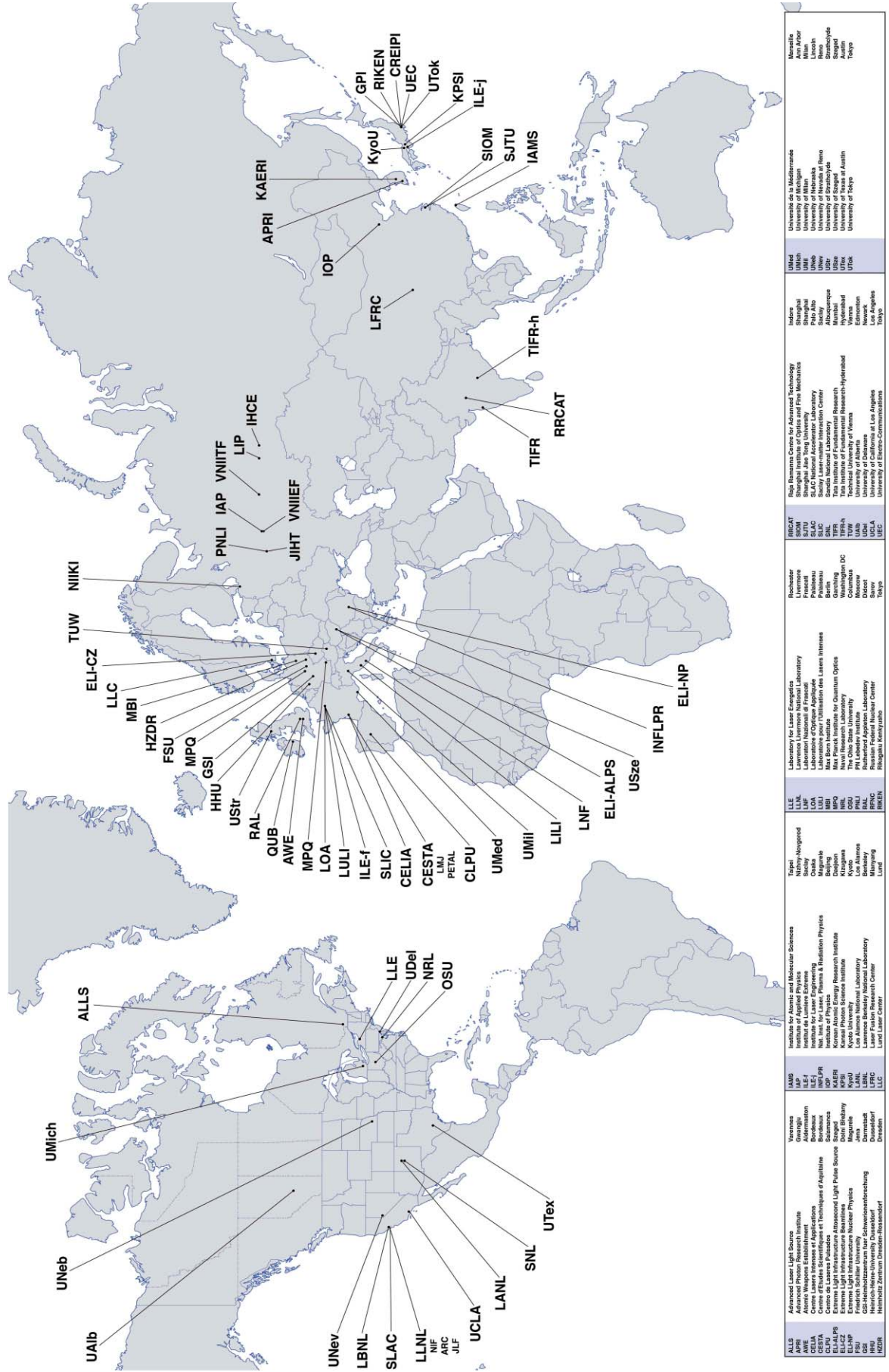


fizikai szemle

2018/12

A PW-osztályú lézerintézetek elhelyezkedése



ALLS	Advanced Laser Light Source	Vienna	AMSP	Advanced Materials and Process	Tokyo	U.S.	Laboratory for Laser Propagation	Technical	RSRAT	RSRAT	RSRAT	RSRAT	RSRAT	RSRAT	RSRAT	RSRAT	RSRAT	RSRAT	RSRAT
APRI	Advanced Photon Research Institute	Osaka	ILCF	International Linear Collider	Stanford	LLNL	Livermore National Laboratory	Lawrence Livermore National Laboratory	Livermore	SLAC	SLAC	SLAC	SLAC	SLAC	SLAC	SLAC	SLAC	SLAC	SLAC
CESTA	Centre de Recherches Scientifiques et Techniques d'Application	Strasbourg	INFLPR	International Laser Fusion Research	Bordeaux	LIP	Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses	Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses	France	MPQ	MPQ	MPQ	MPQ	MPQ	MPQ	MPQ	MPQ	MPQ	MPQ
ELI-ALPS	Extreme Light Infrastructure Advanced Light Pulse Source	Strasbourg	KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute	Daejeon	MPO	Max Planck Institute for Quantum Optics	Max Planck Institute for Quantum Optics	Germany	TIFR	TIFR	TIFR	TIFR	TIFR	TIFR	TIFR	TIFR	TIFR	TIFR
ELI-CZ	Extreme Light Infrastructure Compact FEL	Prague	KPSI	Korea Photon Science Institute	Daejeon	NIJ	National Institute for Research in Physics	National Institute for Research in Physics	Washington DC	UMed	UMed	UMed	UMed	UMed	UMed	UMed	UMed	UMed	UMed
FSU	Frederick Seitz Laboratory for Submicron Physics	Jena	LANL	Los Alamos National Laboratory	Los Alamos	PNL	PNNL National Laboratory	PNNL National Laboratory	Missouri	UMich	UMich	UMich	UMich	UMich	UMich	UMich	UMich	UMich	UMich
HRU	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf	Dresden	LLNL	Livermore National Laboratory	Livermore	RFCN	Russian Federal Nuclear Center	Russian Federal Nuclear Center	Saint Petersburg	TUW	TUW	TUW	TUW	TUW	TUW	TUW	TUW	TUW	TUW
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf	Dresden	LFC	Laser Fusion Center	Livermore					RIKEN	RIKEN	RIKEN	RIKEN	RIKEN	RIKEN	RIKEN	RIKEN	RIKEN	RIKEN



ÉV VÉGE


Kedves Olvasónk a *Fizikai Szemle* LXVIII. évfolyamának utolsó számát tartja kezében, vagy látja számítógépe képernyőjén, hiszen lapunknak immár második teljes évfolyama jelenik meg párhuzamosan nyomtatott és elektronikus (pdf) formában. Be kell vallanom, hogy előfizetőként (ELFT-tagként) én a nyomtatott változatot választottam, mert úgy gondoltam, hogy az az igazi, ha ott van a lap az asztalomon, de helyzeti előnyömnél fogva persze látom a pdf-változatot is. Ha most kellene választanom, akkor biztosan áttérnék az elektronikus változatra, elsősorban a színes ábrák miatt. A nyomtatott lap előfizetőinek javaslom, hogy – ha még nem tették meg és van rá lehetőségük – látogassanak el a fizikaiszemle.hu internetcímre és hasonlítsák össze az ott elérhető cikkek színes ábráit a szürke árnyaltos, nyomtatott ábrákkal. Ha valaki most dönt úgy, hogy átáll az elektronikus forma előfizetésére, akkor 2019-ben már a kedvezményes tagdíjjal újíthatja meg társulati tagságát.

A most záruló esztendő is hozott a *Fizikai Szemle* életében néhány változást. Némileg átalakult a Szerkesztőbizottság: négy korábbi tag lemondott és új tagként belépett *Bíró László Péter*, *Gyürky György*, *Hebling János*, *Koppa Pál*, *Simon Ferenc* és *Takács Gábor*. Újdonság az is, hogy 2018-tól kezdve évenként két *Fizikai Szemle* Nívódíjat ítélhetünk oda: egyet a fizika tanításával és egyet a fizika tudománnyal vagy tudománytörténettel foglalkozó írásért.

Az októberi számban hirdettük meg, hogy kiterjesztjük a csak interneten elérhető tartalmak körét, azzal a céllal, hogy lehetőséget adjunk a folyóirat-jellegű formába be nem illeszthető anyagok, például lektoráláson átesett prezentációk, képek, videók közzétételére. Nagy örömünkre már novemberi számunkhoz kapcsolódóan is kaptunk ilyen anyagokat, mostani számunk mellékleteként pedig *Radnai Gyula: Richard Feynman Magyarországon* című prezentációja jelenik meg, ami Feynman születésének 100. évfordulóján, májusi számunkban megjelent cikke alapjául szolgáló előadásának vetített ábráit tartalmazza.

Továbbra is várjuk Olvasóink írásait, de örömmel veszünk bírálatokat, javaslatokat is a *Fizikai Szemle* színvonalának és minőségének javítása érdekében.

Minden kedves Olvasónknak kellemes Karácsonyi Ünnepeket és Boldog Újévet kívánunk!


Lendvai János
főszerkesztő

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Főszerkesztő:

Lendvai János

Szerkesztőbizottság:

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:

A besugárzás nélküli, E110 kódjelű cirkóniumötvözet-mintáról készült, mintegy 14 000-szeres nagyítású visszaszórtelektron-diffrakciós kép (lásd Groma István és társai írását).

TARTALOM

- Lendvai János: Év vége* 401
- Börzsönyi Ádám, Nagymibály Roland, Tóth Szabolcs, Osvay Károly: A csörpölt (lézer)impulzus-erősítés* 403
Gérard Mourou és Donna Strickland Nobel-díjának háttere
- Luisa Cifarelli: Az Európai Fizikai Társulat története* 406
Az EPS megalakulásának története
- Rüdiger Voss: Az Európai Fizikai Társulat ötven éve* 408
Az EPS múltja és jelene
- Kroó Norbert: Ötven éve az Európai Fizikai Társulatban* 413
Az EPS korábbi elnökeinek visszaemlékezése és gondolatai az EPS szerepéről
- Prósz Aurél, Saftics András, Péter Beatrix, Kurunczi Sándor, Horváth Róbert: Biológiai vékonyrétegek és élő sejtek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata kvarckristály mikromérleggel* 416
A kvarckristály mikromérleg működésének és számos alkalmazási lehetőségének bemutatása
- Groma István, Szenthe Ildikó, Ribárik Gábor, Ódor Éva, Jóni Bertalan, Zilabi Gyula, Dankházi Zoltán: Atomreaktorokban használható cirkóniumötvözetek mikroszerkezetének meghatározása* 420
röntgenvonalprofil-analízissel
A cikk a reaktoranyagok vizsgálatának példáján keresztül ismerteti a röntgenvonalprofil-analízis módszer alkalmazását kristályos anyagok hibaszerkezetének vizsgálatában

A FIZIKA TANÍTÁSA

- Stonawski Tamás: A brachistochron-probléma, avagy a hosszabb út a „rövidebb”* 426
Hogyan lehet megközelíteni és megérteni a brachistochron-problémát középiskolai matematikával és kísérletezéssel
- Palotai Veronika: A BME Kísérleti Köre bemutatja: vízirakéta* 431
A Kísérleti Kör tevékenységének bemutatása egy konkrét projekt példáján

www.fizikaiszemle.hu/mellekletek

Radnai Gyula: Richard Feynman Magyarországon

J. Lendvai: End of year

Á. Börzsönyi, R. Nagymibály, Sz. Tóth, K. Osvay: One half of the 2018 Nobel Prize in Physics: Chirped Pulse Amplification

L. Cifarelli: The history of EPS

R. Voss: 50 years of EPS

N. Kroó: 50 years in the European Physical Society

A. Prósz, A. Saftics, B. Péter, S. Kurunczi, R. Horváth: Investigation of the mechanical properties of biological thin films and living cells by quartz crystal microbalance

I. Groma, I. Szenthe, G. Ribárik, É. Ódor, B. Jóni, Gy. Zilabi, Z. Dankházi: Microstructure of zirconium alloys applied in nuclear reactors determined by X-ray line profile analysis

TEACHING PHYSICS

T. Stonawski: The brachistochron problem, or the longer way is shorter

V. Palotai: The Experimental Circle of Budapest Technical University presents: water rocket

www.fizikaiszemle.hu/mellekletek

Gy. Radnai: Richard Feynman in Hungary

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



A CSÖRPÖLT (LÉZER)IMPULZUS-ERŐSÍTÉS

A 2018. évi fizikai Nobel-díj egyik fele

Börzsönyi Ádám, Nagymihály Roland, Tóth Szabolcs, Osvey Károly
ELI-ALPS, ELI-Hu Nkft., Szeged
SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged

Az első működő lézert *Theodore H. Maiman* mutatta be 1960-ban, amellyel lehetségessé vált magas fokú rendezettséggel bíró, azaz koherens, jól irányítható, kollimált fénynyalábok előállítására. A lézerek kutatása és fejlesztése két fő irányban folytatódott, nevezetesen a folytonos lézerek (optikaiszál-lézerek, diódalézerek) és az impulzusüzemű lézerek felé. Az utóbbiak tették és teszik lehetővé mind az időbontott, ultragyors folyamatok vizsgálatát, mind pedig nagy fókuszált intenzitás elérését. A nagy intenzitással (kezdetben $\sim 10 \text{ GW/cm}^2$) részben ionizációs, részben plazmafizikai kísérleteket lehet elvégezni, illetve rövid időtartamokra olyan extrém körülményeket lehet létrehozni (nyomás, hőmérséklet, elektromos és mágneses tér stb.), amelyek normál földi körülmények közt elképzelhetetlenek.

Számos kutatócsoport versenyzett a legnagyobb fókuszált fényintenzitás eléréseért, amely néhány év leforgása alatt, a hatvanas évek második felére hat nagyságrendet ugrott. A fejlesztések során egyre rövidebb lézerimpulzusokba mind több és több energiát sikerült koncentrálni. A lézerimpulzusokban tárolt energia viszonylag könnyen volt növelhető, azonban az csúcshintenzitás gyorsan elérte azt a szintet, ahol annak további növelése már fizikai korlátokba ütközött. Ekkora térerősség esetén az optikailag átlátszó anyagok törésmutatója függ az intenzitástól, azaz a fénytörés iránya függ a fény erősségétől. Ez a jelen-

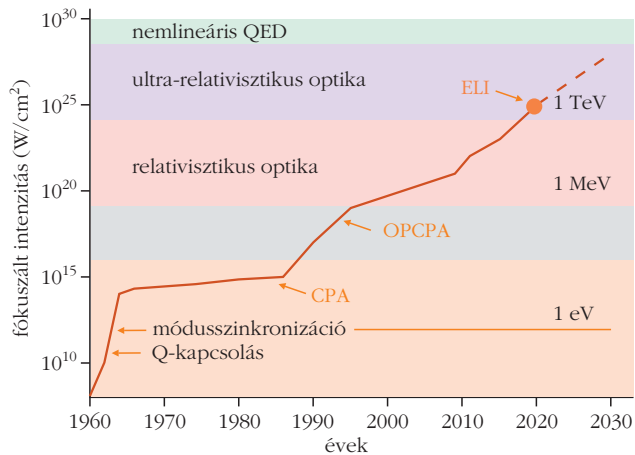
Következő számunkban *Arthur Ashkin*t, a Nobel-díj másik felét elnyerő fizikust és munkásságát mutatjuk be.



Börzsönyi Ádám fizikus diplomáját 2006-ban szerezte a Szegedi Tudományegyetemen. Doktori fokozatát 2013-ban kapta ultrarövid lézerimpulzus-karakterizálás kutatásában elért eredményeiért. 2003 óta az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszéke TeWaTi lézerlaboratórium, majd 2014 óta az ELI-ALPS Lézer Infrastruktúra Osztály kutatója, az Egyciklusú Lézer csoport vezetője. Fő kutatási területei az ultrarövid impulzusok karakterizálása és erősítése, nemlineáris optika, időbontott spektroszkópia.



Nagymihály Roland 2014-ben végzett fizikusként a Szegedi Tudományegyetemen. 2010 óta a TeWaTi lézerlaboratórium, illetve 2014 óta az ELI-ALPS Nagyintenzitású Lézer Csoportjának kutatója és laborvezető-helyettese. Doktori fokozatát 2018-ban kapta a következő generációs titán-zafir alapú lézerek erősítő rendszerek fejlesztésében elért eredményeiért. Fő kutatási területei a nagy átlagteljesítményű ultrarövid lézerimpulzusok erősítése, karakterizálása, valamint a nemlineáris optika.



1. ábra. Lézerek fókuszált intenzitásának fejlődése az 1960-as évektől napjainkig, valamint a várható fejlődés 2030-ig. Az ábra jobb oldalán az adott lézerintenzitással szabad elektronok esetén elérhető ponderomotoros energia látható [1].

ségtérben önfokuszálódást, az időképpen pedig önfázismodulációt idéz elő. Az impulzusok térbeli torzulásai részben erősen lerontják az impulzusok fókuszálhatóságát, azaz egy ponton túl hiába erősítünk tovább, a fókuszbeli térerősség szétterül, a fókuszált intenzitás nem nő tovább. Mindemelllett az optikai erősítőkben fényindukált roncsolódások is keletkezhetnek, amelyek diffrakciós mintázatokat képezve tovább rontják a nyaláb minőségét, ezzel akár az erősítő kritikus meghibásodását is okozva.



Tóth Szabolcs 2012-ben kezdte el kutatói pályáját a Szegedi Tudományegyetem BSc hallgatójaként az Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék TeWaTi lézerlaboratóriumában. Fizikus mesterdiplomáját 2015-ben szerezte meg, azóta a Fizika Doktori Iskola PhD hallgatója, valamint az ELI-ALPS tudományos segédmunkatársa. Kutatási területe a nemlineáris optika, ultrarövid lézerimpulzusok előállítása és erősítése.



Osvey Károly fizikus (1990, József Attila Tudományegyetem, Szeged), a fizikai tudományok kandidátusa (1995), 2011-ben habilitált a Szegedi Tudományegyetemen. 1996-ban docens, 1997-től tanszékvezető-helyettes, majd 2011–13 megbízott vezető. A TeWaTi lézerlaboratórium és kutatócsoport alapítója és vezetője. Az ELI-HU Nkft. kutatási technológiai igazgatója. Fő kutatási területe az ultrarövid lézerimpulzusok előállítása, azok alkalmazása, lézer-anyag kölcsönhatás, nemlineáris optika.

Ezt a problémát éveken keresztül a nyalábok és az erősítő közegek méretének növelésével, illetve a nyalábok több részre osztásával oldották meg. Ennek eredményeképpen az 1980-as évekre a nagy intenzitású lézerimpulzusokat előállító laborok mérete naggyá (tornaterem méretűvé), fenntartása pedig igen költségessé vált. Az 1. ábra hűen szemlélteti azt a folyamatot, ahogyan a nagyintenzitású lézerek fejlődése mintegy két évtized alatt mindössze egy nagyságrenddel nőtt csupán.

A nyolcvanas években természetesen több kutatócsoport dolgozott a kihívás megoldásán. Egy pillanatra idézzük fel az akkori csúcstechnológiát: a legrövidebb, közvetlenül, úgynevezett festéklézerekkel előállított lézerimpulzus ideje akkoriban egynéhány száz femtoszekundum ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) volt, tipikusan a látható tartományban (500–700 nm). A tipikus nagy lézere erősítők $1 \mu\text{m}$ hullámhossz körül működtek, ahol néhány pikoszekundumos ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$) impulzusokat állítottak elő. Az optikai szálon alapuló lézeres kutatások és alkalmazások, elsősorban a telekommunikációs ipar kapcsán ismert volt, hogy időben határos (rövid) lézerimpulzusok több km-es terjedés során – a diszperzió miatt – időben „szétfolynak”, azaz megnyúlnak. Ezen megnyúlás kompenzálása a vevőegység előtt az időegység alatt átvihető információ (impulzusok darabszáma) növelése szempontjából kritikus volt. Több más megközelítés mellett erre Treacy 1969-ben egy optikai rácsokon alapuló megoldást publikált [2]. Mindezek mellett az is ismert volt, hogy a fentebb említett nemlineáris fázismoduláció egy kritikus intenzitás felett, de egy maximumintenzitás alatt az impulzus spektrális kiszélesedését okozza. Ez a kiszélesedés koherens, azaz megfelelő mértékű, ellentétes előjelű diszperzióval rendelkező rendszeren keresztül vezetve az eredetinel időben rövidebb impulzust eredményez [3]. Johnson és társai ezen módon 80-szoros impulzusrövidítést demonstráltak [4], 1984-re elérve az 1 ps-os határt. Hangsúlyozandó, hogy ezen kísérletekben közvetlen erősítés nem történt.

Nem úgy, mint Jénában. A Friedrich Schiller Universität *Berdt Wilhelmi* által vezetett kutatócsoportja 1985 áprilisában egy kísérletet publikált [5], amelyben egyetlen optikai szál segítségével egyrészt spektrálisan kiszélesítették a ps-os impulzusokat (nemlineáris fázismodulációval, mint a kortárs kutatócsoportok), valamint egyúttal időben is megnyújtották (lineáris diszperzió). Ezen impulzusokat azután egy erősítőn átvezetve megerősítették, majd a végén egy egyszerű-



Donna Strickland, a Rochesteri Egyetem végzős hallgatója és

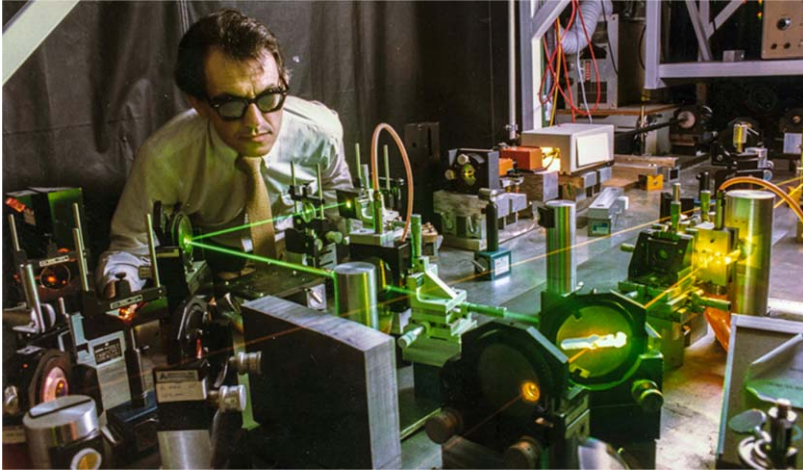


a University of Waterloo Nobel-díjas professzora.

sített rácsos kompresszorral időben összenyomták. Ezzel az eredeti impulzus energiáját 250-szeresre növelték, míg időbeli hosszát egy ps alá vitték (0,7 ps).

Ezzel nagyjából egy időben *Gérard Mourou* és doktorandusza, *Donna Strickland* a Rochesteri Egyetemen egy látszólag hasonló kísérletet hajtott végre, azzal a különbséggel, hogy az impulzusokat jelentősen nagyobb nyújtásnak tették ki, és ezzel jóval nagyobb erősítést értek el. Az 1985 decemberében megjelent beszámoló [6] szerint az eredetileg 150 ps-os, 60 nJ energiájú impulzusokat 300 ps-ra nyújtották, sávzélességét pedig egy 1,4 km hosszú optikai szálban megnövelték. Ezt követően az impulzusok energiáját egy regeneratív erősítőben 1 mJ fölé, azaz több, mint tízezerszeresére növelték, ezáltal közel két nagyságrendnyi erősítéssel nagyobb értéket érve el, mint a jénai csoport.

Tudománytörténeti – és most már Nobel-díj történeti – jelentőségű, ahogyan Mourou és Strickland interpretálták kísérletüket, és megfelelő távlatokba helyezték. Felismerték, hogy az eljárás teljesen általánosnak tekinthető, azaz a módszer általánosan alkalmazható bármely rövid impulzus erősítésére, és utat nyithat akár „asztali méretű TW” csúcsteljesítményű impulzusok előállítására képes lézer készítéséhez is.



Gérard Mourou laboratóriumában, 1987-ben és



előadást tart 2018. november 14-én a szegedi ELI-ALPS-ban (fotó: Jacob Péter).

Mi több, egy új nevet, „fázismodulált impulzus erősítés” (chirped pulse amplification, CPA) adtak az eljárásnak, amit egyébként az általánosítás során a radar-technológiára vezettek vissza. A Bell Laboratórium-ból eredő „chirp” kifejezés (*chirp*, ami magyarul csicseregést jelent) a radarimpulzus fázisának modulálását, azaz a frekvencia időbeli folytonos változtatását jelenti [7], és az akusztikai analógiában madárfüttyre emlékeztető hanghullámra utal. Optikai impulzusban is létrehozható ez a csőrp, azaz fázismoduláció, például, ha az egyes frekvenciakomponensek különböző terjedési sebességgel rendelkeznek, vagy különböző hosszúságú utakat futnak be a terjedés során. Előbbi a természetben adott, hiszen a törésmutató hullámhosszfüggése, azaz a normál diszperzió miatt a „vörös” spektrális komponensek sebessége nagyobb a „kék” komponenseknél. Ennek fordítottját, azaz a kék komponensek gyorsabb terjedését a látható tartományban nem a sebességek különbségével, hanem a terjedési utak különbözőségével lehet elérni – mint például a Treacy-féle kompresszorban [2]. A fázismodulációval akár több ezerszeres időbeli nyújtás is elérhető, amivel az impulzusok csúcsteljesítménye arányosan lecsökken. Ennek köszönhetően az erősítés során elkerülhető az önfokuszálódás és a

roncsolódás, de akár öt-hat nagyságrenddel is növelhető az impulzusenergia. Az erősítést követően a nyújtási szakaszban alkalmazottal azonos nagyságú, de ellentétes előjelű fázismoduláció bevezetésével nyerjük vissza a kiindulási impulzushosszat. Eredményül egy időben rövid, nagy energiájú és nagy csúcsteljesítményű lézertimpulzus keletkezik.

Napjainkban a nagyintenzitású ultrarövid impulzuserősítő rendszerek szinte kizárólag a CPA-technológián, illetve annak továbbfejlesztett változatain alapulnak [8]. Sőt, Gérard és Donna azon felismerését, hogy a módszer nem függ az erősítő közegtől, illetve az impulzus generálásától, néhány éven belül további fejlesztésekkel teljesen bizonyították. Mára nem csak szilárdtest lézertörőket (Nd:YAG, Nd:üveg, Ti:zafir stb.), hanem szállezet erősítőket is használnak, nem beszélve a lézertörés egy szélessávú, és termikus hatásoktól mentes alternatívájaként szolgáló úgynevezett optikai parametrikus erősítésről (Optical Parametric Chirped Pulse Amplification, OPCPA). Az érdekesség kedvéért jegyezzük meg, hogy ezzel a módszerrel a CPA megjelenése után bő tíz évvel sikerült áttörni a TW határt [9].

A modern, 10 TW és még nagyobb csúcsteljesítményű lézertörőknél elengedhetetlen az impulzus időbeli tisztaságának biztosítása, azaz az időbeli jel-zaj arány legalább nyolc nagyságrenddel keresztül való biztosítása. Ezt az úgynevezett kettős CPA (DCPA) [10], illetve egy további változata, a negatív-pozitív csőrpölt impulzuserősítés (NPCPA) [11] alkalmazásával lehet elérni, mikor két egymást követő CPA-fokozat között lehetőség van nemlineáris folyamatokon alapuló impulzuskondicionálásra, például időbeli tisztításra és az impulzusidő további csökkentésére.

A kanadai születésű Donna Strickland a fizikai Nobel-díjak történetében mindössze a harmadik nő *Marie Curie* és *Maria Goepfert-Mayer* után. Jelenleg a University of Waterloo-n vezetett kutatócsoportjával ultrarövid impulzusok multifrekvenciás Raman-keltésen keresztül történő előállításával, két hullámhosszon működő középínfravörös szállezetek fejlesztésével és az öregszeműség (presbyopia) kezelésére szolgáló, szemlencséiben előállított mikrobuborékok keltésének kutatásával foglalkozik. Doktori címét CPA első megvalósítására és többfoton-ionizációs alkalmazására építve a University of Rochesteren, a Laboratory for Laser Energetics intézetben szerezte.

