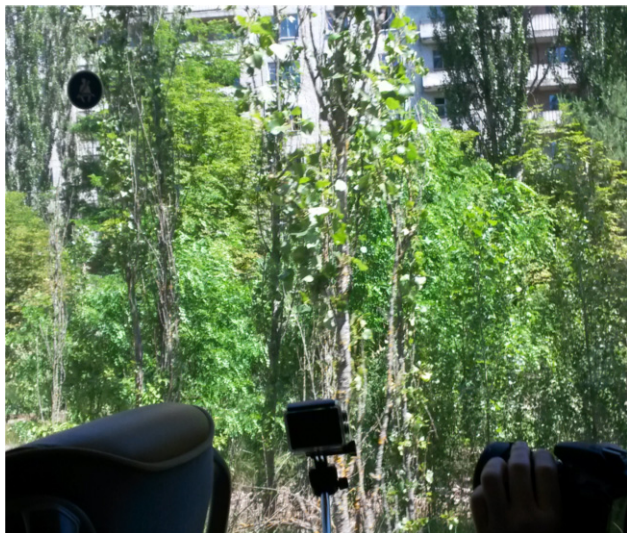
Csernobil város elhagyása után az úgynevezett vörös erdőt pillantottuk meg, amely persze már nem vörös. Nevét onnan kapta, hogy a balesetet követő radioaktív kihullás ezt a korábban zöld fenyőerdőt – szemtanúk elmondása és fényképek tanúsága szerint – vörösesbarna árnyalatúvá változtatta. Ez a zóna legszennyezettebb része. 1986 nyarán a környék megtisztításakor az erdő egy részét ledózerolták, majd a kiirtott fák helyére 1988 és 1990 között újakat ültettek.

Később a fel nem épült 5. és 6. blokk félkész hűtőtoronyát (7. ábra) és épületeit pillantottuk meg, amelyek a mára rozsdáig darukkal együtt is ugyanúgy állnak, mint 26 éve (8. ábra).

A területen azonban új építkezés is van. Jelenleg a Csernobili Atomerőmű 1–3. blokkjaiból – nemzetközi nyomásra, az élettartalmuk lejárt előtti leállítást követően – már kirakták az üzemanyagot, amely jelenleg a vizes átmeneti tárolóban van (HOJAT-1), most épül a száraz átmeneti tároló (HOJAT-2, 9. ábra), amely a 2017. novemberi átadása után fogadja a kiegészített üzemanyagot. A végleges tárolás módjáról még nincs döntés.

12. ábra. A baleset utáni állapotot bemutató makett.





13. ábra. A buszból kitekintve: lakóházak bújnak meg a sűrűn nőző fák mögött.

A központi átmeneti kiégettüzemanyag-tároló építése Ivankin város mellett (ott tervezik átmenetileg tárolni az ukrainai atomerőművek kiégett üzemanyagát) még csak tervben létezik.

Majd a *vizes csatornát* pillantottuk meg (10. ábra), és kicsit odébb már feltűnt az új szarkofág ezüstös fénye (11. ábra). Elhaladtunk a körülbelül 150 m hosszú blokkok alkotta épületsor mellett, sorrendben 1-2-3-4-es blokkok, amelynek végén áll a régire rátolt, így azt teljesen eltakaró, ezüst színű, új szarkofág. A dózis – ha nem is jelentősen – picit magasabb volt a szarkofág körül.

Első megállónk a szarkofág előtt volt, itt egy maketten elmagyarázták a baleset lefolyását (12. ábra). Ez persze sok újat nem mondott nekünk.

Akkor és a másnapi múzeumi magyarázatok során is felfigyeltem arra, hogy kísérőink következetesen *tesztelésnek* és *nem kísérletnek* nevezik a balesetet kiváltó okot. Ezt az üzembe helyezés előtt kellett volna elvégezni, de politikai okok miatt nem tették meg, hiszen minél hamarabb a hálózatra kellett kapcsolni a blokkokat.

Az ebéd előtt még elmentünk *Pripjatyba*, a rózsák városába – egykor sok ültetett virága volt –, amelyet a



14. ábra. Pripjaty egykori szállodájánál is átvette a természet az uralmat.

baleset után teljesen kiürítettek. A várost 1970-ben alapították, nagyrészt az atomerőmű dolgozói és családjaik éltek itt, 49 400 lakos, ebből 15 406 gyermek. A lakók átlagéletkora 28 év volt.

A városban meglepő kép fogadott minket: magas fákkal körülvett kis ösvényfélén indult el a busz, de az ablakból figyelmesebben kinézve láttuk, hogy a fák között szinte megbújnak a sokemeletes házak (13. ábra). Majd kiszállhattunk és egy kisebb sétát tehattunk a város főtere és főbb épületei között (14. ábra).

Megnéztük az elhagyatott város művelődési házát, szállodáját, éttermét, boltját, majd a város főterén saját szemünkkel láthattuk a sárga színű óriáskeréket (15. ábra) és a dodzsemetek (16. ábra), amelyek szinte az elhagyatott város jelképévé váltak. A természet egyre jobban visszafoglalja a területet. A töredezett aszfalt réseiből növények nőnek, az elhagyott épületek mállásnak indultak.

Ezután ebédelni mentünk. Az ebédlőbe csak sugárvédelmi ellenőrzés után léphettünk be. Ez volt az első ellenőrzésünk.

Miután jóllaktunk az 1. blokk vezérlőtermét tekinthettük meg. Az épület előtt 26 évvel ezelőtt egy Le-

15. ábra. Az elhagyott sárga óriáskerék.



16. ábra. Árván maradt dodzsemek.





17. ábra. Érkezés az 1. blokk épületéhez.

nin-szobor állt, amely mostanra eltűnt. Ellenben a bejárat előtt több szobor és kis méretű, vörös kapukat tartalmazó park látható. Az erőmű falán pedig egy enyhén vöröses, némileg a rózsára hasonlító műalkotás (17. ábra). Közvetlenül a bejárat előtt néhány kóbor kutya sétált, belőlük elég sok található a lezárt területen.

A blokkvezérlőbe való bejutás, majd a kijutás, még a reptéri ellenőrzésnél is szigorúbb volt. Csak az útlevelünk és fényképezőgép vagy mobiltelefon lehetett nálunk. Névsorba kellett állnunk, így könnyítve az azonosítást, majd az ellenőrző ponton a fényképezőgépet és az esetleg még nálunk lévő fémtárgyakat letéve tudtunk átmenni. Az 1. blokk vezérlőjéhez való további eljutásunk enyhén *zombi* jellegű volt. Hasonlóan kellett beöltöznünk, mint 26 évvel ezelőtt, amikor a még működő 3-as blokk vezérlőtermét tekintettük meg: fehér köpenyt, fejevédőt és nejlón cipővédőt kellett húzni. Már a folyosó (18. ábra) is a szocialista időkét idézte: sárga, mintás műanyagpadló, néhol világítás sem volt. A vezérlőben minden úgy maradt, ahogy annak idején az operátorok otthagyták (19. ábra). A falon a zóna képe, és sok kijelző, elsősorban analóg műszer (20. ábra). Itt is elmondták a baleset történetét.

19. ábra. A leállított 1. blokk vezérlőterme.



18. ábra. A „szocialista” út a vezérlőteremhez.

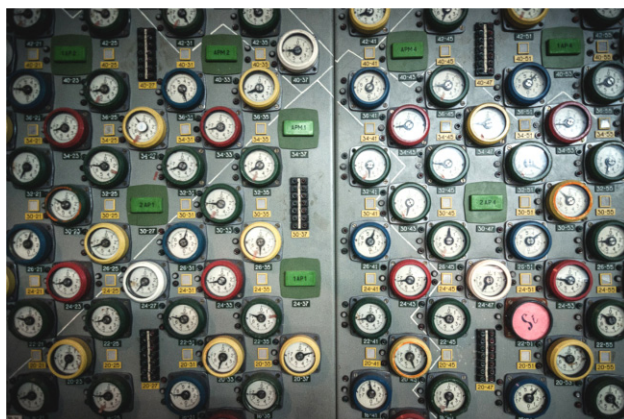
Látogatásunk zárásaként a Csernobili Atomerőmű vezérigazgató-helyettese és biztonsági főmérnöke a Magyar Nukleáris Társaság tagjaival beszélgetett. A látogatás megszervezésében az Ukrán Nukleáris Társaság volt segítségünk.

A látogatás befejezése most is, akárcsak 26 évvel ezelőtt a műszakváltás idejére, 16:30-ra esett.

Befejezésül a csatorna jól megtermett harcsáit és Csernobil város tábláját (21. ábra) néztük meg, majd kiindultunk a zónából, ahol még két dózisellenőrzésen – először a 10 km-es, majd a 30 km sugarú zónahatáron – estünk át.

A külső, 30 km-es zónahatáron, a kijárat melletti épületmaradványban, a fal felé fordulva körülbelül 30 zsidó férfi imádkozott. E meglepő látványra Csernobil város történelme ad magyarázatot: a 17. század végétől askenázi zsidók települtek a városba, amely lassan a zsidó gazdasági és hitélet központjává vált. A 19. század végére lakosainak majd 60%-a izraelita volt. 1919-ben egy ellenforradalmi banda uralta a területet, módszeresen irtva annak zsidó lakosságát. E nagy pogrom után a megmaradt zsidók túlnyomó része Kijevbe menekült, majd később az Egyesült Államokba távoztak, ahol napjainkban is élő közösséget alkotnak.

20. ábra. Analóg műszerek kavalkádja a vezérlőterem falán.





21. ábra. Csernobil város táblájával búcsúzott tőlünk.

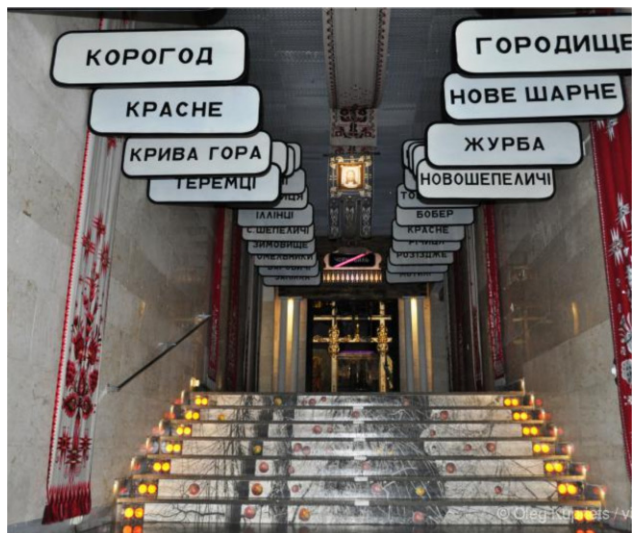
A következő napon a kijevei *Csernobil Múzeumot* tekintettük meg. A földszinten a fukushimai balesetről emlékeznek meg a tárlat készítői.

Az emeletre vezető lépcső felett a kiürített települések neve olvasható, a lépcsőfokok függőleges részén egy almafa képe látható az almákkal, amely a továbbélést szimbolizálja (22. ábra). A kiállítás maga az épület első emeletén, három teremben található. Ebből kettő U alakban fonódik egymásba, amely a baleset létrejöttének körülményeit és annak utóhatásait mutatja be rendkívül korrekten, sok eredeti dokumentum, újságcikk, gépelt jelentések, fényképek, a mentéshez használt ruházatok, mérőeszközök stb. felhasználásával. Itt van a reaktor háromdimenziós, mérethű makettje (23. ábra), amely jól mutatja a reaktor bonyolult szerkezetét a hűtővizet áramoltató csővezeték-hálózzal együtt. Egy háromdimenziós hatású animáció a baleset fő mozzanatait – az ép reaktor, a baleset, a tűzoltók, majd a helikopterek megjelenése – mutatja be. Múzeumi vezetőnk is elmondta a baleset lefolyását. Kiemelte, hogy a hűtőközeg, esetünkben a víz, elvesztését (Loss-of-Coolant Accident, LOCA) nem tartották veszélyesnek, hiszen összességében jóval kevesebb víz keringett a rendszerben, mint egy vízmoderátoros reaktorban, amelyben az aktív zóna értelem-szerűen egy vízzel teli tartályban helyezkedik el. Sőt, kísérőnk szerint az akkori szakemberek egyáltalán nem tartották veszélyesnek a reaktort. Úgy gondolták, hogy semmiféle baj nem történhet¹, ezért egyáltalán nem készült balesetelhárítási terv.

A következő teremben egy háromdimenziós térkép látható a lezárt zónáról. A sugárszennyezettség mértékét színekkel jelölték, rajta jól látható, hogy a szomszédos Fehéroroszországban is vannak erőteljesen szennyezett területek.

A harmadik, különálló nagy terem inkább az érzelmi részt ragadja meg. Ennek közepén a zóna tetejé-

¹ Emlékezzünk vissza e cikksorozat első részére: instabilitásuk okán az ilyen típusú reaktorokat az 1950-es években – *Teller Ede* javaslatára – Amerikában leállították.



22. ábra. A múzeum lépcsője a kiürített települések nevével.

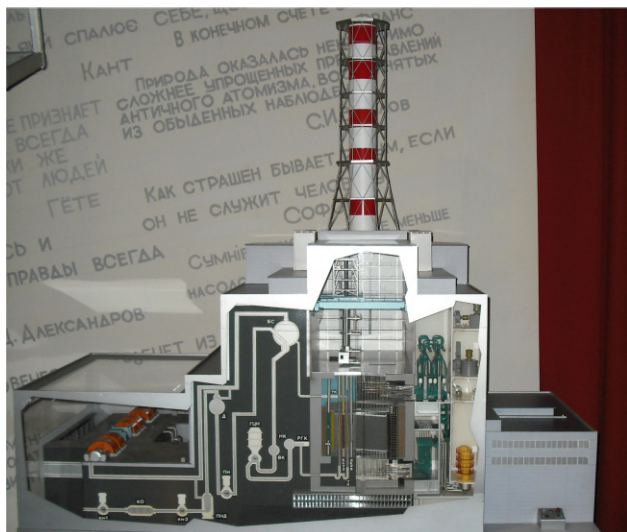
nek mérethű felső körülbelül 10 cm-nyi része látható majdnem az összes kazettával. A közepén, bő 2 m × 2 m-es területen mintegy 20 cm mély, vízzel teli medence fölött egy csónak lebeg, tele plüssállattal és babával (24. ábra). A terem két oldalán, a fal előtt az akkori háztartásokban és munkahelyeken használatos eszközöket állították ki. A középső falon 4 darab, zónaszerűen elrendezett montázs gyerekfényképekkel, középen pedig egy leukémiás kisgyereké gyertyával. Az itt található számítógép a balesetet követő légköri mozgást mutatja be.

A látogatást egy, az áldozatokra emlékező megrázó film megtekintésével fejeztük be.

Konklúzió

Mintegy hetven éve sok – jelenleg több mint 400 – nukleáris erőmű működik a világban, az általuk termelt – évente több mint 2 millió gigawattóra – energiához képest alig, összesen 4 baleset történt. A két súlyos

23. ábra. A reaktor háromdimenziós, mérethű makettje.



reaktorbalesetből azt a következtetést is le lehet vonni, hogy a további súlyos nukleáris baleseteket nagy valószínűséggel el lehet kerülni.

A fukushimaihoz hasonló baleset valószínűsége igen kicsi, hiszen ott olyan, földrengést – amelyet a reaktor még sértetlenül átélt – követő cunami pusztított, amilyen szerencsére csak nagy ritkán (ott korábban még soha nem) történik. A földrengés és a cunami kivédhetetlen, ezek akkor rengeteg halálesetet, sérülést, anyagi kárt okoztak (és nemcsak Fukushima-ban). E közvetlen következményekhez képest a nukleáris baleset igen kevés áldozatot követelt.

A csernobili baleset pedig elkerülhető lett volna, ha a személyzet nem követ el sorozatos hibákat, azaz lényegesen nagyobb technológiai fegyellemmel a további balesetek megelőzhetők. A tragédiát fokozta, hogy a mentésben résztvevők nem voltak kellőképpen felkészítve a feladatra. A lakosság sugárterhelése kisebb lett volna, ha hamarabb tájékoztatják az embereket, kezdik meg a kitelepítést. Ez azonban már túlmutat a technikai felkészültségen, egy zárt, diktatórikus társadalom következménye. Napjainkra már összehasonlíthatatlanul nagyobb eséllyel kerülhet el egy hasonló méretű baleset, illetve a következmények mérséklésére is több lehetőség van.



24. ábra. A múzeum legmegdöbbentőbb terme.

A nukleáris reaktorok biztonsági rendszere többszörös, így csupán *egy műszer* vagy alkatrész meghibásodása, vagy *egy emberi mulasztás*, sőt ezek halmozódása sem vezet tragédiához. Csernobilban az operátorok *sok egymást követő súlyos hibája* – amit a mai biztonsági rendszerek kikapcsolhatatlanul(!) nem engednek meg – vezetett a balesethez. A közlekedés, ahol a legtöbb esetben egyetlen hiba elegendő a tragédiához, csak hazánkban több áldozatot szedett már, mint az összes reaktorbaleset. Az energiatermelés többi módja bőven tartogat veszélyeket a súlytőlég-robbanástól a duzzasztógátak szakadásáig, a savas esőktől az üvegházhatású gázok kibocsátásáig.

A FIZIKA TANÍTÁSA

HOLOGRÁFIA A TANTEREMBEN

Gombkötő Balázs, Bokor Nándor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizika Tanszék

A holográfia feltalálásakor és az első látványos hologramok készítésekor az alkalmazott technológia csak kutatólaboratóriumokban állt rendelkezésre. Sokáig csak egy nem sokkal szélesebb közönség, az egyetemi hallgatók találkozhattak testközelből hologramok

készítésével, mivel az alkalmazott eszközök és anyagok drágák és veszélyesek voltak. Pár éve azonban már odáig jutott a fejlődés ezen a területen, hogy akár otthoni, akár iskolai, tantermi környezetben is bemutatható, sőt, diákok által is elvégezhető feladat egy



Gombkötő Balázs egyetemi adjunktus a BME-n szerzett mérnök-fizikus diplomát 2001-ben, majd ugyanott PhD fokozatot 2004-ben. Kutatási területei az optikai mérés-technika, fázis-visszaállítás, további érdeklődési körei a holográfia, optikai örvények és a komplex klasszikus mechanika.



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 Szemlében*, valamint a *Physics Education* és a *European Journal of Physics* folyóiratokban.

hologram készítése. Az elérhető egyszerűbb eszközökkel is többféle hologramtípus készíthető, akár holografikus interferogram is.

Gábor Dénes legelső hologramját gázkisüléses fényforrással készítette, amelynek koherenciája még alig-alig volt elegendő a holográfiához. A lézer feltalálása adott nagy lökést a területnek. Az ilyen célra leginkább alkalmas, nagy teljesítményű gázlézer (Ag-ion, He-Ne, Kr-ion) azonban még ma is igen drágák, üzemeltetésük – vízűtés esetén – szintén drága. Ma már szilárdtestlézerekből is létezik megfelelő koherenciájú és nagy teljesítményű változat a holográfiához, azonban ezek ára sem sokkal kedvezőbb. Szerencsére kisebb méretekben, 5-10 cm-es tárgyak holografálásához elegendő 5-20 mW teljesítmény, ezt az olcsó félvezetőlézerek is képesek – akár különösebb szabályozás nélkül – megfelelő nyalábpáraméterekkel előállítani. A megszokott keskeny lézernyalábokkal szemben egy csupasz félvezető lézerdióda eleve táguló nyalábot bocsát ki, így a nyalábtágítás kevésbé kedvelt lépésére sincs szükség.

A másik fő újdonság a rögzítőanyagok területén jelent meg. Korábban a legtöbbször alkalmazott fényérzékeny anyagok az ezüst-halogenid tartalmú emulzió, valamint kiváló tulajdonságai miatt a kromát tartalmú emulziók voltak. Az előbbi típus legfőbb hátrányai a vegyszeres előhívás folyamata, amely veszélyes anyagokat is használ, valamint az öregedés akár a felhasználás előtt, akár utána. Az utóbbi típus pedig eleve veszélyes anyagot tartalmaz, így szintén alkalmazatlan iskolai használatra. A legkevésbé veszélyes, legkevésbé környezetszennyező vegyszereket (például rézgalic, C-vitamin, metol) igénylő Slavich PFG-03M ezüst-halogenid emulzió is legfeljebb középiskolások körében alkalmazható tanári felügyelettel.

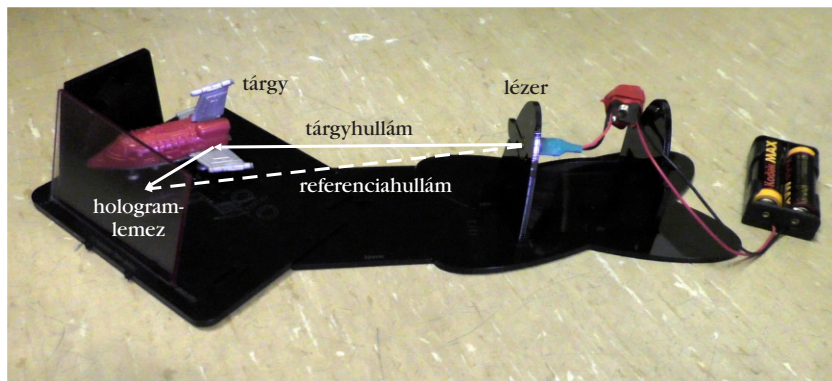
A fent felsorolt anyagokkal szemben a ma elérhető *fotopolimerek* számos előnnyel rendelkeznek. Nem igényelnek vegyi kidolgozást, rosszabb esetben is csak UV-lámpás elő/utókezelésre, vagy utólagos hőkezelésre (például a Bayer cég fóliái) van szükség, de bizonyos típusoknál még erre sem, így ezen típusoknál a hologram magával az expozícióval el is készül. Jelenleg a leginkább diáklarát rögzítőanyag a Litholo CRT20 instant film [1]. Ennél a típusnál sem elő-, sem utókezelésre nincs szükség, ráadásul a film fotopolimerizációja alsó intenzitásküszöbvel rendelkezik, így a tanterem teljes elsötétítésére sincs szükség. 16 mikronos vastagsága a használt lézer hullámhosszának sokszorosa, ennek köszönhetően alkalmas reflexiós látványhologramok készítésére, diffrakciós hatásfoka pedig – fázishologram lévén – ideális esetben közel 100%. Nem lehet túlexponálni, mivel a polimerizáció idővel – körülbelül 5-6 perc után, amikor elfogynak a monomerek – magától leáll. „Színes” anyagnak számít, így vörös, sárga vagy zöld lézerrel is használható.

(Kék színben diffrakciós hatásfoka már kicsi.) A több-rétegű fólia belsejében az emulzió védett, az egész fólia pedig egy üveglemezre kasírozva érkezik. A kész hologramok tartósak, csak arra kell ügyelni, hogy ne karcolódjanak, és hogy ujjlenyomat lehetőleg ne kerüljön rájuk. A megfelelő sötét háttér biztosításához és a mechanikai védelemhez akár az üveg, de javasoltan inkább a fólia oldala fekete akrilfestékkel lefújható. (Ma már akrilfesték spray-ből is kapható kevésbé veszélyes, vízbázisú kivitel.) Az 5×7 cm-es vagy a négyszer nagyobb területű lemezeket először egy komplett csomagban érdemes megvásárolni, ez tartalmazza a megfelelő lézerdiódát és az összes szükséges mechanikai tartóelemet is, tehát a hologram elkészítéséhez csak az alkalmas helyszínt kell biztosítani. Ennek érdemes egy lesötétíthető szobát vagy tantermet választani. A rezgésmentesség érdekében az elrendezést legjobb egy stabil asztalon, vagy a terem padlóján (lehetőleg ne parketten, hanem kőburkolaton vagy linóleumon) összeállítani.

Az utóbbi években a BME Fizika Tanszékén számos tapasztalatot szereztünk iskolás gyerekek és a holográfia találkozásáról. A *Nobel-díjas kísérletek középiskolásoknak* sorozat részeként több éve fut egy holográfia- és hologramkészítés-bemutató [2]. (2016-ban a BME Gyerekegyetem részeként felső tagozatosok is belekóstolhattak ebbe a látványos tudományterületbe.) Itt az érdeklődő diákok először rövid elméleti ismertetőt kapnak (mi a különbség a fénykép és a hologram között, miért kell az utóbbi elkészítéséhez koherens fényforrás, miért kell kiküszöbölni a rezgéseket, hogyan zajlik a hologram felvétele és rekonstrukciója), majd tanári vezetéssel részt vesznek látványhologramok készítésében. Általános tapasztalat, hogy a diákokat lenyűgözi a képek térbelisége, élethűsége, és túlnyomó többségük életében először lát hologramot vagy akár lézert is. A holográfia kapcsán jól bemutatathatók a valóban térbeli holografikus kép, illetve a 3D TV és mozi sztereografikus képe közötti különbségek. A kész hologramokat a csoportok hazavihetik, így kézzel fogható emlékek is marad.

Az alábbiakban két holografikus elrendezést mutatunk be (egy transzmissziós és egy reflexiós típusú), amelyek akár egy középiskolai tanteremben is könnyen felépíthetők. Kifejezetten ügyeltünk arra,

1. kép. A transzmissziós hologram felvételi elrendezése.



hogya ne használjunk olyan optikai vagy mechanikai elemeket, amelyekkel egy középiskolai szertár esetleg nem rendelkezik, ezért mindkét elrendezésnél kizárólag a Litiholo cég hologramkészleteiben található elemeket használtuk. Az egyetlen kiegészítés, hogy (még előzőleg, egyetemi hallgatói méréshez előkészítve) a lézerdióda és a tápegység közé beiktattunk egy kapcsolót, de az nyugodtan kihagyható az elrendezésből.

Az 1. kép transzmissziós hologram munkakészítésének elrendezését mutatja. A lézerdiódából kiinduló szétartó nyaláb egy része a tárgyat – egy három ponton megtámaszkodó műanyag játékreplőt – éri, majd onnan a hologramlemezre szóródik. Ez a tárgyhullám. (A tárgy kiválasztásánál ügyelni kell arra, hogy a lézerdióda hullámhosszán erősen reflektáljon. Vörös lézerdióda esetén a legjobb piros és/vagy fehér színű tárgyat használni.) A szétartó nyaláb másik része közvetlenül a hologramlemezre világítja meg. Ez a referenciahullám. Mint az 1. képen látható, a transzmissziós hologramokra jellemző módon a tárgyhullám és a referenciahullám azonos oldalról éri a hologramot.

A felvételt a Műegyetem Fizika Tanszékén, a 19. labor linóleumpadlóját készítettük el. A tárgy behelyezése után körülbelül 1 percet vártunk az exponálásig, hogy az esetleges mechanikai rezgések elhaljanak. A lézerdióda bekapcsolása után az exponálás körülbelül 10 percig tartott.¹ Exponálás után – a fent leírtak szerint – a hologram mindenfajta vegyi eljárás vagy utókezelés nélkül, azonnal láthatóvá vált (2. kép).

Itt a tárgyat egyszerűen kivettük a helyéről (közben a hologramlemez a helyén, a lézerdióda pedig végig bekapcsolva maradt!), így a lézerdióda fénye az elkészült holografikus rácson diffraktálódva létrehozta a kis repülőgép térbeli rekonstruált képét. A 2. képen a tárgyat az előtérbe helyeztük, hogy a fotón jól elkülönüljön a tárgy háromdimenziós holografikus képétől. Ez utóbbi a hologramlemezen, mint ablakon keresztül tűnik a szemünk elé.

Ezután a Litiholo-készlet reflexiós hologramokhoz való műanyag kiegészítő elemeiből építettük fel a 3. képen látható elrendezést.