Gérard Mourou francia fizikus a nagyintenzitású ultrarövid impulzusok előállításának fáradhatatlan úttörője. A Rochesterben eltöltött évek után a Univer-

sity of Michigan professzora volt 16 éven keresztül. 2005-ben visszatért Európába, és az ENSTA Laboratoire d'Optique Appliquée igazgatójaként dolgozott. Ebben az időben kezdeményezte az Extreme Light Infrastructure (ELI) program elindítását, amelynek köszönhetően a nemzetközi tudományos közösség – Csehország és Románia mellett – a Magyarországon létrehozott új lézeres kutatóintézetet, a szegedi ELI-ALPS-szal gazdagodott [12]. Itt jegyezzük meg, hogy a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékén a cikk szerzői alapították 1998-ban és működtették a szintén CPA/OPCPA-technológián alapuló TeWaTi lézert és laboratóriumot [13]. Gérard Mourou jelenleg a párizsi École Polytechnique-en alapított International Center for Zetta-Exawatt Science and Technology (IZEST) intézet vezetője, amelynek célja a lézeres technológia az ELI-projekten túli távlati irányainak kijelölése.

Strickland és Mourou rövid impulzusok erősítését leíró interpretációja, a CPA-módszer, és döntően az azt követő néhány évben általuk elért technológiai áttörés, a TW-os csúcsteljesítmény esetén módon való elérése [14] azután döntően meghatározta az összes, nagy intenzitású, ultrarövid impulzusokat alkalmazó tudományág fejlődését. A CPA-technológiára vezethető vissza például a lézeres részecskegyorsítás, az orvosi szemműtétek, az iparban az anyagmegmunkálás, az erős terek fizikájának és az attoszekundumos impulzusok előállításának terén elért eredmények jelentős része. A mai modern rövid impulzusú lézeres kutatóintézetek semelyike sem lenne elképzelhető a CPA-technológia nélkül. Strickland és Mourou harminc évvel ezelőtti jóslata mára megvalósult, napjainkban a legintenzívebb impulzusok csúcsteljesítménye immáron a 10 petawatt kategóriába esik. A lézerek töretlen technológiai fejlődését és ezzel együtt a kísérletekben és alkalmazásokban való elterjedését az első belső borítón látható PW-osztályú intézetek számossága is kiválóan szemlélteti [15].

Végezetül engedje meg a Tisztelt Olvasó, hogy a Donna és Gérard Nobel-díjához vezető fenti tudománytörténeti anizix kapcsán *Szent-Györgyi Albert* szavait idézzük: „Látni, amit mindenki lát, és gondolni, amit még senki sem gondolt.”

Irodalom

1. G. Mourou, T. Tajima, S. V. Bulanov, *Rev. Mod. Phys.* 78 (2006) 309.
2. E. B. Treacy: Optical Pulse Compression With Diffraction Gratings. *IEEE J. Quant-Elect.* 5 (1969) 454.
3. B. Nikolaus, D. Grischkowsky, *Appl. Phys. Lett.* 43 (1983) 228.
4. A. M. Johnson, R. H. Stolen, W. M. Simpson, *Appl. Phys. Lett.* 44 (1984) 729.
5. T. Damm, M. Kaschke, F. Noack, B. Wilhelm, *Opt. Lett.* 13 (1985) 176.
6. D. Strickland, G. Mourou: Compression of Amplified Chirped Optical Pulses. *Opt. Commun.* 56 (1985) 219.
7. J. R. Klauder, A. C. Price, S. Darlington, W. J. Albersheim: The Theory and Design of Chirp Radars. *Bell System Technical Journal* 39 (1960) 745–808.
8. C. Danson, D. Hillier, N. Hopps, D. Neely: Petawatt class lasers worldwide. *High Power Laser Science and Engineering* 3 (2015) e3.
9. I. N. Ross, J. Collier, P. Matousek, C. Danson, D. Neely, R. M. Allott, D. Pepler, C. Hernandez-Gomez, K. Osvay, *Appl. Opt.* 39 (2000) 2422.
10. M. P. Kalashnikov, E. Risse, H. Schönnagel, W. Sandner: Double chirped-pulse-amplification laser: A way to clean pulses temporally. *Opt. Lett.* 30 (2005) 923.
11. M. P. Kalashnikov, K. Osvay, I. M. Lachko, H. Schönnagel, W. Sandner: Broadband Amplification of 800-nm Pulses With a Combination of Negatively and Positively Chirped Pulse Amplification. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electr.* 12 (2006) 194.
12. S. Kühn, M. Dumergue, S. Kahaly, S. Mondal, M. Füle, T. Csizmadia, B. Farkas, B. Major, Z. Várallyay, E. Cormier, M. Kalashnikov, F. Calegari, M. Devetta, F. Frassetto, E. Månsson, L. Poletto, S. Stagira, C. Vozzi, M. Nisoli, P. Rudawski, S. Maclot, F. Campi, H. Wikmark, C. L. Arnold, C. M. Heyl, P. Johnsson, A. L'Huillier, R. Lopez-Martens, S. Haessler, M. Bocoum, F. Boehle, A. Vernier, G. Iaquaniello, E. Skantzakis, N. Papadakis, C. Kalpouzos, P. Tzallas, F. Lépine, D. Charalambidis, K. Varjú, K. Osvay, G. Sansone: The ELI-ALPS facility: the next generation of attosecond sources. *J. Phys. B: At., Mol. Opt. Phys.* 50 (2017) 132002.
13. www.tewati.hu
14. P. Maine, D. Strickland, P. Bado, M. Pessot, G. Mourou: Generation of Ultra High Peak Power Pulses by chirped pulse Amplification. *IEEE J. Quant. Electr.* 24 (1988) 398.
15. https://www.icuil.org

AZ EURÓPAI FIZIKAI TÁRSULAT TÖRTÉNETE

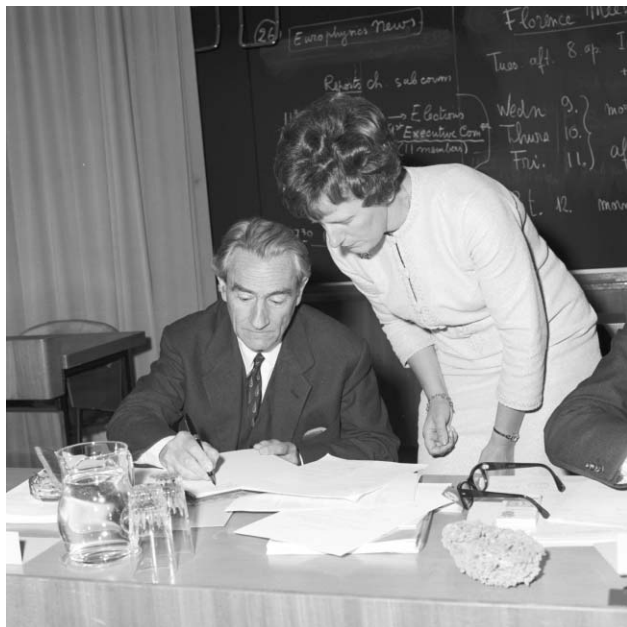
Luisa Cifarelli

Bolognai Egyetem, Olaszország

Az Európai Fizikai Társulatot (European Physical Society, EPS) Genfben alapították 1968-ban, *Gilberto Bernardini* (akkor a CERN kutatási igazgatója) ihletett vezetésével. Az alapítással „a tudósok Európa kulturális egységének erősítése iránti elkötelezettségét kívánták demonstrálni”.

Készült az Olasz Fizikai Társulat internetes folyóiratában (<https://www.primapagina.sif.it/article/851/the-history-of-the-eps#.W-LsMZNKiUk>) megjelent cikk alapján, a szerző hozzájárulásával közöljük.

Az Európai Fizikai Társulat létrehozását Gilberto Bernardini, akkor a pisai Scuola Normale Superiore igazgatója kezdeményezte az Olasz Fizikai Társulat 1965. novemberi éves nagygyűlésén, Bolognában, meggyőzve kollégáit egy ilyen szervezet fontosságáról. A Társulat alapításának eszméjét 1966–1967-ben Párizsban, a CERN-ben, Londonban, Genfben és Prágában tartott találkozókön tovább terjesztették. Pisában Bernardini vezetésével operatív bizottság alakult. A Társulat szerkezetéről a bizottságban sok vita volt, végül két munkacsoportot hoztak létre, egyet a Tár-



Gilberto Bernardini az EPS alapító okirat aláírásakor a CERN tanácstermében. (©CERN Courier 8. évf, 10. szám, 1968).

sulat működési szabályainak, egy másikat pedig az alapítás kidolgozására.

A szerkezetre nézve két koncepció merült fel: az egyik teljesen egyéni tagságra, a másik már létező nemzeti társaságok szövetségére építkezve képzelte el a Társulatot. Végül kompromisszumos megoldás született, amelynek értelmében mind egyének, mind nemzeti társulatok, sőt intézetek is tagok lehetnek. Kelet-Európára kezdettől fogva fokozott figyelmet fordítottak. Először úgy döntöttek, hogy a Társulatot 1968 őszén, Firenzében egy alakuló konferencián alapítják meg hivatalosan, de a konferencia szervezésére abban az évben már túl rövid lett volna az idő, úgy döntöttek, hogy a Társulat hivatalosan 1968 szeptemberében Genfben alakuljon meg. Svájc és különösen Genf, ami számos fontos nemzetközi szervezetnek ad otthont, logikus választás volt a Társulat központja és hivatalos székhelye számára.

Amint azt *Rüdiger Voss*, az EPS jelenlegi elnöke írta egy, a *CERN Courierban* nemrég megjelent cikkében: „Az 1968-as év fordulópontot jelentett a háború utáni Európa történelmében, ami bevésődött kollektív emlékezetünkbe. A globális politikát súlyos diáktüntetések, a hidegháború és a kelet-nyugati konfrontáció jellemezte. Augusztus 21-én a Szovjetunió és a Varsói



Luisa Cifarelli a Bolognai Egyetem professzora, az Olasz Fizikai Társulat elnöke, a Római Centro Fermi elnöke, számos nemzetközi tudományos szervezet tagja. (<https://www.unibo.it/sitoweb/luisa.cifarelli/cv-en>)

Szerződés más tagállamai betörtek Csehszlovákiába a Prágai Tavasz, a liberalizáció, a demokratizálódás és a polgári jogok érvényesülését célzó mozgalom letörésére. Ezek után csodának tűnik az Európai Fizikai Társulat mindössze néhány héttel későbbi, szeptember 26-án történt megalakítása, ahol a Csehszlovák Fizikai Társulat és a Szovjet Tudományos Akadémia képviselői közös asztalnál ültek.”

1968. szeptember 26-án reggel a Társulat alapító közgyűlésére a CERN tanácstermében került sor, ahol az EPS alapszabályát 62 egyéni tag és 20 nemzeti társulat, akadémia és kutatóintézet képviselői írták alá, közöttük a CERN-é is. A hivatalos alakuló ünnepséget ugyanezen a napon délután, a Genfi Egyetem Aula Magnájában rendezték.

Az EPS első elnökének Bernardinit választották, aki beiktatási beszédében hangsúlyozta a CERN fontosságát az EPS megeremtésében, mind az európai nemzetközi együttműködés példájaként, mind az újszülött társulat infrastruktúrájának biztosítójaként. Hangsúlyozta továbbá a meglévő és a jövőben létrejövő európai nemzetközi laboratóriumok és a számos európai fizikai folyóirat kérdését, az Európából az USA-ba irányuló agyelszívás elleni küzdelemre irányuló európai együttműködés megerősítésének szükségességét, a tudósok elkötelezettségét Európa kulturális egységének erősítésére és a kelet-európai országok aktív részvételének alapvető szükségességét. Ez utóbbival kapcsolatban érdemes emlékeztetni arra, hogy a Csehszlovák Tudományos Akadémiánál Prágában létrehozta egy ágazati titkárságot, amely egészen 1973-ig működött, és az EPS-logót is a Csehszlovák Fizikai Társulatnál tervezték meg.

Ma az EPS székhelye Mulhouse-ban van, és a Haute Elsass-i Egyetem a házigazdája. Az EPS-nek 42 társulati tagja van Izlandtól Törökorszáig, és kiterjed Izraelre, több mint 130 000 tagot képviselve. Az EPS tagtársadalmak jelentősen különböznek egymástól, így van kevesebb mint 50 és több mint 60 000 taggal rendelkező tagtársulat. A 42 tagtársulaton kívül az EPS-nek több mint 40 társult tagintézet (főleg vezető kutatóintézetek, köztük a CERN) és 3500 egyéni tagja van (ők jelentik a társulat tudományos magját). Kétoldalú egyezmények alapján az EPS több, mint 20 további társulattal működik együtt (APS, AAPPS, EuCheMS stb.). Az EPS 12 divíziójában és 7 csoportjában kimagasló színvonalú fizikai kutatásokat támogat. Az EPS-díjak, konferenciák és műhelyek elismertsége kiemelkedő: az EPS-konferenciák, amelyek közül sokat együttműködő vagy tagtársulatokkal közösen szerveznek, továbbra is mintául szolgálnak az egész nemzetközi fizikai közösség számára, és évente több ezer résztvevőt mozgósítanak. Az EPS-nek számos célbizottsága van, azzal a szándékkal, hogy európai álláspontot alakítsanak ki a fizikával és a társadalommal kapcsolatos fontos kérdésekről, és katalizálják a különböző területeken és különböző országokban dolgozó fizikusok összefogását. Az EPS fórumot teremt az európai fizikai közösség számára a fizika kutatásával és oktatásával kapcsolatos fontos kérdések,

valamint a fizika egész társadalomra gyakorolt hatásának megvitatására, mint például: kutatási és tudományos politika, EU Horizon Keretprogram, kutatási alapok, európai együttműködés, nemzetközi együttműködés, a fejlődő országok fizikája, az energia és a környezetvédelem, az oktatás és a fiatalok lehetőségei, az ipar fizikája, a nemek kérdése, az európai integráció, a nyílt források és nyílt adatok. Széles tagsági bázisa révén az EPS képviselni tudja az európai fizikus közösség véleményeit, és a fizika nézőpontja alapján hasznos információkat nyújt a politikai döntéshozók és a nagyközönség számára fontos kérdésekben. Hogy hatékonyabb legyen az együttműködés

az EU politikai vezetőivel, az EPS 2016-ban Brüsszelben irodát nyitott egy EU ügyekkel foglalkozó tanácsadóval. Ezenkívül az EPS létrehozott egy tudományos politikákkal foglalkozó tanácsadó testületet (Advisory Board on Science Policies, ABSP). Az ABSP tagjai konzultációkat folytatnak és tanácsokat adnak bizonyos politikai kérdésekkel kapcsolatban.

Az EPS jól hallhatóan és világosan képviseli a fizikus közösség véleményét, együttműködve partnerszervezeteivel a közös célok megvalósításának érdekében. Ezért, éppúgy, mint alapításának idején, az EPS jelenleg is tudományos hidakat biztosít „a fizikai tudomány egységének megőrzésére”.

AZ EURÓPAI FIZIKAI TÁRSULAT ÖTVEN ÉVE

Rüdiger Voss
az EPS elnöke

Az EPS kezdeti időszaka

Az 1968-as év olyan fordulópontot jelentett Európa háború utáni történelmében, amely mélyen bevésődött kollektív emlékezetünkbe. Az amerikai egyetemekről kiinduló, a vietnámi háború ellen tiltakozó, majd Európába is áttérjedő tömeges diákmozgalmak az 1968. májusi párizsi tüntetésekkben, és számos más európai ország hasonló eseményeiben érték el tetőpontjukat. A világpolitika a kelet-nyugat ellentétéről, a hidegháborúról szólt, és Európát mélyen megosztotta az a „vasfüggöny”, amelynek az 1961-ben emelt berlini fal volt a leglátványosabb szimbóluma. 1968 márciusában az egyetemistáknak és az értelmiségieknek a lengyelországi kommunista rezsim elleni tüntéssorozatát a biztonsági erők elfojtották, majd augusztus 21-én a Szovjetunió és a Varsói Szerződés más tagállamainak 500.000 főt meghaladó hadserege megszállta Csehszlovákiát, leverve a liberalizációért, a demokráciáért, valamint az emberi jogok érvényesítéséért indított, „Prágai tavasz”-ként ismertté vált mozgalmat.

Az írás a szerző *Fifty years of EPS (Il Nuovo Saggiatore 34/3–4 (2018) 70–73, ©Italian Physical Society, 2018.)* című cikkének magyar változata. Fordította Szabó Szilárd. Az Olasz Fizikai Társulat engedélyével közöljük.



Rüdiger Voss fizikus, PhD. Szakmai életének legnagyobb részét a CERN-ben töltötte, pályáját az ISR-en folytatott kísérletekkel kezdte Carlo Rubbia vezetése alatt. Karrierjében kiemelkedik a mélyen rugalmatlan müonszórás kísérletek végzése a Szuperprotonszinkrotronban, és az ATLAS-detektor megtervezése és megépítése az LHC-ban. 2016-os nyugdíjba vonulását megelőzően sok éven keresztül volt a CERN Nemzetközi Kapcsolatok Osztályának vezetője. 2017 áprilisa óta az EPS elnöke.

Ilyen háttérrel a mai szemünkkel valóságos csodának tűnik, hogy a csak néhány héttel később megalakított Európai Fizikai Társulat egy asztalhoz ültette a Csehszlovák Fizikai Társulat és a Szovjet Tudományos Akadémia képviselőit. A mai ismereteink szerint az EPS volt az első tudományos társulat Európában, amely a vasfüggöny két oldalán élő fizikusokat, illetve ott működő fizikai társulatokat szövetségbe tömörítette. Azóta is Társulatunk DNS-ének elválaszthatatlan része az, hogy tudományos hidakat épít a politikai megosztottságon keresztül.

Természetesen az EPS sem néhány hét alatt alakult meg; az operatív bizottság több mint két éven keresztül működött az új társulat célkitűzéseinek, tagsága összetételének és irányításának előkészítése érdekében. A kezdetektől *Gilberto Bernardini*, a Scuola Normale Superiore di Pisa akkori rektora volt az EPS-kezdémenyezés motorja. A későbbiekben ő lett a Társulat első elnöke.

Bernardini 1960 és 1961 között a CERN első kutatási igazgatója volt, és azóta is a nemzetközi tudományos együttműködés erős szószólója. Annak ellenére, hogy a CERN-nek nem volt formális intézményes szerepe az EPS létrehozásában, az európai együttműködés CERN-i modellje, illetve a CERN-ben tevékenykedő más kiemelkedő fizikusok – köztük *Bernard Gregory* főigazgató – támogatása jelentős hatást gyakorolt az új társulat megszületésére. Mindezek mellett, habár a CERN egy alapvetően a nyugat-európai országok által létrehozott szervezet volt (a CERN-t 1954-ben alapító tagok közül a politikai rendszerektől magát függetlenítő Jugoszlávia 1961-ben már elhagyta azt), jó időben elkezdte szorosabbra fűzni a tudományos kapcsolatrendszerét a Szovjetunióval és más kelet-európai országokkal, főleg a Dubnai Egyesített Atomkutató Intézeten keresztül. A sikeres CERN-modell által inspirálva, és előrelátó fizikusok egy csoportjá-



Az Európai Fizikai Társulat hivatalos alapító ünnepsége a Genfi Egyetem Aula Magnájában, a képen az összegyűlt fizikusoknak beszédet tartó D. van Berchem rektorral. A pódium bal oldalán az EPS első elnöke Gilberto Bernardini. (A *CERN Courier* képe, 8. évf. 10. szám, 1968.)

nak termékeny gondolatai alapján az Európai Fizikai Társulat hivatalosan 1968. szeptember 26-án jött létre Genfben. Az első *A fizika növekedési pontjai* elnevezésű tudományos konferencia megtartására 1969. április 8. és 12. között került sor Firenzében, amelynek helyszínéül a nagy presztízsű Palazzo Vecchio és az Orsanmichele szolgált. Az 50. évforduló ünnepi ceremóniájának a Genfi Egyetem ugyanazon Aula Magnája adott otthont 2018. szeptember 28-án, ahol az avatoulés is megtartásra került 1968-ban.

Fontos megjegyezni, hogy az alapító atyák víziójában már a kezdetektől több szerepelt, mint csupán egy új fizikai társulat felállítása. Az Aula Magnában elmondott avatóbeszédében Bernardini azon kívánságának is hangot adott, mely szerint az EPS alapítása „a tudósok azon elkötelezettségének demonstrálása, amely a lehető legszorosabb együttműködésre törekedve, pozitívan járulhat hozzá Európa kulturális egységének erősítéséhez”. A nemzetközi tudományos együttműködés eddig és ezt követően is folyamatosan lényeges szerepet játszik abban, hogy egyesítse a különböző kultúrájú és nyelvű, különböző politikai berendezkedésű országokat. A fizika hagyományosan a nemzetközi együttműködés élharcosa volt, és az Európai Fizikai Társulat ennek a folyamatos törekvésnek egyik kulcsszereplője.

E rövid cikknek szándékoltan nem célja az EPS történetének szisztematikus és átfogó leírása, miután a szerző sem nem tudománytörténész, sem pedig az EPS történetének szakértője. Társulatunk történeti fejlődésének különböző aspektusairól szóló cikksorozat található az EPS hírmagazinja, a *Europhysics News* 49/2. és 49/3. számában, illetve egyéb tényanyag található az EPS-ről az eps.org internetes portálon.

A cikkemben inkább az EPS-nek az európai tudományos színtéren betöltött szerepére és pozíciójára igyekszem koncentrálni. Ma az EPS kétféle módon szolgálja az európai fizikusközösséget: a tudományos társulatok klasszikus tevékenységein – konferenciákon, publikációkon és díjakon – keresztül határokon és tudományágakon átívelően támogatja az együttműködést, és segíti elő a kohéziót, illetve a politikai döntéshozókat, a médiát és a társadalmat elérve támogatja a fizikai kutatók és a fizikaoktatás fontosságának megismertetését ebben az egyre összetettebb és versengőbb környezetben. Társulatunk egyedülálló sokszínűségét jól tükrözi a kezdeményezések és tevékenységek kivételes változatossága.

Tagság

Az EPS Alapszabálya első tervezetének szövegezése során a legmarkánsabb vitát annak eldöntése okozta, hogy „egyének társulataként”, avagy „társulatok társulataként” működjön, és az erről szóló párbeszéd a mai napig tart. A nyilvánvaló kompromisszum mindkét kategória elfogadása lett, és ez a megoldás kiállta az idő próbáját. Az egyes országok fizikai társulatai számára az EPS egy egyedi platformot biztosít ahhoz, hogy megoszthassák a legjobb gyakorlataikat, illetve ahhoz, hogy európai szinten közös projekteket valósítsanak meg a tudományos publikációk megjelenítésétől a fizika tudományának a nemzetközi politikai küzdőtereken való népszerűsítéséig. Vitathatatlan, hogy az EPS rendkívül sikeres volt az egyes országok fizikai társulatainak szövetségbe tömörítésében: az 1968-as alapításban résztvevő 20 társulat és hasonló szervezetek száma 42-re nőtt, lefedve ezzel – néhány kivételtől eltekintve – Európa egészét és Izraelt. Ez a 42 társulat ma több mint 130 000 tagot képvisel.

Az EPS termékeny talajt kínál 3500 egyéni tagjának a személyes kapcsolatépítéshez, számos lehetőséget ad ahhoz, hogy hozzájárulhassanak Társulatunk stratégiájának és tevékenységének alakításához, végrehajtásához, valamint, hogy részt vegyenek az EPS munkacsoportjainak és divízióinak tudományos tevékenységében. Az EPS-beli egyedi tagságra sokan úgy tekintenek, mintha az versengene az adott ország társulatában való tagsággal; ám a valóságban ez egy kiegészítő lehetőség annak érdekében, hogy két út nyílhasson meg a személyes tudás kicserélésére a nemzeti és az európai szintek között, mindkét fél meglégedésére.

Az első Alapszabály megalkotásakor egy harmadik kategóriát, a társult tagok kategóriáját is bevezették. Kezdetben a fizikai laboratóriumokat célozta meg, majd a kör fokozatos kiszélesítésével jelenleg különösen azokra az ipari vállalatokra irányul, amelyek fizikával foglalkoznak, vagy vállalják saját fizikai kutatások folytatását. Az EPS-beli társult tagság különleges lehetőség az elkötelezettség és a fizikai kutatások, képzés, tudományos ismeretterjesztés terén elért eredmények demonstrálására, valamint a fenntartható stratégiák és gyakorlatok bemutatására. A társult tagok száma folyamatosan változott az EPS története során, és a jelenlegi mintegy 40 tag főleg az állami kutatóintézetek és egyetemek közül kerül ki.

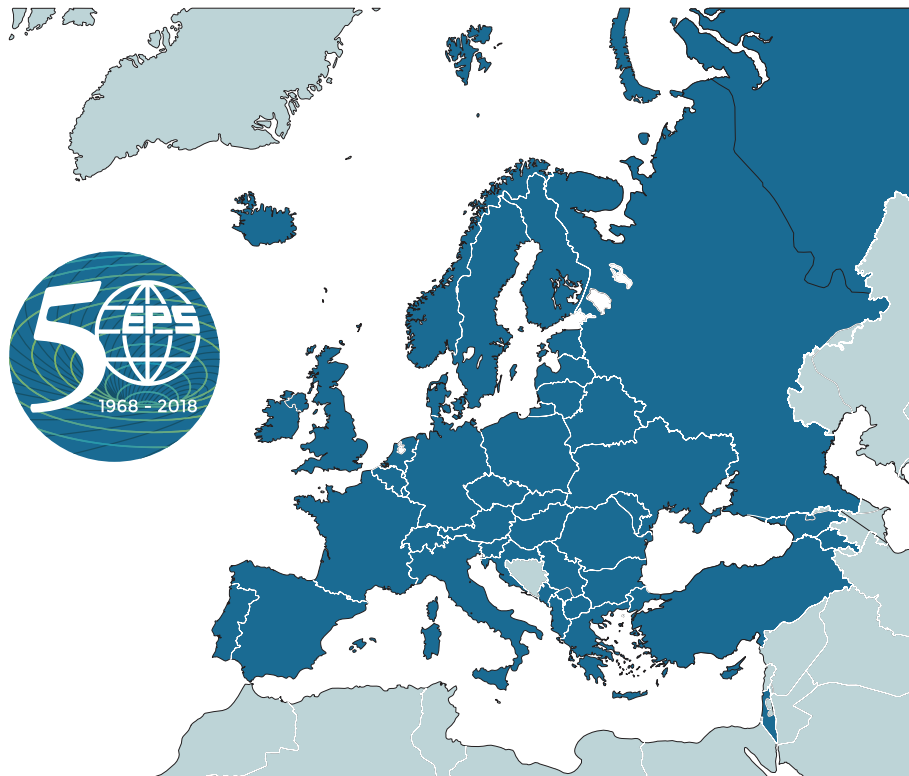
Míg a teljes joggal rendelkező tagtársulatok számának bővítése nagyon szűk keretek között mozoghat, addig az egyéni és a társult tagi kategóriákban szinte korlátlan az EPS résztvevői bázisának szélesítési lehetősége. Ezért most intenzív kampány indul, amely a Társulat múltbelinél vonzóbb arculatát bemutatva igyekszik új társult tagokat toborozni. A beindítást követően hasonló toborzó kampány várható az egyéni tagok irányában is.

Az EPS mint tudományos társulat

Divíziók és munkacsoportok

A divíziók és a munkacsoportok az Európai Fizikai Társulat tudományos éltető elemei; olyan fórumok, ahol az ötletek megvitatásra, a projektek megvalósításra, az eredmények bemutatásra, és a teljesítmények díjazásra kerülnek. Az egységek tudományosan autonómak, azonban munkájuk kritikus fontosságú annak érdekében, hogy hosszú távon lássák el az EPS-t azzal a tudományos munícióval, ami a hiteles szerepléshez szükséges olyan terepeken, mint a tudománypolitika és a tudomány megismertetése a társadalommal. Mint sok más társulat esetében, a divíziók – jelenleg 12 van – szakterületek és részterületek szerint szerveződnek dinamikus módon: a „legújabb kölyök a telepről” a Gravitációs Fizika Divízió, amely 2017-ben került felállításra a gravitációs hullámok Nobel-díjat érdemlő felfedezését követően.