Itt a lézerdióda – mint látható – egy magasított állványra kerül, és fénye felülről, körülbelül 45°-ban éri a hologramlemezre. Ha a tárgyat szorosan a hologramlemez mögé helyeztük, a lézerdiódából érkező fény egyrészt közvetlenül megvilágítja a hologramlemezre (ez a referenciahullám), másrészt a hologramlemezen átha-

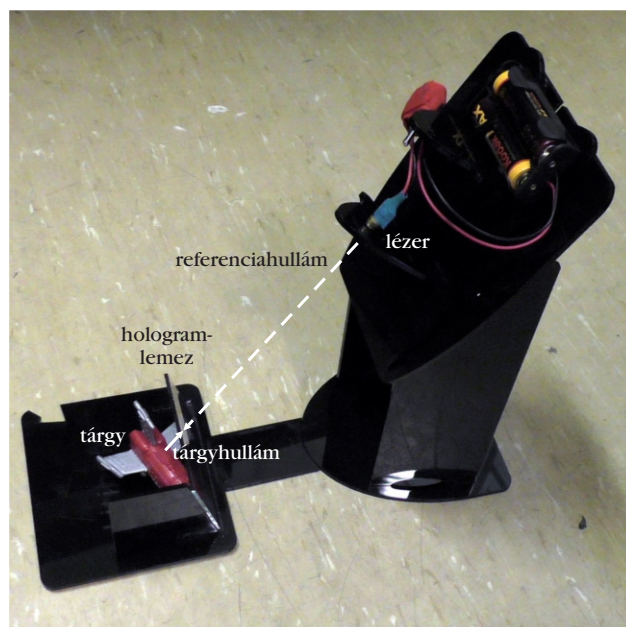


2. kép. A transzmissziós hologram rekonstrukciója.

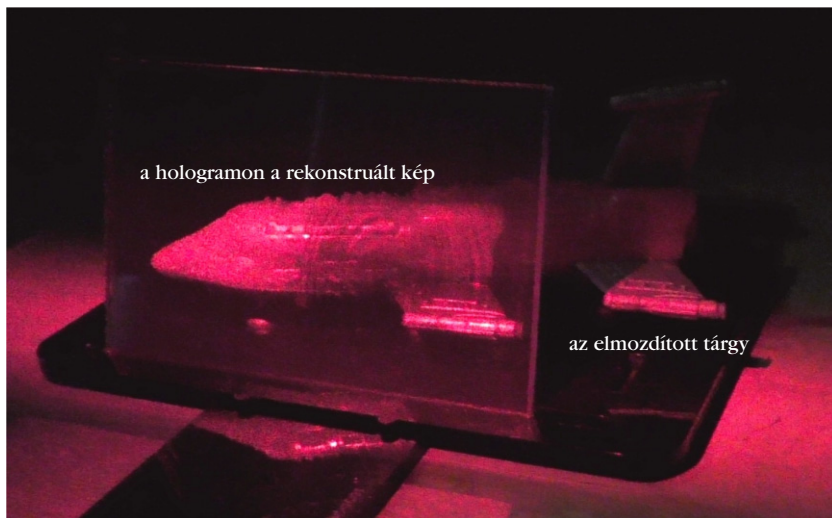
ladva megvilágítja a tárgyat, és arról visszaszóródik a hologramlemez felé (ez a tárgyhullám). Így ennél az elrendezésnél – a reflexiós hologramokra jellemző módon – a tárgyhullám és a referenciahullám ellentétes oldalról éri a hologramot. A felvétel ugyanazon a helyszínen, ugyanolyan időbeli paraméterekkel zajlott, mint az 1. kép transzmissziós hologram-elrendezésénél. A körülbelül 10 perces exponálás végén óvatosan kimozdítottuk a tárgyat a helyéről, miközben a lézerdióda bekapcsolva maradt, és továbbra is megvilágította a hologramlemezre. A holografikus rácson ekkorra már rögzült a lemezben, és a lézerdióda fénye a rácson diffraktálódva ismét jó hatásfokkal létrehozta a tárgy háromdimenziós virtuális képét (4. kép).

A 2. és 4. képet összevetve láthatjuk, hogy a rekonstruált kép mindkét esetben a hologramlemez, mint ablak mögött látszik elhelyezkedni. A különbség az, hogy a transzmissziós hologramnál (2. kép) a

3. kép. A reflexiós hologram felvételi elrendezése.



¹ Ha a lézerdióda és a tápegysége közé nem építettünk volna kapcsolót, akkor a felvétel úgy zajlott volna, hogy a működő lézerdióda fényét fekete kartonpapírral kitakartuk volna addig, amíg a tárgy a helyére került és a mechanikai rezgések lecsillapodtak. Utána a kartonpapírt óvatosan eltávolítva kezdődött volna az exponálás.



4. kép. A reflexiós hologram rekonstrukciója.

megvilágítás a hologramlemez mögül érkezett (a lézertiódá látható is a 2. kép jobb felső sarkában), míg a reflexiós hologramnál (4. kép) a lézertiódá fénye előlről, a fényképezőgéppel azonos oldalról világította meg a hologramlemez.

Hologramkészítéshez hagyományos, ezüst-halogenid- vagy kromát-tartalmú emulziókat használva alapkövetelmény, hogy a felvétel ideje alatt a laborban a lehető legteljesebb *sötétség* legyen (legfeljebb olyan hullámhosszú halvány fény világíthat, amelyre az emulzió nem érzékeny), és az elrendezés minél *rezgésmentesebb* legyen.² Ezek a szigorú feltételek egy középiskolai fizikaórán vagy -szakkörön nem, vagy csak nagy áldozatok árán teljesíthetők. Kipróbáltuk tehát, hogy a lézertiódás, *fotopolimeres* elrendezésnél mennyire lazíthatók a sötétséggel és a rezgésmentességgel kapcsolatos követelmények. A 3. képen látható elrendezést ezért olyan „mostoha” körülmények között is teszteltük, amelyek ezüst-halogenid- vagy kromát-tartalmú emulzióknál szóba sem jöhetnének. A helyszín ezúttal egyikünk (G.B.) egyetemi szobája volt, amely parkettburkolatú padlóval és hatalmas ablakokkal rendelkezik. Az ablakokat bézs színű szalagfüggönnyel sötétítettük el abban a napszakban, amikor az ablak az épület árnyékos oldalán van, de

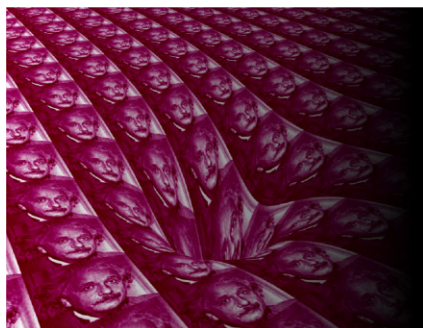
ez is bőven hagyott annyi fényt beszűrődni az egyetem parkja felől, hogy a szobában kényelmesen olvasni lehetett. Ráadásul a folyosóról az üvegajtón át is beszűrődött a fénycsövek fénye. A 3. képnek megfelelő elrendezést a szoba egy árnyékos sarkában, a parketten állítottuk fel. A tárgy behelyezése után ismét 1 percet vártunk, majd körülbelül 10 percig exponáltunk. Meglepetésünkre még ilyen elképesztően igénytelen körülmények között is egészen jó minőségű reflexiós hologramot kaptunk, amelynek fényessége majdnem elérte a 4. képen látható, teljes sötétségben és stabilabb talapzaton felvett hologramét. Mindezekből azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a lézertiódás, fotopolimeres hologramkészlet bármely középiskolában, akár egy sötétítő vagy szalagfüggönnyel elsötétíthető tanteremben is szép, látványos hologramokat tud produkálni.

A hologramkészítés önmagában is nagy élményt nyújt a középiskolás diákoknak. Ezt az élményt néhány ötlettel fokozhatjuk. Megpróbálhatunk valamilyen optikai eszközt, például homorú vagy domború tükröt választani tárgynak. Ekkor – reflexiós hologram-elrendezés esetén – az elkészült hologram maga is homorú vagy domború tükörként fog viselkedni, vagyis gyártottunk egy *holografikus optikai elemet*. Tanulságos kísérlet az is, amikor a hologramot úgy rekonstruáljuk, hogy közben a tárgyat a helyén hagyjuk. Ekkor a tárgyat és a holografikusan rekonstruált képét egymásra lapolódva, egyszerre látjuk. Ha most a tárgyat parányi mértékben elmozdítjuk – például ráfújunk, vagy óvatosan az ujjunkkal megérintjük –, a rekonstruált kép és a tárgy már nem lesz tökéletesen ugyanaz, és interferenciacsíkok jelennek meg a tárgy képén: ezzel az egyszerű kísérlettel a *holografikus interferometria* alapelvét illusztrálhatjuk. Összességében tehát elmondható, hogy a bemutatott készlettel – egyszerűsége ellenére – élményt is adó, látványos és változatos demonstrációs órát lehet tartani.

² Ennek érdekében az optikai és mechanikai elemeket általában légpárnás lengéscsillapítókra nyugvó, nagy tömegű vasasztalon szokás felállítani.

Irodalom

1. <https://www.litiholo.com>
2. <http://felvi.phy.bme.hu/index.php/Holográfia>



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



TÖRTÉNELMI SZIMULÁCIÓ: A TÁVOLSÁGI ÁGYÚZÁS FIZIKÁJA

Szabó Róbert
ELTE TTK IV. éves hallgató

Fizikatanárként fontos belátni, hogy a hagyományos fizikaoktatás új és izgalmas megoldásokat igényel. Azonban – a középiskolai matematika tanterv korlátozása miatt – a fizikát is csak észszerű keretek között lehet tanítani, így azt szükséges lenne a kevésbé ismert, számítógépes ábrázolás útján is megvizsgálni. Tudományos diákköri kutatásom témáját ezért a középiskolai oktatásban sem magyarázott fizikai tényezők bemutatása adta: milyen erők befolyásolják az ágyúból kilőtt, már pályán mozgó lövedék haladását. Dolgozatomban ezen tényezőkből kettőt (közegellenállás, Coriolis-erő) numerikus szimuláció útján is értékeltem, az egyes témákhoz pedig rövid történelmi felvezetést és számítási példákat választottam. Jelen cikk célja, hogy az általános bevezető után, a történelmi és fizikai szempontból érdekesebb effektust (Coriolis-erő) és annak történeti hátterére (Párizs-ágyú) kapott eredményeimet bemutassam, értékeljem, és további módszertani megállapításokat tegyek.

Fizika és történelem

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem harmadéves hallgatójaként a tanári hivatásom két szakjához, a fizikához és történelemhez jól illeszkedő kutatási témát választottam [1]. Fontos belátni, hogy a tantárgyak között a fizika és a történelem olyan egyedi, kettős rendszert alkot, amely kapcsolat végtelen lehetőségeket rejt az oktatás fejlesztésében elmélyülő hallgatók, tanárok, kutatók számára. Hiszen – tudjuk – a történelem nem más, mint háborúk sorozata, a háborúkat, azok harceszközeit pedig évezredek óta a fizika tudománya és a mérnöki technika támogatja és támogatja ma is. Így a múlt hadieseményeit áttekintve nem hagyhatjuk figyelmen kívül az azok tudományos hátterét sem, legyen az például az ókor egyik nagyszabású hadjárata, várostrom a három részre szakadt

Köszönetemet fejezem ki *Abonyi Ivánnak* diákköri dolgozatomban témavezetéséért és *Tél Tamásnak*, hogy alaposabban is elmélyülhettem a Coriolis-hatás dinamikájában, továbbá a numerikus eljárás megismertetéséért és azért, hogy felhívta figyelmem az analitikus megoldásra.



Szabó Róbert az Eötvös Loránd Tudományegyetem fizika-történelem tanárszakos hallgatója. Középiskoláját a Kalocsai Szent István Gimnáziumban végezte. Egyetemistaként főként olyan témákban kutat, amelyekkel a fizika és történelem összekapcsolására törekszik, az elkészített tananyagokkal pedig a tanárok munkáját segíti. 2016-os tudományos diákköri munkájában az ágyúból kilőtt lövedék mozgása során fellépő erőhatásokat vizsgálta, megfelelő történelmi hátteret párosítva hozzá.

Magyarországon, vagy az első és a második világháború gépesített pokla. A téma kimeríthetetlen forrása közül a számomra legizgalmasabb vállalkozás az ágyúlövedék fizikájának történész szemmel is görcső alá vett elemzése lett, amikor első éves egyetemista hallgatóként, a mechanikagyakorlat keretein belül ágyúmechanikával kapcsolatos feladatokat (ferde hajítás, impulzusmegmaradás) oldottunk meg.

Történelmi felvezetés

A tűzérés már az ókorban is ismert és nagy hatékonysággal alkalmazott fegyvernem volt a magasabb és erősebb falak, építmények ellen. Az eszközöket még nem lőpor hajtotta, de a lövedékek fejlődése már akkor megkezdődött. Az ókori görögök és a középkor tűzerei eleinte főként megmunkált kő- (azon belül gránit), esetleg fémgolyókat (bronz, ólom, vas) lőttek, majd elterjedtek a lőporral töltött üreges és meggyújtott, úgynevezett robbanólövedékek is. A török terjeszkedés során megjelent a kettős fémgömbből álló, láncsal összekötött lövedéktípus, amely főként hajók vitorlarendszerében okozott hatalmas károkat. A kora újkori, zömök felépítésű mozsarak – ezeket főleg tengeri ütközetekben, várostromok során, vagy közvetlen összecsapásban alkalmazták a felek – többsége azonban kevésbé hatékony és csupán kicsiny lőtávolsággal rendelkező ágyúnak tekinthető [2].

Amikor távolabbra lőttek...

A viszonylag precíz és nagyobb távolságra is eljutó ágyúgolyó mozgása nem más, mint ferde hajítás, ám nem az iskolából ismert legegyszerűbb formájában. *Galilei* is úgy jutott el a szabadesés és ferde hajítás matematikai leírásához, hogy ágyúkat elsütve próbált rájönni, milyen feltételek szükségesek a célba találáshoz és ezek milyen kapcsolatban állnak más fizikai tényezőkkel. A ferde hajítást a középiskolai fizikaoktatásban azonban csakis vákuummegoldásban ismerhetjük meg, a valóságban viszont, az újkori technikákat vizsgálva és nagyobb távolságot feltételezve már olyan fizikai hatásokkal is számolnunk kell, mint a levegő közegellenállása, vagy a szél iránya és nagysága. A célba érés tökéletességét a mozgás során fellépő oldalgás és párnahatás – amely forgásba hozta az eredetileg egyenes irányban kilőtt ágyúgolyót – is nehezítette [3].

Az ekkor már ballisztikusnak nevezett mozgáspálya koordinációjára az újkorban a vontcsövű ágyút fejlesztették ki. Azután, ahogy a lövedékek is



1. ábra. Az először az első világháborúban alkalmazott, akár 100 kilométer távolságból is pontosan célzni képes, 42 kaliberes mozsárágyút, amelyet a Krupp-művekben készítettek – a gyáros feleségéről, Berta Kruppról – *Kövér Bertának* nevezték. A képeslap rajzolója kiválóan érzékelteti az ágyú-ember méretviszonyokat (saját képeslap).

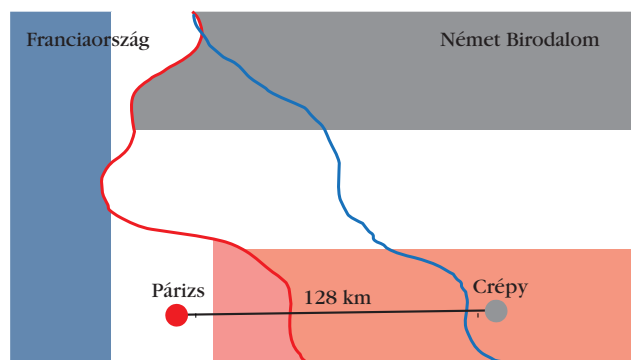
egyre nagyobbak és pusztítóbbak lettek, úgy változott az ágyúk szerkezete és mérete is. A 19. század utolsó évtizedeiben és a 20. század első felében megkonstruált óriások már képesek voltak akár 100 kilométer távolságra is lőni (1. ábra), sőt nagyjából pontosan célba találni. Ehhez azonban a lövedék mozgása során egy újabb fizikai effektust – amelyet a Föld forgásából adódó elmozdulás okoz – kellett figyelembe venniük [4].

Egy utolsó csodafegyver

A cikk fő részét képező Coriolis-hatás hadászati jelentőségéhez elsőként a történelmi háttér elemzése szükséges. Az effektus más háborúkban is szerepet játszott, de *Gaspard-Gustave Coriolis* (1792–1843) felismerése a 19. századra esett, így azt az első világháború egy eseményéhez – ahol már számoltak a Coriolis-erővel – kötöm.

Az 1914 júliusának végén kirobbanó első világháború kezdetén a két ellenséges hatalmi tömb, a központi hatalmak (köztük a Német Birodalom) és az antant (köztük Franciaország) gyors és győzelmes

2. ábra. Az 1918-as nyugati front vázlatos térképe. A kék vonal a német *Tavaszi-offenzíva* kiindulási állását, a vörös pedig a támadás legnagyobb kiterjedésében elért frontvonalat mutatja. A Crépyben felállított *Párizs-ágyú* mintegy 128 km távolságból tüzelt Párizsra.

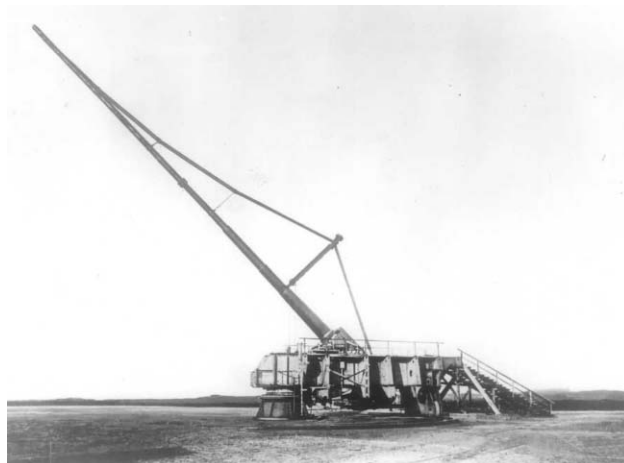


háborút remélt és nem számolt a front megmeredésével, vagyis az állásharc kialakulásával. A fedezékekbe húzódó ellenséges katonák sorozatos támadás-ellen-támadásban őrölték egymást, ám a viszonylag azonos katonai potenciál miatt a front áttörése lehetetlennek tűnt. Az elhúzódó háborúban a győzelem reménye már csak a hátszágok gazdasági és háborús teljesítőképességén múlt, főként az élelmiszer- és hadianyag-termelés terén. Az antant színeiben küzdő Nagy-Britannia tengeri blokáddal zárta el a német kereskedelem útját, meggátolva, hogy a polgári lakosság (és ezáltal a hadsereg) tengerentúli nyersanyaghoz, utánpótláshoz jusson. A szinte kimeríthetetlen tartalékokkal rendelkező Anglia és Franciaország maga mellett tudta a hadianyagot és felszerelést szüntelenül továbbító Amerikai Egyesült Államokat is, miközben az éhező és legyengült német katonák napjai meg voltak számlálva.

Ezért szánta el magát 1918 tavaszán a német vezérkar arra, hogy négy év sikertelen próbálkozás után egy utolsó, mindent eldöntő támadást indít Franciaország ellen, és a front áttörésével még azelőtt foglalja el Párizst, hogy az USA már nem csak gazdasági, de katonai szinten is beavatkozna az európai harcokba. Az óriási szervezéssel és élőerővel támogatott német hadjárat, a „császár csatája” (németül *Kaiserschlacht*) töretlen erővel indult meg 1918 márciusában és jelentős területet kebelezett be a francia államból. Ugyanakkor, amíg a katonák árokból árokba hatoltak előre, a vezérkar Crépy mellett (2. ábra) állította fel új csodafegyverét, amelyről az akkori technológia másutt álmodni sem mert [5].

A *Párizs-ágyúnak* nevezett monstrumot (3. ábra) kettős céllal állították fel. Egyrészt méretével és lövedékeinek pusztításával kellett megfélemlítenie Párizs lakosságát és egyben jeleznie, hogy a német hadsereg már közel jár, bármikor győzedelmeskedhet; másrészt, hogy pánikot keltve menekülésre, illetve fegyverletételre készítse a francia kormányt. Az ágyú csöve 180 000 kg-ot nyomott, saját súlya alatt meghajlott, így egyenesben tartását egy önhordó csigasorral kellett biztosítani. A majdnem 1 méter

3. ábra. A rettegett Párizs-ágyú [7].



hosszú lövedékek 104 kg-ot nyomtak. Az ágyú csőtorkolati sebessége elérte a $v(t=0) = 1600$ m/s-ot. Működtetéséhez mintegy 60 tüzérre volt szükség, és egy-egy lövés után a cső annyira felforrósodott, hogy 24 óra alatt sem hűlt le környezete hőmérsékletére [6]. Crépy és Párizs légvonalban 128 kilométerre vannak egymástól, így már nem csak a sokak által ismert közegellenállás, Magnus-hatás és más kisebb effektusok játszanak szerepet. A forgó rendszerben – azaz a forgó Földön – nagy távolságra mozgó lövedékre már a Coriolis-erő is döntő befolyást gyakorol.

Mozgáskövetés iterációs eljárással

Az elemzés eszközének az iterációs eljárást választottam, amelynek lényege, hogy már ismert adatokból kis Δt idő elteltével új adatokat határozzunk meg, és ezt számítógéppel, numerikusan tesszük. Így a bonyolultsága miatt analitikusan nem megoldható, vagy kézzel már nem számolható differenciálegyenletek is megoldhatók. A számoláshoz a tanulók által is könnyen kezelhető és gyakorta ismert Excel-programot¹ használjuk.

Az eljárás lényege az, hogy a Newton-egyenletet differenciálegyenletté írjuk át (lásd például [8]). Egyetlen tömegpont esetén az $\mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ erőtvény egyértelműen megadja az $\mathbf{a}(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ gyorsulásfüggvényt. Az $\ddot{\mathbf{r}} = \mathbf{a}(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ egyenletet két elsőrendű rendszerként írva: $\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}$, $\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{a}(\mathbf{r}, \mathbf{v})$. Mindkét deriváltat Δt időlépéshez tartozó differenciahányadosként értelmezve és Δt -vel szorozva az $\mathbf{r}_n = \mathbf{r}(n\Delta t)$, $\mathbf{v}_n = \mathbf{v}(n\Delta t)$ jelöléssel az

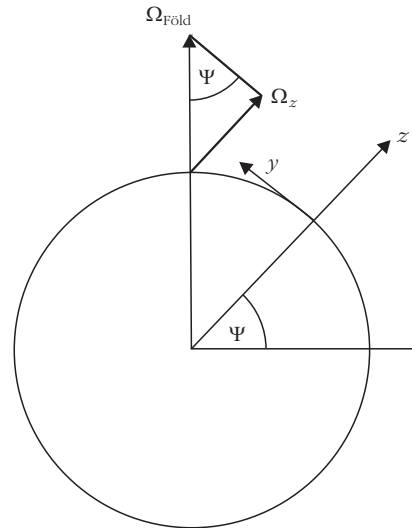
$$\begin{aligned}\mathbf{r}_{n+1} &= \mathbf{r}_n + \mathbf{v}_n \Delta t, \\ \mathbf{v}_{n+1} &= \mathbf{v}_n + \mathbf{a}(\mathbf{r}_n, \mathbf{v}_n) \Delta t\end{aligned}\quad (1)$$

iterálást kapjuk. Az $\mathbf{r}_0$, $\mathbf{v}_0$ kezdőfeltételből indulva egyértelműen következik az $\mathbf{r}_1$, $\mathbf{v}_1$, $\mathbf{r}_2$, $\mathbf{v}_2$ vektorsorozat, vagyis a mozgást leköveti az iterációs eljárás, ami elegendően kis Δt esetén nagyon jól közelíti az eredeti differenciálegyenlet megoldását. A lövedék mozgásának teljes leírásakor $\mathbf{a}(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ az összes ható erőből származó gyorsulásjárulékot tartalmazza.

A lövedék mozgásának szemléltetése

Dolgozatomban [1] – a fenti történelmi példában a közegellenállást és a Coriolis-hatást is figyelembe véve – a Crépy városában felállított ágyúból kilőtt lövedék röptét vizsgáltam. Jelen cikkben azonban – az egyszerűsítés érdekében – eltekintek a közegellenállástól és csupán a Coriolis-hatás vizsgálatával foglalkozom.

¹ A Microsoft Excel táblázatkezelő alkalmazás egyenletek és akár bonyolultabb matematikai számolások eredményeinek megadására alkalmas. Az egyes adatok a számolótáblába való helyezés után módosíthatóvá és formázhatóvá válnak, kijelölt értékekre pedig diagram is illeszthető.



4. ábra. A Coriolis-eltérülés szimulációjához készített koordinátázás a forgó Föld rendszerében. A rajzon $\Omega_{\text{Föld}}$ jelöli a Föld szögsebességét, Ω_z pedig annak helyi függőleges vetületét (Ψ a földrajzi szélesség szöge).

kozom. Ugyanebből a célból az ágyúgolyót egy vízszintes síkban mozgó tömegpontnak tekintem.

Célunk, hogy a szimuláció megoldásával választ kapjunk a kérdésre: mekkora eltérést kapunk numerikusan, a középiskolai módszerrel számolthoz képest? Mindamelllett választ próbálok adni arra is, hogyan kell lőnünk az ágyúval ahhoz, hogy az eltérítő hatást kiküszöböljük és a lövedék pontosan célba érkezzon.

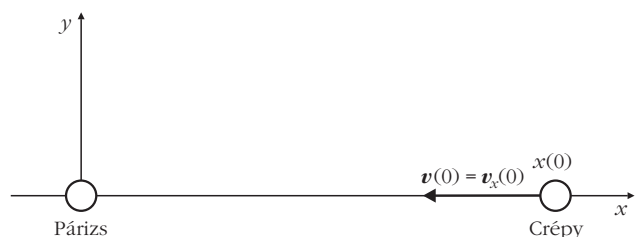
Koordinátázás

A vízszintes síkban történő mozgás leírásához a Föld $\Omega_{\text{Föld}}$ forgását jellemző szögsebesség helyi függőleges vetülete szükségeltetik, amelyet a 4. ábra szerinti egyszerű szögfüggvény ad meg:

$$\Omega_z = \Omega_{\text{Föld}} \sin \Psi. \quad (2)$$

A rajzon szereplő Ψ a földrajzi szélesség szöge. A térkép (2. ábra) leolvasása során azonban látszik, hogy a két város földrajzi szélessége között mindössze $0,9^\circ$ különbség van, így ezen különbséget elhanyagolhatónak választottam, és értékét a két városra azonosnak, $\Psi = 48,5^\circ$ -nak vettem. A Föld ismert $\Omega_{\text{Föld}} = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ szögsebességével számolva, $\Omega_z = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

5. ábra. A Coriolis-erő szimulációjához használt x a kelet–nyugati röptávolság, y az észak–déli vízszintes eltérülés – koordináta-rendszer a kezdeti $y(0) = 0$, $v_y(0) = 0$ feltételek jelölésével.



1. táblázat					
Az (1) differenciálegyenlet megoldását adó Excel-tábla első és utolsó néhány sora a számolt értékekkel					
	A oszlop t (s)	B oszlop $x(t)$ (m)	C oszlop $v_x(t)$ (m/s)	D oszlop $y(t)$ (m)	E oszlop $v_y(t)$ (m/s)
1. sor	0	128000	-565,50	0	0
2. sor	0,1	127943	-565,50	0	0,00622
3. sor	0,2	127887	-565,49	0,00062	0,01244
4. sor	0,3	127830	-565,49	0,00187	0,01866
5. sor	0,4	127774	-565,49	0,00373	0,02488
...					
2264. sor	226,3	40,55	-565,32	1592,03	14,0755
2265. sor	226,4	-15,98	-565,32	1593,43	14,0818

Az utolsó előtti sorban x még pozitív, azaz a lövedék még repül, az utolsó sorban az x már negatív, tehát e két időpillanat között célba ért. E két sorban lévő y értékek átlagát, 1592,7 m-t tekintjük az eltérülés keresett értékének.