Kontrasztként az EPS munkacsoportok – jelenlegi számuk 6 – főleg több tudományágat átfogó, interdiszciplináris témákkal foglalkoznak nagyon eltérő módon: ilyenek például a Részecskegyorsító, a Fizikátörténeti vagy a Fizika a Fejlődésért Munkacsoport.



Ezen országok nemzeti fizikai társulatukkal képviselik magukat az 50 éves EPS-ben.

Konferenciák

Jóllehet az internet korában egyszerű az elektronikus kommunikáció, a konferenciák, workshopok és iskolák fontos színterei az új ötletek és projektek megvitatásának, eredmények bemutatásának és a kutatók következő generációja képzésének. Az EPS legtöbb divíziója és munkacsoportja legalább évente vagy két évente tartott konferenciasorozatot szervez *Eurofizikai Konferencia* közös elnevezéssel; amelyek közül számos rendezvényt nemcsak Európában, de világviszonylatban is a vezető események között tartanak számon. Azok a konferenciák, amelyeket nem az EPS hivatalos szervezésében rendeznek meg, az „EPS által elismert konferencia” besorolásért folyamodhatnak. Az EPS Konferencia Bizottsága biztosítja, hogy minden Eurofizikai és az EPS által elismert konferencia pontosan betartsa a mindenkire vonatkozó szigorú tudományos minőségi és szervezési előírásokat valamennyi tudományterületen. Az Esélyegyenlőség Bizottsága által kezdeményezett, a Nemek Arányát Monitorozó Program szerint, az EPS által támogatott konferenciák vonatkozásában, középtávú elvárás olyan új szabályok bevezetése, amelyek biztosítják a fizikus nők megfelelő képviseletét az EPS-rendezvényeken.

Díjak, elismerések, kitüntetések

Az EPS díjai, elismerései és kitüntetései jutalmazták a kiemelkedő tudományos teljesítményt, bátorítják a feltörekvő tehetségeket, és felhívják a figyelmet a fizikus közösségnek tett kivételes szolgálatra. Több

alkalommal az EPS díjaival kitüntetettek később Nobel-díjjal jutalmazták: például a közelmúltban, 2017-ben a „Giuseppe és Vanna Cocconi-díjat a Rézszecke-asztrofizikáért” *Rainer Weiss, Kip Thorne és Barry Barish* kapták meg, akik később az év folyamán megosztott fizikai Nobel-díjban is részesültek. A legtöbb EPS-díjat a divíziók ítélik oda egy speciális tudományterületet kiválasztva, és az átadásra gyakran az Eurofizikai Konferencián kerül sor. Mindazonáltal vannak EPS-szintű díjak is: a legnagyobb presztízsű az Edison–Volta-díj, amelyről az EPS a comói Alessandro Volta Tudományos és Kulturális Központtal és az Edison Zrt.-vel közösen dönt. 2018-ban ezt a díjat *Alain Brillet, Karsten Danzmann, Alberto Giazotto és Jim Hough* kapta szintén a gravitációs hullámok felfedezésében végzett alapvető jelentőségű munkájáért. Az EPS-szintű díjak közül kiemelendő még az Emmy Noether-díj, amelynek odaítéléséről az Esélyegyenlőség Bizottsága dönt; ezzel a kiemelkedő teljesítményű női tudósokat jutalmazza, példaképként állítva őket a fizikus nők fiatal generációi elé.

EPS Fizikatörténeti emlékhelyek

Ugyan csupán rövid múltra tekint vissza, mindazonáltal figyelemreméltoan sikeres és népszerű az EPS által adományozott címek széles sorában a *Fizikatörténeti emlékhelyek* program, amely mindössze pár éve, *Luisa Cifarelli* korábbi EPS-elnök – ma az Olasz Fizikai Társulat elnöke – vezetése alatt került bevezetésre. Az EPS történelmi emlékhelyek olyan helyekről emlékeznek meg Európában, amelyek a fizika fejlődése és története vonatkozásában fontosak; továbbá olyanokról, amelyekhez a fizikatudomány egy-egy jelentős eseménye, felfedezése, egy vagy több tudós kutatása köthető. Mindezt több mint 40 történelmi emlékhely került kiválasztásra, közülük három van Magyarországon. A helyszínek listája rendkívül sokszínű. Két helyszínt az EPS és az Amerikai Fizikai Társulat közösen jelölt ki, mindkettő szorosan kapcsolódik *Albert Einstein* életéhez és munkájához: az „Einstein-ház” a svájci Bernben, és az Institute for Advanced Study Princetonban, ahol Einstein élete második felének java részét töltötte, miután az Egyesült Államokba emigrált.

Kiadványok

Az EPS kiadványai a Társulat tudományos érdeklődésének és tevékenységének teljes spektrumát lefedik. A kiadványok között a központi szerepet az EPS fennállásával szinte egyidős, jelenleg évente öt számmal megjelenő hírmagazin a *Europhysics News* játssza. Ez a mai napig hagyományosan nyomtatott magazin, bár most már hozzáférhető az ingyenesen olvasható online kiadás is. A kiadványt a havi internetes e-EPS hírlevél egészíti ki, ami inkább az EPS-re és az európai fizikusközösségre koncentrál, mint a tudományos tartalomra. Az EPS jelenteti meg IOP-vel karöltve az a *European Journal of Physics* című folyóiratot, amely-

re széles körben, mint az egyik vezető – valójában „a vezető” –, a fizikaoktatásnak szentelt fizikai folyóiratra tekintenek.

Az EPS tudományos folyóiratainak zászlóshajója az *EPL* (korábban *Europhysics Letters*), amely 1986-ban alapvetően a *Lettere al Nuovo Cimento* és a *Journal de Physique Lettres* fúziójából jött létre. Az *EPL* jelenleg a figyelem középpontjában van. Magas minőségűnek jegyzett folyóiratként küldetésének tekinti, hogy széles érdeklődési körű, interdiszciplináris fókuszú kiadvány legyen. Ugyanakkor a hagyományos, előfizetés-alapú üzleti modelljének olyan komoly versenytársak kihívásával kell szembenéznie, mint az új, egy szűk szakterületre koncentráló, kizárólag internetes kiadású folyóiratok megjelenése, illetve a szabadon hozzáférhető kiadványok felé való elmozdulás. Ahhoz, hogy ezen a gyorsan változó kiadványpiacon az *EPL* továbbra is sikeres legyen, újja kell alakítania magát, új szerkesztői kezdeményezésekkel és felülvizsgált üzleti modellel. Ebben a folyamatban az *EPL* tapasztalt előállítói és terjesztői partnerekre támaszkodhat, legnagyobb értéként pedig egy magasan jegyzett, önkéntes szerkesztőbizottságra, amely biztosítja a minőségi és egységes tartalom legmagasabb színvonalát.

Az EPS a tudománypolitikai küzdőtéren: válogatott példák

A karrierfejlesztés támogatása: a Young Minds Project

A *Young Minds Project* az EPS azon programjainak zászlóshajója, amely a tudományterület jövőjét jelentő fiatal tudósgenerációk szövetségbe tömörítésével és támogatásával foglalkozik, különös hangsúllyal a tudományos ismeretterjesztésre és a határon átnyúló kapcsolatépítésre. A Young Minds (YM) Project elemi szerveződési egységei a helyi csoportok, amelyek száma 2017-ben 40-ről 49-re emelkedett – ez a legnagyobb mértékű növekedés a projekt 2010-es indítása óta –, és jelenleg 23 különböző országot foglal magában. Miután 2016-ban *Eva Salvador* vette át az YM Szervezőbizottságának elnöki posztját, a leköszönő elnök, *Antigone Marino* (Nápoly) a projekt előmozdítása érdekében sok éven keresztül kifejtett munkája, kiemelkedő vezető szerepe elismeréseként 2017-ben, teljesen megérdemelten, az EPS Kiemelkedő Teljesítményért Kitüntetésében részesült. 2018 óta az YM projektet *Roberta Caruso* vezeti ugyancsak Nápolyból. A fiatal nők előtérbe helyezése az YM projektben csak egyike az EPS azon erőfeszítéseinek, amelyek a fizikus nők jobb képviselésének előmozdítására, valamint karrierlehetőségeik valamennyi szinten történő javítására irányul. Az egyéb, az EPS Esélyegyenlőség Bizottsága által *Lucia di Ciaccio* vezetése alatt kezdeményezett programok közül említésre méltó az EPS által támogatott konferenciákhoz kapcsolódó Nemes Arányát Monitorozó Program, illetve az Emmy Noether-díj, amelyek ebben a cikkben korábban már említésre kerültek.



Az EPS titkársága a Haute-Alsace Egyetem területén Mulhouse-ban (Franciaország).

Európai Integráció

Másféle egyenlő vagy egyenlőtlen lehetőségekkel történő foglalkozás szerepel az Európai Integrációs Bizottság (CEI) napirendjén. Majdnem 30 évvel a vasfüggöny lebontása után a kutatási és támogatási lehetőségek még mindig egyenlőtlenül kerülnek elosztásra Európában, ami továbbra is egyenlőtlen eredményez a nyugati és a keleti országok között. A CEI a kelet-, közép- és délkelet-európai, valamint az egyéb tagtársulatok közötti kooperáció erősítésével igyekszik megoldást találni a problémára, illetve ugyanezen szellemben támogatja az EPS a Délkelet-európai Nemzetközi Intézet a Fenntartható Technológiákért (SEEIST) kezdeményezést.

A brüsszeli EPS képviselő

Az EPS évek óta erőfeszítéseket tesz azért, hogy erősítse tudománypolitikai jelenlétét, különösen a Brüsszelben létesített képviselőt, illetve a komoly presztízsű Tudománypolitikai Tanácsadó Testület felállításán keresztül. A hangsúly az Európai Bizottság következő, FP9-es, hivatalosan *Horizont Európa* néven futó keretprogramját előkészítő konzultációban való folyamatos részvételen van. Az EPS egyike a mintegy 12 000, az EU Átláthatósági nyilvántartásában regisztrált szervezetnek. Ezen szervezetek közül természetesen nem mindegyik foglalkozik a tudománypolitikával és a keretprogramokkal, ugyanakkor maga a puszta szám is jól illusztrálja, hogy milyen kihívást jelent elérni, hogy mondandónk hallható legyen Brüsszelben. Fokozott erőfeszítéseket kell tenni kapcsolatrendszerünk fejlesztéséért, illetve a közös érdekek védelme érdekében a partnerszervezetekkel való kapcsolat szorosabbá fűzéséért. Egy olyan környezetben, ahol a kutatási programok megvalósítása és támogatási lehetőségek megszerzése egyre inkább társadalmi, mint tudományos kihívást jelent, az EPS-nek az alap- és alkalmazott kutatások közötti egészséges és fenntartható egyensúly megteremtését kell támogatnia. Európának olyan tudományos szintérré kell válnia,

ahol nincsenek másodrendű állampolgárok: a Horizont Európának nemcsak a támogatási alapokhoz, és a kutatási lehetőségek infrastrukturális háttéréhez való fair és kiegyensúlyozott hozzáférést kell biztosítania valamennyi EU-ország számára, de nyitottnak kell maradnia a nem EU-tagállamok részvétele irányába is, olyan országok sikeres *Horizon2020* partnerségi példáját követve, mint Norvégia és Svájc. Természetesen a Brexit eddig példa nélküli méretű és összetettségű dimenziókat ad majd ehhez a vitához, azonban – ahogyan az már említésre került – az európai fizikusközösség erős kohéziója érdekében, a politikai megosztottságon átívelő tudományos hidak építése mindig is elidegeníthetetlen részét képezte az EPS küldetésének.

Ugyanezen szellemben az EPS aktív szerepet játszik az Európai Bizottság által kezdeményezett és jelenleg is tartó Nyitott Tudomány vitasorozatban, főleg a korábbi elnök, *Christophe Rossel* személyén keresztül, aki az Európai Bizottság Nyílt Tudomány Politikai Platformjának tagja.

Azért, hogy a politikai szintéren hiteles szereplőnek tekintsék, az EPS-nek széleskörű, megingathatatlan bizonyítékkal kell szolgálnia. Ennek érdekében a *Fizika fontossága az európai gazdaság vonatkozásában* című, elsőként 2012-ben publikált nagyszerű tanulmány a jelenlegi statisztikai adatokra alapozva felfrissítésre kerül. A program gerincét mindazonáltal *A Horizon 2050 nagy kihívásai* című keretdokumentum adja, ami megnevezi azokat a társadalmi és tudományos kihívásokat, amelyekkel a fizikának várhatóan szembe kell néznie a 21. század közepéig.

Globális kapcsolatrendszer

A tudományos együttműködés egyre inkább világméretű törekvéssé válik, ami a nem európai partnerszervezetekkel és szervezetekkel való növekvő együttműködésben is visszatükröződik. Az EPS hosszú évek óta együttműködik az Amerikai Fizikai Társulattal (APS) és az Ázsia–Csendes-óceáni Fizikai Társulattal (AAPPS) közös programokban és projektekben; emellett az EPS megfigyelőként részt vesz a Nemzetközi Fizikai Unió (IUPAP) munkájában. Fontos súlyponti elem a *Fizika a Fejlesztésért* témában folytatott együttműködés, különösen Afrikával és a Közel-kelettel. Az EPS és az APS más partnerekkel együtt vendégkutatók látogatásait finanszírozó utazási programmal támogatja a SESAME fényforrásprojektet Jordániában.

A tudományos közösség egyetemes aggodalommal fordul a tudomány szabadságának védelme irányába, ami magába foglalja a tudomány gyakorlásának a nem tudományos szempontoktól és kényszerítéstől mentes szabadságát, a tudósok személyes szabadságának biztosítását, és az emberi jogok figyelembe vételét. Ez egy olyan terület, ahol az EPS már a múltban is aktív volt; kiemelkedő példaként említhető a disszidens szovjet tudósok *Andrej Szabarov* és *Jurij Orlov* érdekeinek megvédése. A közelmúlt eseményei

és történései is arra tanítanak bennünket arra, hogy a tudomány szabadsága olyan fontos és törekeny dolog, amit sohasem téveszthetünk szem elől, még európai összefüggésekben sem.

Végkövetkeztetés

Fennállásának 50. évfordulóján, az Európai Fizikai Társulat büszkén tekinthet vissza ugyanennyi, a fizikusszféra számára kiemelkedő szolgálatot nyújtó évre. A Mulhouse-ban található központban működő

maroknyi, ugyanakkor profi szervező csapat mellett az EPS ma is jobbára egy önkéntes szerveződés, így ez egy nagyszerű alkalom a köszönet kifejezésére azon sokak felé, akik éveken keresztül keményen dolgoztak az EPS növekedése és felvirágoztatása érdekében. Szerencsére sokkal többen vannak annál, hogy ehelyütt név szerint valamennyien felsorolásra kerülhessenek. Mindazonáltal szeretném külön is kifejezni köszönetemet az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak, az EPS egyik alapító tagjának az elmúlt ötven évben nyújtott lankadatlan támogatásért és csodálatos partnerségért.

ÖTVEN ÉVE AZ EURÓPAI FIZIKAI TÁRSULATBAN

Kroó Norbert
az EPS egykori elnöke, tiszteleti tagja

Ötven éve, 1968. szeptember 26-án néhány éves előkészítő munka lezárásaként Genfben megalakult az Európai Fizikai Társulat (EPS). Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat egyike volt az alapítóknak. Én akkor Dubnában, az Egyesített Atomkutató Intézetben dolgoztam és meghívást kaptam az alapítási ünnepségre. A meghívót bő egy hónappal az esemény előtt postázták, én azonban csak két nappal az ünnepség után kaptam meg. Gondolom nem véletlenül. Ez a szándékos késleltetés jól példázza az akkori viszonyokat.

Dubnából 1971 nyarán tértem haza, és még szinte meg sem melegedtem, amikor az ELFT akkori elnöke, *Sziget György* akadémikus meghívott egy beszélgetésre. A téma a magyar képviselet volt az EPS-ben. Szigeti elnök úr arra kért, hogy vállaljam el a magyar fizikusok képviseletét ebben az új európai szervezetben. A rábeszélő szöveg tartalma a következőképpen hangzott: Európa előbb vagy utóbb egyesül és ennek az egyesült Európának Magyarország is tagja lesz. E szervezetnek szüksége lesz egy, a fizikusokat képviselő európai szervezetre is és ez csak az EPS lehet. Manapság egy ilyen álláspont triviálisnak tűnhet, de 1968-ban ez olyan bátor vízió volt, ami akkor józan ésszel lehetetlen ábrándnak látszott.

A 2018. október 12-én – az EPS Fizikatörténeti Emlékhely avatása és az Európai Fizikai Társulat megalakulásának 50. évfordulója alkalmából – tartott előadás frott változata.



Kroó Norbert fizikus, kutatóprofesszor, a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja. 1993 és 1995 között az EPS elnöke. 1999 és 2005 között az MTA főtitkára, majd 2005-től alelnöke. A szilárdtestfizika neves kutatója. 1981 és 1998 között az MTA Központi Fizikai Kutatóintézet Szilárdtestfizikai Kutatóintézete igazgatója. (Wikipédia)

Az érvelést megértettem, a felkérést elfogadtam, tagja lettem az EPS Tanácsának, később a Végrehajtó Bizottságnak, a kilencvenes évek elején megválasztott elnöke, 1993 és 1995 között elnöke, majd lelépő elnöke lehettem a Társulatnak. Most pedig egyike lehetek a mintegy két tucat tiszteleti tagnak. Azóta is szívügyem, ami e fontos szervezetben történhet.

Izgalmas periódust jelentettek a hetvenes és nyolcvanas évek. Elzártágunk szimbolikus kerítése, a Vasfüggöny sok mindenben korlátozott bennünket, az EPS azonban hatékony formákat teremtett ennek legáltalább részbeni enyhítésére. Nálunk rendezett konferenciák, személyes kapcsolatok, oktatási programok lehettek ennek forrásai. Tagdíjunkat az akkor még nem konvertibilis forintban fizettük, ami lassan felgyülemlett. Ezt a pénzforrást és a többi szocialista ország tagdíját is úgy hasznosítottuk, hogy egy EPS fiilálé irodát hoztunk létre Budapesten, amit a Magyar Tudományos Akadémia a Nádor utcai irodaházban felajánlott két szobával segített. Az EPS akkori főtitkára, *Gero Thomas* pedig néhány évig ebből az irodából koordinálta a Társulat tevékenységét.

A rendszerváltás idején sok segítséget kaptunk nemzetközi összefogás eredményeként, például ajándék számítástechnikai eszközök és tudományos folyóiratok, továbbá ösztöndíjak formájában. Örömmel gondolok vissza arra, hogy különböző EPS funkcióimban ezt a segítséget koordinálhattam, illetve különböző formáit kezdeményezhettem. Elnökségem idején indítottuk a fizikai diákmobilitási programot, amelyben minden EPS tagország, mi is részt vehettünk. A fizikus hallgatók lehetőséget kaptak arra, hogy egy-két szemesztert a programhoz csatlakozó másik egyetemen látogassanak. Létrehoztuk az Optikai és Kvantumfizikai divíziókat, hidat építettünk a kutatások és az eredmények alkalmazásainak szervezetei között, együttműködési kapcsolatokat építettünk más európai szervezetekkel. Mindezzel azt kívántuk elérni, hogy az

EPS több legyen, mint egy tudós társaság, professzionális irányba is bővítsé tevékenységét, beleértve a szakmai háttér biztosítását a politikai döntéshozók számára.

A múlt század utolsó évtizedei, de különösen az új évezred óriási változásokat hozott életünkbe. A globális gazdasági súlypont keletre tolódik, Európa részaránya a világ gazdaságában csökken, ami versenyképességének csökkenését is jelenti. Ez azért is figyelmeztető folyamat, mert a 19. században és a 20. század első felében Európa a tudomány és gazdasági fejlődés motorja volt. Mi voltunk az első, második, sőt jelentős mértékben a harmadik ipari forradalom, a mezőgazdaság forradalmi átalakulásának vezető ereje, de ezen időszak tudományos vezető ereje is Európa volt.

Az utolsó ötven évben a tudomány alapú technológiák átalakulása gyökeresen megváltoztatta életünket és ezek a változások már ritkábban indultak ki Európából. Néhány példa ezen változásokra. Az EPS alapítása idején a tranzisztor centiméteres méretű eszköz volt, korlátozott teljesítménnyel, manapság pedig a tranzisztorok milliárdjai találhatók egyetlen centiméteres csipen, ráadásul a kvantummechanika is bevonult e területre. Az akkori IBM7090-es számítógép gyermekjátéknak tűnhet a mai gépek mellett és már úton van a kvantumszámítógép is. Az akkor még unikumnak számító lézerek helyett ma hadseregnyi áll rendelkezésünkre a teremméretűtől a nanoméretűig, a folyamatosan sugárzótól az attosekundumos impulzusokat adókig, a terahertzes frekvencián sugárzótól a röntgenlézerekig, a gázlézerektől a biológiai anyagban működőkig. A fosszilis, környezetkárosító energiaforrások mellett egyre több a megújuló forrás. Akkor levélben kommunikáltunk, ma az internet az egész világot behálózza, már a dolgokat (gépek stb.) is összeköti. Az anyagtudomány fél százada három dimenzióban gondolkodott, ma a két-, egy-, sőt zérus dimenziós szerkezetek állnak az érdeklődés és az alkalmazások középpontjában. Ezt a tendenciát a miniatürizálási trend alapozta meg, valamint az a törekvés, hogy a természetben zajló folyamatok analógiájára hozzunk létre új technológiákat. Az emberi agy energiafogyasztása például mintegy százezerszer kisebb, mint az azonos teljesítményű szuperszámítógépeké. Ennek oka az, hogy az agyban a memória és a processzálás egy helyen történik, szemben a számítógépekével, ahol e két funkció



Az Europhysicsnews 2018/3 száma alapján

szétválik. Az IBM cég pedig már létrehozott egy olyan csipet, amely 1 millió idegsejtet és 256 millió szinapszist szimulál és eredményül egy olyan áramkör született, amely tízezer kisebb energiafogyasztású, mint a hasonló teljesítményű „klasszikus” csipek. 50 éve már ismertük a DNS szerkezetét, manapság már sokrétűen manipulálni is tudjuk, ennek biológiai lehetőségei gazdasági spektrumát is kihasználva, gyakran veszélyeit és etikai konzekvenciáit is elfeledve. Az EPS megalakulása idején született meg az első interaktív TV, manapság pedig már a mesterséges intelligencia sokrétű lehetőségei folyamatos megvalósulásának lehetünk szemtanúi.

Ez csak néhány példa azokból a változásokból, amelyek gyökerei a jelen és a közeljövő gazdaságait, de tudományos kutatások jelentős szegletét is átalakítják. Ezt azért merem állítani, mert már az elmúlt évszázadok során is tapasztaltuk, hogy milyen hatással voltak életünkre a nagy tudományos felfedezések. A newtoni mechanika, a gravitáció felfedezése vezetett az első ipari forradalomhoz (például a gőzgépek megalkotása). Az elektromágneses sugárzás felfedezése alapozta meg a világítás és az elektronika forradalmát (rádió stb.), és az erős és gyenge kölcsönhatások megismerése vezetett minket a nukleáris korszakba, megismertük, hogyan működik a Világegyetem és egy új energiaforráshoz jutottunk – annak minden jó és káros hatásával együtt. Új lehetőségek világába vezetett a kvantummechanika is. Megszülethetett a

tranzisztor és a lézer, de beindult a digitális és a genetikán alapuló biológiai forradalom is. Alapvető változást hozott a fentiekben alapuló informatikai fejlődés. Ennek egyik eredménye, hogy míg a 20. században azt tudtuk megérteni, megtervezni és gyártani, amit meg tudunk mérni. A fizika műszerei és számítástechnikai rendszerei segítségével messzebbre láthatunk, többet érthettünk meg a természeti folyamatokból, jobban kommunikálhattunk és ellenőrizhettük a mesterséges folyamatokat. A 21. században pedig már azt is meg tudjuk érteni, megtervezni és létrehozni, amit ki tudunk számítani. A számítástechnikai modellek segítségével még messzebbre láthatunk, időben oda-vissza utazhatunk, olyan hipotéziseket is ellenőrizhetünk, amelyeket másképp nem lehet, mesterséges folyamatokat indíthatunk el stb.

Az EPS születése táján zajlott az első kvantumforradalom. Ebben az időszakban a kvantummechanika törvényeinek megértése és alkalmazása volt a cél. Megismertük a kvantummechanika alapjelenségeit (hullám-részecske dualitás, alagúteffektus, szuperpozíció, összefonódás), hozzászoktunk ahhoz, hogy a kvantummechanikai jelenségeket valószínűségi elmélet írja le, hogy a Heisenberg-féle határozatlansági reláció meghatározó jelentőségű és a kvantumrendszereken végzett mérések a klasszikus világba vezethetik vissza a rendszereket. Ezek a felfedezések és hatásaik alapvető gazdasági és társadalmi következményekkel jártak.

A második kvantummechanikai forradalom napjainkban zajlik. Ennek lényege, hogy megtanultuk manipulálni a kvantumfolyamatokat a különböző rendszerekben és anyagokban. Az eredmény: alapvetően kiemelkedő paraméterű és képességű eszközök és rendszerek megjelenése a szenzorika, mérés-technika, képalkotás, kommunikáció, szimuláció, számítástechnika és orvosi diagnosztika területén. Ez a forradalom is radikális gazdasági és társadalmi változásokhoz vezet, foglalkozások tűnnek el, de egyúttal újabb, magasabb képzettséget igénylő szakmák jelennek meg. Közben az is kiderült, hogy szemben a korábbi hiedelmekkel, a kvantummechanika törvényei a makroszkopikus világban, sőt még a biológiában is hatnak. Például a fotoszintézis is kvantummechanikai folyamat és a madarak tájékozódásának biológiai GPS „műszere” is kvantummechanikai alapon érthető meg.

Mindezen változások új technológiákat szültek. A nanotechnológiák a gazdaság szinte minden ágában kulcstechnológiákká váltak, a biotechnológiák gyökeresen átalakultak, az információs technológiák mindenütt jelen vannak, de jellegükben és teljesítőképességükben folyamatosan és gyorsuló ütemben változnak. A szilíciumkorszakot folyamatosan felváltják az új lehetőségek, amelyeket a molekuláris elektronika, a szénalapú elektronika, a spintronika és a kvantumelektronika teremt meg. Az új anyagok létrehozására irányuló erőfeszítéseket is nagyrészt a miniatürizációs folyamat és ezen technológiák igényei motiválják. Mindezekre pedig növekvő hatást gyakorolnak a kvantummechanika törvényei.

És tanúi vagyunk a negyedik ipari forradalom eseményeinek. Ez a folyamat közel egy tucat új technológia integrációjára épül, a digitális fotonika alkalmazásai teszik lehetővé, a lézerek teszik flexibilissé, épít a nagy adathalmazok kezelésére, a hálózatosodásra és a képalkotás és analízis legújabb eredményeire.

Mindezek a változások azonban a pozitívumok mellett egy sor új problémát is szülnék. A nyersanyagkincsek felélése, az üvegházhatás erősödése, a környezet elszennyeződése stb. olyan problémákat kreálnak, amelyeket jövőnk érdekében meg kell oldanunk. És *Albert Einsteint* idézve „ezeket a problémákat nem tudjuk megoldani olyan gondolkodásformákkal, amelyekkel azokat kreáltuk”.

De még egy fontos körülmény: a technológiák lehetőségeket adnak a kezünkbe, de nem határozzák meg azt, hogyan alkalmazzuk ezeket. Ez tőlünk függ. Ezért is fontos Albert Einstein egy újabb üzenete: „Félek attól a naptól, amikor a technológia fontosabb lesz, mint az emberi kapcsolatok. A világon lesz egy generációnyi idióta.” A tudomány, az EPS és az ELFT is sokat tehet azért, hogy ez ne így legyen.

Természetesen ezen változásokat sem az EPS, sem az ELFT nem hagyhatja figyelmen kívül. Az elmúlt évszázadok technológiai változásai a tudomány eredményeiben gyökereztek és ez így van a jelenben, így lesz a jövőben is. Az ipari és mezőgazdasági forradalmak Európából indultak el és a modern tudomány bölcsője is Európában ringott. Mivel a jövőt a múltban lefektetett alapokra érdemes építeni, Európa jövőt formáló szerepe fontos is fontos lehet, felelőssége pedig éppen ezért is nagy. Mivel pedig a fizikának a fent vázolt fejlődésben játszott szerepe meghatározó volt, ezért felelőségünk még nagyobb, mint másoké. Ezért lehetőségeink korlátain belül mindent meg kell tennünk a fenntartható, élhető jövőért. Ehhez az alapvető eszközök rendelkezésünkre állnak. A belépő technológiák kulcsa a kezünkben van, Európában létezik az az intézményi struktúra, amelyre a megvalósítás során támaszkodhatunk és ebbe a struktúrába az Európai Fizikai Társulat és rajta keresztül az ELFT is beépült.