A mozgást leíró függvényhez derékszögű koordináta-rendszert veszünk fel, az x (kelet-nyugati) tengely a két várost köti össze, az y (észak-déli) tengelyen pedig majd a észak-déli eltérülés nagyságát kapjuk meg (5. ábra). A lövedék kiindulási pontja Crépy, célja 128 kilométerre, azaz $x(0) = 128\,000$ méterre Párizs középpontja. Mivel az ágyú is az x tengelyen van, $y(0) = 0$, és az origó felé célozva a kezdeti $v_y(0)$ ugyancsak nulla. A tipikusan 45° -os szögben történt tüzelés esetén $v(0) = 1600$ m/s csőtorkolati sebességet használva, az észak-déli irányú, kezdeti sebességkomponens

$$v_x(0) = -v(0) \cdot \cos 45^\circ. \quad (3)$$

Ennek 1131 m/s nagysága a levegő közegellenállása miatt a mozgás során jelentősen lecsökken, a teljes útra átlagsebességet feltételezve a továbbiakban ennek felével,

$$v_x(0) = -565,5 \text{ m/s} \quad (4)$$

értékkel számolunk.

Vízszintes síkban történő mozgás esetén a Coriolis-erő két komponense $2m\Omega_z v_y$ és $2m\Omega_z v_x$ [9], vagyis a differenciálegyenletet meghatározó $\mathbf{a}(\mathbf{r}, \mathbf{v})$ gyorsulásfüggvény:

$$\mathbf{a} = (2\Omega_z v_y, -2\Omega_z v_x, 0). \quad (5)$$

Ezt a kifejezést használjuk az (1) iterációban.

² Az $\ddot{x} = 2\Omega_z \dot{y}$, $\ddot{y} = -2\Omega_z \dot{x}$ differenciálegyenlet lineáris, ezért (bár nem középiskolás módszerrel) megoldható. Az eredmény:

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{v(0)}{2\Omega_z} \sin(2\Omega_z t - \beta) + \frac{v_y(0)}{2\Omega_z} + x(0), \\ y(t) &= \frac{v(0)}{2\Omega_z} \cos(2\Omega_z t - \beta) + \frac{v_x(0)}{2\Omega_z} + y(0), \end{aligned}$$

ahol

$$\tan \beta = \frac{v_y(0)}{v_x(0)} \quad \text{és} \quad v(0) = \sqrt{v_x^2(0) + v_y^2(0)}.$$

Az első eredmény

Excel-táblázatunk első két sorában a kezdeti paraméterek, míg a továbbiakban az azokat felhasználó, számolt értékek láthatók. Az 1. táblázat A oszlopában az indulás óta eltelt idő szerepel a szimuláció lépésközének – 0,1 másodpercet választottam – megfelelő időkülönbséggel.³ A táblázat B és D oszlopában rendre a vízszintes röptávolság és az észak-déli eltérülés értékeit méterben, míg a C és E oszlopában rendre a vízszintes irányú röppebességet és az észak-déli eltérülés sebességét, m/s-ban láthatjuk.

Az Excel által végigszámolt adatokból kirajzolódik a Coriolis-erő miatt eltérült röppálya képe (6. ábra). Az iteráció alapján (1. táblázat) látható, hogy a Párizs-ágyú lövedéke, mialatt eléri az $x_{\text{cél}} = 0$ távolságot, azaz Párizst, a középponttól $y_{\text{cél}} = 1592,7$ méter, azaz körülbelül 1,6 kilométeres eltérést szenved.⁴ Egy háborúban – pláne, ahol négy évnyi küzdelem után végre felül lehet kerekedni a kitaró ellenségen – ilyen mértékű mellélövés nem megengedhető!

Korrekcó a zérus eltérüléshez

A németek ismerték a Coriolis-erőből adódó eltérést, vajon hogyan módosíthatták a célzást ahhoz, hogy a lövedék pontosan, azaz zérus eltéréssel érkezzen célba (7. ábra)?

A repülési idő 226,3 másodperc, ez alatt a Coriolis-erő 1593 méterre, északra térítette el a lövedéket. Egy extra, e távolságot pont ennyi idő alatt megtérvő 7,04 m/s déli irányú sebességkomponens – amely se-

³ Minél kisebb időközlel dolgozunk, eredményünk annál pontosabb és szemléletesebb lesz.

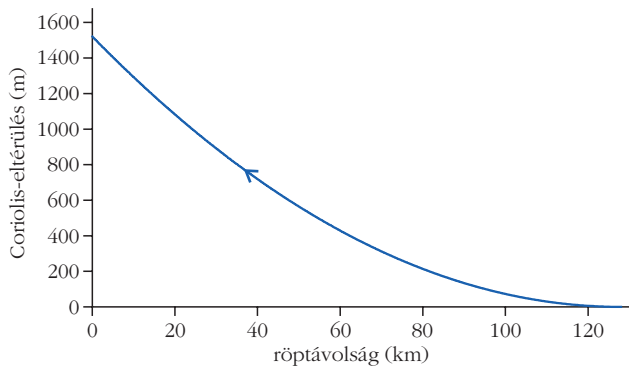
⁴ Az egzakt megoldás alapján a pálya az

$$\left(x - x(0) - \frac{v_y(0)}{2\Omega_z}\right)^2 + \left(y - y(0) + \frac{v_x(0)}{2\Omega_z}\right)^2 = \frac{v^2(0)}{(2\Omega_z)^2}$$

egyenletű kör. A környezeti áramlások irodalmában a vizsgált mozgást tehetetlenségi körmozgásnak nevezik, ugyanis a szállókések által elindított óceáni víztömegek az ilyen egyenletű körökön mozognak [10, 11]. Az $y(0) = 0$, $v_y(0) = 0$ kezdőfeltételekkel a Párizs középpontjának megfelelő $x = 0$ koordináta-hoz tartozó $y_{\text{cél}}$ értékre másodfokú egyenletet kapunk, amelyből

$$y_{\text{cél}} = \frac{|v_x(0)|}{2\Omega_z} - \sqrt{\left(\frac{|v_x(0)|}{2\Omega_z}\right)^2 - x^2(0)}.$$

Mivel $x(0) = 1,28 \cdot 10^5$ m és $|v_x(0)|/(2\Omega_z) = 5,14 \cdot 10^6$ m, ezért a becsapódáskori eltérés, $y_{\text{cél}} = 1593,7$ m. Numerikus közelítéssel számolt eredményünk tehát ezrelék pontossággal megegyezik az egzakt megoldás értékével.



6. ábra. A Coriolis-eltérülés a vízszintes röptávolság függvényében ($x(0) = 128\,000$ m, $v_x(0) = -565,5$ m/s).

besség két nagyságrenddel kisebb, így nem befolyásolja a lövedék repülési átlagsebességét – éppen kompenzálja az eltérülést. Ennek segítségével:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{v_y(0)}{v_x(0)}, \quad (6)$$

ahol β az a korrekciós szög, amellyel az ágyú tüzelési irányát délre – azaz balra – kell módosítani. Az ismert adatokból ekkor $\operatorname{tg} \beta = 0,0125$, vagyis $\beta = 0,0125$ rad = $0,71^\circ$ lesz a korrekciós szög.⁵ Eredményünket numerikusan, az Excel-táblázatkezelővel is ellenőrizhetjük, grafikonon megjeleníthetjük (8. ábra).

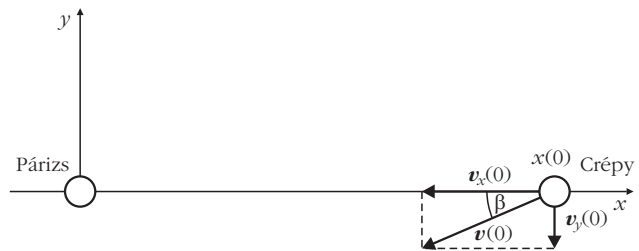
Diszkusszió, eredmények

Két fontos kijelentést fogalmazhatunk meg. Egyrészt, hogy az Excel-program által számolt eredmények azonosak a szimuláció nélkül végrehajtott, egzakt módon megoldható differenciálegyenletek számításaival. Másrészt – és ezt már a történelemtanár mondatja velem – kijelenthetjük, hogy a demoralizáló csodafegyverként felállított Párizs-ágyú hatékonysága meg kellett feleljen a német vezérkar elvárásainak, hiszen a birodalom mindent erre az utolsó, döntő szereppel bíró kártyára tett fel. Addigra a jelenség jól ismert volt, és ezért már kompenzáló célzóberendezést használtak, ahogy arról Horváth Árpádtól is olvashatunk [12].

Párizs ágyúzásakor más, technikai okokból fellépő hibák is jelentkeztek, mint a csőtágulásból adódó célzási pontatlanság, a huzagolás és az ágyú csövének egyenesben tartása, valamint a nehéz kezelés és irányíthatóság. Ezen problémák azonban a használat „természetes”, nem javítható velejárói voltak. Ellenben, a Coriolis-erő hatásának kiküszöbölése megoldható feladatnak tűnt!

Cikkünkben, amellet, hogy egy speciális történelmi eseményen keresztül fizikával foglalkoztunk és összekötöttük e két tantárgy egyedi vonásait, a kö-

⁵ A pályát megadó kör akkor megy át az origón, ha $v_y(0) = -x(0)\Omega_z$ és $\operatorname{tg} \beta = x(0)\Omega_z / |v_x(0)|$. Adatainkkal $v_y(0) = 7,040$ m/s és $\operatorname{tg} \beta = 0,01245$ radián, vagyis a numerikus eredmények ismét legálább ezrelék pontosággal közelítik az egzaktot.



7. ábra. Az ágyút kis β szöggel délre irányítva kapott sebességviszonyok: $v_y(0)$ kicsi értéke miatt $v_x(0) \approx v(0)$ kezdősebességgel.

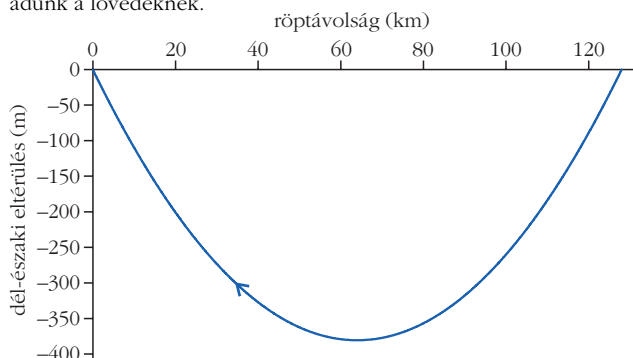
zépiskolai fizikaoktatás egy új módszerét használtuk. Az ágyúgolyó mozgásakor fellépő közegellenállás és Coriolis-erő középiskolai oktatása csakis az iteráló módszer segítségével lehetséges, hiszen azt a tantervek sem tartalmazzák a matematikai háttér bonyolultsága és a háttérelmélet hiányzó részei miatt. Ugyanakkor a leírás rendkívül leegyszerűsödik, ha az iteráló program eszközeül a középiskolában is tanított és könnyű kezelhetőséggel rendelkező Excelt használjuk. Segítségével a tanulók önálló következtetések levonására is képesek.

Dolgozatommal példát kívánok mutatni és inspirálni szeretném a jövő pedagógusait, hogy hasonló témákat keressenek és kutassanak, és azokat szimulációkkal, vagy a témához kapcsolódó gyakorlati példákval lássák el. Fizika és történelem szakpárom találkozási pontja lehet például az ókori Egyiptom múmiáinak radiokarbon kormeghatározása, az atombomba fizikája és annak történelmi háttere, illetve a jövő tudományát érintő drónok technológiája is. Ugyancsak izgalmas kutatási téma lehet az irodalom és a fizika együttes vizsgálata.

Irodalom

1. Szabó Róbert: *Pályán az ágyúgolyó*. Tudományos diákköri dolgozat, ELTE TTK, 2016.
2. Horváth Árpád: *Az ágyú históriája*. Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest (1966) 47–94.
3. Horváth Árpád: *Az ágyú históriája*. Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest (1966) 214.
4. Horváth Árpád: *Az ágyú históriája*. Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest (1966) 215.
5. Horváth Árpád: *Az ágyú históriája*. Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest (1966) 212.
6. Horváth Árpád: *Csodafegyverek*. Zrínyi Katonai Lap- és Könyvkiadó, Budapest (1972) 49–50.

8. ábra. A Coriolis-eltérülés mértéke zérus, ha az ágyúcsövet kissé balra állítva 7,04 m/s déli irányú, vízszintes sebességkomponenst adunk a lövedéknek.



7. Háborús szörny 2. Párizs-ágyú. <http://www.keptelenseg.hu/keptelenseg/haborus-szorny-2-69474>
8. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: *Mai fizika I. A modern természettudomány alapjai. A mechanika törvényei*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest (1970) 120–125.
9. Tasnádi Péter, Skrapits Lajos, Bérces György: *Mechanika I*. Dialóg Campus Kiadó, Budapest–Pécs (2004) 276–279.
10. Tél Tamás: A Coriolis-erő és a környezetfizika: a lefolyótól a ciklonokig. *Fizikai Szemle* 56/8 (2006) 263–267.
11. Jánosi Imre, Tél Tamás: *Bevezetés a környezeti áramlások fizikájába: Légköri, óceáni folyamatok és éghajlati hatásai*. Typotex Kiadó, Budapest (2002).
12. Horváth Árpád: *Csodafegyverek*. Zrínyi Katonai Lap- és Könyvkiadó, Budapest (1972) 50.

PROBLÉMAALAPÚ TANULÁS EGY NYERTES PÁLYÁZAT TÜKRÉBEN

Gyermán György

Szent József Általános Iskola, Gimnázium,
Szakgimnázium és Kollégium, Debrecen

Az elmúlt, 2016–2017-es tanévben két 11. évfolyamos, gimnazista tanítványom ösztöndíjat nyert *Település közvilágításának, tűzvédelmének, jelzőlámpáinak számítógépes vezérlése* című pályázatához (UT-2016-0006).

A pályázat lényege egy olyan településmakett elkészítése, amelyen a címben leírtak a valóságosnak megfelelően (vagy egy kicsit jobban) valósulnak meg.

A települést egy bútorlapokból készült, lábakon álló terepasztalon hozták létre a tanulók. A megtervezésénél figyelni kellett arra, hogy a vezetékek, relé, konverter biztonságban, a nézők számára nem hozzáférhető helyen legyenek, azonban legyen lehetőség a későbbi alakításra, fejlesztésre (oldható kötések). A makettet plexivel fedtük le. A terepasztal elkészítéséhez a terveket AUTOCAD-ben rajzoltuk meg. A házak, kórház, tűzoltóság, utak kartonpapírból készültek (1. ábra).

A település közvilágítását tanulóim LED-ekkel oldották meg. A közvilágítás be- vagy kikapcsolását a környezet fényerősségének – amelyet egy fotoellenlás érzékel – megfelelően vezérli a szoftver.



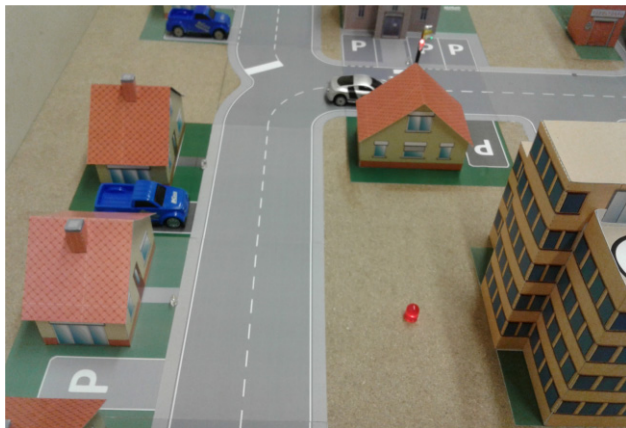
1. ábra. A település makettje nappal.

A fotoellenlás nagysága a fényerősség csökkenésével növekszik. Ezt felhasználva egy előre beállított értéknél kapcsol be a világítás a településen. A közvilágítást 18 darab erős fényű fehér LED jelenti, amelyek a „közlekedő” autók (4 darab) fehér és piros lámpáival párhuzamosan vannak kapcsolva (2. ábra).

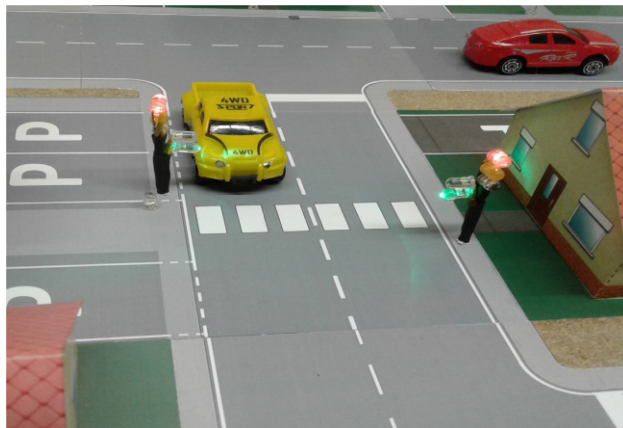
2. ábra. Sötétedéskor bekapcsol a közvilágítás és az autók lámpája is felgyullad.



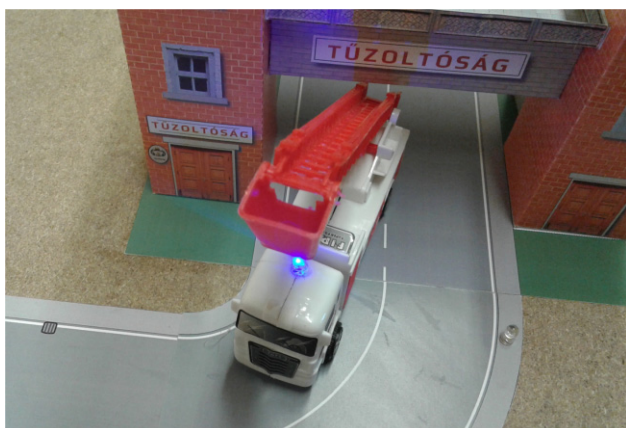
Gyermán György a debreceni Szent József Általános Iskola, Gimnázium, Szakgimnázium és Kollégium matematika-fizika-informatika szakos középiskolai tanára már több mint negyed százada van a pályán. Publikál matematikából és fizikából. Mérés-szoftvereket ír a fizika tanításához, melyek alkalmazásáról oktatófilm is készült (videotórium). Tanulói mindhárom tantárgyból sikeresen versenyeznek. Elkötelezett tehetséggondozó tanár.



3. ábra. „Tűz van babám”, a piros LED kigyulladt.



6. ábra. A közlekedési lámpa is működik.



4. ábra. Villog a tűzoltó autó kék LED-je (sőt szirénázik is) indulhat a mentés.

Faj	Szerkesztés	Formátum	Nézet	Súgó
Tűzriasztás	történt:	2017. június 22., csütörtök	14:31:52	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 22., csütörtök	14:32:06	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 22., csütörtök	14:34:03	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 22., csütörtök	14:49:52	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 22., csütörtök	14:50:07	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 22., csütörtök	19:39:37	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 22., csütörtök	19:40:14	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 22., csütörtök	19:41:49	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 22., csütörtök	19:42:13	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 24., szombat	12:32:39	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 24., szombat	12:32:54	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 24., szombat	12:40:20	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	8:52:51	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	8:53:42	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	8:54:44	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	9:02:45	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	9:07:49	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	10:48:06	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	10:48:31	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	11:09:50	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	11:10:49	
Tűzriasztás	történt:	2017. június 27., kedd	12:14:43	
Tűzriasztás	történt:	2017. július 19., szerda	10:19:02	
Tűzriasztás	történt:	2017. július 19., szerda	10:19:41	
Tűzriasztás	történt:	2017. július 19., szerda	10:20:32	
Tűzriasztás	történt:	2017. július 19., szerda	10:30:02	
Tűzriasztás	történt:	2017. július 19., szerda	10:30:36	
Tűzriasztás	történt:	2017. július 19., szerda	10:31:05	

5. ábra. A tűzriasztások jegyzőkönyve.

Némi számítást követve a LED-ek megfelelő erősségű világításához a tanulók meghatározták a szükséges külső tápegységet és konvertert. A kapcsolás vezérlése relével történik.

A település tűzfigyelését a tanulók egy termoellenállás (NTC) segítségével oldották meg. Az NTC tulajdonsága, hogy hőmérséklet-emelkedés hatására az ellenállás értéke csökken. Egy előre beállított határnál a számítógép bekapcsolja a villogó piros LED-et a település központjában, (3. ábra), valamint a tűzoltó-

autó tetején a villogó kék LED-et, és beindítja a szirénát (4. ábra).

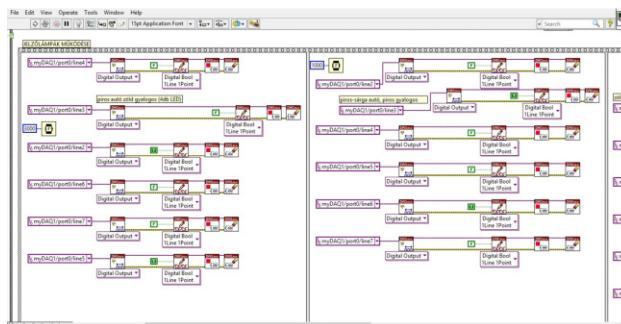
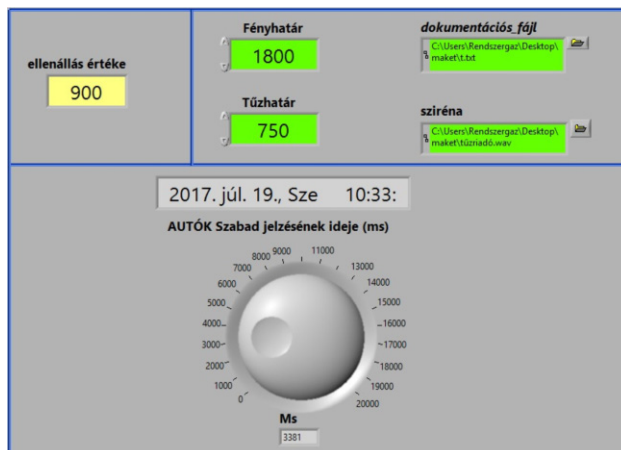
A riasztást a szoftver másodperc pontossággal dokumentálja, egy txt-fájlba elmentve (5. ábra).

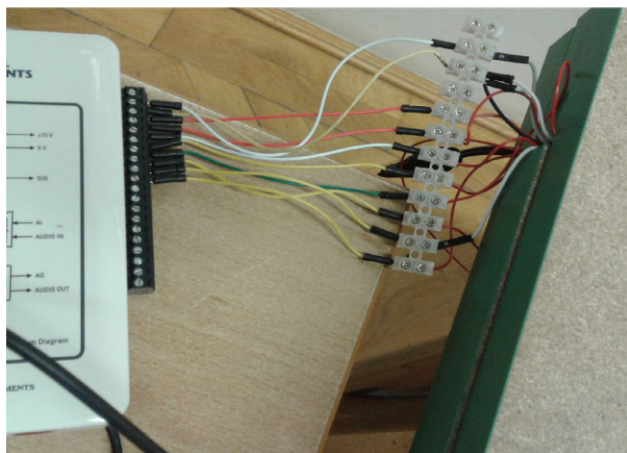
A gyalogosok és gépjárművek közlekedését segítő jelzőlámpák két zebránál a szokásos módon működnek azzal a különbséggel, hogy működés közben is lehet változtatni a gépjárművek zöld lámpájának időtartamát (6. ábra).

A vezérlést a National Instruments által kifejlesztett Labview programozási nyelven valósítottuk meg. A program frontpanelje és blokkdiagramjának egy része a 7. ábrán láthatók.

Az adatgyűjtést a foto- és a termoellenállásról, valamint a relé, a jelzőlámpák és veszélyjelzők működte-

7. ábra. A Labview programozási nyelven írt vezérlés frontpanelje és blokkdiagramjának egy része.





8. ábra. A myDAQ és a terepasztal összekapcsolása.

tését myDAQ segítségével oldották meg a tanulók (8. ábra). Az 1. táblázat a digitális kimeneteken történő vezérléseket tartalmazza. A LED-ek másik „lába” mindenütt a földdel – DGND – van összekötve.

E pályázat hozzásegítette a tanulókat a folyamattervezés lépéseinek megismeréséhez, követéséhez, fejlesztette AUTOCAD ismereteiket. Megtapasztalhatták a fizikaórákon tanultak gyakorlati alkalmazhatóságát a félvezetők témakörében, jelfogók működésében, a LED-ek nyitófeszültségének meghatározásában, élettartamának meghosszabbításában, elektronikai kapcsolások átgondolásában, optimalizálásában. A programozás során alkalmazniuk kellett az összes vezérlési szerkezetet (szekvencia, case struktúra, for és while ciklusok), adatgyűjtést (foto- és termoellenállá-

1. táblázat	
A myDAQ digitális kimeneteivel vezérelt funkciók	
DIO	Mit vezérelnek rajta keresztül?
0	veszélyjelzők vezérlése: tűzoltóautó tetején villogó kék, település központjában villogó piros
1	a közvilágítást és az autók világítását kapcsoló relé
2	jelzőlámpa 1 a zebra mindkét oldalán: autó piros, gyalogos zöld autó sárga, gyalogos piros autó zöld, gyalogos piros
3	
4	
5	jelzőlámpa 2 a zebra mindkét oldalán: autó piros, gyalogos zöld autó sárga, gyalogos piros autó zöld, gyalogos piros
6	
7	

sok értékei), külső eszközök vezérlését (relé, jelzőlámpák és veszélyjelzők), valamint a fájlkezelést (szíréna indítása, naplózás).

Összességében elmondható, hogy a projekt során tanulóim sokat tanultak; megtanultak együtt, felelősséggel dolgozni úgy, hogy a munka számunkra végig örömet jelentett.

Az általuk elkészített makett remélhetőleg hosszú évekig teszi a fizika- és informatikaórákon tanultakat kézzelfoghatóbbá, valóságosabbá, felkeltve így a jövő mérnökeinek figyelmét e két szép és rendkívül hasznos tantárgyra és együttalkalmazhatóságuk lehetőségeire.

A működésről készült rövid filmbemutató megtekinthető a www.szjg.hu oldalon valamint a <https://youtu.be/VRemrPfN09s> címen.

KÖNYVESPOLC

Rajkovits Zsuzsanna: FIZIKA AZ ÉLŐ TERMÉSZETBEN

Globe Edit International Book Market Service Limited 2017, 126 oldal

ISBN 978-620-2-48711-5



Az élő és élettelen természet sokszínű és sokféle módon összefonódó világában a diákok a hagyományosan felosztott diszciplínáknak megfelelően a fizika-, a kémia-, a biológia- és a földrajzórán elsajátított, egymástól általában elkülönülő ismereteik alapján kísérhetnek meg eligazodni. Ezt segíthetjük azzal, ha bemutatunk kapcsolódási pontokat az egyes tárgyak között. A Szerző a jelen kötetben a fizika oktatásában felhasználható biológiai jelenségek közül mutat be példákat, a fizika alapján értelmezhető, sokszor a fizika egyenletei segítségével kvantitatív módon leírható vagy legalábbis becsülhető jelenségek közül. Félreértés ne essék: a Szerző nem a természettudomá-



Rajkovits Zsuzsanna

Fizika az élő természetben

Gyűjtemény a fizika interdiszciplináris szemléletű tanításához

nyok integrált oktatása mellett teszi le a garast (ezt igazolja a könyv alcíme is: „Gyűjtemény a fizika interdiszciplináris szemléletű tanításához”), csak amellett érvel, hogy érdekesebbé lehet tenni a fizikaórákat azzal, ha felhívjuk a figyelmet a fizikai ismeretek alkalmazhatóságára más területek, esetünkben a biológia jelenségeinek leírásában. Az élővilág közismert jelenségeit – a tanórai kísérletek mellett és nem helyett(!) – a fizikai törvények érvényesülésének demonstrációjaként alkalmazhatjuk. Emellett a könyv arra is mutat példákat, hogy nem csak a fizika szemléletesebbé tételére használhatunk példákat az élővilágból, hanem egy-egy élőlény felépítésének vagy életmódjának bemutatásával rávilágíthatunk azokra a fizikai jelenségekre is, amelyek az evolúció során meghatározták az adott élőlény kifejlődését. Ahogy a Szerző írja „így lehet a fizika hasznos vendég a biológiaórán is”.