Úgy gondolom, hogy a mai esemény, amikor az EPS történelmi helyeire figyelünk, méltó keretet adott az 50. születésnap megünneplésére is. Az emlékhelyek a fizika fejlődése számára fontos eredmények helyszínei. Három magyar európai fizikai emlékhely nagy öröm, elismerés és megtiszteltetés számunkra. Az első magyarországi emlékhely az MTA Atommagfizikai Kutatóintézete Debrecenben, ahová a magfizika egy fontos eredménye miatt került az emlékeztető tábla, a második a fásori Evangélikus Gimnázium, ahol *Wigner Jenőre* és a kvantummechanikára emlékezünk. Végezetül pedig most avattuk a harmadikat, az *Eötvös Lorándra* és a gravitációra emlékeztető táblát az általa alapított Fizikai Intézet előtt.

Reményeim szerint a jövőben még további magyarországi emlékhelyek is szülehetnek és ezek meg is kapják az európai fizikus közösség elismerését. Ehhez kívánok a magyar fizika művelőinek eredményes munkát.

BIOLÓGIAI VÉKONYRÉTEGEK ÉS ÉLŐ SEJTEK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK VIZSGÁLATA KVARCKRISTÁLY MIKROMÉRLEGSEL

Prósz Aurél, Saftics András, Péter Beatrix, Kurunczi Sándor, Horváth Róbert
MTA EK MFA, Nanobioszenzorika Lendület Csoport

Jelölésmentes bioérzékelők

A mikrovilág folyamatainak megfigyeléséhez ma már számos, különböző elven alapuló képalkotó eszköz áll rendelkezésünkre. Bár a fénymikroszkópok a legelterjedtebbek, a minta tulajdonságai sok esetben egyéb mechanikai, optikai vagy elektrokémiai eljárások alkalmazását követelik meg. A különböző vizsgálati módszereknek vannak előnyei és hátrányai, valamint alkalmazhatósági korlátai is. A leggyakrabban használt technikáknál a vizsgálandó folyamatok megfigyeléséhez valamilyen jelöléses eljárást kell alkalmazni, ami problémát jelenthet. Például a fluoreszcens mikroszkópiában sokszor olyan molekulákat

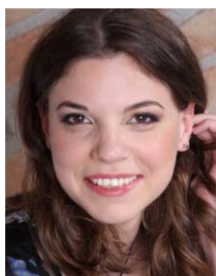
A bemutatott munka az MTA Lendület, az NKFIH ERC_HU és KH_17 programok, valamint a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (Kurunczi Sándor) támogatásával készült.



Prósz Aurél 2017-ben fizikus BSc diplomát szerzett az ELTE-n, ahol jelenleg a fizikus MSc szakon folytatja tanulmányait. Kutatómunkáját a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének Nanobioszenzorika Lendület Kutatócsoportjában végzi, Horváth Róbert témavezetése alatt. Kutatásának fő területe az egyedül emlőssejtek kitapadásának és jelzéseinek vizsgálata jelölésmentes bioérzékelőkkel.



Saftics András 2012-ben biomérnök BSc, majd 2014-ben vegyészmérnök MSc diplomát szerzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen (BME). 2014-től a BME Oláh György Doktori Iskolájának PhD hallgatója, kutatómunkáját az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének Nanobioszenzorika Lendület Kutatócsoportjában végzi Kurunczi Sándor témavezetésével. Doktori munkájának területe hidrogél rétegek fejlesztése bioszenzorikai alkalmazásokhoz.



Péter Beatrix 2009-ben környezetmérnöki BSc, majd 2012-ben biomérnöki MSc diplomát szerzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. PhD tanulmányait a Pannon Egyetem Molekuláris- és Nanotechnológiák Doktori Iskolájában végezte Horváth Róbert témavezetésével. A PhD fokozatot 2016-ban szerezte meg. A Nanobioszenzorika Lendület Kutatócsoportban (MTA EK MFA) dolgozik tudományos munkatársként. Fő témája a sejtkitapadás vizsgálata jelölésmentes optikai bioszenzorokkal.

kell a számunkra érdekes folyamatokban részt vevő összetevőkhöz kapcsolnunk, amelyek számottevően befolyásolhatják a megfigyelt rendszert. Ha a használt módszer időfelbontása viszonylag alacsony, akkor a gyorsabban változó folyamatok esetében csak a rendszer kezdő- és végállapotáról nyerhetünk információt, a pontos kinetika így rejtve marad – ami újabb probléma forrása lehet. Az említett nehézségek megoldására – gyakran – kiválóan alkalmasak a nagy érzékenységgű és időfelbontású jelölésmentes bioérzékelők (továbbiakban: bioszenzorok).

A jelölésmentes bioszenzor elnevezés olyan innovatív analitikai eszközök családjára utal, amelyek egy specifikus kémiai vagy biológiai válaszjelet alakítanak át közvetlenül mérhető, számszerűsíthető jellé. Közös jellemzőjük a nagyfokú szelektivitás, érzékenység és több kísérletben való újrafelhasználhatóság. Működésük során közvetlenül mérnek egy, a vizsgált minta által kiváltott kémiai vagy fizikai jelenséget, így nincs szükség közvetett jelölők alkalmazására. Magas időfelbontásuk pedig a folyamatok valós idejű megfigyelését teszi lehetővé.

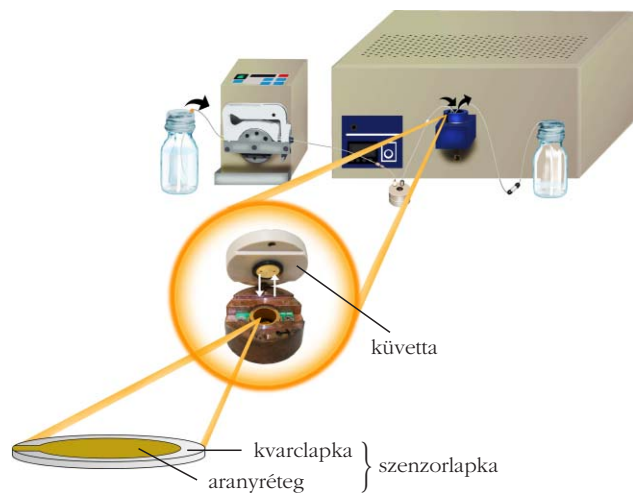
Hátrányuk, hogy a bioszenzor által mért jel forrása egyfajta összegjel, amely több, különböző biológiai vagy kémiai folyamat eredményeképpen áll össze, így a jel értelmezése gyakran bonyolult folyamat. A kísérleti eredmények helyes értelmezésének érdekében –



Kurunczi Sándor kémia-fizika szakon végzett az ELTE-n 1995-ben. PhD fokozatot a Semmelweis Egyetemen szerzett az Elméleti Orvostudományok Doktori Iskolában 2002-ben, majd JSPS posztdoktori ösztöndíjjal 2 évet töltött Japánban (NIMS, Tsukuba). Az MTA EK MFA-ban 2005 óta dolgozik bioszenzorikai témákon.



Horváth Róbert 1997-ben szerzett MSc diplomát az ELTE fizikus szakán, majd ugyanitt 2002-ben PhD fokozatot biofizikából. Témavezetője *Papp Elemér* volt. Összesen 8 évnyi dániai és angliai kutatómunka után 2009-ben tért haza. Jelenleg a Nanobioszenzorika Lendület Kutatócsoport vezetője a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetében. Kutatási témájuk a jelölésmentes bioszenzorok fejlesztései és biológiai, kémiai alkalmazásai.



1. ábra. Egy QCM műszer (QCM3000, MikroVákuum Kft.) vázlatos ábrája a benne foglalt küvetával és szenzorlapkával, mellette a kísérleti elrendezéssel.

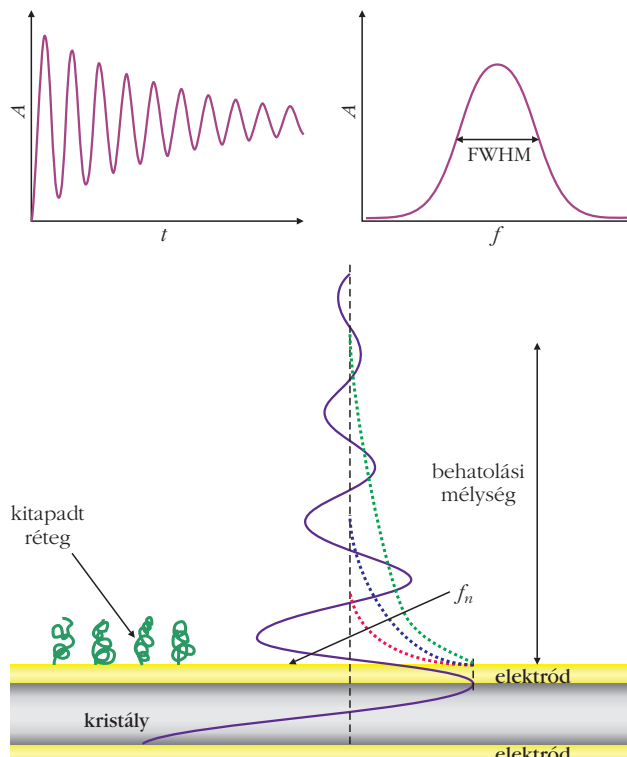
az egyes specifikus jelek kinyeréséhez – fontos az ellenőrző mérések körültekintő megválasztása.

A jelölésmentes bioszenzorok felhasználása több mint fél évszázados múltra tekint vissza. Az első ilyen érzékelőt – segítségével glükózkoncentrációt mértek biológiai mintákban – Clark és Lyons alkotta meg 1962-ben. Az ezt követő évtizedekben a jelölésmentes bioszenzorok roppant fejlődésnek indultak mind a módszer technológiai oldalát, mind pedig alkalmazásainak széles skáláját tekintve. Felhasználásuk ma már meglehetősen széles körű, alkalmazzák például elektrokémiai, nanotechnológiai és bioelektronikai területeken, valamint a gyógyszerfejlesztésben és élelmiszer-mérnöki kutatásokban is.

Cikkünkben egy olyan modern bioszenzor működési elvét és felhasználásának különböző módjait mutatjuk be, amellyel közvetlenül, jelölésmentesen vizsgálhatunk biológiai vékonyrétegek, például felületre kitapadt fehérjemolekulák mechanikai jellemzőit, sőt bonyolultabb rendszerek, például élő sejtek kitapadásának kinetikájáról is értékes információkat szerezhetünk [1].

Kvarckristály mikromérleg

A kvarckristály-mikromérleg (angolul: Quartz Crystal Microbalance, QCM) működési elve a piezoelektromosságon – bizonyos anyagok (például kvarc, kerámia) deformálásakor elektromos tér keletkezik az anyagon belül – alapszik. A deformáció mértékének változtatásával e tér erőssége befolyásolható. A jelenség fordítva is megfigyelhető: elektromos tér hatására a piezoelektromos anyag szerkezete megváltozik. Ezt felhasználva, megfelelő, a piezoelektromos minta sajátfrekvenciájával egyező frekvenciájú váltakozó elektromos feszültséget kapcsolva rá, a kristály a többi frekvenciához képest nagyobb amplitúdóval és kisebb csillapodással rezgésbe hozható. E rendszerre többlettömeget helyezve – az új rendszer immár má-



2. ábra. A QCM-D és QCM-I módszerek alapjainak összefoglalása. Balra fenn: QCM-D esetében a rezgést létrehozó feszültség kikapcsolása után az amplitúdó karakterisztikus lecsengési idejéből számítható a disszipáció. Jobbra ugyanez az érték az impedanciaspektrum félértékszélességéből (FWHM, angolul: Full Width at Half Maximum) határozható meg. Alul a vizsgált réteg és a benne terjedő alap- és felharmonikus frekvenciákhoz tartozó módusok behatolási mélységeinek vázlatos megjelenítése látható.

sik sajátfrekvenciája miatt – a rezgést gerjesztő elektromos feszültség frekvenciáját is változtatni kell. Ez képezi a QCM technológia alapját (1. ábra), ahol egy vékony kvarclapkát hoznak rezgésbe. E módszer széles körben elterjedt a lerakódott réteg vastagságának mérésére.

A rezgés frekvenciája a felhasznált kvarckristály geometriai és mechanikai sajátosságaitól függ. A legáltalánosabban elterjedt szabvány az 5 MHz alapfrekvenciájú kristály, amelyben az alapfrekvencia mellett megjelenő magasabb, páratlan szorzatú felharmonikusok is gerjeszthetők és mérhetők (15, 25, 35, ... MHz, a páros szorzatú felharmonikusok piezoelektromos módszerrel nem gerjeszthetők¹). Ez azért fontos, mert a különböző felharmonikusokhoz tartozó rezgésmódusok behatolási mélysége és érzékenysége más és más, így a kristályra felvitt és vizsgálat tárgyát képező kémiai vagy biológia réteg eltérő tartományairól nyerhetünk információt (2. ábra, alul).

A kristály – a ráakódott tömeg hatására bekövetkező – Δf sajátfrekvencia-változása a következő egyenlettel határozható meg:

¹ Elméletileg az alapfrekvencia páros szorzatú módusainál is létezik rezonancia, de ezek a felharmonikusok gyakorlatilag csak mechanikai úton gerjeszthetők, és csak a kvarckristályon belül lenne amplitúdójuk. Ezeket nem célszerű mérésre használni, mert számunkra csak a kristály felületén bekövetkező változások érdekesek [2].

$$\Delta f = - \frac{n \Delta m}{C}, \quad (1)$$

ahol Δm a kitapadt réteg felületi tömegsűrűsége, n a felharmonikus száma, C pedig egy, a kristályra jellemző állandó, ennek a tipikus értéke $17,7 \text{ ng cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. Az (1) az úgynevezett Sauerbrey-egyenlet, ami csak speciális körülmények között, vákuumban és rugalmatlan rétegekre érvényes. Biológiai alkalmazásokban – a vizsgált rétegek hidratáltsága miatt – ezen egyenlet csak korlátozottan alkalmazható [3].

Disszipáció mérése QCM-D és QCM-I módszerekkel

Újabb fejlesztésű mikromérlegekkel a disszipáció is mérhető, így közvetlenül nyerhetünk információt a vizsgált anyag mechanikai rugalmasságáról, és lehetővé válik a Voigt-modell alkalmazása, amivel folyadékközegben, hidratált biológiai mintákon már pontosabb közelítéssel végezhetünk vizsgálatokat. A Voigt-moddal a réteg vastagsága, viszkozitása és képlékeny (elasztikus) nyírási együtthatója is meghatározható.

A fent említett disszipáció meghatározására két műszerfajta terjedt el, a QCM-D (angolul: Quartz Crystal Microbalance with Dissipation monitoring) és a QCM-I (angolul: Quartz Crystal Microbalance with Impedance measurement). Megjegyzendő, hogy a QCM-D és QCM-I technikák segítségével kiolvasott disszipációértékek egymással egyenértékűek. A két módszer alapjait képező jelenségek összefoglalása a 2. ábrán látható. A későbbiekben néha mindkét mérésfajta egyszerűen QCM néven hivatkozunk.

QCM-D módszer

A QCM-D módszer esetében a frekvenciamérések között rövid időre kikapcsolják a rezgést előidéző feszültséget, majd a rezgéscsillapodás mértékét regisztrálják. Ha a felületre tapadt réteg merev, akkor a rendszer lecsengési ideje hosszú, ellenben, ha a réteg puhább és kevésbé sűrű, akkor ez az idő rövidebb lesz, hiszen a minta erősebben hat kölcsön a vizes környezetével, és ez a közeg így gyorsabban elnyeli (hővé alakítja, disszipálja) a rezgés energiáját.

QCM-I módszer

Egy újfajta – például az általunk is használt, a magyar MikroVákuum Kft. (Budapest) által fejlesztett – műszer a disszipáció értékének meghatározását impedanciaanalízissel végzi. A QCM-I műszer egy speciális rezgőkörnek tekinthető, impedanciaspektrumát – mérés közben – a műszer folyamatosan rögzíti. A spektrum adott frekvenciáihoz (alap- és felharmonikusokhoz) tartozó csúcsok helye és félértékszélessége görbeillesztéssel határozható meg. Utóbbi értéke arányos a rezgő szenzorlapka és a rá kitapadó rétegek disszipációs képességének mértékével. Ez érthető, mivel

nagy általánosságban is bármely rendszer rezonancia-csúcsának félértékszélessége a rendszer energiavesztésével van kapcsolatban.

A QCM technológia főbb alkalmazási területei

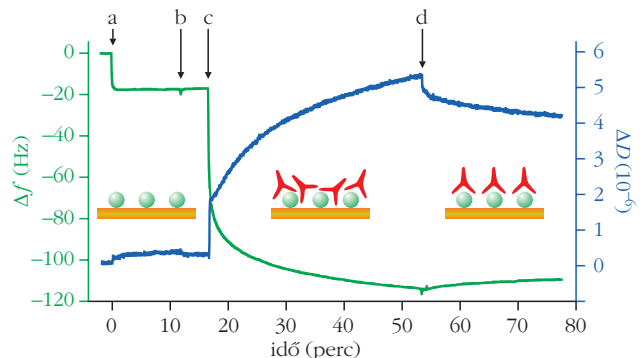
A QCM technológiának gazdag alkalmazási területei vannak mind az alap, mind az alkalmazott kutatásokban. A biológiai alkalmazások körében kiemelendők a fehérjerétegek mechanikai tulajdonságainak vizsgálatai, receptor-ligandum kölcsönhatások dinamikájának számszerűsítése, polielektrolit-rétegek önszerveződésének mérése, biológiai vékonyrétegek hidratáltságának meghatározása, valamint élő, legtöbbször daganatos sejtekkel végzett kitapadási és sejtjelzési mérések. Ezekon kívül még anyagtudományi és kémiai kísérletekben is felhasználják, például az autokatalizátor-rétegek bomlása hatékonyan mérhető [4]. A továbbiakban néhány konkrét alkalmazást mutatunk be.

Fehérjekitapadás kinetikájának és mechanikai jellemzőinek vizsgálata

A fehérjék kölcsönhatásainak, szerkezetének és egyéb fizikai tulajdonságainak pontos ismerete elengedhetetlen a sejtek alapvető működésének megértéséhez, és közvetlenül szükség van rá olyan alkalmazott kutatásokban, mint például az új gyógyszermolekulák kifejlesztésének területe.

A fehérjevizsgálatban használt QCM technológia egyik leggyakoribb módjában a QCM szenzor felületére történő fehérjekitapadást vizsgálják. Ekkor valós időben, közvetlenül mérhetővé válik a fehérjekitapadás kinetikája, a kitapadt réteg mechanikai sajátosságai, valamint megnyílik a lehetőség egyéb, a fehérjék köl-

3. ábra. Egy fehérjekitapadást vizsgáló kísérlet folyamata. A mérés célja az emberi szérumbalbumin és a specifikus antitest közötti kölcsönhatás dinamikájának számszerűsítése volt, aminek során egyidejűleg válnak megfigyelhetővé a kialakuló biológiai vékonyréteg mechanikai tulajdonságai. A mért frekvenciaváltozást Δf , a disszipációváltozást ΔD jelöli. a) A fehérjeoldat befecskendezése a szenzorlapot tartalmazó küvetta. b) A fehérjék kitapadnak a felületre, miközben dinamikus egyensúly alakul ki. c) Az antitesteket tartalmazó oldat befecskendezése után a specifikus antitestek fehérjékre kötődnek, a nem specifikusak pedig a réteg közelében maradnak. d) A küvetta pufferoldattal történő átmosásakor a gyengén kötődő, nem specifikus antitestek lemosódnak, míg az erősen kötődött antitestek a felületen maradnak.





4. ábra. A sejtkitapadás folyamatának vázlata. Első lépésben a vizes oldatban lévő sejt megközelíti a felületet, majd passzív módon hozzátapad. Ezután, ha azt a felület lehetővé teszi, aktív folyamatok indulnak meg a sejt belsejében, és különböző sejtkitapadási molekulák segítségével a sejt – úgynevezett fokális kitapadási korongok segítségével – rögzül a felülethez. Végül, a kitapadt sejten specifikus molekulákkal tetszőleges folyamatokat vizsgálhatunk, miközben a műszerrel regisztráljuk a sejtes választ. Felül az egyes fázisokhoz tartozó mért frekvenciaváltozások 0-hoz való viszonyait (előjeleit) tüntettük fel.

csönhatásait vizsgáló kísérletek elvégzésére is. Ez utóbbira példa a receptor-ligandum (fehérje kölcsönhatása specifikus kismolekulákkal), illetve fehérje-antitest kölcsönhatások számszerűsítése, amit a 3. ábra foglal össze.

A fehérjemolekulák kitapasztásával kialakuló réteg mechanikai tulajdonságai és a fehérjekitapadás dinamikája a szenzorlapka bevonatától függ, így a különböző abiotikus rétegek biológiai mintákkal való kölcsönhatásai vizsgálhatók. Erre példa a marha szérumbalbumin (BSA) fehérjék letapadásának vizsgálata TiO₂ bevonatú szenzorlapon [5].

A titán alapú egészségügyi implantátumok (az emberi testbe beültethető mesterséges, gyógyászati célú segédeszközök) felszínét – kevés kivételtől eltekintve – néhány nanométer vastagságú oxidréteg borítja, így az élő szervezetben belül a sejtekkel és különböző molekulákkal való kölcsönhatások dinamikáját e réteg fizikai-kémiai jellemzői fogják meghatározni. A példaként felhozott kísérletben a QCM műszerrel jelölésmentes módon és valós időben lehetett meghatározni a vizsgált fehérjék vastagságát, viszkozitását, képlékeny nyírási együtthatóját és a versengő kitapadás kinetikájának egyéb fontos jellemzőit.

Emlős daganatsejtek kitapadásának vizsgálata

A legtöbb sejttípus esetében a sejtkitapadás (4. ábra) a következő szükséges feltétele: a sejt funkcióinak normális ellátása, a sejten belüli és a sejt-sejt közötti jelátvitel (információcsere) folyamatának zavartalan megőrzése. Kitapadás hiányában a sejt rövid időn belül programozott sejthalálon megy keresztül. A sejt-kitapadás összetett folyamat, amelynek egyik legfontosabb szereplője a sejtmembránba ágyazódó speciális fehérjemolekulák (elsősorban az integrinek, szelektinek, kadherineek). Ezek egyszerre valósítják meg a mechanikai kapcsolatot a sejt környe-

zetében található felülettel (például a sejten kívüli mátrixszal), és meghatározott sejtválaszokat hozhatnak létre a belőlük kiinduló jelátviteli útvonalakon.

A bioszenzor által mért, a sejtkitapadás miatt bekövetkező jel összetett folyamatok eredménye, pontos leírása még várat magára, de széles körben elfogadottan a következő differenciálegyenlettel számszerűsíthető:

$$\frac{dA}{dt} = rA \left(1 - \frac{A}{A_{\max}} \right), \quad (2)$$

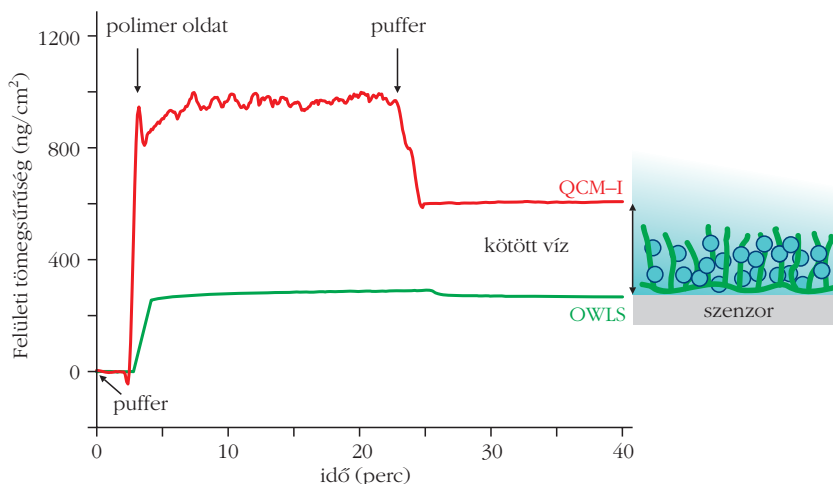
ahol A a sejt által elfoglalt felület, A_{\max} a maximális felületdarab, amit kitapadásakor a sejt el tud foglalni, és r a kitapadás gyorsaságát jellemző kinetikai mennyiség [6].

A sejtek mechanikai tulajdonságai és külső behatásokra (például gyógyszeres kezelésre) adott válaszaik erősen függenek a sejtkitapadás állapotától. A QCM műszerrel a kitapadt sejtek egy vékony, a szenzorlap fölötti, körülbelül 0,25 μm vastagságú rétegében – a sejtek külső megjelölése nélkül, roncsolásmentes módon – vizsgálhatók a mechanikai sajátágok.

Tymchenko és munkatársai [6] QCM műszerrel elsőként vizsgálták az előbb említett réteg viszkoelasztikus jellemzőit. Kísérletükben NIH/3T3 eger fibroblasztsejteket tapasztottak ki a QCM szenzor felületére, és a kitapadás végbemenetele után a nem mérgező, cytochalasin D nevű, a sejtvázas felépítését módosító kezelőszert alkalmazták rajtuk.

A kísérletben detektálták a sejtek kitapadása és a kezelőszert által okozott frekvencia- és disszipáció-

5. ábra. Az ábrán látható kísérletben két különböző elven működő bioszenzor kombinálásával meg lehet határozni a kitapadt réteg hidratáltságát. Mindkét műszerhez tartozó mikrofluidikai rendszerbe azonos koncentrációjú polimeroldatot fecskendezve, majd a pufferrel való atmoszféra követően a kitapadt réteg felületi tömegsűrűségét meghatározva, a két érték különbségéből számítható a kötött víz tömege és a réteg hidratáltsága. (A méréseket a MikroVákuum Kft. által forgalmazott OWLS 210 és QCM-I 3000 műszerrel végeztük.)



változást, valamint meghatározták a sejtek alsó, vékony rétegének mechanikai paramétereit. A mérés során optikai mikroszkóppal – amelynek felvételén látható sejtes morfológiai változások időben jól korreláltak a QCM műszerrel mért mennyiségek változásaival – folyamatosan nyomon követték a változásokat [7].

A QCM adatok kombinációja optikai bioszenzoros mérések eredményeivel

Számos alkalmazási területen (például a szövettérnökségben felhasznált hidrogélek fejlesztései) kiemelten fontos a biológiai vagy kémiai réteg hidratáltságának meghatározása. A kötött víz egyértelmű jelet ad a QCM műszerben, mivel a víztömeg együtt rezeg a biológiai réteggel. Ezzel szemben az optikai technikák érzéketlenek a kötött vízre, mert ezek az oldószerhez (vízhez) viszonyított törésmutató-eltérést detektálják. Így egy optikai technika és a QCM technika kombinálása lehetőséget nyújt a kötött víz mennyiségének pontos meghatározására (5. ábra). Ilyen mérési módszer például az optikai hullámvezető fénymódus-spektroszkópia (angolul: Optical Waveguide Lightmode Spectroscopy, OWLS), amely szintén széles körben elterjedt, jelölésmentes bioszenzor.

A QCM-I mérőműszer OWLS berendezéssel kombinált változata napjainkban már kereskedelmi forgalomban is elérhető [8] és felhasználásra került hidrogél alapú biomimetikus rétegek fejlesztéseiben [9].

Összefoglalás

A fenti eredmények jól mutatják a QCM technológia 30 évre visszatekintő történetének és felhasználásának sokszínűségét. Jelenleg több, különböző típusú, kereskedelmi forgalomban kapható QCM műszer létezik, a modernebb eszközök többcsatornás méréseket is lehetővé tesznek, illetve már integrált mikrofluidikai rendszerrel is rendelkeznek.

Irodalom

1. M. S. Thakur, K. V. Ragavan: Biosensors in food processing. *J. Food Sci. Technol.* 50 (2013) 625–641.
2. <https://www.biolinscientific.com/faq/interpreting-f-and-d>
3. N. E. Weckman, C. McRae, P. Ko Ferrigno, A. A. Seshia: Comparison of the specificity and affinity of surface immobilised Affimer binders using the quartz crystal microbalance. *Analyst* 141 (2016) 6278–6286.
4. A. Monkawa et al.: Fabrication of hydroxyapatite ultra-thin layer on gold surface and its application for quartz crystal microbalance technique. *Biomaterials* 27 (2006) 5748–5754.
5. M. P. Neyra: *Interactions between titanium surfaces and biological components*. PhD thesis Dissertation 3. *Kinetics and two-step competitive protein adsorption characterization on TiO₂ crystals using QCM-D*. Diss. Univ. Politècnica Catalunya, Barcelona, July, 2009.
6. N. Orgován, B. Péter, S. Bősze, J. J. Ramsden, B. Szabó, R. Horváth: Dependence of cancer cell adhesion kinetics on integrin ligand surface density measured by a high-throughput label-free resonant waveguide grating biosensor. *Sci. Rep.* (2014) 4034, doi: 10.1038/srep04034.
7. N. Tymchenko, E. Nileba, M. V. Voinova, J. Gold, B. Kasemo, S. Svedhem: Reversible changes in cell morphology due to cytoskeletal rearrangements measured in real-time by QCM-D. *Bio-interphases* 7 (2012) 1–9.
8. <http://www.owls-sensors.com>
9. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-30201-6>

ATOMREAKTOROKBAN HASZNÁLHATÓ CIRKÓNÍUMÖTVÖZETEK MIKROSZERKEZETÉNEK MEGHATÁROZÁSA RÖNTGENVONALPROFIL-ANALÍZISSSEL

Groma István,¹ Szenthe Ildikó,² Ribárik Gábor,¹ Ódor Éva,¹
Jóni Bertalan,¹ Zilahi Gyula,¹ Dankházi Zoltán¹

¹ELTE TTK Anyagfizikai Tanszék

²MTA Energiatudományi Kutatóközpont

Az anyagok mechanikai és termikus tulajdonságait alapvetően a különböző típusú kristályhibák határozzák meg. A vonal- és térfogati hibákhoz rendelhető karakterisztikus hosszúságskála a néhány nm-től a μm nagyságig változik. Ezért a kristályhibák által kialakított komplex struktúrát mikroszerkezetnek nevezzük.

A szerzők megköszönik a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott NVKP-16-1-2016-0014 számú CAK-projekt keretében kapott anyagi támogatást, valamint a Budapesti Kutatóreaktor munkatársainak segítségét a mérések kivitelezésében.

A felhasznált szerkezeti anyagok tulajdonságai legtöbbször azért változnak, mert a benne levő mikroszerkezet átalakul. Ezért a mikroszerkezet feltárása alapvető fontosságú. Erre számos kísérleti technika áll rendelkezésre, csak néhány fontosat említve: transzmissziós elektronmikroszkópia, pásztázó elektronmikroszkópia, atomierő-mikroszkópia, valamint a különböző diffrakciós módszerek.

Ebben a cikkben a röntgendiffrakció egy speciális változatát a röntgenvonalprofil-analízist ismertetjük részletesen. Röviden összefoglalva ez azt jelenti, hogy

a mintában a szabályos periodikus rendet megbontó hibák hatására a teljesen szabályos szerkezetnek megfelelő éles diffrakciós Bragg-csúcsok kiszélesednek. A vonalprofilmérés során nagy pontossággal megmérjük az egyes Bragg-csúcsok alakját. A profil alakjából következtetni tudunk a mintában jelenlevő hibák jellegére és mennyiségére. A következőkben először a mérési metodikát és a kiértékelés módját ismertetjük. Ezután megmutatjuk, hogy a vonalprofil-analízis hatékony módszer a neutronokkal besugárzott cirkónium-ötvözetekben lejátszódó sugárkárosodási folyamatok feltárására.

A közelmúltban a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által támogatott NVKP-16-1-2016-0014 számú CAK projekt keretében az MTA EK Budapesti Kutatóreaktorában neutronokkal besugárzott Zr-mintákon végeztünk röntgenvonalprofil-méréseket. A cikk második felében a kapott eredményeket ismertetjük.



Groma István fizikus, egyetemi tanár, az ELTE Anyagfizikai Tanszékének vezetője. Kutatási területe a diszlokációs szerkezet változásainak kísérleti vizsgálata és elméleti értelmezése. Az ELFT főtitkára.



Szenthe Ildikó okleveles gépészmérnök az MTA Energiatudományi Kutatóintézet Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratóriumának mérnöke. Kutatási területe a nukleáris és fúziós reaktorok anyagtulajdonságai neutron-sugárzás által okozott változásainak kutatása.



Ribárik Gábor az ELTE TTK Anyagfizikai Tanszékén adjunktusként röntgenvonalprofil-analízissel foglalkozik, azaz olyan kísérleti módszerek kidolgozásával, mely röntgendiffrakciós mérések során felvett vonalprofilok, illetve diffrakciós spektrumok kiértékelésével az anyag mikroszerkezeti tulajdonságait adja meg, illetve háromdimenziós mikroszerkezetek számítógépes modellezésével kapott vonalprofilokat szinkrotronos mérések eredményével hasonlítja össze.



Ódor Éva anyagtudomány mesterszakon végzett az Eötvös Loránd Tudományegyetemen 2017-ben. Jelenleg PhD-hallgató az ELTE fizika doktori iskolájában. Az ELTE Anyagfizikai Tanszékén Ungár Tamás témavezetése alatt 2014-ben kezdett a röntgendiffrakciós vonalprofil-analízis területén dolgozni. Kutatási tevékenységét jelenleg is e területen végzi, valamint a mikroszerkezet és vonalprofilok gyors Fourier-transzformáció alapú modellezésével foglalkozik Ribárik Gábor témavezetésével.

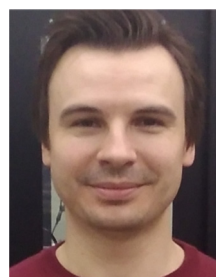
Arról, hogy miért a Zr-ötvözeteket használják kiterjedten a reaktorokban a *Fizikai Szemle* előző számában *Griger Ágnes* részletes ismertetést adott [1].

Röntgenvonalprofil-analízis

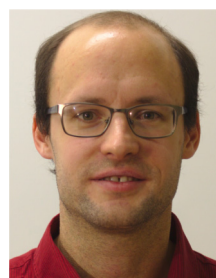
Mérési metodika

A vonalprofil mérésére szolgáló berendezés egy nagyobb teljesítményű (minimum 2 kW) röntgenforrásból áll, amelynek egyik erős karakterisztikus vonalát használjuk. Mivel a karakterisztikus vonal viszonylag széles, gyakran több csúcsból áll, az ebből adódó, úgynevezett instrumentális vonalszélesedést egy megfelelő monokromátorral csökkenteni kell. Monokromatorként leggyakrabban egy Ge egykristályt használunk, amelynek egyik Bragg-reflexiójában szóródó sugárzást megfelelő résekkel ellátva már kellően monokromatikus röntgensugárzást kapunk. Megjegyezzük, hogy az intenzitás növelése érdekében az utóbbi időben számos új megoldás született, de ezekkel itt nem foglalkozunk. Fontos megemlíteni, hogy napjainkban röntgenforrásként mind több szinkrotron is rendelkezésre áll, amelyek új lehetőségeket nyitottak a vonalprofil-analízis területén.

A mintát a monokromatikus nyalábbal megvilágítva egy helyzetérzékeny röntgendetektorral felvesszük a kiválasztott Bragg-csúcs alakját. A szórt intenzitás a



Jóni Bertalan 2012-ben szerezte diplomáját az Eötvös Loránd Tudományegyetemen szilárdtestfizika szakirányon. Jelenleg doktorjelölt az ELTE fizika doktori iskola anyagtudomány és szilárdtestfizika programjában Ungár Tamás témavezetésével. Kutatási területe a texturált anyagok röntgen- és neutronvonalprofil-analízise. 2017 óta tudományos segédmunkatárs az ELTE-n.



Zilahi Gyula 2018-ban az Eötvös Loránd Tudományegyetemen szerezte doktori fokozatát háromdimenziós röntgendiffrakció témakörében, amely a röntgendiffrakciós anyagszerkezet-vizsgálati módszerek egy a 2000-es években kialakult, ma is fejlődő, új területe. Doktori tanulmányai során vendégkutatóként dolgozott a City University of Hong Kong és a franciaországi Université de Lille egyetemeken is. 2017 óta az ELTE Anyagfizikai Tanszékének tudományos segédmunkatársa.



Dankházi Zoltán matematika-fizika szakos tanár, a fizikai tudományok kandidátusa, az ELTE Anyagfizikai Tanszék docense, a TTK Központi Kutató és Műszer Centrum SEM/FIB laboratóriumának vezetője. Sok éves röntgenspektroszkópiai kutatás után 2010-től a centrum Quanta3D elektronmikroszkópjával dolgozik. Számos anyagtudományi és geológia projekt résztvevője. Fő kutatási területe a visszaszórtelektron-diffrakció és annak alkalmazása a fémek deformációs tulajdonságainak vizsgálatában.

beeső és kimenő hullámszámvektorok különbségének háromváltozós függvénye. A hagyományos mérési elrendezésben ezt a háromváltozós intenzitáseloszlást a minta lengetésével és a megfelelő detektor alkalmazásával a csúcshoz megfelelő \mathbf{g} diffrakciós vektorra merőleges síkban kiintegráljuk (strain broadening). Így egy egyváltozós $I(q)$ intenzitáseloszlást mérünk, ahol

$$q = \frac{2}{\lambda} (\sin \Theta - \sin \Theta_0), \quad (1)$$

amelyben λ a röntgensugárzás hullámhossza, Θ a szórási szög és Θ_0 a Bragg-csúshoz megfelelő szórási szög. A vonalak félértékessége tipikusan a $0,1^\circ$ nagyságrendjébe esik. A napjainkban elérhető 1D félvezető röntgendetektorok néhány ezer csatornát tartalmaznak, amelyek $10\text{--}50 \mu\text{m}$ távolságra helyezkednek el egymástól. Ezért a detektort a megfelelő profil felbontáshoz a mintától 1 m nagyságrendű távolságra kell elhelyezni. Egy deformált Cu egykristályon mért vonalprofil látható az 1. ábrán [2].

Vonalszélesedés okai

A vonalszélesedés egyik meghatározó oka a véges kristallit (koherensen szóró domén) méret. Az ennek következtében létrejövő vonalprofil egy Lorentz-görbével – amelynek félértékessége fordítottan arányos a kristallit méretével – általában jól leírható [3]. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a profil aszimptotikus lecsengése a vonalprofil kiértékelése szempontjából alapvető szerepet játszik. Azt mondhatjuk, hogy a profil – a véges szemcseméret következtében – az aszimptotikus tartományban a Lorentz-görbének megfelelően az

$$I(q) = \frac{1}{\pi^2 d} \frac{1}{q^2} \quad (2)$$

négyzetes lecsengést mutatja, ahol d a szemcseméret. Megjegyezzük, hogy a fenti kifejezés akkor érvényes ha $I(q)$ 1-re normált, azaz

$$\int_{-\infty}^{\infty} I(q) dq = 1, \quad (3)$$

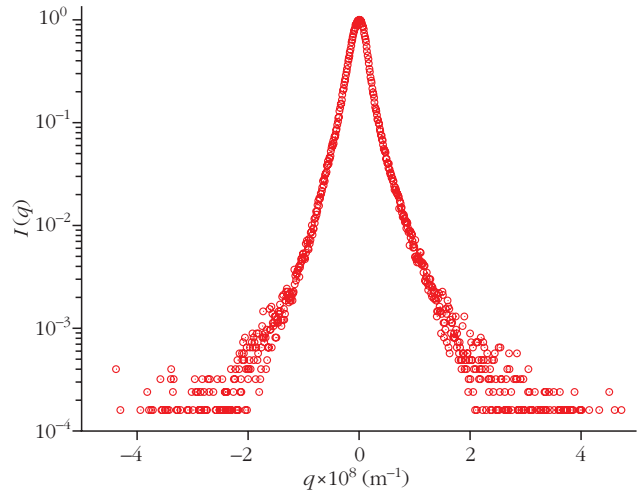
továbbá, az (1) egyenlet szerint a profil súlypontja

$$\int_{-\infty}^{\infty} q I(q) dq = 0 \quad (4)$$

az origóban van. Ezt a továbbiakban is feltesszük.

A vonalszélesedés szempontjából a vonaltípusú kristályhibák, a diszlokációk alapvető fontosságúak. A diszlokáció úgy keletkezik, hogy a 2. ábrán látható módon egy extra atomi félsíkot adunk a szabályos kristályhoz.

Az így keltett hiba mozgóképes, elmozdulása marandó alakváltozást okoz. A diszlokáció több mint 80 évvel ezelőtti bevezetésével [4] megoldódott az a probléma, hogy a kristályos anyagok miért olyan „pu-

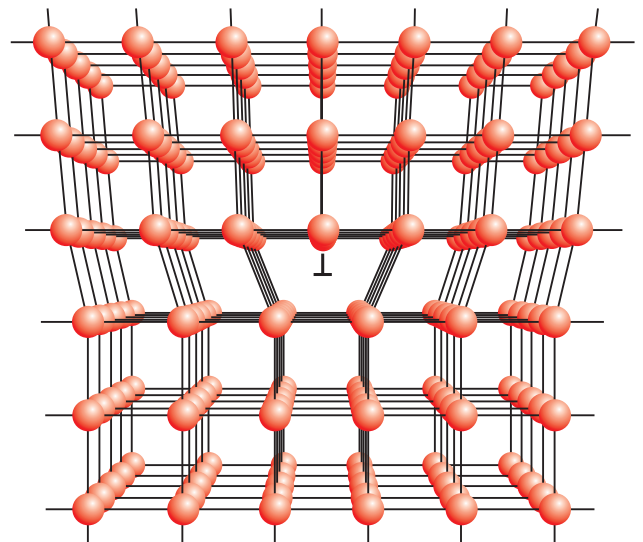


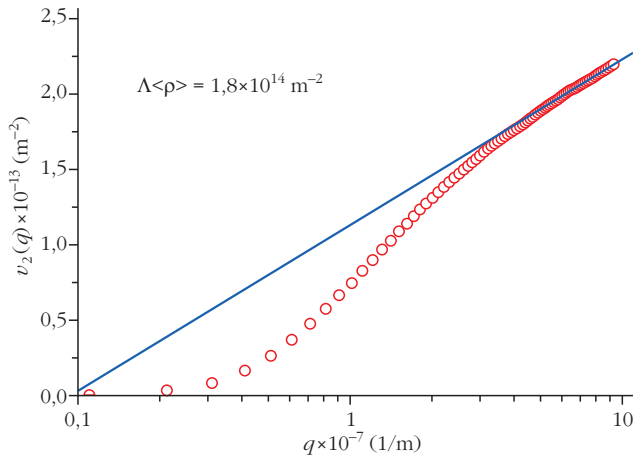
1. ábra. Húzással deformált Cu egykristályon mért (200) vonalprofil [2].

hák”. Ahhoz ugyanis, hogy egy diszlokációt nem tartalmazó egykristályban, annak felső felének egy rácsállandónyi elmozdításával plasztikus deformációt hozunk létre, elméleti számítások szerint 2 nagyságrenddel nagyobb feszültség kellene, mint amit kísérletileg tapasztalunk. A diszlokáció már kis feszültség hatására is el tud mozdulni.

A diszlokáció sok szempontból hasonlít a folyadékokban levő örvényekhez, azonban egy deformált kristályban nagyon „sűrűn” fordul elő. A diszlokációk tipikus távolsága 100 nm nagyságrendjébe esik. Fontos tulajdonsága, hogy egy egyenes diszlokáció körül a diszlokáció vonalától (a betoldott félsík vége) mért távolsággal fordítottan arányos feszültség jön létre [4]. Ennek következtében az áram által átjárt egyenes vezetékhez hasonlóan két diszlokáció kölcsönhatása is fordítottan arányos távolságukkal. Ezért a diszlokációk kölcsönhatása hosszú hatótávolságú, amely alapvetően határozza meg kollektív mozgásukat [5].

2. ábra. Kristályban létrehozott diszlokáció (Polányi, Orován, Taylor 1934).





3. ábra. Húzással deformált Cu egykristályon mért $v_2(q)$ görbe.

A diszlokációk következtében létrejövő vonalszéledés első elméletét *Wilkins* [6] dolgozta ki egy speciális diszlokációelrendezésre. Ezután az 1980-as években *Groma* és munkatársai kidolgozták a diszlokációk vonalszéledésének egy általános aszimptotikus elméletét, amely a ma is használt egyik kiértékelési módszer alapját jelenti [2]. A kapott eredmény egyik legfontosabb következménye, hogy diszlokációk okozta deformáció következtében az $I(q)$ intenzitáseloszlás köbös lecsengést mutat:

$$I(q) = \frac{\Lambda}{4\pi^2} \langle \rho \rangle \frac{1}{q^3}, \quad (5)$$

ahol $\langle \rho \rangle$ a diszlokációsűrűség (diszlokációvonalhossz per térfogat), Λ pedig egy a diffrakciós vektortól és a diszlokáció típusától, illetve irányától függő állandó. A köbös lecsengés a diszlokáció $1/r$ -es feszültségterének következménye. Fontos megemlíteni azt az érdekes tulajdonságot, hogy az aszimptotikus lecsengés nem függ attól, hogy a diszlokációk miként helyezkednek el, csak a diszlokációvonal-hossz számát. Tehát, ha úgy rendezzük át a diszlokációkat, hogy a vonalhossz nem változik, a vonalprofil aszimptotája változatlan marad [2], miközben a központi rész természetesen módosul. Ez a tulajdonság teszi lehetővé a diszlokációsűrűség meghatározását.

Megjegyezzük, hogy a pontszerű hibák, illetve kis kiválások szintén okoznak vonalszéledést, de ez csak igen nehezen kimérhető mértékű, külön erre a célra kifejlesztett berendezést igényel. A hagyományos elrendezésben nem okoznak mérhető effektust.

A korlátozott momentumok módszere

Amint az 1. ábrán látható, a mért profilok zaja az aszimptotikus tartományban általában elég nagy, így közvetlenül függvényt illeszteni e tartományra nagyon nehéz, főleg ha nem tudjuk, hogy az előzőekben ismertetett elméleti aszimptotikus kifejezések mennyire érvényesek. A probléma kezelésére a „korlátozott momentumok” módszere ad megoldást (lásd *Groma* [2]).

Tekintsük a

$$v_k(q) = \int_{-q}^q q'^k I(q') dq' \quad (6)$$

mennyiséget, amelyet k -ad rendű korlátozott momentumnak hívunk. Ha az integrálást a végtelenig végezzük el, a mennyiség a k -ad rendű momentumot adná. Azonban diszlokációk esetén, $I(q)$ köbös lecsengése következtében már a másodrendű momentum is végtelent ad. Ugyanez adódik a véges szemcseméret okozta esetben is. A korlátozott momentum nem más, mint a súlypontra szimmetrikus határokig kiintegrált momentum integrálási határtól való függése.

A (2, 5) egyenletek alapján könnyen látható, hogy elegendően nagy q esetén

$$v_2(q) = \frac{\Lambda}{2\pi^2} \langle \rho \rangle \ln\left(\frac{q}{q_0}\right) + \frac{2}{\pi^2 d} q, \quad (7)$$

ahol q_0 egy a diszlokáció-diszlokáció korreláció által meghatározott állandó. A módszer „hasznát” az 1. ábrán látható $I(q)$ -hoz tartozó $v_2(q)$ jól szemlélteti (3. ábra). Itt, mivel a mérés egykristályon készült, a végesméréthatás nem jelenik meg. Ezért a nagy q tartományban a görbe az $\ln(q)$ függvényében egyenes kell legyen [2, 3]. Látható, hogy az aszimptotikus tartományban is kicsi a görbe szórása. Az egyenes illesztése erre a tartományra igen jól elvégezhető. Az illesztett egyenes meredekségéből a diszlokációsűrűség általában néhány százalék pontossággal meghatározható.

Gyakran a 4-ed rendű korlátozott momentumot is érdemes kiértékelni. Azonban célszerűbb az

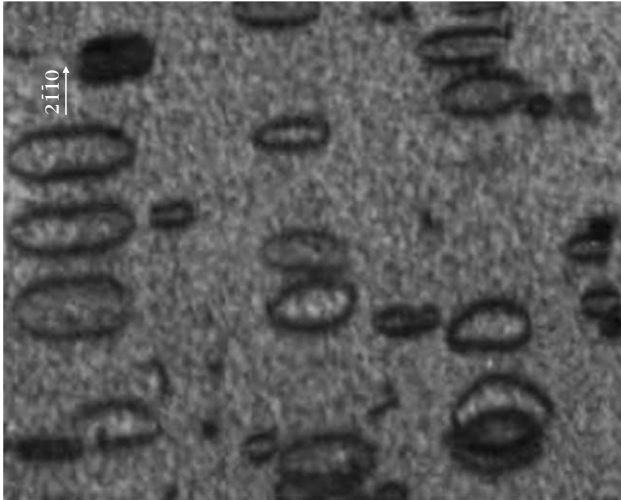
$$f(q) = \frac{1}{q^2} \int_{-q}^q q'^4 I(q') dq' \quad (8)$$

mennyiséget tekinteni. Ez elegendően nagy q esetén

$$f(q) = \frac{\Lambda}{4\pi^2} \langle \rho \rangle + \frac{2}{3\pi^2 d} q. \quad (9)$$

Látható, hogy a görbe q -ban lineáris. Az aszimptotikus részre egyenest illesztve mind a szemcseméret, mind a diszlokációsűrűség jól meghatározható [3]. Egykristályon végzett mérésnél a görbe egy $-\rho$ -val arányos $-\ln(q)$ -hoz tart. Tapasztalat szerint a szokásos mérés elérése érdekében a mérettől függő széledés alig észlelhető, az $f(q)$ görbe egy $-\ln(q)$ -val arányos $-\ln(q)$ -hoz tart.

Megjegyezzük, hogy a vonalprofilok kiértékelésére egy másik lehetőség az úgynevezett teljesvonalprofil-illesztés [7]. Ez azt jelenti, hogy a mért csúcsra vagy csúcsokra egy mikroszerkezeti modell alapján felállított elméleti profilt illesztünk, amelyben szabad mikroszerkezeti paraméterek annak. A korlátozottmomentum-módszer és a teljesvonalprofil-illesztés között az a lényeges különbség, hogy előbbinél a kiértékeléshez nincs szükség előzetes mikroszerkezeti mo-



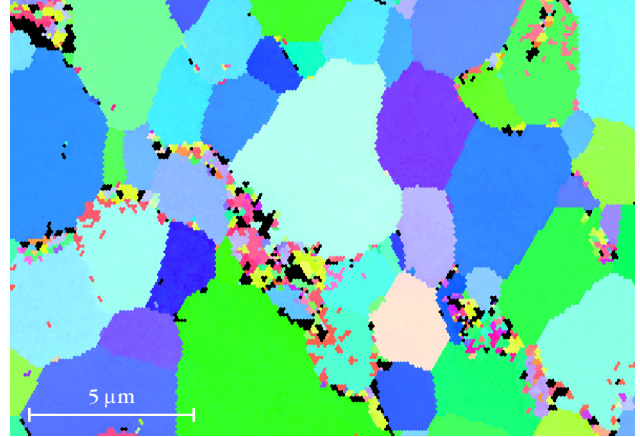
4. ábra. Besugárzás hatására keletkező $\langle c \rangle$ típusú diszlokáció-hurkok [8].

dellre. Már a különböző rendű korlátozottmomentum-görbék alakjából következtetni tudunk számos mikroszerkezeti tulajdonságra [2]. A kapott paraméterekből azután egy mikroszerkezeti modellt tudunk felállítani. Ugyanakkor előfordul, hogy az egyes Bragg-reflexiókhoz tartozó csúcsok összeérnek. Ekkor a korlátozottmomentum-módszer nem használható.

Besugárzott Zr-mintákon mért vonalprofilok

A CAK projekt keretében cirkónium-ötvözésű mintákat vizsgáltunk. A röntgenvonallprofil-mérések a Paksi Atomerőműben fűtőelem-burkolatnak használt E110 és E110G kódjelű Zr-ötvözetű csövekből vett mintákon készültek. A mérések egy részét az MTA EK Budapesti Kutatóreaktorában neutronokkal besugárzott mintákon végeztük. Ezeket a reaktorban 1675,5 órán át, két különböző neutronfluxusú helyen gyors neutronokkal besugárzták. A teljes besugárzási idő alatt az egyik mintasorozat $1,99 \cdot 10^{20}$ n/cm², a másik $3,2 \cdot 10^{20}$ n/cm² ($E > 1,5$ MeV) gyorsneutron-fluenciát kapott. Tekintettel arra, hogy a minták aktivitásuk következtében nem hozhatók ki a reaktor épületéből, egy speciálisan erre a célra felépített diffraktométert telepítettünk a Kutatóreaktor radioaktív anyagokkal végzendő tevékenységekre engedéllyel rendelkező területére.

Ebben a cikkben azzal, hogy a reaktorokban miért Zr-ötvözeteket használnak kiterjedten nem foglalkozunk, csak utalunk arra, hogy a *Fizikai Szemle* előző számában Griger Ágnes részletesen [1] ismertette a Zr használatának előnyeit. Itt csak arra térünk ki röviden, hogy neutronokkal történő besugárzás hatására mi történik a Zr-ötvözetben. Korábbi transzmissziós elektronmikroszkópos (TEM) vizsgálatok tanúsága szerint a neutronok hatására kilökött atomok és a visszamaradó vakanciák a kristálytani síkokban klaszterekbe rendeződnek és úgynevezett prizmatikus diszlokációhurkokat hoznak létre. Ilyen hurkok láthatók a 4. ábrán. Két típusú hurkot lehet megkülönböztetni. Az egyik, amit $\langle a \rangle$ típusúnak neveznek intersticiális atomokból épül

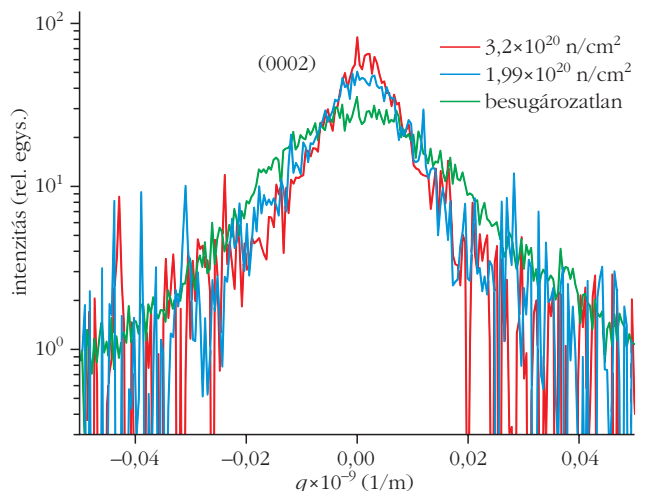
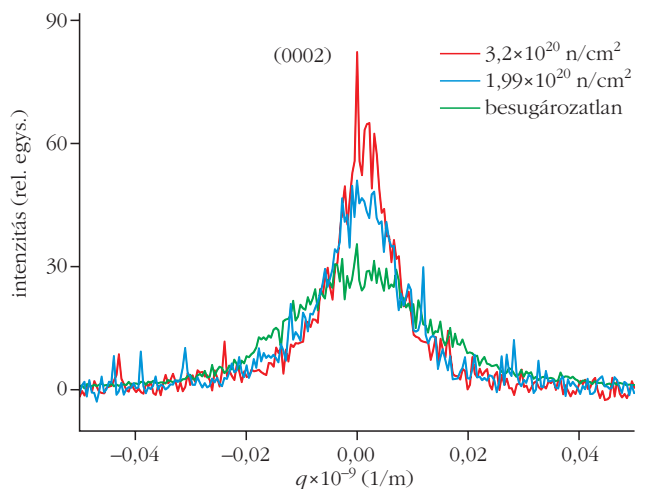


5. ábra. A besugárzás nélküli E110 kódjelű mintáról készült EBSD kép.

fel és a hurok síkja merőleges egy, a hexagonális Zr bazális síkban fekvő vektorra. A másik a $\langle c \rangle$ típusú, vakanciákból álló hurok, amelynek normálisa a rács $\langle c \rangle$ irányába mutat, tehát síkja a bazális síkban van.

A hurkok tipikus mérete az 5 nm nagyságrendjébe esik, ami eléggé nehézé teszi a hurkok TEM vizsgálá-

6. ábra. A besugárzatlan és két különböző mértékig besugárzott E110 jelű mintán mért (0002) reflexióhoz tartozó röntgenvonallprofilok lineáris és logaritmikus skálán.



1. táblázat		
A v_2 és v_4 korlátozott momentumokból számolt ρ diszlokációsűrűségek – (10^{14} m^{-2}) egységben – az E110 jelű Zr-ötvözet esetén		
neutronfluens ($E > 1,5 \text{ MeV}$)	v_2	v_4
besugározatlan	23,0	23,1
$1,99 \cdot 10^{20} \text{ n/cm}^2$	8,5	8,1
$3,2 \cdot 10^{20} \text{ n/cm}^2$	6,7	6,5

tát. A röntgenprofil-analízis egy viszonylag könnyen kivitelezhető eljárás a hurkok mennyiségének meghatározására.

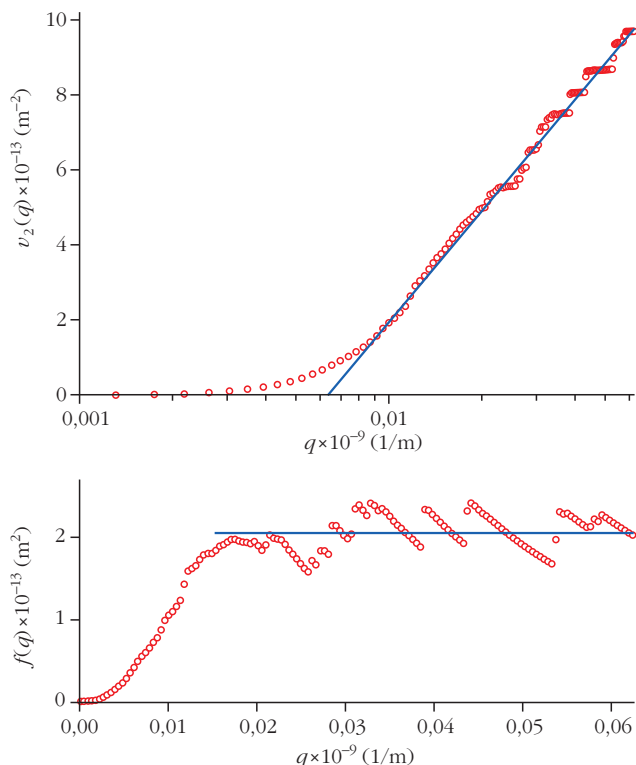
Amint az a vizsgált kiindulási mintáról készült visszaszórtelektron-diffrakciós (EBSD) képen (5. ábra) – valamint a 14 000-szeres nagyítású címlapképen – látható a minta szemcsemérete $5 \mu\text{m}$ (a címlapon ennek 7 cm felel meg) körüli. Ezért, ahogy azt az előbbiekben megmutattuk, ennél a mintasorozatnál a véges méretből adódó vonalszélesedés nem jelenik meg. A kiindulási és a két különböző fluenssel besugárzott E110 mintán mért (0002) reflexióhoz tartozó vonalprofilok a 6. ábrán láthatók.

Megállapítható, hogy a mért profilokból mind a $v_2(q)$, mind az $f(q)$ görbék analízisével a diszlokációsűrűség nagy pontossággal meghatározható. A két korlátozott momentum 5%-on belül azonos diszlokációsűrűséget ad. Így tehát a módszer alkalmas a besugárzott Zr-mintákban keletkező diszlokációsűrűség meghatározására.

A három E110-es mintában mért diszlokációsűrűségeket az 1. táblázat foglalja össze.

A kapott diszlokációsűrűség-adatakból arra következtethetünk, hogy a cső gyártásakor keletkező nagy diszlokációsűrűség a besugárzás hatására jelentősen lecsökken. Fontos kiemelni, hogy a besugározatlan mintában nem mozgásképtelen prizmatikus diszlokáció-hurkok vannak, hanem a gyártás közben alkalmazott deformáció során keletkező mozgóképes diszlokációk. Ezek a besugárzás hatására keletkező, még nem klaszterekbe rendeződő vakanciák és intersticiális atomok jelenléte következtében képesek a betoldott sík irányában (diszlokációmászás) is – a normál esetenél sokkal gyorsabban – elmozdulni. Tehát a ponthibák felgyorsítják a kezdeti diszlokációk annihilációját. Ezt segíti még az a körülbelül $250 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőmérséklet is, amiben a minta a besugárzás közben van.

Elsőre talán meglepő jelenség, hogy a nagyobb fluxussal besugárzott mintában kisebb diszlokációsűrűséget kaptunk, mint a másokban. Ez a tendencia minden vizsgált esetben megfigyelhető és korábbi irodalmi eredmények is hasonlóra utalnak [9]. Egy lehetséges magyarázatot a kialakuló hurkok összeolvadása adja. Ez egy, az ötvözetekben közismert Ostwald-éréshez hasonló folyamat, amikor a kisebb kiválások eltűnnek, növelve a nagyobbak méretét. A folyamat hajtóereje a felületi energia csökkenése. A prizmatikus hurkok összeolvadása szintén csökkenti a rendszer energiáját.



7. ábra. Az $1,99 \cdot 10^{20} \text{ n/cm}^2$ fluenssel besugárzott E110 mintán mért $\ln(q) - v_2(q)$ és $q - f(q)$ görbék.

Azonban e magyarázat alátámasztása további vizsgálatokat igényel.



Összefoglalva, megállapíthatjuk, hogy a röntgenprofil-analízis igen hatékony módszer a besugárzás hatásainak vizsgálatára. Az ismertett korlátozott momentumokon alapuló kiértékelési módszer a neutronokkal besugárzott mintákon mért vonalprofilokra is jól használható.

Irodalom

- Griger Ágnes: Cirkónium mint az atomerőművek szerkezeti anyaga. *Fizikai Szemle* 58/11 (2018) 371–375.
- I. Groma: X-ray line broadening due to an inhomogeneous dislocation distribution. *Physical Review B* 57(1998) 7535.
- A. Borbély, I. Groma: Variance method for the evaluation of particle size and dislocation density from X-ray Bragg peaks. *Applied Physics Letters* 79(2001) 1772–1774.
- Kovács I. Zsoldos L.: *Diszlokációk és képlékeny alakváltozás*. Műszaki Kiadó, Budapest (1965)
- I. Groma, F. F. Csikor, M. Zaiser: Spatial correlations and higher-order gradient terms in a continuum description of dislocation dynamics. *Acta Mater.* 51 (2003) 1271–1281.
- M. Wilkens: The determination of density and distribution of dislocations in deformed single crystals from broadened X-ray diffraction profiles. *Phys Status Solidi A* 2 (1970) 359–370.
- T. Ungár, L. Balogh, G. Ribárik: Defect-Related Physical-Profile-Based X-Ray and Neutron Line Profile Analysis. *Metal. Mater. Trans.* 41A (2010) 1202–1209.
- A. Jostsons, P. M. Kelly, R. G. Blake: The nature of dislocation loops in neutron irradiated zirconium. *J. Nuclear Mater.* 66 (1977) 236–250.
- T. Seymour, P. Frankel, L. Balogh, T. Ungár, S. P. Thompson, D. Jädernäs, J. Romero, L. Hallstadius, M. R. Daymond, G. Ribárik, M. Preuss: Evolution of dislocation structure in neutron irradiated Zircaloy-2 studied by synchrotron X-ray diffraction peak profile analysis. *Acta Mat.* 126 (2017) 102–113.

A BRACHISTOCHRON-PROBLÉMA, AVAGY A HOSSZABB ÚT A »RÖVIDEBB«

Stonawski Tamás
Nyíregyházi Egyetem

Fizikatörténeti áttekintés

Galilei lejtővel végzett kutatásai során több lejtőből álló, úgynevezett poligonlejtőkkel is foglalkozott. Következtetései alapján megállapította (helyesen), hogy a nehézségi erőter egy függőleges síkjának két különböző magasságú pontja között fektetett egyenes lejtőn mozgó test hosszabb idő alatt jut el az egyik pontból (a magasabbikból) a másikba, mint a két pont által meghatározott körívre rajzolt poligonlejtőkön. A töröttvonalszakaszok száma tetszőlegesen nagy lehet, így végtelen sok töröttvonal alkalmazásával magát a körívet kapjuk. Állítását viszont tévesen általánosította, miszerint: „ha egy függőleges síkban két pont között egy tetszés szerinti alakú lejtőt fektetünk, akkor a körív alakú lejtő az, amelyen a test az egyik pontból a másikba a legrövidebb idő alatt jut el” [2]. Galilei ezzel a hamis állításával felhívta a figyelmét a következő generáció gondolkodóinak, akik egzakt bizonyítással keresték, hogy milyen alakú görbén ér le a legrövidebb idő alatt a test a fent leírt kezdőfeltételek esetén. A brachistochron néven elhíresült probléma hibátlan megoldását 1697-ben *Jakob Bernoulli* közli először [3], ebben eredményül a cikloist adja meg, amely a *Huygens* által bizonyított tautochron tulajdonságú is (bármilyen pontjából induljon a görbe mentén eső test, mindig ugyanakkora idő alatt jut el a görbe legmélyebb pontjába).

Tapasztalatom szerint a brachistochron-probléma felvetése olyan körben, ahol még nem találkoztak vele, igen érdekesnek tűnik. A probléma egzakt megoldása magas szintű matematikai eljárást – mint például variációszámítást – igényel, így a megoldásra fejben rájönni nem kis nehézséget okoz. Elsőként általában – reflexből – az egyenes lejtőre voksolnak, hiszen azonos sebesség mellett a legrövidebb idő alatt

a legrövidebb utat teszi meg a test, de esetünkben (ha különböző ívek mentén mozognak a testek) a sebességek nem azonosak, így e következtetés helytelen. E probléma megoldása – azaz hosszabb úton rövidebb idő alatt ér le a test – szokatlan, így kvázi paradoxonként hat tudatunkra. A paradoxonok pedig – feloldásukig – erős motivációs hatással bírnak.

Középiskolásokkal végzett lejtős kísérleteim során e jelenség mindig felkeltette a diákok érdeklődését, ami arra ösztönzött, hogy pusztán ott tanult matematikával és kísérletezéssel közelítem meg és értessem meg a brachistochron-problémát. Az alábbiakban szakköri tapasztalataimat szeretném megosztani a kollégákkal.

Köríven leguruló golyó esete

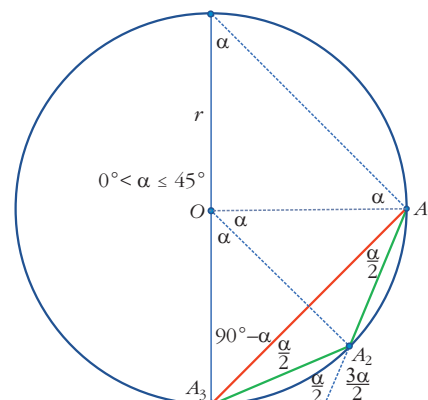
Első közelítésben egy egyenes és egy töröttvonalakból álló lejtőn mozgó test mozgásidejét hasonlítsuk össze! Két, egyenlő hosszúságú töröttvonalból álló lejtőt válasszunk úgy, hogy töréspontjai egy köríven nyugalodjanak (1. ábra), így számításunkhoz a középiskolában tanult geometriai összefüggések is elegendők lesznek.

Az 1. ábra alapján határozzuk meg az $A_1A_2A_3$ törött vonalon haladó test mozgásidejét az α szög függvényében ($0^\circ < \alpha \leq 45^\circ$)! Először számítsuk ki az egyes lejtők hosszait:

$$\overline{A_1A_3} = 2r \sin \alpha,$$

$$\overline{A_1A_2} = \overline{A_2A_3} = 2r \sin \frac{\alpha}{2},$$

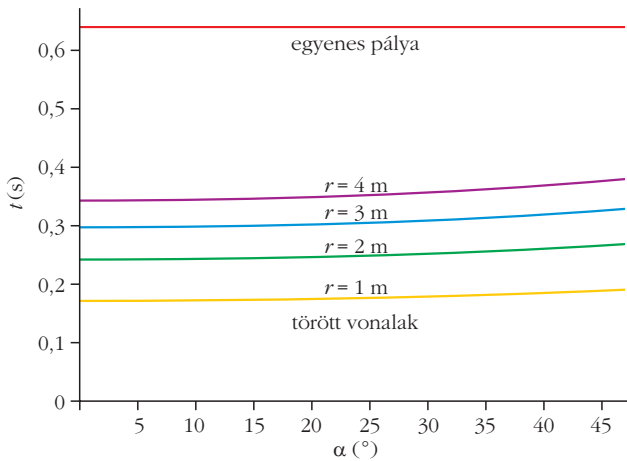
1. ábra. A_1A_3 egyenes lejtő és az $A_1A_2A_3$ poligonlejtő geometriai vázlat. Az ábrán feltüntetett szögek és oldalak közötti kapcsolatok a középiskolában tanult geometriai összefüggések alapján számolhatók.



Köszönettel tartozom az Ecsedi Báthori István Gimnázium tanulóinak (kiemelten *Czérna Lászlónak* és *Pátzay Richárdnak*) és a Nyíregyházi Egyetem fizikatanár szakos hallgatóinak.



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



2. ábra. A lejtőkön haladó testek mozgásidőjét ábrázoló grafikon. Jól látható a poligonlejtő gyenge szögfüggése. A grafikonról a nagyobb sugarú körre illeszkedő töröttvonal-lejtők növekvő mozgás-ideje is leolvasható.

majd írjuk be a megfelelő kinematikai képletbe:

$$t_{A_1 A_3} = \sqrt{\frac{2 A_1 A_3}{a}} = \sqrt{\frac{2(2r \sin \alpha)}{g \sin \alpha}} = \sqrt{\frac{4r}{g}} = 2 \sqrt{\frac{r}{g}},$$

azaz az r sugarú körpálya bármelyik húrján ennyi idő alatt ér le a test.

A törött vonalon haladó test először az $A_1 A_2$ utat

$$t_{A_1 A_2} = \sqrt{\frac{2 A_1 A_2}{a}} = \sqrt{\frac{4r \sin \frac{\alpha}{2}}{g \sin \frac{3\alpha}{2}}} = t_{A_1 A_3} \sqrt{\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\sin \frac{3\alpha}{2}}}$$

idő alatt teszi meg. A_2 -ben a végsebesség, ami a következő szakasz kezdősebessége lesz:

$$v = at = g \sin \frac{3\alpha}{2} t_{A_1 A_2} = 2 \sqrt{rg \sin \frac{3\alpha}{2}} \sin \frac{\alpha}{2}.$$

Az $A_2 A_3$ szakasz megtételéhez szükséges időt az alábbi másodfokú egyenlet megoldásával kapjuk:

$$\overline{A_2 A_3} = v_0 t + \frac{a}{2} t^2.$$

Ennek gyöke (a negatív értéket kizárjuk):

$$t_{A_2 A_3} = 2\sqrt{r} \frac{-\sqrt{\sin \frac{3\alpha}{2}} + \sqrt{\sin \frac{3\alpha}{2} + \sin \frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{g \sin \frac{\alpha}{2}}}.$$

Ezután bizonyítandó, hogy

$$t_{A_1 A_2} + t_{A_2 A_3} < t_{A_1 A_3}.$$

Az egzakt bizonyítás helyett használjunk függvényábrázoló programot! Válasszuk az α -t x tengelynek, hiszen ez

lesz az a változónk, amelynek függvényében kiszámoljuk és ábrázoljuk a mozgásokhoz szükséges időt!

A grafikonról leolvashatjuk, hogy a poligonlejtő hosszabb útját lényegesen rövidebb idő alatt teszi meg a test, mint a rövidebb és egyenest. Ez a különbség a szög növekedésével alig változik. Az előbbi gondolatmenettel beláthatjuk, hogy a poligonlejtők szakaszait újabb 2-2 törött vonallal helyettesítve, a mozgásidőre még kisebb értéket kapunk. Ha az eljárást a végtelenségig folytatva, határesetben körvonalhoz jutnánk. Azaz a körvonalon lecsúszó test mozgás-ideje bármelyik körvonalra illeszkedő poligonlejtő mozgási idejénél kisebb.

Felmerül a következő kérdés: van-e más görbe, amelyik a körvonalon kapottnál kisebb mozgásidőt adna? Két pont köré végtelen sok kör írható, ezért érdemes más sugarú köröket is megvizsgálni. Kisebb sugarú kört, ahol $\alpha > 45^\circ$ nem választhatunk, mert akkor kezdetben a test nem csúszna a lejtőn, hanem szabadon esne. A 2. ábra alapján elmondható, hogy a sugár növelésével, a körív „lankásításával” a lecsúszási idő nő, és az elméletileg végtelen sugarú kör esetén az egyenes lejtő idejével egyezne meg. Tehát más, nem kör alakzatokat kell keresni.

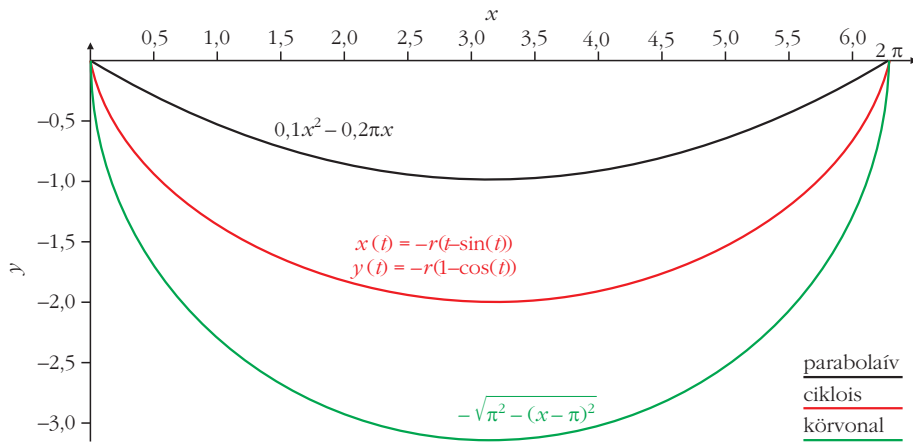
A középiskolai tananyagban szerepel a parabola és az ellipszis is, de ezek idevonatkozó geometriai tárgyalása már meghaladja a középiskolai tudásszintet. A továbbhaladáshoz e témakör fizikátörténeti tanulmányozását adtam feladatul, és tanulóim a körnél is „jobb” görbét – amelyiken haladva még rövidebb idő alatt ér le a test – találtak: a cikloist (a körrel rokon görbe nevét Galileitől kapta). Később a görbék „szép Helenéjének” is nevezték, mert megannyi vizslyát szított a tudósok között.

Ismerkedés a cikloissal

A ciklois – amit a gördülő körvonal egy pontja ír le – megismertetését a szerkesztésével érdemes kezdeni. Egy rossz CD-lemez széléhez közel fúrjunk lyukat, és abba helyezünk tollat vagy ceruzát. Az asztalon – a közepén található lyukba dugott rúd, például ceruza segítségével – úgy görgessük a CD-t, hogy a szélébe fúrt lyukba illesztett ceruza hegye az asztal melletti falra helyezett papírlapra rajzoljon (spirográf néven játékboltban vásárolt fogaskerekes rajzeszközökkel precíz rajzokat is készíthetünk).

A görbével való ismerkedés után az irodalomban talált képlet [4] alapján a Graph programmal [5] rajzoltassuk meg a görbét (3. ábra)!

A középiskolai koordináta-geometriai ismeretek alapján rajzoljunk ugyanebbe a koordináta-rendszerbe olyan kör-, illetve parabolaívet, amelyek a $(0;0)$ és a $(2\pi;0)$ pontokon mennek át! Mivel 2 pont végtelen sok ilyen ívet határoz meg, az alakzatok paramétereinek változtatásával elérhetjük, hogy a cikloishoz közel egyenlő távolságra legyenek. Az ilyen görbéken haladó testek (kezdősebesség nélkül) a súrlódás miatt a valóságban nem képesek a teljes $[0;2\pi]$ intervallu-

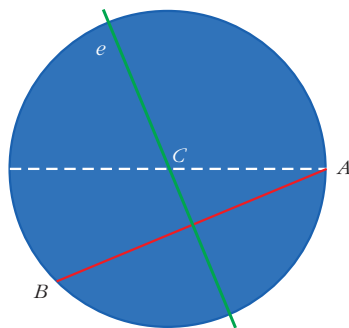


3. ábra. Különböző, az egyenleteik alapján Graph program segítségével ábrázolt görbék.

nes egyenletet kapunk a -ra, b -re, c -re. A egyenletmegoldást manuálisan vagy programozottan is elvégezhetjük, például a Scilab programmal [6, 7] (5. ábra).

A lejtősor elkészítése

A fent vázolt ábrázolást ki-nyomtatva (megfelelő méretezéssel) megkapjuk a lejtők sablonjait, amelyek alapján, farostlemezből kivágva, összeállíthatjuk a lejtősort (6.



1. AB -re merőleges, AB felezőpontján átmenő egyenes egyenlete: e
2. e és CA egyenesek metszéspontjai $C(u, v)$
3. $r = CA$

4. ábra. A középpokai koordináta-geometria segítségével meghatározható a kör középpontja és sugara.

ábrán balra). Ahhoz, hogy a golyók a lejtő ívén maradjanak, egyszerű csatornákat alakítottunk ki: két azonos lejtőt vágunk ki lemezből, majd távtartókat (szintén farostlemezből) helyeztünk közéjük, ezzel értük el, hogy a golyók csak két (alsó-oldalsó) ponton érintkezzenek a lejtővel, így a stabil mozgás a teljes pályán biztosítva volt. A többi lejtővel is hasonlóan jártunk el, majd azokat összeerősítve megkaptuk a lejtősort. A golyók egyszerre történő indítását egy műanyaglap (flakomból kivágott téglalap, amelyre cérnát erősítettünk) gyors kirántásával értük el.

mot befutni. Az elkészített lejtő leglátványosabban akkor mutatja a ciklois „győzelmét”, ha a golyó éppen fel tud kapaszkodni a görbe másik végébe. Az emelkedő szakasz meghatározása számítás alapján, vagy egyszerűen úgy történhet, hogy megfigyeljük, az elkészített cikloislejtőn meddig tud feljutni a golyó. Mindkét eljárás során azt tapasztaljuk, hogy a golyó a pályaszakasz közelítőleg 90%-át futja be. Ennek tudatában a cikloist csak ebben a 90%-os intervallumban ábrázoljuk, azaz kerekítve az $[1; 2\pi]$ -on! A ciklois kezdő és végpontjai lesznek a többi lejtővel a kapcsolódási pontok: $A(1; -1,35)$ és $B(2\pi; 0)$. Ez a két pont fogja meghatározni az egyenes lejtő egyenletét is.

A körszerkesztésnél vegyük figyelembe, hogy középpontjának az x tengelyen kell lennie (lásd a korábbi feltételt). A köregyenlet meghatározásához a 4. ábrán látható eljárást kell végrehajtani.

A parabolát három pontja alapján adjuk meg. A harmadik pontot a görbék „egyenletes sűrűsége” alapján választottuk meg: $D(\pi+0,5; -1,3)$. Ezután helyettesítjük be a koordinátákat az x és y helyére a parabola általános

$$y = ax^2 + bx + c$$

egyenletébe (ez 3 egyenletet jelent), így 3 háromismeretle-

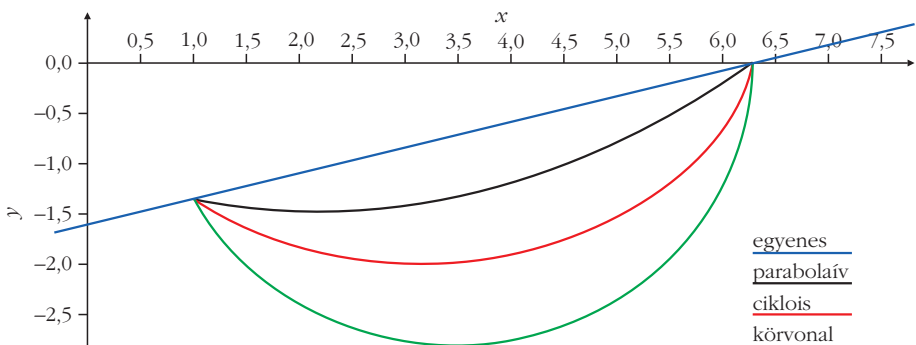
A lejtőn leguruló golyók versenyét szabad szemmel is jól lehetett követni (a győztes tényleg a ciklois pályán haladó golyó lett), de a mozgás gyorsasága (és további fizikai vizsgálódások) miatt nagyfrekvenciás filmfelvételt készítettünk a mozgásról (6. ábrán jobbra), majd kiértékeljük azt.

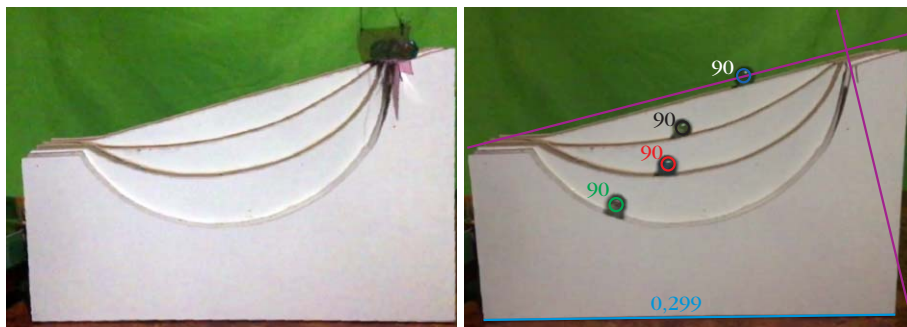
Videoanalízis a golyók mozgásáról

A videót 240 kép/s beállítással, mobiltelefonnal vettük fel. A videoanalízisban az x tengelyt az egyenes lejtőre illesztettük, az origó a startvonal lejtővel való metszéspontja, a pozitív irányt pedig az egyenes lejtőn haladó golyó mozgási iránya szerint választottuk meg.

A lejtősor elmozdulás-idő grafikonjainak tanulmányozását természetesen az egyenes lejtő félparabolájával érdemes kezdeni, hiszen a négyzetes úttörvény

5. ábra. A súrlódás figyelembevételével megrövidített görbék, amelyek sablonként szolgáltak a lejtő elkészítésekor.





6. ábra. a) Az indítás előtt a lejtő vájatába helyezett műanyaglap garantálta az egyszerre indulást. b) Pillanatkép a filmfelvételtől.

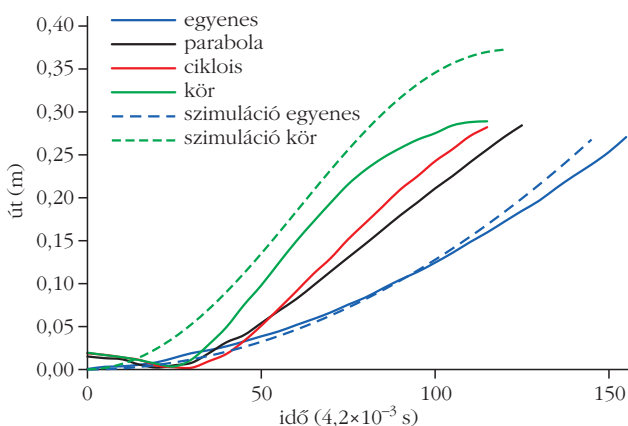
része a tananyagnak, így annak felismerése mindig sikerélményt okoz. A görbe vonalú pályák grafikonjai jellegzetesen „S” alakúak, azaz ezen pályákon a golyók a legalsó pontig gyorsulva, majd később lassulva haladnak. Az íves pályák első, úgynevezett tranzienz szakasza jól elkülöníthető a grafikonokon (ez a lejtőre állás szakasza).

Az egyenes lejtőn legördülő golyó – a tranzienz szakaszon gyorsulva, még előnyből is – az utolsó helyen végez. A harmadiknak befutó parabolapályán guruló golyó az egyenes pályát használóhoz képest lényegesen hamarabb érkezik, de a ciklois- és körpályákon fejfejjel haladnak a golyók. A grafikon szerint szinte egyszerre érkeznek pályájuk végére, de a grafikon a kamera perspektivikus torzulása miatt csalóka (felülnézetű kameraállással a célfotó egyértelműen eldöntötte a ciklois íven futó golyó győzelmét).

Azért mindenképpen érdemes megjegyezni a részeredményeket is: ha vízszintes segédegyeneseket rajzolunk a grafikonra, megállapíthatjuk, hogy az egyenes lejtőn haladó golyót a többi golyó már az első harmadban megelőzi, a második harmadban a cikloislejtőn haladó golyó a parabola golyójától átveszi a második helyet, majd a harmadik harmadban kintartó hajrával, „mellbedobással” győz.

A sebességek időbeli változásait a szoftver az elmozdulás-idő adatpárokából – deriválás segítségével – határozza meg. A grafikonon megfigyelhető, hogy az egyre nagyobb ívű lejtőkhöz egyre nagyobb maximális sebesség tartozik, és szinuszgörbéhez hasonló ala-

7. ábra. A lejtőn leguruló golyók út-idő grafikonjai a szimulációk grafikonjaival.



kúak, kivételet az egyenes lejtő sebesség-idő grafikonja képez, ami szigorúan monoton egyenes. A körpálya grafikonja „hegyesebb” a cikloisénál, azaz jóval nagyobb sebességértékeket vesz fel a pálya középső része körül, viszont a pályaszakasz végén tartósan nagy sebességet csak a cikloispályán guruló golyó képes tartani, azaz a győzelmet a cél előtti hajrá hozza meg neki.

Az iskolában tanult speciális mozgások (egyenes és körpályán mozgó testek, egyenletes és egyenletesen változó mozgások) grafikon-elemzésének elsajátítása után érdemes kihasználni a tanulók tudását bonyolultabb elemzésekre is, hiszen a természetben lejátszódó mozgások közül csak néhány írható le „tankönyvszerűen”. A kisdíjak is, miután megtanult olvasni, kíváncsian emel le a könyvespolcra egy ismeretlen könyvet, és megértéséhez az ABC-s könyvben tanultakat próbálja alkalmazni. E kísérletsorozat elvégzése és értelmezése kilépés az iskolapéldákból, de épít rá, hiszen a grafikon-elemzés „betűi”, alkotó módon lesznek használva.

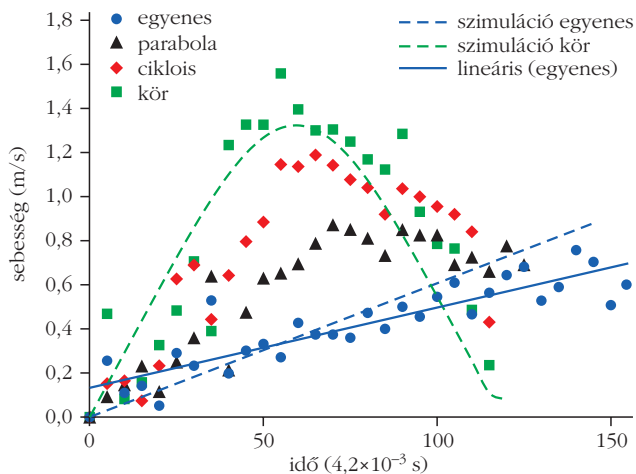
A bonyolult mozgások leírásában és elemzésében is érdemes alkalmazni a középiskolai matematikát, újabb közös pontokat találni a fizikával, a felsőbb matematikai megoldásokat és alkalmazásokat pedig tudománytörténetileg érdemes megközelíteni, így betekintést nyerhetnek a diákok, hogy a továbbtanulás milyen kapukat nyithat meg a természet megismerésében.

Szimulációk

A kísérletek alapján szimulációkat is készítettünk az egyenes és körpályán legördülő golyók mozgásairól. A szimulációk fontosak, hiszen segítségével a fizika képletei alapján megírt algoritmusokkal készült grafikonokat össze tudjuk hasonlítani a mérések alapján felrajzoltakkal. A szimulációban ráadásul lehetőségünk van a kezdőértékek megváltoztatására, kiszélesíthetjük a kísérlet technikai határait (például növelhetjük a golyók méreteit, csökkenthetjük a golyók tömegét stb.).

A szimulációt a Scilab [6] szoftver segítségével írtuk. Az algoritmusok léptető módszerrel számolták ki a fizikai mennyiségek értékeit. A lépésközt a filmfelvétel kép/másodperc értékéhez állítottuk, a kezdőértékeket méréssel határoztuk meg (lejtő hossza és meredeksége, körlejtő sugara, golyó sugara, tömege, a levegő sűrűsége, közegellenállási tényező, gördülési súrlódás). A közegellenállást is beépítettük a szimulációkba (lényegét lásd később) [7].

A lejtősor út-idő grafikonján jeleztük a szimulációk alapján kapott adatpárokat (7. ábra). Az összehasonlítás alapján elmondható, hogy a szimulációk görbéinek helyei és jelleggörbéi egyértelműen azonosíthatók. A mozgásidők is közel azonosak. Különbség a megtett útban van. A különbségek legfőbb okai a kamera torzítá-



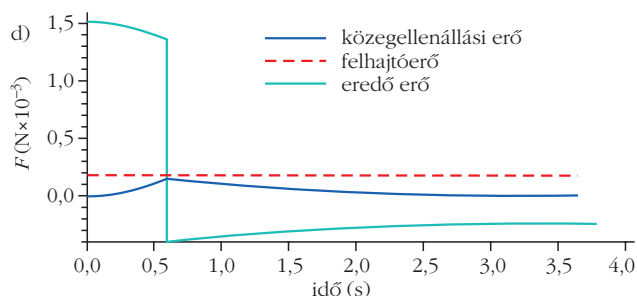
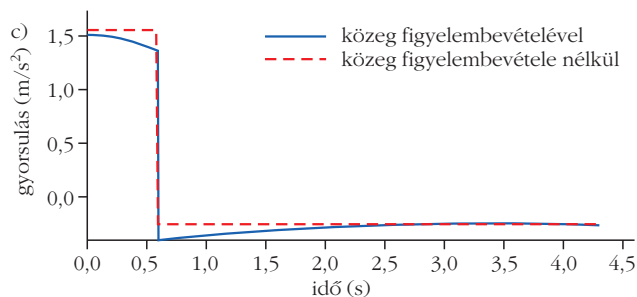
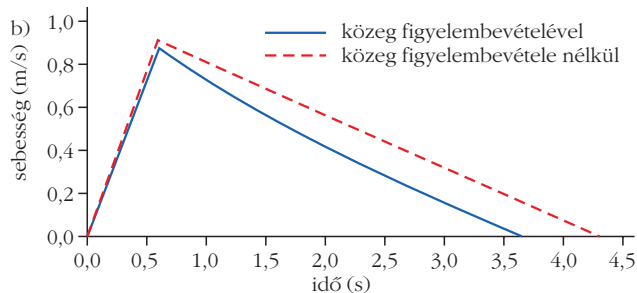
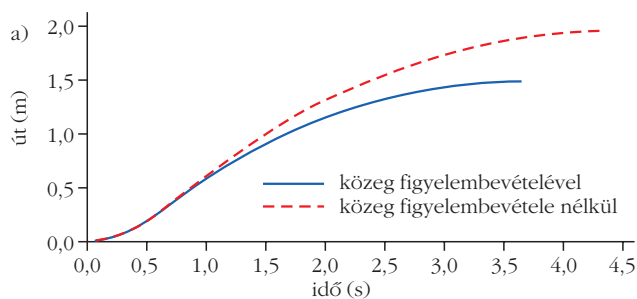
8. ábra. A lejtőn leguruló golyók sebesség-idő grafikonjai a szimulációk grafikonjaival.

sában, és a videoanalízis során a golyók pozícióinak azonosításából keletkező hibákban keresendők. A sebesség-idő grafikonokra (8. ábra) is elmondhatók a fentiek, sajnos a videoanalízisből eredő hibák a sebességszámítás során tovább növekedtek.

Az egyenes lejtőn leguruló golyó pályáját a szimulációban egy vízszintes pályával is kibővítettük, így a golyó megállásig gurulhatott. Az algoritmusba a közegellenállást és a felhajtóerőt is belefoglaltuk. A szimulációt lefuttatva nem tapasztaltunk közeg okozta nagyobb változásokat a grafikonokban. Érdekességként azért megvizsgáltuk, hogy mikor nem hanyagolható már el a közeg mozgást befolyásoló szerepe. A golyó tömegét megtartva, de térfogatát ötszörösére növelve már észrevehetővé váltak a közeg okozta változások – a súrlódási együtthatót 0,025-nek választottuk – (9. ábra). A tömeget ötödére csökkentve, azonos térfogat mellett, a közeg jelenléte szintén észrevehető. A kezdeti értékek változtatásával elindított szimulációk alapján a diákok számára érthetővé vált, hogy milyen esetekben számolhatunk a közeg figyelembevétele nélkül.

Konklúziók

Nehéz arra válaszolni, hogy milyen mélységben tárgyaljunk egy-egy konkrét fizikai problémát, mikor vegyük figyelembe a környezet hatásait, milyen pontossággal végezzük el a méréseket. A tanórán kívüli szakkör lehetőséget ad arra, hogy a már megszerzett tudást nyitottabb fizikai feladatok megoldására is használják a diákok. Az a felismerés, hogy az iskolában tanultak valós problémáknál is alkalmazhatók, erősen motiválta a tanulókat. Ilyenkor a fizika nemcsak egy tantárgy a sok közül, hanem válasz a közösen feltett kérdésekre. Ilyen és ehhez hasonló jellegű problémák megoldása esetén fontos a folytonos tanári jelenlét (akár interneten keresztül is), a „kollegiális” viszony, hiszen sok esetben, akár egy ilyen projektben való munka során is, módosulhat a tanuló motivációja. (Ha túl nagy teljesítményt várunk, akár a probléma feladását kockáztatjuk meg.)



9. ábra. a)–c) Egyenes lejtőn leguruló golyó mozgásgrafikonjai a közeg módosító hatásaival számolva és anélkül. d) A golyóra ható közegellenállási erő, a felhajtóerő és az eredő erő az idő függvényében ($m = 0,001$ kg, $r = 0,015$ m, $\mu = 0,025$).

Ajánlom e cikket a lelkes fizikatanároknak és diákjaiknak, akik szívesen elvégzik a fent leírt kísérleteket. A szimulációkat lefuttatva – akár más példákon keresztül – remélem, hogy értékes időtöltést fognak szerezni nekik.

Irodalom

1. Stonawski Tamás: *Trükkös fizika: 58 játékos kísérlet egyszerű eszközökkel*. Mozaik Kiadó, Szeged (2016) 127 o., 62–63.
2. Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat kiadó Budapest (1981) 193. o.
3. Faragó Andor: Felhívás egy új probléma megoldására. *Középiszkolai matematikai és fizikai lapok* I. évf. 1. szám, Budapest, 1925. február
4. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Ciklois>
5. <https://www.padowan.dk/download/>
6. <https://www.scilab.org/>
7. <https://1drv.ms/f/s!An0er2QwwGjyqhd-w5CvsXmo99QN>

A BME KÍSÉRLETI KÖRE BEMUTATJA: VÍZIRAKÉTA

Palotai Veronika
BME, TTK

Már harmadik éve, hogy a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Karának szakkollégiumán, a Wigner Jenő Szakkollégiumon belül működő öntevékeny kör, a Kísérleti Kör tagjai a nyarat egy egyhetes „nyári iskolával” indítják. Ahogy a név is sejteti, ez kötetlen, csapatépítő jellegű, egyben szakmai esemény. A Kísérleti Kör tevékenységébe azonban nem csak akkor tudnak beleszólalni az új tagok, hanem év közben is számos lehetőség kínálkozik. Elsősorban rendszeres szemináriumokon, ahol a TTK-s hallgatók a fizikai ismereteik mellett elektronikai és

programozási tudásukat is csiszolhatják egy Geiger-Müller-számláló vagy épp egy elektronikus dobókocka elkészítésével (1. ábra). Aki az előadói készségét fejlesztené, annak sem kell messzire mennie, hiszen remek lehetőség a kísérletezős szeminárium, ahol a résztvevők egymásnak mutatnak be érdekes kísérleteket. Építésből, forrasztásból, illetve kísérletek bemutatásából a nyári iskolákban sincs hiány. Minden alkalommal kitűzünk egy központi projektet, ez általában egy komolyabb eszköz elkészítése. Készült már ködkamra és indukciós hevítő is, de jutott idő a résztvevők által bemutatott rövid, frappáns, érdekes kísérletekre is. Régóta célunk, hogy egyfajta adatbázist hozzunk létre az elkészített eszközökről, illetve a bemutatott kísérletekről, így a dokumentálás is a nyári iskolák elengedhetetlen része. A Kísérleti Kör honlapját felkeresve bárki, aki kedvet kap hozzá, böngészheti a már meglévő leírásokat. Az is előfordult, hogy a nyári iskolát nem csak a Kísérleti Kör tagjai, hanem maga a Szakkollégium szervezte. Szakkollégistaként pedig nem csupán a Kísérleti Kör szemináriumain lehet részt venni, hanem számos egyéb szemináriumon is, például gépi képfeldolgozás vagy webszerkesztés témá-



1. ábra. Az elektronikusdobókocka-készítő szeminárium résztvevői az elkészült eszközökkel [1]. Balról jobbra: Träger Magdolna, Madarász Fanni, Hadobás János, Szűcs Ágnes, Buday Csaba, Sánta Botond, Horváth Levente, Kardos Boldizsár, Blaskó Márk.

ban. A szemináriumok mellett a Szakkollégium olyan közéleti eseményeket is szervez, amelyeken a kar bármely hallgatója részt vehet. Ilyenek a nagyelőadások, amelyeket a saját területükön elismert, neves előadók tartanak, vagy a Wigner-konferencia, amelyen a hallgatók egymásnak adnak elő a kutatási eredményeikről.

A vízirakéta-projekt

A 2017-es nyári iskola (2. ábra) fő konstrukciós projektje egy vízirakéta építése volt. A cél egy olyan eszköz megvalósítása volt, amelyet a rakétatestből kiáramló víz hajt, ejtőernyő segítségével képes sérülés-

2. ábra. A 2017-es nyári iskola résztvevői [1]. Első sor balról jobbra: Czémán Mátyás, Sánta Botond, Nyáry Anna, Träger Magdolna. Hátsó sor balról jobbra: Gyökös Réka, Boros Csanád Örs, Palotai Veronika, Balogh Nóra, Madarász Fanni, Hadobás János.



Palotai Veronika a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Természettudományi Kara másodéves Fizika BSc szakos, alkalmazott fizika szakirányos hallgatója. 2016 szeptembere óta cikkíró és tördelő a *Pikkász* című kari lapnál, illetve 2017 februárja óta a kari Wigner Jenő Szakkollégium tagja, ahol 2018 áprilisában az Oktatási és Kapcsolatok Munkacsoport vezetőjének választották. A Szakkollégium Kísérleti Kör nevű öntevékeny körének tagja.

mentesen landolni, illetve repülése során különböző műszereket hordozva a fedélzetén méréseket végez. A Kísérleti Kör néhány tagja már korábban is megkísérelte ezt, így rendelkezünk egy kezdetleges modellel. Ez azonban koránt sem volt tökéletes, ezért egy komolyabb, összetettebb eszközt akartunk építeni. Első lépésként az interneten a „vízirakéta” kulcsszó alatt fellelhető elgondolások széles tárházából ki kellett választanunk az erőforrásainkhoz illeszkedő ideális koncepciót. Tudtuk, hogy a rakétatest alapanyaga PET-palack lenne, de döntenünk kellett, hogy egy vagy több palack alkotja-e majd. Előbbi a lehető legyszerűbb megoldás, azonban a többpalackos verziót sem nehéz elkészíteni, hiszen a hossz tengelyük mentén a palackok jól összeragaszthatók. Ezzel növelhetjük a rakéta térfogatát, ami nagyobb hasznos teher cipelését teszi lehetővé – a maximálisan elérhető magasság rovására. E verzióknak azonban van egy komoly buktatója is: a nyomásállóság miatt ügyelni kell az illesztések pontosságára. Ha kellően meg tudjuk erősíteni a falat, akkor nagyobb nyomást érhetünk el, így magasabbra tudunk repülni. Idáig csak az egyfokozatú rakétákról esett szó, azonban többfokozatúak készítése is lehetséges. Igazán ezekkel növelhető meg a repülési magasság. A második fokozat nemcsak magasabbról indul, hanem kezdősebességgel is rendelkezik. Ugyanakkor problémát jelent az első fokozat leválasztása, illetve a második fokozat indítása. Természetesen nem csak PET-palackot használhatunk alapanyagként, de a másfajta, erősebb anyagból készült, egyedileg gyártott rakétákkal már világcsúcsokat szoktak dönteni.

Mi végül egy többpalackos, egyfokozatú rakéta elkészítése mellett döntöttünk. Azonban hiába láttuk már szinte a levegőben a rakétát, a tervezéssel koránt sem voltunk készen, még jó néhány problémával kellett megbirkóznunk. Többek között a kilövőállás nyomás alá helyezésével, a (táv)kioldással, vész esetén a nyomás leengedésével, illetve a kilőtt rakéta visszahúzásával. Nem lennénk Kísérleti Körösök (és fizikusok), ha csak a látvánnyal beérnénk, így a rakéta segítségével elvégezhető méréseket is kidolgoztunk, amelyek később akár egy komolyabb rakéta- vagy drónprojektben is a segítségünkre lehetnek. Ezek közül a legfontosabb a magasság és a sebesség mérése, illetve a rakéta repülésének kamerával való rögzítése. Továbbá célunk volt, hogy információkat szerezzünk a külső hőmérsékletről, valamint a rakéta gyorsulásáról is. A rengeteg feladat miatt a rakéta elkészítésével kapcsolatos tennivalókat előzetesen elosztottuk egymás között, így a nyári iskoláig hátra lévő hetekben mindenki igyekezett a saját részfeladatához



3. ábra. a) A vízirakéta kilövőállása a földhöz rögzítve. b) és c) Palack csatlakoztatása és kioldása. d) A tartórészre felszerelt elektronika [1].

szükséges ismereteket, alapanyagokat összeszedni, illetve – amennyire időnk és a feladat jellege engedte – nekikezdeni.

Előzetes részfeladatok

A rakéta kilövőállásának elkészítése (Balogh Nóra)

A cél a Kísérleti Kör korábbi, eléggé kezdetleges kilövőállásának továbbfejlesztése volt. Az elsődleges problémát a nem megfelelő szigetelés jelentette a palack nyakánál, itt ugyanis nagyjából 3 bar nyomásnál a víz kezdett kiszivárogni a palackból. Ezen egy egyszerű O-ring szigetelőgyűrűvel segíteni lehetne, azonban Nóri egy teljesen új koncepciót dolgozott ki és valósított meg. A korábbi PVC-csöves verzió helyett egy szövetbetétes levegőtömlő képezte a kilövőállás csövét, ami egy kompresszor-gyorscsatlakozóval végződött. A gyorscsatlakozóhoz biciklitömlőt autópumpához csatlakoztató szelepet is vettünk, hogy azt biciklipumpával is használhassuk. A tapasztalat azt mutatta, hogy kitűnően bírta a nagyobb nyomást, csak a szelep megfelelő csatlakoztatására kellett figyelni. A cél egy teljesen szét szerelhető, stabil állvány elkészítése volt. Ezért MEFA-szerelőcsíneket használtunk, amelyeket fémlapokkal könnyen egymáshoz tudunk csavarozni. Sátorvasakkal pedig a földhöz tudtuk rögzíteni. A cső végére egy mozgatható fejű vizes gyorscsatlakozót (Gardena) szereltünk. A fejre gyorskötözőkkel köteleket rögzítettünk, ezek megáramlásával lehetett a palackot kioldani (3.a ábra). A kioldható csatlakozóban van egy szelep, ami a levegőáramlást csak akkor engedi, ha a palack be van kattintva. Itt a víz visszafolyására kell ügyelni, ezért szilikonos tömlőt ragasztottunk a palackba. Emiatt azonban a víz nehezebben áramlott ki a kilövésnél, ezért végül a tömlő nélküli palackot használtuk. A kilövésre szánt palackokat kétféleképpen készítettük el. Egyrészt használtunk egy egy collos gyorscsatlakozót, amibe a palack kifűrt kupakját ragasztottuk. Ekkor először a palackot és a kupakot ragasztottuk össze, majd a kupakot egy gumis tömítéssel a gardena-csatlakozóba rögzítettük. A kritikus pont itt a ragasztás volt. A melegragasztós verzió nagyon hamar

szétjött, ezért ahol lehet, ott kétfázisú ragasztót használtunk. A másik lehetőség az volt, hogy a palackok nyakáról lecsiszoltuk a meneteket és úgy ragasztottuk bele kétfázisú ragasztóval egy 3/4 colos gyorscsatlakozóba. Ez a verzió kicsit hosszabb előkészítést igényelt, de strapabírónak bizonyult (3.b és 3.c ábra).

Ejtőernyő készítése a rakétához (Träger Magdolna)

Kilövés után a rakéta visszazuhan a földre, és mivel esés közben nagy sebességet érhet el, könnyen megsérülhet. Ezért szükséges (főleg az orr-részben található elektronika védelme miatt) ejtőernyővel felszerelni a rakétát, amely ideális esetben a pálya legmagasabb pontján kinyílik. Magdi először egy vékonyabb anyagból készített nyolcszög alakú próbajejtőernyőt, amelyhez madzagokat erősített. Az ernyőt kicsire összehajtogatva helyeztük a rakéta orrába, egy kis rekeszbe az elektronika mellé. Zuhanáskor az ernyőt tartó rekesz ajtaját szervomotor segítségével nyitottuk ki. A szervomotorral mobiltelefonon keresztül kommunikáltunk. Az első sikeres tesztek után Magdi erősebb anyagból is elkészítette az ejtőernyőt, ez került a rakéta végleges verziójába.

Elektronikatartó-rész kialakítása (Madarász Fanni)

A komoly elektronika – amit sokáig szeretnénk használni – komolyabb védelmet és rögzítést igényelt. Ehhez egy olyan műanyag foglalatot építettünk, amely egyben az ejtőernyőt is rögzíti. Alapanyagként vízálló polipropilén hullámkartont (corriflute) használtunk, mivel olyan anyagra volt szükségünk, ami viszonylag könnyű, hiszen az elektronika, illetve az ejtőernyő éppen elég súlyt fog jelenteni a rakéta orrában. Ugyanakkor gondolnunk kellett a landolásra is, szerettük volna elkerülni, hogy földet éréskor valamilyen szenzor károsodjon, így szintén fontos szempont volt, hogy alapanyagunk strapabíró is legyen. Ez a fajta hullámkarton mindkét szempontból tökéletes választásnak bizonyult.

A rakétatest elkészítése (Palotai Veronika)

Egy strapabíró rakétatest kialakítására volt szükségünk. Tesztelésekppen, hogy a rendelkezésünkre álló üdítő palackokból kiválasszuk a legalkalmasabbat, egypalackos prototípusokat készítettünk. Végül egy 2,5 literesre esett a választásunk. A többpalackos rakétatest esetünkben két palackot takart. Az egyik palack nyílását úgy alakítottuk ki, hogy azt csatlakoztatni lehessen a kilövőálláshoz. A kilövéskor ez volt az a palack, amit megtöltöttünk (az üzemanyagként használt) vízzel. A másik palackból készült a rakéta orra, amelyben az elektronikát, illetve az ejtőernyőt helyeztük el. Ezt az egyharmadánál kettévágtuk, majd az elkészült tartórészt az elektronikával, illetve az ejtőernyővel abba a részbe helyeztük, amelyiken a palack nyílása volt. Áramlástan okokból a palack nyakát a csavaros menettel együtt levágtuk, helyére pedig egy hungarocellból készült, lekerekített tetejű testet helyeztünk, amely formáját tekintve követte a palack felső részének alakját. A rakétatest után a terelőszár-

nyak következtek. Ezek szintén hullámkartonból készültek, és melegragasztóval erősítettük őket a rakétatestre. Ez a megoldás egészen tartósnak bizonyult, a terelőszárnyak ritkán törtek le a rakétatestről, de nem minden szempontból volt a legjobb döntés, mert a meleg hatására a palack deformálódni kezdett.

A rakétában használt szenzorok ismertetése (Hadobás János)

Szerencsére ma már igen sok olcsó és egyszerűen használható, sokoldalú integrált áramkör áll rendelkezésre, így első lépésként a számunkra legmegfelelőbbeket kellett kiválasztanunk. Az adatlapok átolvasása után az alábbi szenzorok mellett döntöttünk:

- GY-521 (MPU6050) giroszkóp, gyorsulás szenzor;
- GY-68 (BMP180) nyomás és hőfokmérő.

Még egy Raspberry Pi-t is beszereztünk, amelyet szenzoradatgyűjtőként használtunk. Jani feladata a függvények mérirása volt a szenzorok kiolvasásához. Ezt követően a – Fanni által kialakított – tartórésszel felszerelte az elektronikát (3.d ábra), ügyelve arra, hogy az ejtőernyő kioldását semmi se akadályozza.

Kamera beüzemelése a rakétához (Gyökös Réka)

A rakéta emelkedését a rakéta „szemszögéből” is szerettük volna látni, így a rakétatestre egy kamerát telepítettünk. Kínából egy igen olcsó és sokoldalú, kis méretű kamerát rendeltünk, amelyet a rakéta elektronikatartó-részébe építettünk. A kamera 720p-s felvételeket készít, és microSD kártyára rögzíti azt. Az eszköz 5,8 GHz-en real-time analóg videót is képes sugározni (ehhez megfelelő vevőre lenne szükség, de most szándékosan nem vettünk). Réka a beépítés előtt tesztelte a kamerát, összeállította annak tápegységét, illetve egy védőburkolatot készített hozzá.

Szimulációs kód, GUI fejlesztése (Buday Csaba, Boros Csanád Örs)

A rakétaegyenleteket és fizikadatasunkat felhasználva szimulációt készítettünk a rakéta működéséről. A kód alapjait Csabi írta meg, Örs pedig a megírt kódhoz kialakította a felhasználóbarát GUI-t (Graphical User Interface, azaz grafikus felhasználói felület). Bizonyos paramétereket a kilövés során mérésrel tudunk meghatározni, így egy idő után a szimuláció továbbfejleszhetővé vált. A modellben található kísérleti paramétereket Örs határozta meg a mérések alapján.

Pneumatikus összeállítás készítése (Buday Csaba)

Szerettünk volna egy kicsit fejlettebb kilövőrendszert, ami a következő kritériumoknak felel meg:

- levegő felengedés;
- vízzel feltöltés;
- vész-leeresztés;
- távvezérelhetőség;
- a nyomás távolról való leolvashatósága;
- a vizes és a levegős rendszer különválás (a levegős rendszerbe nem kerülhet víz);
- biztonsági szelep (túl nagy nyomás ellen).



4. ábra. A kész rakéta a kilövőálláson, indításra várva [1].

Az elkészült indítóállomás (4. ábra) végül nem minden célnak felelt meg, de ezt további fejlesztéssel javítani lehet (elsősorban visszacsapó szelepre lenne szükség). Az elkészült rendszerben egy T idomban egyesül a vizes és a levegős rendszer. Fontos, hogy először a vízzel feltöltést kell elvégezni, utána következhet a levegő betöltése. Lényeges szempont az is, hogy a levegő betöltése során a levegős rendszer nyomás alatt legyen (a víz ne tudjon visszafolyani), valamint a kompresszor magasabban legyen a rakéta vízszintjénél (szintén visszafolyás megakadályozása). Csak levegős nyomásmérővel rendelkeztünk, így nem tudtuk közvetlenül mérni a palack nyomását. Ehhez egy vizes nyomásmérőre (is) szükség lenne.

A nyári iskola első néhány napjában átbeszéltük, illetve befejeztük a részfeladatokat, hogy a rengeteg munka után végre tesztelhesük a rakétánkat. De mi is történik a kilövést követően? Először tekintsünk át egy, a rakéta viselkedésére vonatkozó egyszerű fizikai modellt.

A vízrakéta fizikai modellje

A rakétát a kiáramló víz hajtja előre. Az energiát a nagynyomású levegő tágulása biztosítja. Egy egyszerű fizikai modellben a következő hatásokat kell figyelembe vennünk:

- víz kiáramlása (rakétaelv);
- gáz tágulása (adiabatikus modell), ami a vizet kinyomja a palackból;
- gravitáció;
- légellenállás;
- a víz elfogyása után a levegő még biztosít egy lökést, ami nagyon gyorsan lezajlik;

A modellhez szükséges paraméterek:

- m_0 (kg): üres tömeg;
- $V_{üzemanyag}$ (m^3): betöltött vízmennyiség (a levegő tömegét elhanyagoljuk);
- $\rho_{üzemanyag}$ ($kg \cdot m^{-3}$): víz sűrűsége;
- g ($m \cdot s^{-2}$): gravitációs gyorsulás;
- p_{g0} (kPa), V_{g0} (m^3): kezdeti gáznyomás és térfogat;
- $\gamma(1)$: adiabatikus együttható;
- $p_{körny}$ (kPa): külső légnyomás;
- $A_{fúvóka}$ (cm^2): fúvóka átmérője;
- A_{homlok} (cm^2): homlokl felület;
- $\rho_{levegő}$ ($kg \cdot m^{-3}$): levegő sűrűsége;
- $C_d(1)$: közegellenállási együttható.

A modell szakaszai:

- *gyorsítási szakasz, víz munkaközeg:* így indul a modell;
- *gyorsítási szakasz, levegő munkaközeg:* a víz elfogyásakor a maradék levegő még némi meghajtást ad, a levegő jóval kisebb dinamikus viszkozitása miatt ez a szakasz jóval gyorsabban lezajlik;
- *lassulási szakasz:* a munkaközeg elfogyott, a rakéta tömege nem változik, innen ballisztikus pályán mozog, a légellenállás és a gravitáció hatnak rá;
- *esési szakasz:* a sebesség megfordulása után a légellenállás és a gravitáció már ellentétes előjellel hatnak. Ha ernyő is van, itt érdemes kinyitni, és akkor ez a szakasz jóval tovább fog tartani.

Mivel a modelltől elsősorban a csúcsmagasságot akarjuk meghatározni, az első két szakasz a mérvadó. Az adiabatikus expanziós modell a folyamat sebességével indokolható. Az egész gyorsítási szakasz jellemzően másodpercek alatt lezajlik, így a gáznak nincs módja energiát felvenni a környezetétől.

A szimulációhoz szükséges állapotváltozók:

- x (m), v_x ($m \cdot s^{-1}$): kinematikai jellemzők;
- V_g (m^3): gáztérfogat.

Az adiabatikus állapotegyenletből meghatározható a pillanatnyi nyomás:

$$p_g = p_{g0} \left(\frac{V_{g0}}{V_g} \right)^\gamma$$

Az adiabatikus változás során a gáz belső energiája teljesen munkává alakul. Ez hajtja a kiáramló vizet.¹

Ezt figyelembe véve a következőket kapjuk (infinitezimális értékek):

- gáztérfogat-változás: δV_g ;
- kiáramló víztérfogat: $\delta V_g = v_{ki} A_{fúvóka} dt$;
- gáz által végzett munka: $dW = \delta V_g p_g$;
- a kiáramló víz mozgási energiája:

$$\frac{1}{2} \delta V_g \rho_{üzemanyag} v_{ki}^2;$$

- a kiáramló vizet viszont nem a vákuumba nyomjuk, hanem a környező levegőbe, így ehhez is munkát kell végezni: $dW_{ki} = -\delta V_g p_{körny}$

¹ Ez természetesen csak ideális esetben igaz. A valóságban hidraulikai veszteségek is fellépnek. Ezekkel később foglalkozunk.



5. ábra. A rakéta trajektóriája [1].

Az utolsó három egyenletből megkapjuk a kiáramlási sebességet:²

$$v_{ki} = \sqrt{\frac{2(p_g - p_{körny})}{\rho_{üzemanyag}}}$$

A kiáramlási sebesség meghatározása után az infinitesimális impulzusváltozás:

- kiáramló tömeg:

$$\frac{dm_{üzemanyag}}{dt} = v_{ki} A_{fűvóka} \rho_{üzemanyag}$$

- kiáramló impulzus:

$$\frac{dp}{dt} = v_{ki}^2 A_{fűvóka} \rho_{üzemanyag}$$

Innen már egyszerűen felírható a dinamikai egyenlet:

$$F = v_{ki}^2 A_{fűvóka} \rho_{üzemanyag} - (m_0 + \rho_{üzemanyag} [V_{üzemanyag} - V_g + V_{g0}]) g - A_{bomlok} \rho_{levegő} C_d v_x^2$$

Tesztelési eredmények, jövőbeli tervek

A fizikai modell leírásakor szó esett arról, hogy az energia kezdetben nyomásként (az összenyomott levegő energiájaként) tárolódik a rendszerben. A túlnyomást egy kompresszor segítségével hoztuk létre.

A kompresszor növeli a gáz nyomását és csökkenti térfogatát, így az energiát lényegében a sűrített levegő biztosítja. Már az első tesztek is meglepően sikeresek voltak, a rakéta 30-40 méter magasra is felrepült, és a vízzel feltöltött részében indítás előtt 7-8 bar nyomást is elértünk. Eleinte nehézséget okozott, hogy az ejtőernyőt a megfelelő pillanatban nyissuk ki. Ezt ki kellett tapasztalunk, de pár kilövést követően sikerült eltalálni a megfelelő időpontot. A kamerával sajnos nem sikerült értékelhető felvételt készítenünk, mivel a kioldás pillanatában a rakétát érő erőhatások következtében leállt. A hőmérséklet- és a gyorsulás-mérés azonban sikeres volt, bár előbbi esetében a kis magasság

miatt nem számítottunk igazán érdekes adatokra. A rakétakilövéseket igyekeztünk az összes lehetséges módon dokumentálni, így született meg az az ötlet, hogy a rakéta orrába villogó fényforrást szerelve, sötétedés után készítsünk hosszú záridős képeket, így rögzítve a rakéta pályáját. Ez a próbálkozás meglepően sikeres volt, a 5. ábrán tökéletesen kivethető a rakéta trajektóriája.

Sajnos a kilövések során az orr-rész minden megerősítés ellenére is sokat sérült, így a nyári iskola végén ezt leszereltük a rakétáról, az elektronikát kiszedtük belőle, és egy, az eredetihez hasonló, üres orr-részt készítettünk. Ezt a leegyszerűsített változatot azóta számos fizika-, illetve tudomány népszerűsítő eseményen nagy sikerrel mutattuk be. Ilyen volt a 2017 szeptemberében, a Várkert Bazárban megrendezett *Tudományok Fővárosa*, ahol az érdeklődő gyerekek versenyt futottak azért, hogy melyikük hozza vissza a kilőtt rakétát. Szerencse bőven akadt jelentkező a kilövésére is. A nem sokkal későbbi *Kutatók Éjszakáján* a vízirakéta ismét hasonló sikert aratott, akárcsak az áprilisban megrendezett *A fizika mindenkié 4.0*-án. Ami pedig a Kísérleti Kör nyári iskoláját illeti, a tavalyi sikeren felbuzdulva idén is hasonlóan nagyszabású projektet tervezünk, ám a témája még kérdéses.

Irodalom

1. <https://wjsz.bme.hu/~kiskor/wiki/Vízirakéta>

² Ha a sebességet a Bernoulli-egyenletből vezetjük le, ugyanezt az eredményt kapjuk. A veszteségeket – természetesen – a Bernoulli-egyenlet sem veszi figyelembe.

MAGYAR TUDÓSOK ÉS MŰVÉSZEK SZÜLŐHÁZA

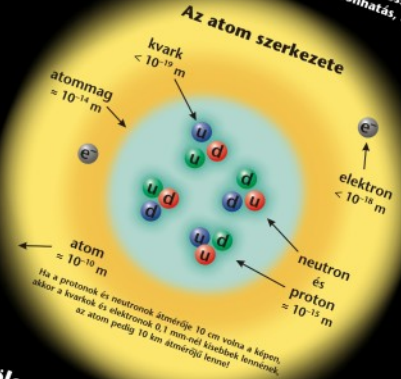
- akik Nyugaton alakították a 20. század történelmét és kultúráját

Z ELEMELI RÉSZECSKÉK ÉS ALAPVETŐ KÖLCSÖNHATÁSOK

Standard Modellje

Az elemi részecskékre és alapvető kölcsönhatásokra vonatkozó jelenlegi legpontosabb ismereteinket összegzi a Standard modell, amely az erős és egyesített elektromágneses kölcsönhatások elmélete. A gravitáció, jóllehet alapvető kölcsönhatás, nem része a Standard modellnek.

leptonok (spin = 1/2)	tömeg GeV/c ²	elektromos töltés
elektron	< 10 ⁻⁸	0
muon	0,000511	-1
tauon	< 0,0002	0
neutrínó	0,106	-1
...	< 0,02	0
...	1,7771	-1



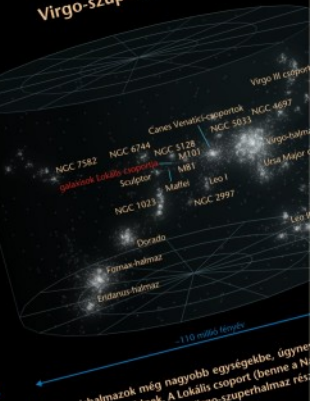
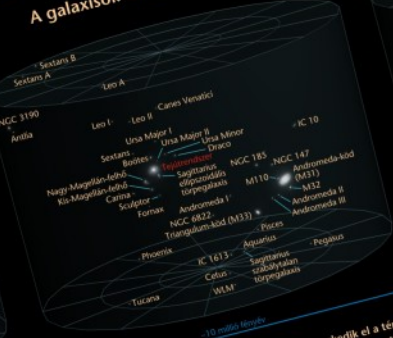
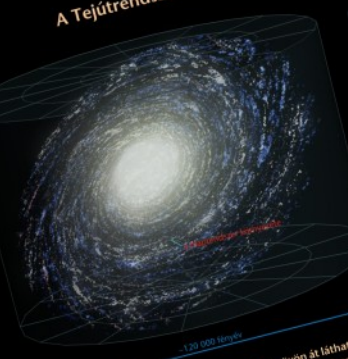
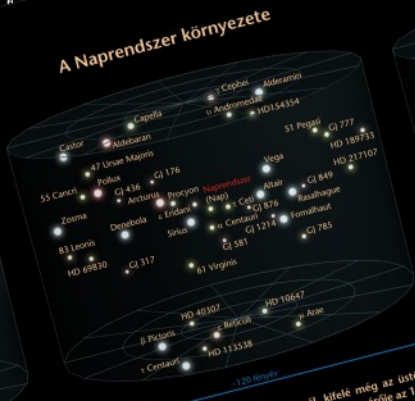
Bozonok - a kölcsönhatások közvetítői, spinjük: 0, 1, 2...

erős - a kölcsönhatások közvetítői, spinjük: 0, 1, 2...	jel/név	tömeg GeV/c ²	elektromos töltés
gluon	0	0	

A kölcsönhatások tulajdonságai

kölcsönhatás	alapvető	erős	gyenge
gravitáció	szintöltés	viszamaradó	...
elektromágneses	kvarkok, gluonok	lásd magyarázat	...
erős	gluonok	hadronok	...
gyenge	25	mezonok	60

HELYÜNK A VILÁGEGYETEMEN



A Naprendszer nem ér véget a Kuiper-övezetig, kifelé még az üstökösöket tartalmazó Oort-felhő található, amelynek átmérője az 1 fényévet is meghaladja. A Naphoz legközelebbi csillag, a Proxima Centauri csillag, amelynek távolsága a Naptól 4,2 fényévre van. A csillagok nem egyforma méretűek, ezért egy csillag fényességét (luminositását) a felszíni hőmérsékletétől és az átmérőjétől függ. Az égbolt legfényesebb csillaga, a Sirius 8,6 fényévre van tőlünk, jó néhány csillag ennél közelebbi. A legfényesebb csillagokra egyedi tájolásnévvel, a halványabbakra a csillagatalogokban kapott sorszámmal hivatkozunk.

A szabad szemmel látható csillagok - a csak távcsővön át látható lárszálakkal együtt - galaxisunk, a Tejútrendszer tagjai. A Tejút derengő sávja valójában hatványos csillagok összemosódó fénye. A Tejútrendszer spirális csillagok mentén tömörül. Becslések szerint a Tejútrendszer 200 milliárd csillag alkotja.

A galaxisok túlnyomó többsége nem elszórtan helyezkedik el a térben, hanem csoportosulva. Néhány tucat tagból állnak a galaxiscsoportok, és több száz vagy akár ezer tagja is van a galaxis-halmazoknak. A Tejútrendszer a Lokális csoporthoz tartozik körülbelül 60 ismert galaxissal együtt. E csoport meghatározó tagjai a Tejútrendszer spirális csillagok mentén tömörül. Becslések szerint a Tejútrendszer 200 milliárd csillag alkotja.

A galaxis-halmazok még nagyobb egységekbe, úgynevezett szuperhalmazokba szerveződnek. A Lokális csoport (bentem a Tejútrendszerrel) a Virgo-szuperhalmaz részét képezi.

Éghajlati háztartása

A Föld energia-háztartása bolygónk levegőjében lévő rendszert írja le, egy-egy méternyi légkör erő, valamint az onnan származó hő- és fényenergia mennyiségeket. Ezek lehetnek szűkebb értelemben a hő- és fényenergia, de a teljes energiát is lehet érteni. A légkör felületén a Föld felszínéről a légkör felé történő hő- és fényenergia áramlása - hosszú távú időskálán - egyenlő a Föld felszínéről a légkör felé történő hő- és fényenergia áramlásával, mint az infravörös sugárzásból származó hő- és fényenergia.

a légkör által elnyelt **77 W/m²**

a felszín által visszavert **23 W/m²**

infravörös kisugárzás **239,7 W/m²**

a légkör által kibocsátott **170 W/m²**

a légkör által elnyelt **358 W/m²**

felhők által kibocsátott **100 W/m²**

légköri ablak **40 W/m²**

üvegházhatás **33 W/m²**

látványos (halvány) változások

noáramlás

noáramlás

POSZTEREINKET KERESD A FIZIKAISZEMLE.HU MELLÉKLETEK MENÜPONTJÁBAN!

A poszterek szabadon letölthetők, kinyomtathatók és oktatási célra, nonprofit felhasználhatók. Kereskedelmi forgalomba nem hozhatók, változtatás csak a Fizikai Szemle engedélyével lehetséges. A kirakott poszterekről fényképet kérünk a szerkesztok@fizikaiszemle.hu címre.



A FIZIKAI SZEMLE LXVIII. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

<p><i>Börzsönyi Ádám, Nagymibály Roland, Tóth Szabolcs, Osvay Károly:</i> A csörpölt (lézer)impulzus-erősítés . . . 403</p> <p><i>Börzsönyi Tamás, Szabó Balázs, Somfai Ellák, Török János:</i> Elnyújtott alakú részecskék rendeződése nyíró áramlásban 118</p> <p><i>Bozóki Zoltán:</i> A fotoakusztikus laboratóriumtól a tengeri fűrótoronyokig – egy sikeres műszerfejlesztés története 192</p> <p><i>Cifarelli Luisa:</i> Az Európai Fizikai Társulat története 406</p> <p><i>Cserbáti Csaba, Parditka Bence, Tomán János, Csik Attila, Erdélyi Zoltán:</i> Szilárdtest-reakció nanoskálán 45</p> <p><i>Deák András:</i> Nanorészecskék önszerveződése 295</p> <p><i>Demes Sándor:</i> Kénmolekulák fragmentációja 111</p> <p><i>Fényes Tibor:</i> A stabilitási sávtól távol eső atommagok – 1–2. rész 340, 368</p> <p><i>Gombosi Tamás, Kecskeméty Károly:</i> Viharok a világuűrben 75</p> <p><i>Gríger Ágnes:</i> Cirkónium mint az atomerőművek szerkezeti anyaga 371</p> <p><i>Groma István, Szenthe Ildikó, Ribárik Gábor, Ódor Éva, Jóni Bertalan, Zilahi Gyula, Dankházi Zoltán:</i> Atomreaktorokban használható cirkóniumötvözetek mikroszerkezetének meghatározása röntgenvonalfelbontó-analízissel 420</p> <p><i>Groma István:</i> A Társulat 2018. évi rendezvényei 37</p> <p><i>Gyulai József:</i> Ionsugaras technikáktól a nanoszerkezetekig 3</p> <p><i>Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán:</i> Műon: mi az és mire jó? 147</p> <p><i>Horváth Dezső:</i> Új felfedezések a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél: furcsa részecskék 219</p> <p><i>Horváth Gábor, Stromp Mark, Farkas Alexandra, Száz Dénes, Barta András:</i> Mennyire valóságűek a festmények villámai? 299</p> <p><i>Horváth Gábor, Takács Péter, Barta András, David Pye:</i> A vízfelszín Brewster-féle sötét foltjának polarizáció-optikája – 1–2. rész 39, 86</p> <p><i>Juhász András, Tél Tamás:</i> Tíz éves az ELTE Fizika Doktori Iskola „Fizika Tanítása Programja” gyakorló fizikatanárok számára 251</p> <p><i>Kamarás Katalin:</i> Nanotartályok és nanoállványok 8</p> <p><i>Kóspál Ágnes, Ábrahám Péter, Varga József:</i> A csillagkeletkezés vizsgálata új interferometrikus műszerekkel 235</p> <p><i>Kovács László:</i> Segner János András, a fizika és a csillagászat tanára 376</p> <p><i>Kroó Norbert:</i> Ötven éve az Európai Fizikai Társulatban . . 413</p> <p><i>Lendvai János:</i> Duplaszám 217</p> <p><i>Lendvai János:</i> EPS Fizikatörténeti Emlékhely a Trefort-kerti D épület 365</p> <p><i>Lendvai János:</i> Év vége 401</p> <p><i>Lendvai János:</i> Közlekedni kell... 109</p> <p><i>Lendvai János:</i> Májusi események 181</p> <p><i>Lendvai János:</i> Március 73</p> <p><i>Lendvai János:</i> Október 329</p>	<p><i>Lendvai János:</i> Richard P. Feynman 100 145</p> <p><i>Lendvai János:</i> Új tanév kezdetén 293</p> <p><i>Makai Mibály:</i> Csoportelmélet reaktorfizikai alkalmazásai 335</p> <p><i>Molnár János Albert:</i> Kétszálás napóra – egy ritkaság Siófokon 245</p> <p><i>Opitz Andrea, Forczek Bianka:</i> A rejtélyes Vénusz 115</p> <p><i>Patkós András:</i> Feynman-előadások fizikából – előszó az új magyar kiadásához 162</p> <p><i>Pekker Sándor, Földes Dávid, Kovács Éva, Bortel Gábor, Jakab Emma:</i> Új szerves-fémkoordinációs vázszerkezetek 11</p> <p><i>Piszter Gábor, Kertész Krisztián, Horváth Zsolt Endre, Biró László Péter, Bálint Zsolt:</i> Ikarusz boglárka lepkék szerkezeti és pigment eredetű színeinek stresszállósága 225</p> <p><i>Próz Aurél, Saftics András, Péter Beatrix, Kurunczi Sándor, Horváth Róbert:</i> Biológiai vékonyrétegek élő sejtek mechanikai tulajdonságainak vizsgálata kvarckristály mikromérleggel 416</p> <p><i>Pusztai Tamás:</i> Anyagtudomány számítógéppel – 1–2. rész 188, 241</p> <p><i>Radnai Gyula:</i> Feynman Magyarországon 154</p> <p><i>Radnóczi György, Braeckman Bert, Depla Diederik, Misják Fanni:</i> Nagyentrópiás ötvözet-vékonyrétegek szerkezete 81</p> <p><i>Radnóti Katalin:</i> Két magyar marslakó: Szilárd Leó és Teller Ede 308</p> <p><i>Radnóti Katalin:</i> Látogatás a csernobili atomerőműben – 1–2. rész 16, 51</p> <p><i>Sólyom Jenő:</i> Fizikatörténeti emlékhely a Puskin utcában . 367</p> <p><i>Szabados B. László:</i> A gravitációs energia-impulzusról . . . 183</p> <p><i>Szigeti László, Mészáros Szabolcs, Szabó M. Gyula:</i> Extra felkeveredés óriáscsillagokban 343</p> <p><i>Szörényi Tamás, Pereszlényi Ádám, Horváth Gábor, Barta András, Gerics Balázs, Hegedűs Ramón, Susanne Ákesson:</i> Miért kell polarizáció-érzékelés a gazdaállat-kereséshez? 164</p> <p><i>Szücs Tamás:</i> Alacsony háttérű magfizikai mérések, avagy a nukleáris asztrofizika kihívásai 230</p> <p>Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2018. évi tagdíjairól 1</p> <p><i>Tóth Gábor:</i> Száz évesek Noether tételei 331</p> <p><i>Voss Rüdiger:</i> Az Európai Fizikai Társulat ötven éve 408</p>
VÉLEMÉNYEK	
<p><i>Patkós András:</i> Megjegyzések a fizika szakterületi „Shanghaj-rangsorról” 22</p>	
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<p>A Nat–2018 tervezetének szakmai véleményezése 386</p> <p><i>Bokor Nándor:</i> Milyen alakú a száguldó autó kereke? 203</p> <p><i>Csatári László, Molnár Tamás, Zámbo Szabolcs:</i> Törésmutató meghatározása saját mérőeszköz segítségével 209</p>	

<i>Farkas Zsuzsanna, Mező Tamás, Torma Gábor</i> : Torricelli megidézése	176	<i>Szakmány Csaba</i> : Microsoft Excel program használata a természettudományok tanításában	95
<i>Gombkötő Balázs, Bokor Nándor</i> : Holográfia a tanteremben	56	<i>Zátonyi Sándor</i> : Színes kísérletek egyszerűen	25
<i>Gyermán György</i> : Problémaalapú tanulás egy nyertes pályázat tükrében	65	KÖNYVESPOLC	
<i>Horváth Dezső</i> : Magyar tanárok és diákok részecskefizikai oktatása a CERN-ben	124	Benkő József, Mizser Attila (szerk.): Meteor csillagászati évkönyv 2018 (<i>Füstöss László</i>)	69
<i>Kilián Balázsné Raics Katalin, Sánta Imre, Knoch Júlia, Kovács Bence Tamás, Lovász Boglárka, Mester Ádám, Póla Márton, Szabó Dániel, Weisz Pál, Wensofszky Balázs</i> : Fényutasok – Kvantumelektronika-szakkör, „lézerbarlang”-építés a gimnázium pincéjében	30	Braun Tibor: Vándorbottal a tudományos kutatásban (<i>Kroó Norbert</i>)	364
<i>Kirsch Éva</i> : A Fizikatanári Anketé interferenciái és rezonanciái	137	Diósi Lajos: Bevezetés a kvantuminformáció-elméletbe (<i>Gesztai Tamás</i>)	108
<i>Kiss Miklós</i> : Relativitáselméletről középiskolában – másként	131	Géczi János, Csányi Vilmos: Őszi kék	364
<i>Koczka Vencel, Lipták Zoltán, Piláth Károly</i> : Kísérletek myDAQ-ra hangolva	399	Kovács László: Segner János András, egy jeles magyar a 18. századból (<i>Füstöss László</i>)	383
<i>Komáromi Annamária, Nagy Dániel</i> : Akusztikus lebegtetés és más kísérletek Arduino felhasználásával – avagy ne féljünk tanulni diákjainktól	356	Mester András, Horváth András (szerk.): Országos Szilárd Leó Fizikaverseny 2011–2016 (<i>Radnóti Katalin</i>)	142
<i>Kosztu János</i> : Középiskolai tanulók aktivitásának fokozása élményt nyújtó fizikaórai mérési kísérletekkel	354	Rajkovits Zsuzsanna: Fizika az élő természetben (<i>L. J.</i>)	67
<i>Krammer Melinda</i> : Öveges József nyomdokain – a XX. Ifjú Fizikusok Találkozója Péren	361	Schiller Róbert: A kételkedés gyönyörűsége (<i>Váradi András</i>)	363
<i>Kürti Jenő</i> : Relativitáselméletről középiskolában – másként, kiegészítés	263	Whiteson Daniel, Cham Jorge: Halványlila gőzünk sincs (<i>Szalai Tamás</i>)	288
<i>Medvegy Tibor</i> : Kevésbé ismert demonstrációs kísérletek cseppfolyós nitrogénnel	89	HÍREK – ESEMÉNYEK	
<i>Mester András</i> : A tizedik Nukleáris Szaktábor	272	A Társulat 2018. évi kitüntetései és tudományos díjai	216
<i>Németh Viktória, Nguyen Q. Chinh</i> : A Lenz-törvény demonstrálásában használt rézcső méretének hatása a csőben mozgó mágneses testek sebességére	318	Állami kitüntetések augusztus 20-a alkalmából	313
<i>Oláh Éva Mária, Fülöp Csilla</i> : A csapból is részecskefizika folyik?	283	Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2018. évi Küldöttgyűlése	214
<i>Palotai Veronika</i> : A BME Kísérleti Köre bemutatja: vízirakéta	431	Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Küldöttgyűlése – meghívó	109
<i>Papp Katalin, Flach Fanni, Molnár Milán</i> : A kisgyermekkorai természettudományos nevelés itthon és külföldön – helyzetkép	101	Az Eötvös Társulat kitüntetései és díjai – felhívás javaslatételre	36, 72
<i>Rajkovits Zsuzsanna</i> : Fizika az élő természetben	256	<i>Bartos-Elekes István</i> : Gábor Zoltán, 1924–2018	180
Rátz Tanár Úr életműdíj, 2017 – <i>Mester András</i> tanár úrral <i>Radnóti Katalin</i> beszélget	275	Bródy Imre Országos Fizika Kísérletverseny – felhívás jelentkezésre	107
<i>Simon Alpár, Tunyagi Arthúr, Fülöp Zalán, Kapusi Zalán, Kandrai Konrád</i> : Sűrűdési együttható meghatározása ellenállásmérés alapján	197	Búcsú: Bonifert Domonkosné Botyán Katalin	291
<i>Simon Ferenc</i> : Nagyfrekvenciás jelek kábelbeni terjedésének fizikai alapjai – 1–2. rész	278, 314	Búcsú: Niedermayer Ferenc	313
<i>Stonawski Tamás, Gálík Tamás</i> : Víz hőmérő? Majd, ha fagy!	133	Gábor Dénes-díj 2017	36
<i>Stonawski Tamás</i> : A brachistochron-probléma, avagy a hosszabb út a „rövidebb”	426	<i>Hartmann Ervin</i> : Tanítványok tanítványai	291
<i>Sükösd Csaba</i> : XXI. Országos Szilárd Leó Nukleáris Tanulmányi Verseny – 1–4. rész	267, 326, 348, 393	Humboldt-díjban részesült Legeza Örs	292
<i>Szabó László Attila</i> : Ne habozz! Kísérletezz!	171	In memoriam Janszky József (<i>Czitrouszky Aladár</i>)	71
<i>Szabó Róbert</i> : Történelmi szimuláció A távolsági ágyúzás fizikája	60	<i>Jarosievwitz Beáta</i> : Fizikai kísérletek, nem csak tudósoknak	143
		Magyar diákok sikere az „Ifjú Kutatók Nemzetközi Konferenciája” versenyen	145
		Ötven évvel ezelőtt hunyt el Gyulai Zoltán, a hazai kísérleti szilárdtest-fizika úttörője	289
		Solvay-konferencia, Brüsszel 2017 (<i>Márk Géza</i>)	36
		<i>Sólyom Jenő</i> : Emlékbeszéd Gyulai Zoltán mellszobránál	289
		Tudós lesznek fizikából – feladatmegoldó szakkör az ELTE-n	108
		Utazási ösztöndíj nemzetközi Science on Stage Fesztiválon részt vett tanároknak	72
		www.fizikaiszemle.hu/mellekletek	
		<i>Bartos-Elekes István</i> : A szabadesés kísérletes tanítása a nagyváradi Ady Endre Líceumban	
		<i>Radnai Gyula</i> : Richard Feynman Magyarországon	
		<i>Wesztergom Viktor</i> : Loránd Eötvös and the Foundations of Geophysics	
		<i>Will Clifford</i> : The Eötvös Experiment	