A konkrét példák bemutatása *A fák és a fizika* című fejezettel indul. Egyszerű fizikai összefüggések alapján kvantitatív becslést mutat be arra, hogy mi szab határt a Földünkön létező fák magasságának. A fák vízforgalma biológiai folyamatainak markáns jelenségeit a párolgás és a folyadékáramlás fizikai egyenletei alapján lehet megérteni. Mit tanulhatunk meg a fák szerkezetéből, vagy hogyan érthetjük meg a fák kergének mintázatát? Miért rezeg a nyárfalevél? Ezekre a kérdésekre is fizikai magyarázatokat ka-

punk. Végül megérthetjük, hogy miért használható a parafa pezsgősüvegek dugójaként és kiváló hőszigetelő anyagként is.

A következő nagy fejezet a vizek élővilága és a fizika törvényeinek kapcsolataira mutat példákat. Magyarázatot kapunk arra, hogy miként tudnak állni és haladni rovarok a vízfelszínen, hogy a felhajtóerőnek és a súrlódásnak milyen szerepe van például a kacsák úszásában. Számos vízi állat úszásának és merülésének példáján Arkhimédész törvényének jelentőségét láthatjuk. Az áramlások törvényei is számos jelenségben észrevehetők, egyebek között a halak alakjában, vagy a vérkeringésben.

A következő fejezet az élővilág színeivel foglalkozik. Itt számos, napjainkban is élénken kutatott téma is megjelenik, például a lepkeszárny nanoszerkezetének szerepe a lepkék színének kialakulásában, vagy a kagylóhéj réteges szerkezetének megismerése és alkalmazása a biológiát utánózni törekvő biomimetikus anyagok világában.

Az utolsó fejezet a különleges körülményekhez való alkalmazkodás eseteit és lehetőségeit tárgyalja. Szerteágazó példák sokaságát mutatja be és értelmezi elsősorban a legközismertebb halmazállapot-változások, a párolgás, lecsapódás, olvadás és fagyás alapján.

Rajkovits Zsuzsanna nem titkolja, hogy a könyvben bemutatott szemelvények mind fizikából, mind biológiából néhány esetben túlmennek az általános és középiskolai tananyagon. A hiányzó ismeretek gyűjtéséhez javasolja a nagy internetes jártassággal rendelkező tanulók bevonását. Így a diák akár a tanári munka segítőjeként is aktív részesévé válhat a tanítási folyamatnak.

L. J.



Benkő József, Mizser Attila (szerk.):
METEOR CSILLAGÁSZATI ÉVKÖNYV 2018
Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest, 2017, 320 oldal



A Csillagászati évkönyv központi része a *Kalendárium*, amely a terjedelem kétharmad részét teszi ki.

A Wikipédia szerint „a kalendárium egy, az év napjait, évfordulókat, ünnepeket, sok esetben olvasmányokat is tartalmazó évkönyv, melynek elsődleges feladata az idő múlásának jelzése volt”. Az idő múlását esetünkben a csillagászati események egymásutánja jelzi. Minden hónapban két oldalon olvashatunk a Nap és a Hold keltének, delelésének és nyugtának időpontjáról, valamint az egyes napokhoz rendelt névnapokról. Egy további oldal a bolygók észlelhetőségéről tájékoztat. Minden hónapnál találunk egy-egy égbépet a legfontosabb csillagképek elhelyezkedéséről (a hónap közepén este 8 órakor). A Hold és a bolygók jól megfigyelhető helyzeteit rögzíti az *Eseménynaptár*. Az adott hónap fontos eseményeit néhány sorostól néhány oldalas terjedelmű írások ismertetik. A 2018-as év ajándéka az amatőrcsillagásznak szervezett három csillagtúra. Áprilisban a *tavaszi galaxistúra* két igazi tavaszi csillagkép, a *Vadászebek* és a *Bereniké Haja* kínálatából válogat. A

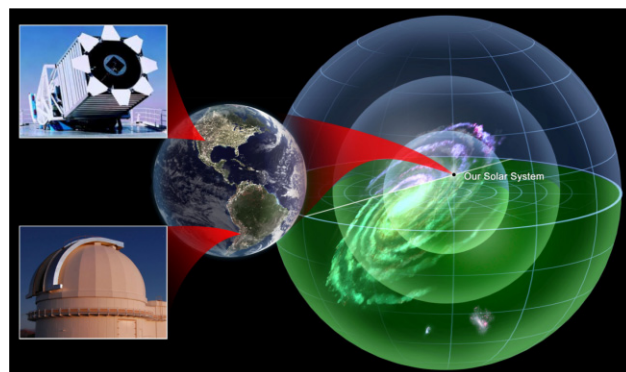
túrávezetés lényege, hogy az egyes galaxisokról megtudjuk, hogy az észleléshez milyen műszerre van szükség: az NGC 4725 galaxis esetében ezt és ezt látjuk, ha „jó szemünk, egünk és 15 cm-nél nagyobb távcsövünk van”.

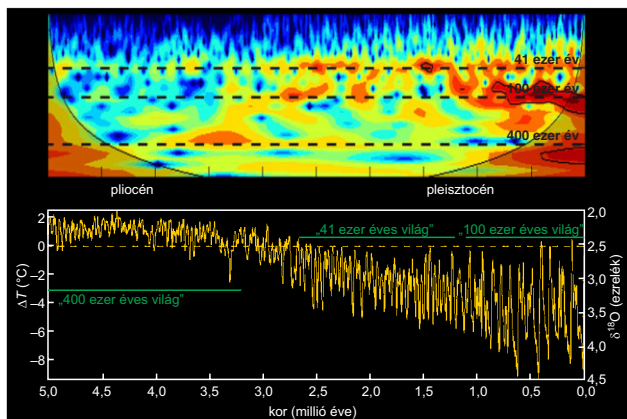
Júliusban a Hattyú vidékét járhatjuk be. A Fátyolköd egy fényesebb szakaszának „felszínén már 10 cm-es műszerrel is elkülöníthetünk néhány foltot, 30 cm-es műszer és OIII-as szűrő szálas-csomós szerkezetet enged látni a különleges szépségű ködösségben”. Az októberi eseménynaptár rész az őszi mélyég-túra, amely az eddigiekhez hasonló szellemben kalauzol: „feltétlenül vegyük szemügyre még a 8'-es, 8 magnitúdós NGC 6939 nyílthalmazt, amelyet sok tucat 11,5 – 14 magnitúdós csillag alkot. A sűrű csillaghalmaz 20 cm-es távcsővel mutatja meg teljes szépségét”.

Rendszeresen találkozunk az adott hónap fontos üstökösmozgásaival; a Jupiter-holdak és Szaturnusz-holdak helyzetváltozásaival. Itt jut hely a fontosabb együttállások leírására és az évfordulókra, amelyek közül az augusztusit emelem ki, mert ekkor lesz 50 éve, hogy elhunyt *George Gamow*, azon Tompkins úr megálmodója, aki álmaival sokak számára tette élvezetessé a modern fizika nagy elméleteit. Persze első-sorban eredményes elméleti fizikus volt, aki a korai Univerzum történetének fontos elemeit dolgozta ki.

A Kalendárium után öt cikkből válogathatunk:

Petrovay Kristóf: A jégkorszak csillagászati okai – A tízezer-százezer éves időközönként változó eljegesedések okai között feltehetően szerepet játszik az orbitális moduláció. „Az eljegesedések, avagy a szűkebb értelemben vett jégkorszakok ritmusának szabályozásában viszont már meghatározó szerepet játszanak a csillagászati tényezők, jelesül a Föld pályaelem változásai és a felszíni inszoláció mértékének és eloszlásának ezzel összefüggő ingadozásai: az *orbitális moduláció*. Ennek hatása nem mindig kézenfekvő, ami a pontos hatásmechanizmust illetően a mai napig heves vitákat vált ki.” Ezek alapjait vázolja a cikk.





Mészáros Szabolcs: *Az APOGEE égboltfelmérés –* Az Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment célja a Tejútrendszer szerkezetének és fejlődésének feltárása a csillagok fizikai paramétereinek – effektív hőmérséklet, felszíni gravitációs gyorsulás, fémtartalom és 25 elem koncentrációjának – nagy pontosságú meghatározásával. A közeli infravörösben működő spektrográffal a Tejútrendszerben található nagy mennyiségű por jóval átláthatóbb, mint az emberi szemnek látható tartományban. 2014-ig fél-millió nagy felbontású spektrum készült 141 000 csillagról, a folytatásban 2020-ig 500 000 további csillag észlelése a cél. A cikk leírja az APOGEE célkitűzéseit és elért eredményeit.

Nagy Andrea: *Az SN 1987A harminc éve, avagy a jó, rossz és csúf szupernóva* – Az SN 1987A jelű szupernóva immár harminc éve áll a csillagászok érdeklődésének középpontjában. Ez nem is csoda, hiszen 168 000 fényéves távolságának köszönhetően a távcső feltalálása óta megfigyelt legközelebbi felvillanás következménye. Azonban még így is 20–30-szor távolabb van a „történelmi” galaktikus szupernóváknál. Máig egyetlen szupernóva, amelyet neutrínódetektorokkal is sikerült észlelni. A rendelkezésre álló rengeteg információ ellenére már osztályba sorolása is gondot okozott, a kék szuperóriás szülőcsillag sem volt magától értetődő, az pedig, hogy az összeomlás után visszamaradó neutroncsillag azóta sem került elő, végképp alátámasztani látszik a szerző óhaját: „Galaktikus szupernóvát mindenkinek!”

Paragi Zsolt: *Gyors rádiótranziensek* – A tranziensek rövid idő alatt bekövetkező jelentős változások. A vörös törpecsillagok néhány magnitúdós kitérései

másodpercek alatt játszódnak le, a mikrokvazárok felvillanása napokig tart, az aktív galaxismagokban lejátszódó folyamatok éveket vesznek igénybe. A jelenségek néhány GHz frekvencián detektálhatók a legintenzívebben, ezek a lassú tranziensek. A pulzárkutatások során tíz éve sikerült egy nagyon erős, néhány ezred másodperces jelet detektálni. A legegyszerűbb magyarázatnak az tűnt, hogy a jel gyors rádiókitörésként (FRB – Fast Radio Burst) a Tejútrendszeren kívülről érkezett.

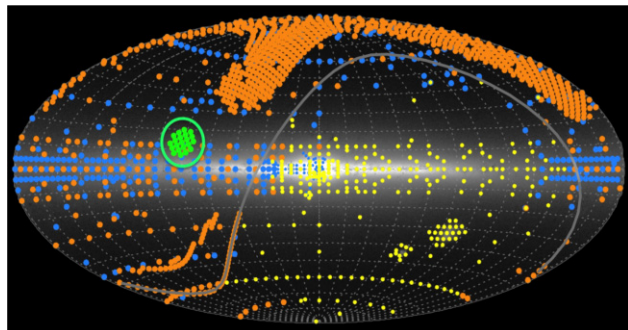
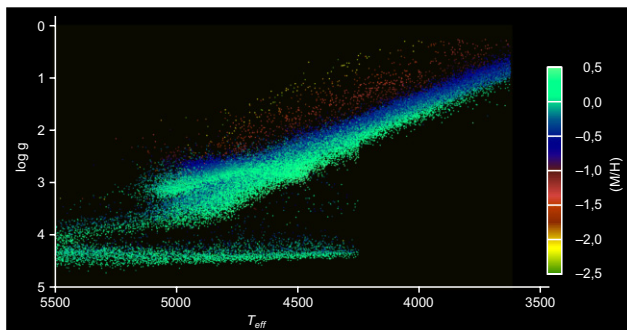
Két évvel ezelőtt egy kutatócsoport beszámolója szerint megtalálni vélték egy valós időben detektált gyors rádiókitörés gazdagalaxisát. A döntő eredményről, az ismétlődő kitérések észleléséről nem sokkal ezután mások számoltak be.

Dálya Gergely, Bécsy Bence: *A gravitációshullám-asztrófizika születése* – „A gravitációshullám-asztrófizika terén ott tartunk most, ahol négyszáz évvel ezelőtt, az első megfigyelések éveiben a távcsöves csillagászat tartott.” Innen indulva a szerzők a gravitációs hullámok megmagyarázásához a speciális és az általános relativitáselmélet néhány eredményét idézik, a relativisztikus sebesség-összetevést és a gravitáció összevetését a tehetetlenségi erőkkel. „A tömeggel bíró testek meggörbítik a téridőt, és ennek a görbületnek a hatását hívjuk klasszikusan gravitációnak... A téridő kis megváltozásai hullámszerűen, fénysebességgel terjedhetnek... A gravitáció rendkívüli gyengeségének következménye az, hogy észlelhető nagyságú gravitációs hullámok keltezéséhez óriási tömegek fénysebesség közeli mozgása szükséges.”

Az egymásra merőlegesen felépített két lézer-interferometriás detektorból álló LIGO gravitációshullám-obszervatórium két évtizedig nem volt eredményes. Az érzékenység négyszeresre növelésével 2015-ben három esetben sikerült gravitációs hullámokat észlelni, ezáltal a fekete lyukak dinamikájáról ismereteket szerezni. A többcsatornás csillagászat már nem ábránd.

Az évek óta rendkívül magas színvonalat képviselő csillagászati évkönyvek – amelyekről 2012 óta rendszeresen tájékozódhatnak folyóiratunk olvasói – nemcsak jelzői, de gerjesztői is az amatőr csillagászok mozgalmának. Nem feledkezhetünk meg a technikai megvalósítás professzionális szintjéről sem, amit jól jelképez a nyolc színes oldal képeinek minősége.

Füstöss László



IN MEMORIAM JANSZKY JÓZSEF

Janszky József 1943. május 9-én született Csornán. Középiskolai tanulmányait szülővárosában végezte. A Moszkvai Lomonoszov Egyetemen szerzett fizikusi diplomát. Hazatérte után, 1970-től Tarján Imre mellett végezte elméleti kutatásait a kristályfizika területén. *Diszlokációs terek hatása a ponthibákön lokalizált elektronokra és rezgésekre* című kandidátusi dolgozatát 1978-ban védte meg. Ebből az időszakból származik egyik legtöbbet hivatkozott munkája a rövid lézerimpulzusok tulajdonságainak karakterizálásáról (*Corradi Gáborral és R. N. Gyuzaliannal* közösen, *Optics Communications* 1977). Itt még pikoszekundumos impulzusokról volt szó, ugyanakkor a rövid lézerimpulzusok fizikája – ma már a femto- és attoszekundumos skálán – később a hazai optikai kutatások egyik legfontosabb területévé vált. 1985-ben lett a fizikai tudományok doktora az időben és térben limitált fényimpulzusok kölcsönhatásával, illetve a nemlineáris optikai folyamatok zaj és disszipációs tulajdonságaival kapcsolatban elért eredményeiért. A kristályfizikai kutatói környezetben természetes módon jött elő a parametrikus erősítés és frekvenciakonverzió folyamatainak kvantumelméleti vizsgálata az 1980-as évek elején. Innen továbblépve – a nagydoktori disszertáció után – figyelme a fény kvantumstatistikájával kapcsolatos jelenségek felé fordult. Az abban az időben robbanásszerűen kibontakozó kvantumoptika területén talált időszerű témákat, például az összenyomott fénnel és a koherensállapot-reprezentációkkal kapcsolatban. Számos új, nemzetközi együttműködést hozott neki a témaváltás, de még fontosabb, hogy tevékenysége ezen a területen iskolateremtőnek bizonyult. 1990-től kezdődően kvantumoptikai kutatásaiban sorban csatlakoztak hozzá tanítványok, akik nagy része ma is sikeres kutatóként dolgozik hazai és külföldi kutatóhelyeken. Kutatói eredményei mellett ezt is elismerve választották meg 2001-ben a Magyar Tudományos Akadémia levelező, majd 2007-ben rendes tagjává.

Éveken át volt a Kristályfizikai Kutatólaboratórium igazgatója, amely 1998-ban egyesült az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetével, ahol továbbra is vezette a kristályfizikai főosztályt. Kutatóprofesszorként, később professzor emeritusként kötődött az intézethez és azon belül az általa alapított kvantumoptikai kutatócsoporthoz. 2000 óta a Pécsi Tudományegyetem

kinevezett professzora volt, ahol 2001 és 2008 között a Fizikai Intézet igazgatójaként tevékenykedett. Meghatározó szerepe volt a pécsi fizikusképzés elindításában. Vezetésével jött létre a PTE Fizika Doktori Iskolája, amelynek 2013-ig volt a vezetője. Öt évtizednyi kutatómunkájának eredményei több mint 170 referált tudományos közleményben jelentek meg; ezek elismertségét mutatja a több mint 2000 hivatkozás. Iskola-teremtő kutatói tevékenysége mellett nagy hangsúlyt fektetett az oktatásra – kutatók generációit nevelte fel.

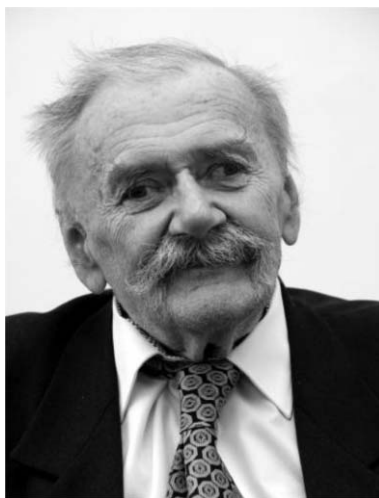
Janszky József számos tudományos bizottságban vállalt szerepet, így az MTA Lézerfizikai Tudományos Bizottságában hosszú évtizedeken át részt vett a lézerfizikai kutatások magyarországi szervezésében. Tudományos munkásságát 1990-ben az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Novobátky Károly-díjjal ismerte el. Az MTA Fizikai Tudományok Osztálya 1992-ben Fizikai Díjjal, majd 1996-ban Fizikai Fődíjjal tüntette ki. 1999-ben az MTA-tól Akadémiai Díjat kapott. Életműve elismeréseképpen 2011-ben a Magyar Köztársasági Érdemrend tisztikeresztje kitüntetést vehette át.

Janszky József hihetetlen általános tudással és intelligenciával rendelkezett, nem csak a fizika vagy a természettudományok, de a történelem, az irodalom, és a művészetek terén is – ezért korunk oly ritka polihisztorai közé tartozott, akik mindig lelkesedve osztják meg a tudásukat másokkal. Amikor valami érdekes tudományos hírt osztott meg beszélgetőtársával, látni lehetett, mennyire élvezte, hogy valami újat tud mondani.

Még az utóbbi időben is, amikor már egyre ritkábban találkoztunk, ezekből a beszélgetésekből nemcsak tudást, de sok energiát és humanitást is merítettünk. És valami hihetetlen életerő volt benne, ami abban is megnyilvánult, ahogy jó tíz évvel ezelőtt leküzdötte azt a nehéz betegséget, amely ugyanakkor meggyengítette szervezetét. Kollégáinak, ismerőseinek és barátainak különösen emlékezetes, hogy mindig mindenkinek mindenben igyekezett segíteni. E segítsége – a szakmai tanácsokon kívül – gyakran a magánéletben is megnyilvánult. A jóindulat a családján kívül a barátok és a kollégák irányában is sugárzott belőle; szerencsések voltak, akik ismerhettek egy ilyen nagy tudású, ritka kedves, szelíd Embert.

Janszky József nemcsak közvetlen barátainak, de mindenkinek, aki ismerte őt hiányozni fog.

Czitrouszky Aladár és kollégái



UTAZÁSI ÖSZTÖNDÍJ NEMZETKÖZI SCIENCE ON STAGE FESZTIVÁLON RÉSZT VETT TANÁROKNAK

A Science on Stage Europe többféleképpen is elősegíti a természettudományokat tanító európai tanárok együttműködését, a tapasztalatok és a jó gyakorlatok kicserélését.

Ennek egyik módja, hogy anyagilag is támogatja azon tanárok együttműködését, akik egymást valamely nemzetközi Science on Stage Fesztiválon ismerték meg, és akik a további együttműködés, vagy oktatási módszerek és jó gyakorlatok megosztása céljából el kívánnak látogatni egymáshoz. Az útiköltség-támogatás maximális összege 300 euró.

Ezen támogatott látogatások már jó néhány éves múltra tekintenek vissza, de az elmúlt években a kérelmek száma megsokszorozódott. Ezért a Science on Stage Europe vezető testülete, az Executive Board a közelmúltban lefektette azon szabályokat és követelményeket, amelyek egy ilyen utazási ösztöndíj elnyerésének feltételei.

Az utazási ösztöndíjak szabályai és feltételei

Előfeltételek

- Mind a fogadó, mind a vendégtanár iskolában tanító (óvoda, általános iskola, illetve középfokú oktatási intézmény), aktív pedagógus legyen. Egyetemen tanítók utazási ösztöndíjra nem jogosultak.
- Mindketten – a fogadó és a vendégtanár is – valamilyen formában (hivatalos delegáltként, fizető delegáltként vagy fizető vendégként) részt vett már legalább egy nemzetközi Science on Stage fesztiválon. Akik csak a Nyílt Napon vettek részt, nem jogosultak utazási ösztöndíjra.

Jelentkezés

- Az utazási ösztöndíjra történő jelentkezés évente négyszer, az alább szereplő határidőig adható be az angol nyelvű *Application Form for Travel Scholarships* kitöltésével.
 - Első határidő: március 15.
 - Második határidő: június 15.
 - Harmadik határidő: szeptember 15.
 - Negyedik határidő: december 15.
- A Science on Stage Europe vezető testülete (az Executive Board) a beadási határidő letelte után egy hónapon belül dönt az utazási ösztöndíjak odaítéléséről.

- Ha a fogadó tanár és a vendégtanár egy második látogatást is tervez, akkor az első látogatás létrejötte után újabb jelentkezési lapot kell beadniük.

- Ha az utazási ösztöndíjra való jelentkezés elutasításra kerül, az érdekelt tanárok jelentkezésüket újra beadhatják.

A jelentkezések elbírálásának szempontjai

- A tervezett projekt mennyire innovatív, és miként járul hozzá, hogy a diákok jobban megértsék a tudományos fogalmakat.
- A projekt általános felépítése: a jelentkezés jól mutatja-e be, hogy a résztvevő tanárok mit szeretnének elérni a látogatással.
- Előkészítés: a látogatás előkészítése megfelelő és realiztikus.
- A látogatás alatti tevékenység: a résztvevők világosan megfogalmazták-e, hogy a látogatás ideje alatt milyen tevékenységet szeretnének végezni.
- A projekt utóélete: a látogatás befejezése után milyen további lépéseket (például az eredmények megosztása más tanárokkal, „Joint Project” kezdeményezése stb.) terveznek.

Az útiköltségek visszatérítésének módja

- A Science on Stage Europe csak egy személy útiköltségéhez járul hozzá legfeljebb 300 euró összegig. Csak másodosztályra szóló jegyeket, illetve számlát fogadunk el az oda- és visszaútra vonatkozóan. Belépődíjakat és egyéb díjakat nem térítünk. Taxiszámlákat csak kivételes esetben térítünk.
- Az útiköltségek visszatérítése érdekében a Science on Stage Europe számára az eredeti jegyeket, illetve számlákat kell megküldeni, valamint azon bankszámla adatait, amelyre az összeg utalását kéri. Elektronikus jegyek (e-jegyek) esetén a beszállókártyákat PDF formában kérjük elmenteni, illetve, ha okostelefonos alkalmazást használnak, akkor képernyőképet készítsenek a beszállókártyáról, illetve a jegyről, és igazolásul ezeket küldjék el.
- Az útiköltség visszatérítése érdekében a fogadó tanárnak és a vendégtanárnak is készítenie kell egy rövid beszámolót (fotókkal illusztrálva) a látogatásról, amelyet a Science on Stage Europe az internetes csatornáin nyilvánosságra hoz.

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 főtákar, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

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

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

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

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

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

Az Eötvös Társulat kitüntetései és díjai – felhívás javaslattételre

Az ELFT Díjbizottsága jelöléseket, illetve pályázatokat vár a Társulat 2018. évi kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira. Kérjük a Társulat szakcsoportjait, területi csoportjait és valamennyi tagunkat, hogy a kitüntetésre érdemes kollégákat és tudományos eredményeiket bemutató javaslataikat legkésőbb **2018. március 19-ig** szíveskedjenek eljuttatni a Társulat titkárságára (1092 Budapest, Ráday utca 18. fszt. 3., elft@elft.hu). A tudományos díjakat a kutatók saját kezdeményezésükre is megpályázhathják.

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

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

A társulati kitüntetéseket, valamint a tudományos és felsőoktatási díjakat az Eötvös Társulat 2018 májusában tartandó Küldöttközgyűlésének keretében ünnepélyesen osztjuk ki.



Társulati kitüntetések

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

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

Eötvös Plakett elnevezésű emléktárgy adományozható annak a társulati tagnak, aki hosszú időn keresztül aktív társadalmi munkával járul hozzá a Társulat egészének vagy valamelyik csoportjának, szakcsoportjának eredményes működéséhez; olyan személynek, aki társadalmi munkában vagy egyéb módon rendkívüli mértékben nyújt segítséget a Társulat célkitűzéseinek megvalósításához; neves külföldi vendégnek a Társulat valamely rendezvényén tartott előadása alkalmából.

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

Tudományos és felsőoktatási díjak

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat az alábbi tudományos, illetve felsőoktatási díjakat adományozhatja:

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

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

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

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

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

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

Gombás Pál-díj „a kvantumelmélet atom- és molekulafizikai alkalmazásában, továbbá a statisztikus fizikában

végzett elméleti kutatásokkal elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

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

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

Novobátszky Károly-díj „az elméleti fizikai kutatásokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

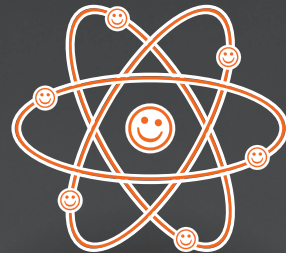
Schmid Rezső-díj „az anyag molekuláris szintű szerkezetét felderítő, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

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

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

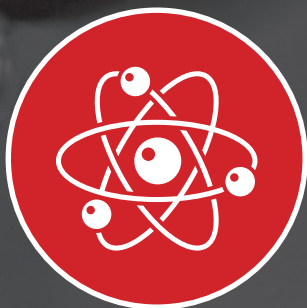


Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szervezésében



2018.
ÁPRILIS
20-21.

A FIZIKA MINDENKIÉ 4.0



ISSN 0015325-7
9770015-325009 18002

A fizika mindenkié 2018-ban is! A tiéd, miénk és mindenkié. Fizikázz tanároddal, barátaiddal, szüleiddel; végezz kísérletet, vagy építs új eszközt, hallgass vagy szervezz előadást! E két napon szóljon minden a fizikáról! Vegyél részt, regisztráld a programod, és ünnepeljük együtt a fizika kérdéseit és csodás eredményeit! Hiszen a fizika segítségével adunk választ számos, a társadalmat érintő problémára, például energia, közlekedés, kommunikáció, környezetvédelem; amelyek mindannyiunk életét befolyásolják.

Mert a FIZIKA MINDENKIÉ!



Információért látogass el weboldalunkra:

AFIZIKAMINDENKIE.KFKI.HU

Támogatók:

