

fizikai szemle

BEÁGYAZOTT
VIDEÓVAL

2017/7-8

A Science on Stage Debrecenbe érkezett

Idén Debrecen adott otthont Európa legnagyobb, természettudományokat oktató pedagógusoknak szervezett rendezvényének, a Science on Stage fesztiválnak 2017. június 29. és 2017. július 2. között. Több mint 30 ország közel 450 STEM tanára (STEM angol rövidítés: természettudományok, műszaki tudományok, mérnöki tudományok és matematika) jött el, hogy bemutassa: milyen ötletekkel, kísérletekkel, módszerekkel oktatja hazájában, iskolájában diákjainak a természettudományokat.

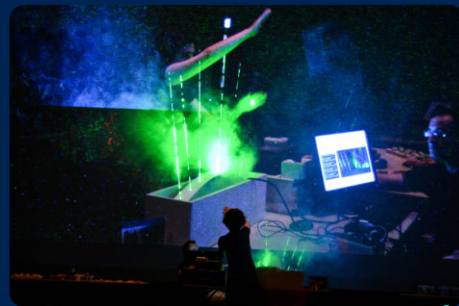
A fesztivál legfontosabb küldetése, hogy javítsa az oktatás színvonalát, és ezzel minél több diák érdeklődését felkeltse a természettudományok iránt, növelve a hallgatói létszámot ezen egyetemi képzéseken, hosszabb távon pedig jól felkészült pedagógusokkal fenntartani a minőségi természettudományos oktatást. A közös európai célt ismerve vállalta el az idei fesztivál fővédnökségét Navracsics Tibor, az Európai Bizottság oktatási, kulturális, ifjúságpolitikai és sportügyi biztosa, Balog Zoltán, az Emberi Erőforrások Minisztériumának minisztere és Pálinkás József, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFI) elnöke.

A Science on Stage Fesztiválok „elődje” a Physics on Stage Fesztiválok sorozata volt, amely 2000-ben indult útjára (http://szinpadon-a-tudomany.hu/PonS_2000/PonS2000_proceedings.pdf). A fizika mellett a többi természettudomány bevonásával 2005-ben alakult át Science on Stage Fesztivállá, és először ezt is a CERN-ben, Genf közelében szervezték meg. A versenyt kétfévente rendezik meg, eddig olyan európai városok adtak helyszínt, mint Genf (2005), Grenoble (2007), Berlin (2008), Koppenhága (2011), Slubice – Frankfurt (2013), London (2015). Idén a debreceni Kölcsény Központ adhatott otthont a rendezvénynek, a szervezők ezzel azt is elismerték, hogy Magyarország már a kezdetektől fogva, a 2000-ben elindult Physics on Stage fesztiválokon is részt vett, és szép eredményekkel szerepelt.

A rendezvény első napi programjának keretében 14 workshop és 3 színpadi előadás került megrendezésre. A július 1-jei „Nyílt Napon” bárki ingyen beléphetett, megcseodálhatta a kiállítási standokat, elbeszélgethetett a magyar és külföldi résztvevőkkel, és részt vehetett még a workshopok munkájában is. Hatalmas sikert aratott a debreceni diákok angol nyelvű színpadi műsora „Atomic Life Pictures” címmel. A színdarab szövegét Kirsch Éva tanárnő írta, és az iskola angoltanárnőjének segítségével ő rendezte és tanította be a diákokat. Csatlakozó rendezvényként a National Instruments színes programokkal és bemutatókkal várta a látogatókat.

Július 2-án, az utolsó nap délelőtti bemutatói után délben volt az eredményhirdetés. Részt vett és felszólalt Lovász László, a Magyar Tudomány Akadémia és Pálinkás József, az NKFI elnöke is. A díjátadások és a köszönetnyilvánítások után a közönség hosszú percekig át felállva, vastappal köszöntö meg a szervezőknek e nagyon sikeres fesztivált. Az európai Science on Stage szervezettel a kapcsolatot az Eötvös Loránd Fizikai Társulaton belül a Science on Stage Magyarország tartotta. A helyi szervezésért köszönet illeti a Főnix Rendezvényszervező Kft.-t, és vezetőjét, Szabó Zsoltot. A szakmai szervezésben oroszánrészt vállalt Fülöp Zsolt és Szilasi Szabolcs (ATOMKI), valamint az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, a Magyar Kémikusok Egyesülete, a Bolyai János Matematikai Társulat, az Informatika és Számítástechnikai Tanárok Egyesülete, valamint a Biológiai Tanárok Országos Egyesülete.

A rendezvényt támogatták: Debrecen Megyei Jogú Város (főtámogató), az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal, a Magyar Tudományos Akadémia, az Európai Innovációs és Technológiai Intézet, a National Instruments, a Richter Gedeon Nyrt., az ELI, a Debreceni Egyetem, az ATOMKI.



SCIENCE ON STAGE 2017
DEBRECEN

THE EUROPEAN NETWORK OF SCIENCE TEACHERS

SZERVEZŐK:





JÚLIUS–AUGUSZTUS

Nyár van, az évszaknak megfelelő magas hőmérsékletekkel. Befejeződött a 2016/17-es tanév az iskolákban és az egyetemeken, tanár és oktató kollégáink átmenetileg megszabadulnak órarendi kötöttségeiktől, remélhetőleg hosszabb-rövidebb időre mindenki szabadságra is megy. Külön öröm lenne számunkra, ha a kikapcsolódás alatt is érdemesnek tartanának időt szentelni a *Szemle* olvasására.

Nyár van, uborkaszazon: azt gondolná az ember, hogy ebben az időszakban különösebb érdeklődésre számot tartó hír nem is adódik. De feltétlenül érdemes megemlítenünk, hogy június 29. és július 2. között nagy sikerrel zajlott le Debrecenben a Science on Stage fesztivál, a természettudományi oktatás módszertanával foglalkozó legnagyobb európai rendezvény. A fesztiválon 30 országból jött 450 tanár mutatott be új ötleteket, lehetőségeket a természettudományi oktatás fejlesztésére. Örömteli meglepetés volt, hogy egy héten belül a média magyar diákok két jelentős nemzetközi fizikaversenyen elért kimagasló eredményéről adott hírt. Időrendben az első a magyar középiskolásokból álló fizikaválogatott aranyérme a Szingapúrban rendezett „Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye (IYPC) 2017” nevű megmérettetésén. A versenyen harminc ország vett részt ötfős csapatokkal. A magyar válogatottat az ELTE Anyagfizikai Tanszékének munkatársai állították össze és készítették fel. A szerkesztő sikerének tűnhetne, de be kell vallanom, hogy csak véletlen egybeesés, hogy a tavaly megrendezett IYPC-2016-ról, amelyen a magyar csapat ezüstérmet szerzett, éppen jelen lapszámunk 282. oldalán jelenik meg cikk, amelynek szerzői nagyrészt megegyeznek az idei verseny felkészítő oktatóival és versenyzőivel. A másik sikerhír az indonéziai Yogyakartában, július 16. és 23. között megrendezett 48. Nemzetközi Fizikai Diákolimpiáról érkezett, ahol a magyar csapat egy arany és négy ezüstérmet szerzett. A csapatot az olimpiai szakkörökön és a BME Fizika Tanszékén szervezett mérési foglalkozásokon készítették fel. A versenyző diákokat *Tasnádi Tamás* és *Vankó Péter* csapatvezetők, és megfigyelőként *Szász Krisztián* kísérte. (Egyébként Vankó Péter névvel is találkozunk jelen számunk szerzői között is, a 269. oldalon a 2016. évi Eötvös-versenyről szóló beszámolóban.) A fenti három eseményről részletebben a Hírek között, illetve a szemben lévő oldalon számolunk be.

Nyár van, az időjárás-jelentésben és számos más helyen rendszeresen emlékeztetnek, hogy óvakodjunk az erős UV-sugárzástól. *Tóth Zoltán* cikke a Napból érkező ultraibolya sugárzás nagy pontosságú mérésének nehézségeivel ismerteti meg. Más természetű környezeti problémákkal kapcsolatos további két cikkünk: *Kiszi Magdolna* és munkatársai a felületaktív anyagok vízfelszíni rovarokat veszélyeztető káros hatásáról írnak a felületi feszültséggel kapcsolatos tanulságos dolgozatukban; *Kiss Ádám* és *Szabó Mária* gondolatébresztő cikke pedig széles áttekintést ad a Földünket fenyegető potenciális veszélyekről. Akár valóban kikapcsolódásra is alkalmas olvasmányként ajánljuk az Einstein-specialista, Marx György Fizikai Szemle Nívódíjas szerzőnk, *Illy József Einstein a haditengerész* című érdekes cikkét.

Lendvai János
Lendvai János
főszerkesztő

Úgy tűnik, túl szerényre sikeredett jubileumi számunk címlapján a 750-es szám. A gyümölcselemekkel táplált zsebszámológép kijelzőjén található, íme a segítség:



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

Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

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

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

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



A címlapon:

A Szaturnusz bolygót és környezetét – beleértve holdjait és gyűrűrendszerét is – több mint egy évtizeden át vizsgáló Cassini-szonda itt még az 1997-es indítás előtt látható összeszerelt állapotban a pasadenai Jet Propulsion Laboratory telephelyén. A Cassini küldetése 2017 szeptemberében ér véget. (A Cassini bolygószonda búcsúzni készül című cikkünkhöz.)

A hátsó borítón:
Víztaposó poloska a vízfelszínen, Kriska György felvétele (lásd az írást a 275. oldalon).

TARTALOM

Július–augusztus (Lendvai János)	217
Kiss Ádám, Szabó Mária: Élhető marad-e az emberi környezet?	219
Ódor Géza: Kritikus dinamika egy nagy emberi konnektomon	227
Tóth Zoltán: A Napból érkező ultraibolya sugárzás nagy pontosságú mérésének problémái	232
Szentmihályi László, Kis Zoltán, Belgya Tamás, Maróti Boglárka, Horváth László Zoltán, Papp Mariann: Roncsolásmentes képalkotás neutronokkal és röntgensugárzással a Budapesti Neutron Centrumban	240
Rajta István, Vajda István, Biri Sándor, Sulik Béla, Gyürky György, Soltész Géza, Szűcs Zsolt, Fülöp Zsolt: Az MTA Atomki Tandetron Laboratóriuma – egy részecskegyorsító alapozott új kutatási infrastruktúra	244
Zsigmond Anna Julia: Z bozonok jelentősége nehézion-ütközésekben	251
Bányász István: Tökéletesen holográfia	255
A rögzítőanyag nemlinearitásának és véges feloldóképességének hatása a rekonstruált holografikus képre	
Illy József: Einstein, a „haditengerész”	259
Szabados László: A Cassini bolygószonda búcsúzni készül	263
A FIZIKA TANÍTÁSA	
Tichy Géza, Vankó Péter, Vigh Máté: Beszámoló a 2016. évi Eötvös-versenyről	269
Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna, Rizmajer Erzsébet, Kriska György, Horváth Gábor: A tavi molnárpoloska árnyékpapucsai és a víz felületi feszültsége, avagy felületaktív anyagok káros hatása a vízfelszíni rovarok viselkedésére	275
Hömöstre Mibály, Adorján Dániel, Bánóczki Tímea, Boross Péter, Ispánovity Péter Dusan, Jenei Péter, Nagy Balázs Norbert, Plaszkó Noel, Varga-Umbrich Eszter: Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye 2016 – magyar szemmel	282
KÖNYVESPOLC	
	290
HÍREK – ESEMÉNYEK	
	292

J. Lendvai: July–August

Á. Kiss, M. Szabó: Will the human environment remain livable?

G. Ódor: Critical dynamics in a large human connectome network

Z. Tóth: Problems of the high precision measurement of solar uv radiation

L. Szentmihályi, Z. Kis, T. Belgya, B. Maróti, L. Z. Horváth, M. Papp: Non-destructive imaging by neutrons and X-rays in the Budapest Neutron Centre

I. Rajta, I. Vajda, S. Biri, B. Sulik, Gy. Gyürky, G. Soltész, Zs. Szűcs, Zs. Fülöp: Tandetron Laboratory in the MTA-ATOMKI – a new particle accelerator based research infrastructure

A. J. Zsigmond: Significance of Z-bosons in heavy ion collisions

I. Bánász: Imperfect holography

J. Illy: Einstein and the Navy

L. Szabados: Cassini space probe is saying goodbye

TEACHING PHYSICS

G. Tichy, P. Vankó, M. Vigh: Eötvös Physics Competition 2016

M. Nagy-Czirok Kiszi, E. Rizmajer, Gy. Kriska, G. Horváth: 'Shadow-slippers' of waterstriders and the surface tension of water: adverse effects of surfactants on the behaviour of aquatic insects of the water surface

M. Hömöstre, D. Adorján, T. Bánóczki, P. Boross, P. D. Ispánovity, P. Jenei, B. Nagy, N. Plaszkó, E. Varga-Umbrich: International Young Physicist's Competition 2016 – from Hungarian viewpoint

BOOKS, EVENTS

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



ÉLHETŐ MARAD-E AZ EMBERI KÖRNYEZET?

Kiss Ádám – Eötvös Loránd Tudományegyetem, Atomfizikai Tanszék

Szabó Mária – Eötvös Loránd Tudományegyetem, Környezet- és Tájföldrajzi Tanszék

Napjaink társadalmi közösségei az utóbbi évtizedek – addig soha nem látott mérvű és ütemű – változásai után jöttek létre. A mélyreható társadalmi változások napjainkban is folytatódnak, sőt sok területen még gyorsulni is látszanak. Ezen társadalmi változásoknak sok kiváltó oka van, amelyek közül biztosan kiemelkedik a népességgrobbanás, a kulturális-vallási különbségek kiegyenlítése, a klímaváltozás, a nagy mértékű technológiai fejlődés és a szinte minden terület infrastruktúrájában megjelenő forradalmi megújulás. Ez utóbbi átalakulások oka egyértelműen a természettudományok fejlődése és az új eredmények rendkívüli gyorsasággal való alkalmazása.

A mai világ sok, a múltban gyökerező, de többségünkben csak az utóbbi évtizedekben, években felismert problémával küzd. Ezeknek szinte mindegyike jórészt a természettudományokra alapuló környezet-tudomány területére esik. Ez a tény rámutat arra a társadalmi igényre, hogy a környezeti ismereteket rendszeresen, tudományos pontossággal és a modern kor kihívásainak megfelelően szerepeltessük oktatási rendszerünkben és problémaorientált módon adjuk át a következő generációnak.

Tanulmányunkban a természettudományos ismeretek fontosságát emeljük ki a társadalmi közösségeket ma körülvevő és gyorsan egyre bonyolultabbá váló környezeti kérdések megértésében. Az emberiséget biztosan érintő problémák egy csokrának felsorolásával érzékeltetjük a környezettel kapcsolatban reánk váró feladatok nagyságát. Példákon keresztül mutatjuk meg, hogy a világ népessége legfontosabb kör-

nyezeti problémáinak jellege multidiszciplináris. A megfelelő szemléletnek mind az oktatásban, mind az ismeretterjesztésben tükröződnie kell. Három példán keresztül utalunk arra, hogy a jövő generációk élhető környezetet örökölnék tőlünk, az nagy mértékben rajtunk is múlik.

Átalakuló környezetünk

A 20. század utolsó és a 21. század első évtizedeit megelőző embertársaink legfontosabb életélménye a gyorsan változó világ. A természeti, társadalmi, gazdasági, műszaki környezet mindegyike alapvetően megváltozott körülöttünk. Ma napi szinten használunk olyan eszközöket, amelyekre – mondjuk fél évszázaddal ezelőtt – még csak nem is gondoltunk, s olyan körülmények alakultak ki körülöttünk, amelyek még nem is olyan régen elképzelhetetlenek voltak. Ezen változások mélyreható következményei vannak az élet szinte minden területén már most is, és világosan látszik, hogy további következményei lesznek a jövőben is. Mi a lényegük és mi váltotta ki ezeket az óriási átalakulásokat?

A változások lényegét igen nehéz összefoglalni, de a tényleges részletei közül sokat viszonylag könnyű felsorolni. Így mindannyian tudjuk, hogy az informatikai forradalom robbanásszerűen felgyorsította és leegyszerűsítette az információ- és adatátadás sebességét és módját. A mobil telefonok általánosan elterjedtek és alapvetően megváltoztatták a kis és közepes nagyságú közösségek, így többek között a családok, baráti körök életét. De például az egészségügyben is újabb és újabb magas technológiai szintű berendezések készítenek belső szerveinkről jobbnál jobb felvételeket. Az agrárgazdaság szinte teljesen átalakult, és a boltokban kapható ipari termékek jelentős része röviddel ezelőtt kifejlesztett olyan új anyagokból készül, amelyek pár évvel ezelőtt még nem is léteztek.

Ha belegondolunk az új eszközök, módszerek felbukkanásába, azok körülményeire, akkor könnyen belátható, hogy mindegyik háttérben a természettudományok szédületes ütemű fejlődése eredményeképpen bekövetkezett, az eredményeket felhasználó műszaki innováció van. Korunk egyik meghatározó jelensége a tudományos eredmények gyakorlatba való átültetésének igen gyors üteme. Tekintettel arra, hogy ez minden természettudományos szakterületen igaz, így a minket körülvevő világ minden területén érezhetjük a drámai átalakulásokat.

A fizikában például jelentős fejlődésnek indult a szilárdtestfizika. Az ezen a területen elért új tudományos eredmények lehetővé tették a félvezetők tulajdonságainak megértését, ami viszont előfeltétele volt az in-



Kiss Ádám (1942) az ELTE emeritus professzora, az OAH Tudományos Tanácsa elnöke. Kísérleti magfizikus, nemzetközi figyelmet keltett kísérletek szervezője, résztvevője. Atom- és magfizikát oktatott. Az ELTE TTK Környezettudományi Centruma és a Környezettudományi Doktori Iskola igazgatója volt. A radioaktív hulladékok elhelyezésére irányuló Nemzeti Célprogram Szakértői Bizottságát vezette. Napjainkban fő érdeklődési területe az emberiség energiajövőjének kutatása.



Szabó Mária (1947) az ELTE professzora. Tájökológus, fő kutatási területe a vizes élőhelyek környezet- és természetvédelme, rehabilitációja; a biodiverzitás változásai; a tájak terhelhetősége, érzékenysége; megújuló energiaforrások alkalmazása és a tájvédelem. Tankönyvek, jegyzetek társszerzője. Igazgatója volt az ELTE TTK Földrajz- és Földtudományi Intézetének. Az ELTE TTK Földtudományi Doktori Iskola Földrajz- és Meteorológia program vezetője. Az MTA Földtudományi Doktori Bizottság tagja.

formatikai forradalom kibontakozásának. A computer-technológia, vagy a távközlési módszerek ma már mindenütt elterjedt átalakulását, így például az okos telefonok világméretű elterjedését is ezek a tudományos eredmények alapozták meg. Vagy gondoljunk a világítástechnológia forradalmi megújulására. A LED-es világítás alapjait is fizikai laboratóriumokban kísérletezték ki. Az anyagtudományban az elmúlt évtizedekben igazi tudományos forradalom zajlott le. Az új, igen sokszor először elméleti munkával megtervezett és ténylegesen csak később előállított anyagok sok területen alapvetően alakították át a mindennapokban használt eszközeinket. Izgalmas újdonságokat hoz a mai fizikai kutatások egyik kiemelten érdekes területe, a nanotechnológia a maga eddig soha nem látott tulajdonságú felületeivel, anyagminőségeivel.

Az élettudományok és azon belül a biológia területén az új ismeretek megfejténi látszanak az életjelenségek és a biológiai folyamatok fiziológiai és genetikai hátterét. Ez, párosodva a biológia egyéb területein begyűjtött újabb ismeretekkel, nagy mértékben átalakította többek között az orvostudomány vagy az agrártudomány területét is. Ide tartoznak olyan, vitatott hatású, de intellektuálisan kétségtelenül figyelemre méltó ismeretek, amelyek a genetikailag módosított szervezetek (GMO – növények, állatok, mikroorganizmusok) előállításával, klónozásával függenek össze.

Korunk átlagemberének – valószínűleg – leginkább az orvostudomány fejlődése szembeötlő, talán itt a legnagyobb az érezhető változás. A gyógyítási módszerek vitathatatlan átalakulása olyan betegségek leküzdését teszi lehetővé, amelyekből korábban a felépülés lehetetlennek látszott. Mindezeket az eljárásokat új gyógyszerek alkalmazása is segíti. Ráadásul a többség számára is elérhetővé váltak olyan diagnosztikai eljárások, amelyek a fizikai módszerekre épülve részletes bepillantást adnak a vizsgált személy testébe – annak roncsolása nélkül. Itt például a CT- (computer tomográfiára), az MR- (mágneses rezonancia képalkotásra), vagy a PET- (pozitronemissziós tomográfiára) vizsgálatokra gondolunk.

A földtudományok is jelentős mértékben fejlődtek. Ezt elsősorban a teljesen megújult, a földtudományokban alkalmazott vizsgálati technikáknak köszönhetjük. Ma sokkal többet tudunk a Föld mélyéről, mint pár évtizeddel ezelőtt. Így például a földgázellátást az Egyesült Államokban megújító palagáz mezők felfedezése és kitermelése óriási mértékben megváltoztatta a fosszilis energiahordozókkal kapcsolatos elképzeléseinket. De a geográfia is átalakult. A táj gyors tér-idő változása, ipari létesítmények telepítése, úthálózatok létesítése, a bányászat átalakulása, vagy a nagyvárosok terjeszkedése megváltoztatta földrajzi és ökológiai környezetünket. Az átalakulások tudományos értékelése, a következtetések levonása, a jövő településeinek megtervezése a földrajztudományt is nagy kihívás elé állítja.

Hogyan érthetjük meg a ma minket körülvevő világot? Nyilvánvaló, hogy a természettudományok alapjainak megértése nélkül még tájékozódunk sem le-

het napjaink új világában. Az oktatók, a tanárok kezében van az ismeretátadás kulcsa. Nekik olyan tudást kell átadniuk a következő generációknak, amely képessé teszi a fiatalokat arra, hogy a társadalom felelős, tájékozott tagjaivá váljanak. A természettudományok magas színvonalú, a legfontosabb alapokra koncentráló oktatása nélkül elképzelhetetlen a következő generációk új világ jelenségei között való tájékozódása.

Az emberiség mai problémái

Mindaz, amiről eddig gondolkoztunk azzal foglalkozott, hogy az elmúlt pár évtizedben, ilyen történelmi mértékben igen rövid idő alatt milyen mértékben változott meg a világ körülöttünk. Azt is láttuk, hogy milyen sok ismeretre van szükségünk már csak ahhoz is, hogy ezeket a változásokat megértsük, követni tudjuk.

A változások azonban nem csak az élővilágunkat alakították át, hanem olyan folyamatokat is elindítottak, amelyek következményei elkerülhetetlennek látszanak és sajnos nem sok jót ígérnek. Természetesen szembe kell néznünk ezekkel a problémákkal, és keresnünk kell a számunkra, a nagyobb közösség számára optimális megoldásokat [1].

A problémák, válsághelyzetek mindig a társadalmi lét természetes velejárói voltak. A közösségek feladata, hogy a felmerülő nehézségeket közösen elfogadott szabályok szerint, a többség számára legjobb módon megoldja. A problémák megoldására a ma általánosan elterjedt, sikeresnek tartott társadalmi modell a többségi véleményen alapuló demokratikus módszereket dolgozta ki. E szerint a társadalom működésében felmerülő problémákat – a rendelkezésre álló tudományos ismeretek keretein belül – felelősen, szakszerűen meg kell vizsgálni, rögzíteni kell a tényállásokat, ki kell dolgozni a lehetséges megoldások különböző változatait és a közösség tagjait az ismeretek feltárásával döntéshelyzetbe hozva, demokratikus többséggel kell kiválasztani a probléma megoldásának elhatározott módját.

A ma felmerülő súlyos és néhány esetben sürgősen megoldandó problémák – konzervatív becslés szerint is – több mint fele, de egyes szakemberek szerint akár túlnyomó többsége is a környezettel, annak védelmével, kutatásával, fenntartásával és a helyreállítással kapcsolatos [2]. A problémák olyanok, hogy biztosan nem elegendő egy-egy szakterület, a természet-, illetve a társadalomtudományok – mint például a biológia, a fizika, a földrajz, a földtudományok és a kémia, illetve a közgazdaságtan, gazdaságföldrajz, társadalomföldrajz, demográfia, szociológia, urbanisztika, humánökológia valamennyire kibővített tárgyalása – területén azok tanításához-megismertetéséhez, illetve a kezeléséhez-megoldásához.

A következőkben – hangsúlyozottan a teljesség igénye nélkül, a külön csoportosítást is elkerülve – olyan témákat sorolunk fel, amelyek környezeti jellegük miatt legalább két-három, az előbbieken értel-

mezett szakterülethez tartozó ismereteket igényelnek a velük kapcsolatos problémák kifejtéséhez és kezeléséhez. Így ezek nyilvánvalóan nem tárgyalhatók csak a klasszikus természet- vagy társadalomtudományi szaktárgyak körében.

- Ivóvízkérdés, vízellátás,
- népességrobbanás és lehetséges következményei,
- a globális méretűvé váló migrációs folyamatok okai és lehetséges következményei, kezelésük kérdései,
- a társadalom, nagyobb közösségek biztonságos energiaellátása,
- az energiatermelési módok áttekintése és kritikai összehasonlítása,
- a megújulóenergia-termelési módok környezeti hatásai,
- az atomenergetika alkalmazásának előnyei és veszélyei,
- a természeti erőforrások kimerítése, illetve fenntartható felhasználása,
- óceánok, tengerek állapotának hatása a környezetre,
- a légkör és a világtengerek kölcsönhatásai,
- a biodiverzitás változásai, illetve csökkenése és következményei,
- tájdegradáció, természetközeli élőhelyek fragmentációja és izolációja,
- az ökológiai lábnyom, vagyis azon terület nagyságának növekedése, amelyre egy emberi közösség és életszínvonala fenntartásához szükség lenne,
- hulladék, veszélyes hulladék kezelése,
- levegőszennyezés,
- klímaváltozás és hatása globális és regionális szinten,
- ózonréteg elvékonyodása,
- a zaj és a zajterhelés általános növekedése, kezelése és társadalmi hatásai,
- urbanizáció, élhető város, várostervezés, városrendezés,
- talajdegradáció és talajpusztulás,
- környezeti sugárzások és hatásuk a biológiai rendszerekre,
- a közlekedés szervezése, fenntarthatósága,
- katasztrófák hibás emberi döntések miatt.

Ezek a témák mind olyanok, hogy a környezeti képzésre, ismeretterjesztésre tett külön intézkedés nélkül az oktatásban, ismeretterjesztésben nem, vagy legfeljebb csak felszínesen kerülhetnek szóba. Ugyanakkor feltétlenül szükségesnek tartjuk, hogy a szélesebb közösség minden egyes tagja a súlyának megfelelő módon és helyes szemlélettel ismerkedjen meg ezekkel – a több esetben is fenyegető következményekkel járó – problémákkal.

Az előbbi, csak multidiszciplináris szemlélettel tárgyalható témák zöme olyan, hogy a kortárs közösségekben élő emberek többsége néhányról már feltétlenül hallott-olvasott, vagy a televízióban látott velük kapcsolatos anyagokat. A témák, bár együttesen ritkán tárgyalják őket, általában napirenden vannak a tudományos műhelyek kutatási területeitől a napi politikai csatározásokig. Napjainkra már mindegyik problémának óriási az irodalma, amelyek áttekintése

is nagy munkát igényel. Ráadásul mindegyik problémakör olyan, hogy velük kapcsolatban – szinte állandóan – új ismeretek merülnek fel, amelyek még kevésbé átláthatóvá teszik a rendezett tudást.

Megjegyzések néhány kiemelkedő környezeti problémához

A következőkben, a példa kedvéért, három területre fogunk elemző megjegyzéseket tenni. Célunk, hogy bemutassuk a problémák meg nem oldásakor fellépő veszedelmeket, a veszélyek elhárításához szükséges ismeretek jellegét. Úgy gondoljuk helyesnek, ha az egyik probléma, amihez megjegyzéseket teszünk az az emberiség következő évtizedeinek egyik sorskérdése, az emberi társadalmak biztonságos energiaellátása, a másik a természeti környezetünk figyelemre méltó problémája, a biodiverzitás csökkenése lehet. Végül egy olyan katasztrófát tárgyalunk, amire felelős döntéshozók hibás elhatározásai miatt került sor. Mindhárom kiválasztott esetben a komplex, multidiszciplináris megközelítésre tesszük a hangsúlyt.

A társadalom biztonságos energiaellátása, a megújulóenergia-termelési módok környezeti hatásai és az atomenergia szerepe

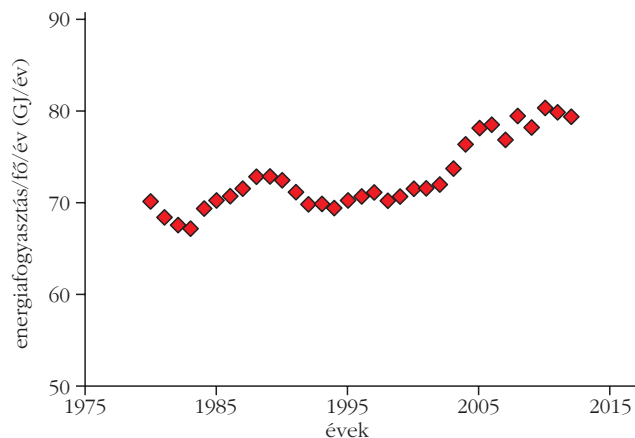
A biztonságos és folyamatos energiaellátás a társadalom működtetésének alapvető feltétele. A civilizált élet minden mozzanatához energiára van szükség, amely összességében már jelenleg is hatalmas. Túlzás nélkül állíthatjuk, hogy a közösségek energiaellátása az emberiség egyik sorskérdése.

Ugyanakkor négy évtizede, az 1973-as első energiválság óta minden döntéshozó tudja, hogy az energiaellátás jelenlegi, főleg az ásványi energiahordozókra épülő rendszere sok ok miatt (így például a források korlátai, környezeti szempontok) is fenntarthatatlan. A világ energiafogyasztása ennek ellenére az elmúlt négy évtizedben folyamatosan nőtt és napjainkra a földi társadalmak fogyasztása megközelítette az óriási, ~540 EJ¹ értéket. Ez mintegy 80%-kal magasabb az 1980-as ~300 EJ fogyasztásnál. Ráadásul a fosszilis energiahordozók részaránya a megtermelt energiából már egy évszázada érdemben nem változik, most is 80 és 85% között van.

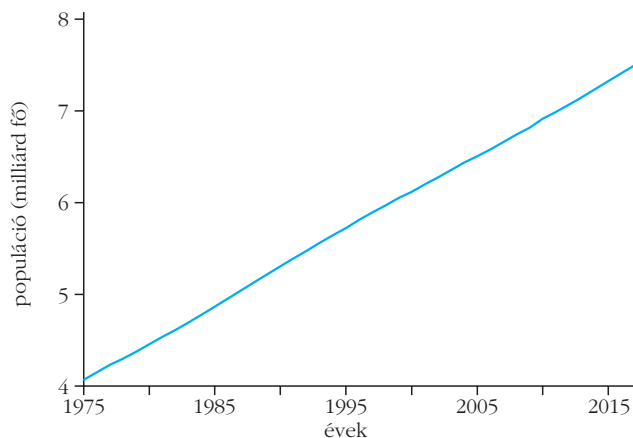
Mi az oka az energiafogyasztás növekedésének? A vizsgálatok azt találták, hogy az egyetlen paraméter, amivel az energiafogyasztás immár három és fél évtizede erős korrelációt mutat: az emberek száma! Bármilyen meglepő, az egy főre eső átlagos energiafogyasztás három évtizede alig változott (1. ábra), legfeljebb kis mértékben – (1-2%)/évtized – növekedett, és néhány százeleken belül 70-75 GJ/fő/év körül mozog [3].

Ma (2017) 7,5 milliárd ember él a Földön (2. ábra). Ez a szám évente körülbelül 70 millióval növekszik. Ezt összevetve az előzőekkel látszik, hogy a világ

¹ EJ (exajoule) = 10¹⁸ J.



1. ábra. A fejenkénti energiafogyasztás változása 1980 és 2012 között (forrás [3] és hivatkozásai).



2. ábra. A populáció növekedése az elmúlt 40 évben (forrás: Wikipedia).

népességének növekedése miatt energiaigény-csökkenés a következő évtizedekben valószínűleg nem érhető el. A jelenlegi, ásványi forrásokra alapozott energiaellátó rendszerek azonban bizonyosan nem tarthatók fenn sokáig, szükség van más, a megújuló energiaforrások és az atomenergia széleskörű alkalmazására [3].

Megújuló energiaforrások

A *napenergia* hasznosításának fő területei a következők: a) az aktív szoláris termikus rendszerek, b) a mezőgazdasági termikus alkalmazások, c) a szoláris fotovoltai rendszerek energetikai célú hasznosításra, d) passzív szoláris termikus rendszerek. Az elemzés azt mutatja, hogy a fenti lehetőségek mindegyikének létjogosultsága van és megfelelő kihasználás esetén az energiaigények jelentős részét fedezhetné. Mindezzel szemben áll, hogy a napenergia alkalmazása óriási területek felhasználását igényli. Egy kanadai (Sandia, Ontario) fotovoltai naperőmű 80 MW_{csúcs} kapacitással átlagosan 13,7 MW_e teljesítménnyel működött 2011-ben és ehhez 1 km² területet vett igénybe. Ráadásul napenergia műszaki-gazdasági kultúrája csak napjainkban alakul ki a közép-európai térségben. Gazdaságilag egyelőre mérsékeltlen vonzó alternatívának tűnik. A tudatos fejlesztéshez ki kell dolgozni a klímapolitikai célkitűzéseket, miközben vizsgálni kell a környezeti hatásokat is.

A *vízenergia* igazi megújuló energia, amelyet energetikai célokra már régóta felhasználnak. Jelenleg az összes megtermelt elektromos energia 16%-át vízenergia segítségével állítják elő.

A vízenergia előnyei közé tartozik, hogy működtetése alacsony költségek mellett folyhat és egy vízerőmű élettartama hosszú. Ráadásul ez régen alkalmazott, ismert és bevált technológia. A vízerőművek külön előnye, hogy hasznos elemei a nagy elektromos hálózatoknak. A gátak az árvízvédelem kipróbált segítői és a folyami hajózást is elősegítik. Környezetkímélő abból a szempontból, nincs közvetlen széndioxid-kibocsátása. Trópusi és szubtrópusi viszonyok között azonban a duzzasztott tóban kialakuló, esetleg buja vízinövényfőméreg szerepet játszhat a széndioxid-kibocsátásban.

A folyókon gátakkal megépített erőműveknek azonban jelentős hátrányai és figyelemre méltó környezeti hatásai vannak. Gazdasági jellegű hátrány, hogy az építkezések nagy kiterjedésűek, sok tőkét kötnek le, az erőművek csak lassan épülnek meg. A folyami gátak fölött nagy vízfelületek (tározóterek) jönnek létre, amelyek sok embert érinthetnek akár úgy is, hogy lakóhelyüket el kell hagyniuk. A megváltozott vízügyi körülmények új vízhasználati és földhasználati módok kialakítását teszi szükségessé. Nyilvánvaló, hogy komoly ökológiai károk keletkezhetnek. A duzzasztott vízfelületek addig összefüggő élőhelyeket választanak el egymástól, megváltozik a vízjárás és a vízi élőhelyek is átalakulnak. A vízminőséget folyamatosan ellenőrizni szükséges és a halak vándorlását is külön biztosítani kell. Egy nagy teljesítményű vízerőmű hatalmas területre kiterjedő talajvízszint-változást okozhat.

Fontos lenne a szivattyús vízerőművek telepítése kérdésének megvizsgálása. Ezeket is figyelembe véve a vízerőművek jelentős szabályozó szerepet töltenek be az elektromos hálózatok működtetésében.

A *biotömeg* energetikai felhasználásában sokan nagy lehetőségeket látnak. Ezt arra alapozzák, hogy a sok ország felesleges agrárpotenciáljának egy részét erre a célra lehetne alkalmazni. A lehetőségek azonban korlátozottak. A biomassza energiatartalma a különböző növényfajok esetén csak mintegy 10%-os eltérést mutat, a termőföld energetikai hasznosításában jelentkező tényleges különbséget a hozamok közötti eltérések okozzák. Az elemzések azt mutatják, hogy jelentős mennyiségű energia megtermeléséhez rendkívül nagy területekről kellene összegyűjteni a növényi biomasszát. Így például egy 1 MW teljesítményű, folyamatosan működő elektromos erőmű táplálásához ~600-1500 hektárnyi földterület termését kellene begyűjteni.

Hibás energiapolitikával akár rablógazdálkodásra (például erdők tarvágása) is készíthetjük az alkalmazókat. Ezen túlmenően a földhasználat egy sor további jogi és közigazgatási problémát is felvet. Ráadásul mindvégig megoldatlan maradhat az élelem- és az energia-termelés szembeállításának súlyos etikai kérdése.

Fentiekén túl az energiaültetvények – mind a fás, mind a lágyszárú növények esetén – komoly természetvédelmi problémákat vetnek fel nemcsak hazánkban, hanem szerte a világban. Tudni kell, hogy Közép-Európa eredeti vegetációjának mára csupán mintegy ~15%-a maradt fenn. Így például hazánkról a Magyarország Élőhelyeinek Térképi Adatbázisa (MÉTA) program keretében kiderült, hogy a természetes növényzet – mennyiségileg és minőségileg egyaránt – évente egy százalékkal fogyatkozik. Noha az ilyen pusztulás csekélynek tűnik, ám ez azt jelenti, hogy hatvan-hetven év múlva a jelenlegi természetes növényzet mintegy 75 százaléka eltűnik.

Mindezt alapvetően a tájidegen, gyakran invazív váló, úgynevezett özönnövények gyors terjedése okozza. Ezek közül régóta ismertek az idegen kontinensekről behurcolt fajok. Ilyenek például az Észak-Amerikából származó akác, parlagfű, amerikai kőris, zöld juhar és a gyalogakác, vagy a keletről érkezett japán keserűfű és a kaukázusi medvetalp. Az ártéri ligeterdőkben és egyéb vizes élőhelyeken egyre nagyobb teret hódít el az őshonos nyárfától és fűzektől – az amerikai kőrisen és zöld juharon kívül – az energetikai célokra telepített gyorsan növő hibrid nyárak és fűzfélék (3. ábra). Ezek az „energiaerdők”, amelyek egyidős nemesített egyedekből, számos esetben klónokból állnak, gyakorlatilag monokultúrák, kis biodiverzitással rendelkeznek, és lágyszárú szintjükben a természetvédelmi szempontból rendkívül káros tájidegen özönfajok uralkodnak.

A lágyszárú energianövényeknél a fűfélék közül több országban – mások mellett – a *Miscanthus* fajtákat termesztik, míg Magyarországon a Szarvasi-1 (*Elymus elongatus* cv Szarvasi-1) növénnyel folynak kísérletek. Ez a növény az Alföld szikes talajú területeiről, illetve Közép-Ázsia száraz térségeiből begyűjtött növényanyagok keresztezésével jött létre és nagy variabilitást mutat. Tarackféle lévén – vegetatív úton – gyorsan terjeszkedik, emellett nagy maghozammal is rendelkezik, így fertőzi a védett területeket és a ter-

3. ábra. Energiaültetvény tájérték szempontjából kevés értékű monokultúrák kialakulásához vezet. A telepített nyárerdő lágyszárú szintjében uralkodik a tájidegen magas aranyvessző (*Solidago gigantea*).



mészetes élőhelyeket. Agresszív terjeszkedése és nagy ökológiai tűrőképessége miatt kiszorítja a természetes növényzetet, megjelenését természetvédelmi szempontból sokan rendkívül károsnak tartják.

A szélenergia felhasználása a tengerekhez közel eső területeken kedvező tapasztalatokat hozott, azoktól távol az alkalmazásnak természetes korlátai vannak. Összességében: a teljes energiaigény néhány százalékanak szélenergiával történő előállítása – hosszabb fejlesztés után – reálisnak tűnik. A jelenlegi szélerőművi kapacitás ingadozásai kicsik az egyéb ingadozások mellett. Ráadásul elképzelhető, hogy arra alkalmas helyeken a vízerőművekkel való szoros vezérlési kapcsolatot lehet megvalósítani. Ez szép példája lenne különböző földrajzi régiók együttműködésének.

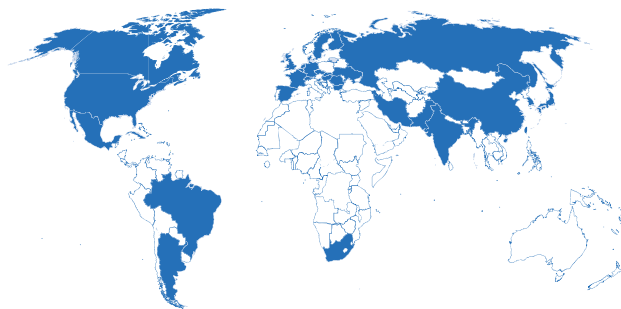
Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy egy sor megújuló forrásról bizonyították be, hogy alkalmas jelentős mennyiségű energia megtermelésére [4]. Az elemzések közül azonban az is látszik, hogy a közel teljes energiaigény kielégítése csak a megújuló források alkalmazásával a következő 30-50 évben valószínűleg nem érhető el.

Ugyanakkor jelentős energia megtermelése mindig komoly tájökológiai és környezeti hatásokkal jár. Ez nagy mennyiségű, egészségre, környezetre káros anyag kibocsátásában, veszélyes hulladékok keletkezésében, igen nagy területek igénybevételeiben nyilvánul meg. Fontos azonban emlékezni, hogy az egyes energiafajták összehasonlításánál az elemzéseket az azonos megtermelt energiára kell elvégezni [4].

Az atomenergia széleskörű felhasználása

Az előbb tárgyalt megújuló energiaforrásokon kívül egyedül a hasadós magenergia tud olyan technológiát kínálni, amely nagy mennyiségű, emberi felhasználásra alkalmas energiát képes termelni. A nukleáris energetika már most komoly részarányt képvisel az energiaellátásban (4. ábra), hiszen az összes megtermelt elektromos energia mintegy 11%-át (5. ábra) a jelenlegi 447 atomreaktor termeli (2017. március). Ráadásul az atomenergia egy olyan energiatermelési módot jelent, amely egyáltalán nem bocsát ki klímaváltozás folyamatait elősegítő széndioxidot. A nukleáris energia egy olyan technológiát testesít meg, amely alapvetően különbözik minden más alkalmazott energiatermelési módtól.

4. ábra. Országok, amelyekben jelenleg is működik atomerőmű.



A nukleárisenergia-termelés értékelésekor több komoly aggodalom is felmerülhet. Ezeket a fenntartásokat a legegyszerűbben a nukleáris fűtőanyag útjának vázlatos követésével mutathatjuk be.

Az eddig megépített atomerőművekben az energiát néhány, igen nehéz atommag (ilyenek például a ^{235}U , ^{239}Pu) két kisebb atommaggá történő elhasadásakor felszabaduló reakcióhő adja. Ez az energia olyan nagy, hogy mintegy 5-6 nagyságrenddel felülmúlja

az azonos tömegű anyagok kémiai reakciójánál felszabaduló energiákat. Magát a hasadást neutronokkal váltjuk ki. Tekintettel arra, hogy a hasadásnál neutronok keletkeznek, az energiatermelés neutron-láncreakció formájában valósul meg. Az atomerőművek biztonságos működtetése éppen e láncreakció ellenőrzésével valósul meg.

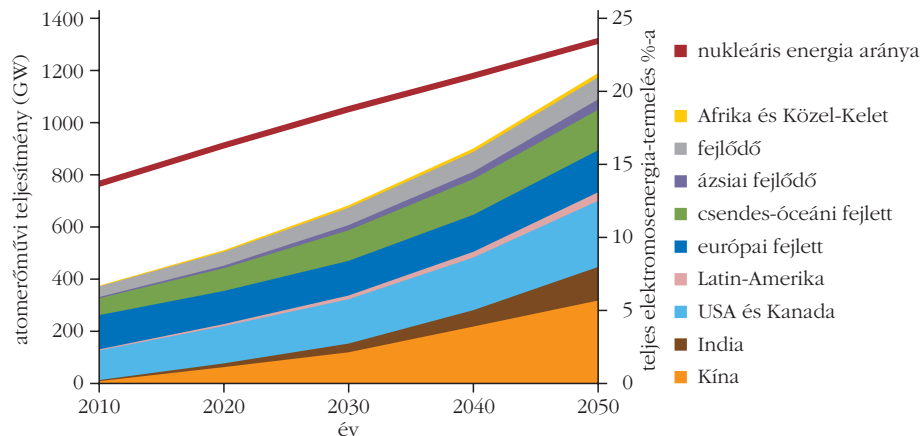
A nukleáris fűtőanyagciklus kiinduló pontja a hasadóanyagok előállítása. Ez az urán bányászását jelenti, ami különleges nehézségeket nem rejt magában. A fűtőanyag előállításának következő lépése az, hogy a természetben előforduló két uránizotóp (^{235}U , illetve ^{238}U) közül a hasadó könnyebb izotóp viszonylagos részarányát meg kell növelni, vagyis a 235-ös uránt dúsítani kell. Ez azért okoz problémát, mert minden olyan szervezet, amelyik dúsítani tud, végső soron atombombát is előállíthat. Ez pedig nemzetközi bizalom nélkül komoly feszültségek forrása.

A fűtőelemek a reaktor magjába kerülnek és velük beindulhat a nukleáris láncreakció. A reaktorok magjában hamarosan hatalmas aktivitások épülnek fel rendkívüli energiasűrűség mellett. Ezen a ponton hihetően biztosítani kell a reaktor a balesetmentes működtetését, vagyis azt, hogy a radioaktivitás nem kerül ki a bioszférába.

A fűtőelemekben a neutronokkal kiváltott magreakciók révén egy sor uránon túli izotóp, transzurán atommag termelődik. A hasadványok és a transzuránok elválasztása jelenti a fűtőelemek újrafeldolgozását. Itt az a nehézség merül fel, hogy mindazok, akik ezt végre tudják hajtani, atombomba előállítására alkalmas, hasadásra képes transzuránokhoz juthatnak.

Végezetül tudomásul kell venni, hogy a nukleáris fűtőanyag nagy aktivitású, hosszú felezési idejű transzuránokat tartalmaz, amelyeket igen hosszú időre (sok ezer évre) biztonságosan el kell zárni a bioszférától.

Az atomenergiával kapcsolatban felmerült problémák tárgyalásakor azonban hangsúlyozni kell, hogy – elsősorban a lényegesen nagyobb energiasűrűségek miatt – azonos megtermelt energiára vonatkoztatott hulladékok, tárolandó aktív anyagok mennyisége nagyságrenddel kisebb, mint más energiatermelő eljárásokban keletkezetté. A problémák jellege egészen más,



5. ábra. Előrejelzés az atomerőművi kapacitás változására (forrás: IEA/NEA).

mint a többi alkalmazásnál. Ma úgy tűnik, hogy a tudomány az atomenergia minden felmerült nehézségére kínál mérlegelhető megoldást és a társadalmi megítélés kérdése is, hogy mennyire fogadjuk meg ezeket. Mindenesetre a jövő reaktorainak a felmerült összes problémára alapos és meggyőző választ kell adniuk.

Az energiatermelés átalakítása, a megújuló energiaforrások és a körülményektől függően az atomenergia bevonása, az energiaipar megújítása sürgős és halaszthatatlan feladat. Ráadásul nincsen eleve ismert, a jó megoldás felé vezető út. Az energia legfeljebb átmenetileg lesz olcsó, és mindenkinek fel kell készülnie arra, hogy akár ténylegesen harcolni kell az energiáért, de a jelenlegi életszínvonal csökkenését valószínűleg el kell majd viselni. Ezt a küszöböt csak fegyelmezett, öntudatos csoportok lesznek képesek átlépni!

A biodiverzitás változásai, csökkenésének következményei

A biodiverzitás az 1992. évi Rio de Janeiróban megtartott ENSZ konferencia óta – *Biológiai Sokféleség Egyezmény*² gyakran használt nevén Riói egyezmény – korunk egyik kulcsszava, amely a görög biosz, illetve latin diversitas szavak jelentésének megfelelően a biológiai sokféleséget jelenti. Az értelmezésnél ide kell érteni mind a genetikai, egyedi, populációs, ökoszisztéma és táji szintű sokféleséget, és mindezt a szárazföldekre, tengerekre és édesvizekre is értelmezve. Mostanában a geográfusok és a geológusok a geodiverzitás vizsgálatával is egyre gyakrabban foglalkoznak. Ez a sokféleség a földtörténet során mindig változott, átalakult, így például a valaha élt fajok túlnyomó része mostanra kihalt. Maga a fajkihalás tehát természetes jelenség. A jelenkori fajkipusztulást a korábbi földtörténeti korokban tapasztaltaktól a kihalás sebessége – mely 100-szor, 1000-szer gyorsabb a korábbiaknál – különbözteti meg. A nagy kihalási hullám 65 millió évvel ezelőtt, ami a dinoszauruszok kihalásával is járt, földtörténeti szempontból „hirtelen” váltást jelentett az élővilágban, ténylegesen azonban több százezer év alatt játszódott le [5].

² Convention on Biological Diversity

A jelenlegi kihalási hullámnál más a helyzet. Elég, ha példaként csak néhány, sokak által jól ismert fajt idézünk. Ezek egyike a dodó galamb, mely Mauritius szigetéről tűnt el a gyarmatosítók által behurcolt ragadozók (kutya, macskák, patkányok stb.) miatt. Az észak-amerikai vándorgalamb³ egy másik ismert példa. Ezek néhány száz éve még óriási csapatokban vonultak, ám 1914-ben elpusztult az utolsó egyed is. A kihalás oka a vándorgalamb élőhelyeinek átalakítása (területcsökkenés, fragmentáció, izoláció), illetve a vadászat volt. A gyors kihalási ütem ezeknél, és más fajoknál is az emberi tevékenységekre vezethető vissza. Egyik legjelentősebb hatás az, amikor az érintetlen, természetes állapotú élőhelyeket mezőgazdasági területekké, faültetvényekké, infrastruktúrával lefedett területekké (település, zöldmezős beruházás, úthálózat) alakítanak át. Ez a veszélyforrás – a Föld lakosságának rohamos növekedésével – egyre jelentősebbé válik.

A biodiverzitás csökkenésének (újabbán már diverzitásvesztésről beszélünk) becslésekor-felmérésekor problémát jelent, hogy nem ismerjük a Föld bioszférájában élő fajok számát. A tudomány eddig mintegy 1,7 millió fajt írt le, ám a teljes fajkészletet egyesek minimum 5 millióra teszik, de vannak 15-50 milliós, vagy még ennél is magasabb becslések. A teljes fajszám tehát nem ismert, annak csökkenési üteme azonban jól becsülhető. Ismert ugyanis a fajszám-terület törvényszerűség, ami azt jósolja, hogy 100%-os terület-növekedés 20-30%-os fajszámnövekedést eredményez. Ez fordítva is igaz. Ha például a trópusi esőerdők 1%-át írjuk ki évente, az 0,25% fajszámcsökkenést okoz. 10 millió fajt feltételezve e rendkívül fajgazdag trópusi erdőkben, évente 25 000, azaz óránként három faj kipusztulásáért vagyunk felelősek! Az evolúció során új fajok is kialakulnak, de ezt a gyors kihalási sebességet képtelen ellensúlyozni [6].

A biodiverzitás alapvetően fontos az egész bioszférára, az élővilág „működtetéséhez”. Ez magába foglalja a fotoszintézis során megkötött energia révén létrehozott elsődleges produkciót (amelynek során szerves vegyületek, például cukrok képződnek), amely a fogyasztó (heterotróf) szervezetekben végbemenő lebontások folyamán energiává alakul, és lehetővé teszi az életet. Kísérleti parcellákba vetett eltérő fajszámú növénytársulások alapján kimutatták, hogy az elsődleges produkció nagyobb a fajgazdagabb helyeken. Ha tehát csökken a biodiverzitás, egyre kevesebb produktum (szerves anyag) keletkezik. Elsősorban a mező- és erdőgazdálkodás révén az élővilág által megtermelt anyag mintegy 40%-át használja fel jelenleg az emberiség. Amennyiben csökken a produkció és növekszik az emberiség által kisajátított arány, néhány évtizeden belül a természetes rendszerek műkö-

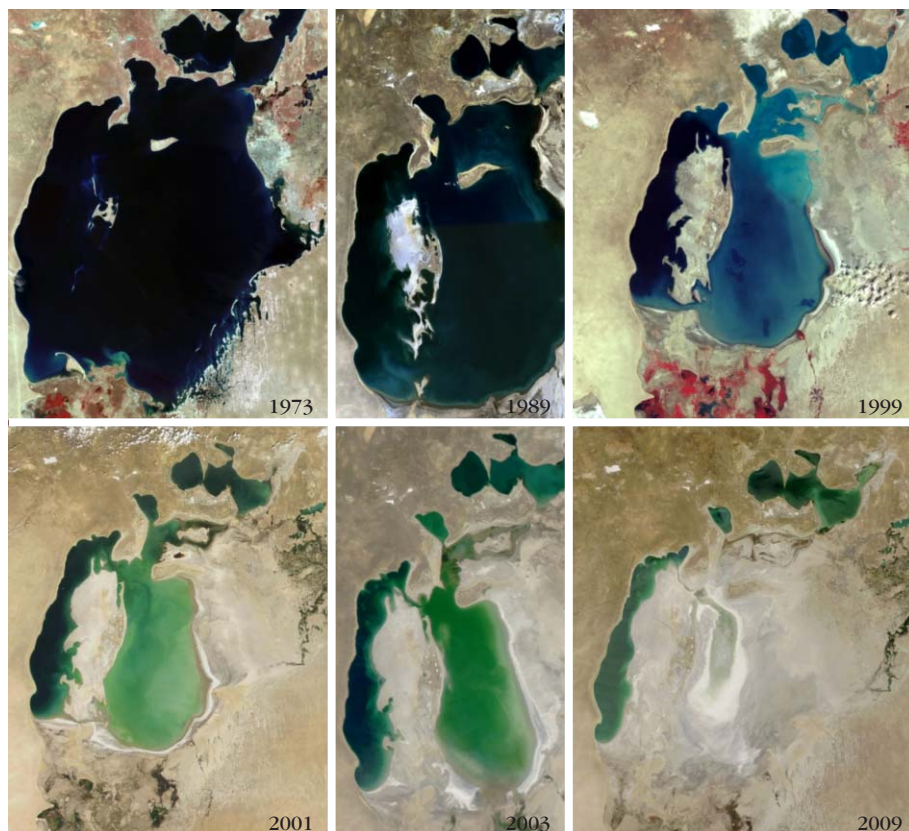
dése „üzemanyag” hiányában akadozni fog, azok jelentős mértékben átalakulnak, a Föld eltartó képessége rohamosan csökken és a jelenlegi emberi társadalmat nem fogja tudni eltartani.

A fentieken túl, a biodiverzitás csökkenésének számos egyéb olyan káros következményei is lehetnek, amelyek alig ismertek. Mennyire van a köztudatban például az, hogy a gyógyításra használt szerek 80%-a természetes eredetű, azaz különböző növényi, állati vagy mikrobiális forrásból származik? Ismert-e, hogy az emberiség által fogyasztott növényi termékek 75%-a a vadon élő rovarok beporzó tevékenységének köszönhető, ami pénzben kifejezve több, mint 100 milliárd euró szolgáltatást jelent évente? Tudjuk-e, hogy egy-egy földrajzi területen élő fajgazdag ízeltlábú rovarközösség a mezőgazdasági táblákon előforduló rovarkártevőket, például levéltetveket vissza tudja szorítani, míg egy monokultúrában, ahol a kártevőket vegyszerezéssel irtják, az jelentős mértékű környezetszennyezést eredményez? A példák sora szinte végtelen, hiszen a természet rengeteg „adománnyal”, más néven szolgáltatással (úgynevezett ökoszisztéma szolgáltatással) támogatja az emberiséget.

Az emberiség okozta biodiverzitás-csökkenést a szintén az emberiség által gerjesztett klímaváltozás csak tovább erősíti. Közvetve például a földhasználat-változás és a tájidegen inváziós fajok elterjedése hat negatívan a biodiverzitásra. Jelentősek a közvetlen hatások is, például az egyes fajok elterjedési területének változása, vagy a szaporodási időszak eltolódása. A melegebb, és egyre korábban kezdődő tavaszok miatt például az Afrika déli részén telelő vonuló madárfajaink nem érnek vissza, hogy a nekik optimális időben és élőhelyi viszonyok között rakjanak fészket. Ezzel szaporodási sikerük kisebb lesz, állományaik csökkennek.

A Kárpát-medencében és azon belül Magyarországon, csakúgy, mint sok más régióban is, az évezredes emberi jelenlét fokozatosan átalakította a környezetet. Ugyanakkor a nagyléptékű átalakítások, például a folyószabályozások csak a 19. században indultak meg, így addig egy gazdag, az emberi jelenlétéhez alkalmazkodó, sőt, azt már igénylő élővilág alakult ki. Gondoljunk például a Kárpát-medence pusztáira, amelyek a legeltetés miatt jöttek létre, és amelyek a legeltetés (vagy a kaszálás) hiányában elcserjésednek, így átalakulnak és idővel eltűnnek. A 20. század második felében a nagyüzemi mezőgazdálkodás, a műtrágya és egyéb vegyszerek használata miatt azonban számos faj állománya jelentősen csökkent. Például a magyar puszták nagytermetű madara, a tűzok mára mindössze 1500 példányban fordul elő Magyarországon. Az 1900-as évek elején a trianoni határokon belüli tűzokállományt 8000 körülre becsülték. A 20. század leg-
elején viszont még rendszeresen vadászták a fajt, a hivatalos statisztikák szerint évi 1000-4000 példányt lőttek ki. Az aktív természetvédelmi kezelésnek köszönhetően növekedett meg 1100 példányról 1500-ra az elmúlt évtizedekben. A 20. századi biodiverzitás-

³ A vándorgalamb múzeumi példányaiból kinyerhető gének és szirti galambok segítségével elképzelhető a kihalt faj „feltámasztása”. Erről írt a *National Geographic* magyar kiadása 2016. júniusi száma a 131. oldalon. Az írás a <https://www.scribd.com/document/348995700/National-geographic-2016-06-Szam-hun-Scan-ebook#download> webhelyen megtekinthető. (szerk.)



6. ábra. Műholdfelvételek az Aral-tóról 1973 és 2009 között. A vízfélület drámai zsugorodása nyilvánvaló.

tápláló folyók mentén öntöző csatornákat létesítsenek. Az öntözéssel a terméketlen Karakum-sivatag aszályos területein kívántak komoly mezőgazdaságot kiépíteni és többek között rizst, dinnyét és gyapotot termelni.

A csatornák megépültek, jelentősen csökkentve az Araltóba beszállított víz mennyiségét, anélkül, hogy számottevő mezőgazdasági termelés alakult volna ki az öntözött területeken.

2008-ra a tó elveszítette korábbi területének háromnegyed részét és vízmennyisége a pár évtizeddel azelőttinek tizedére csökkent (6. ábra). Az Aral-tó menthetetlenül elpusztul!

Az Aral-tó tragédiája embe-rileg is megrázó. Még sokan élnek azon halászok közül, akik egykoron a – most – homokban fekvő hajókon dolgoztak (7. ábra).

csökkenés ellenére – az Európai Unió legtöbb államához képest – Magyarország jelenlegi élővilág-állapota kedvező. Számos, Magyarországtól nyugatra eső területen zsugorodó állományú faj a Kárpát-medencében még jelentős számban fordul elő. Az uniós csatlakozás számos lehetőséget biztosít e gazdagság megőrzésére. Remélhetőleg sikerül élni velük az urbanizáció, az infrastruktúra-fejlesztések és a földhasználati változások kedvezőtlen hatása ellenére.

A 21. század során a biodiverzitás-csökkenés olyan globális mértékű problémát fog okozni az elsődleges produkció elégtelensége és az ökoszisztéma-szolgáltatások akadozása miatt, amely alapjaiban fogja megrengetni a Föld jelenlegi fogyasztói civilizációit.

Környezeti katasztrófa, amely hibás vezetői döntés miatt következett be: az Aral-tó drámai pusztulása

Az 1940-ben még 68 000 km² területű Aral-tó az akkori Szovjetunióban Kazahsztán, Üzbegisztán és Türkmenisztán határvidékén terült el. A tavat két bővizű folyó, délről az Amu Darja és keletről a Szir Darja táplálta. Az Aral-tó a világ negyedik legnagyobb sós tava volt. A tóhoz komoly gazdasági tevékenység kapcsolódott. Jelentős halászata eltartotta a ráépülő feldolgozó ipart és mintegy 30 000 embernek nyújtott megélhetést. Vízét több mint száz halászhajó járta, amelyek az akkori Szovjetunió haltermelésének egyhatodát adta.

Az 1940-es évek végén, az 1950-es évek elején a szovjet vezetés elfogadta azt a javaslatot, hogy a tavat

Élhető lesz-e környezetünk száz év múlva?

Az előbbi három, nem tendenciózusan kiválasztott példa áttekintéséből riasztó kép rajzolódik ki. Sajnos, *Az emberiség mai problémái* fejezetben megemlített, hangsúlyozottan csak példákat felhozó problémacso-mag bármelyik más elemét kiválasztva sem lenne lényegesen eltérő a kép. Vegyük sorra a felsorolt kör-

7. ábra. Elhagyott halászhajók az Aral-tó kiszáradt medrében.



nyezeti problémákat! Egyet kell értenünk abban, hogy amerre csak nézünk, komoly, kezelendő környezeti anomáliák, nehézségek sorát látjuk.

Napjainkban szédületes ütemben folyik környezeti átalakulása. Az alig követhető, napi szintű változás mellett a legnehezebb problémákat a környezetünk jövője oldaláról felmerülő kérdések vetik fel. A természeti erőforrások végesek és nem hosszú időn belül egészen biztosan beszűkülnek. A klíma nagy valószínűséggel meg fog változni. Ez magával hozza majd, hogy az elszaporodott emberiség jelentős része a tengerek által elöntött, vagy éppen az elsivatagosodott területekről, a valóban élehetetlen régiókból a szerencsésebb környezetű vidékek felé fog vándorolni.

Az előbb említett példák, de a legnagyobb környezeti problémák elemzése világosan utal arra, hogy az elmúlt évtizedekben nemcsak a világgazdaság globalizálódott, hanem az átalakulás során előhívott környezeti problémák zöme is. Nyilvánvaló, ezen környezeti veszélyeket csak nemzetközi erőfeszítésekkel lehetne kezelni.

Ugyanakkor a mai világban nincsenek az emberi törekvéseket összefogó erők. Még szervezetek is alig vannak az egy-egy kérdésben egységes álláspontok kialakításához. Ráadásul, az emberiség mély morális válságon megy keresztül. Kortársaink többségének morális színvonala alacsony, ami még a globálisan célszerű és végrehajtható javaslatok megvalósítását is majdnem lehetetlenné teszi. Nekünk úgy tűnik, hogy a társadalom minden szereplője – néhány kivétellel – úgy tesz, mintha csak rövid távú érdeke lenne. Az

egyének többsége csak az anyagi javakat akarja megszerezni és nekik a hosszú távú célok, erkölcsi megfontolások semmit nem számítanak. Az olyan kérdések, mint az emberiség jövője, a környezet, a Föld további sorsa a legtöbb emberben fel sem merül, élik világukat és csak igen távoli, zavaró rossznak tartják a józan kérdések felvetését.

Mindezek ellenére e sorok írói a Föld jövője szempontjából optimisták és vallják, hogy a Föld élhető marad a következő évszázadban is! Ennek alapja az, hogy hiszünk a tudomány hihetetlen erejében és hatékonyságában. A tudomány szinte minden probléma megoldásához segítségül hívható. Ha tömegesen leszünk képesek ezt felismerni, és a segítséget elfogadni, akkor még kiépíthető egy vékony palló, amelyen átmehetünk, hogy a jövő generációk környezete is élhető maradjon! Ehhez azonban már most óriási elszántságra és munkára van szükség.

Irodalom

1. D. H. Meadows, D. L. J. Randers, D. Meadows: *A növekedés határai – Harminc év múltán*. Kossuth Kiadó, Budapest, 2005.
2. Rakonczai J.: *Globális környezeti kihívásaink*. Universitas Szeged Kiadó, Szeged (2008) 19–163.
3. M. Szabó, Á. Kiss: Effects of renewable energy resources on the landscape. *Hungarian Geographical Bulletin* 63/1 (2014) 5–16. DOI: 10.15201/hungeobull.63.1.1.
4. Vajda Gy.: Energiaellátás ma és holnap – *Magyarország az ezredfordulón* sorozatban, MTA Társadalomtudományi Központ, (2004) 177–236.
5. Szabó M.: A bioszféra sokfélesége – az élővilág változatossága és veszélyeztetettsége. *Földrajzi Közlemények* 132/4 (2008) 441–449.
6. E. O. Wilson: *Az élet jövője*. Akkord Kiadó Kft. (2006) 288.

KRITIKUS DINAMIKA EGY NAGY EMBERI KONNEKTOMON

Ódor Géza

MTA-EK, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Kritikusság és Griffiths-fázisok hálózati modelleknél

Elméleti és kísérleti kutatások arra utalnak, hogy az agy többnyire egy aktív és inaktív fázist elválasztó kritikus állapot környékén működik [1]. A kritikus rendszerek optimális számítási képességekkel rendelkeznek, így ez az állapot hasznos az idegrendszer számára. Miután a kritikusság eléréséhez bizonyos kontrollparamétereket hangolni kell, felmerül a kérdés, hogy miként is történik ez. A probléma jól ismert

a statisztikus fizikában, és helyfüggetlen kölcsönhatású rendszerek esetében az úgynevezett önszerveződő kritikusság (SOC) elméletét vezették be [2]. Az SOC-s modellekben egy lassú és egy gyors folyamat versengésével a rendszer magát hangolja egy kritikus fázis-átalakulási pont köré. A kritikus pont környékén a fizikai mennyiségek hatványfüggvény-viselkedést mutatnak, és ha ilyen figyelnek meg, sokan – a fenti ver-

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.

Köszönöm C. C. Hilgetag, R. Juhász és M. A. Muñoz megjegyzéseit, W. Cota ábráját, Ódor Gergely konnektom-adatbázis felfedezését és dekódolását, az OCP projekt segítőkészségét, valamint NIIF HPC szuperszámítógépes támogatását. A kutatást az OTKA (K109577) támogatta.



Ódor Géza 1984-ben villamosmérnöki diplomát szerzett a BME-n. Azóta a KFKI területén levő, különböző nevűre átkeresztelt MTA kutatóintézetek kutatója. Fizikusi MSc-t 1993-ban Chicagóban, PhD-t 1996-ban az ELTE-n kapott. 2004 óta az MTA doktora. Kétszer 1 évig CERN kutatói ösztöndíjas volt. Jelenleg az MTA-EK MFA tudományos tanácsadója, több nemzetközi projekt tagja. Fő kutatási területe a nemegyensúlyi rendszerek statisztikus fizikája a rendezetlen és univerzális viselkedések vizsgálata.

sengő folyamatok azonosítása nélkül is – egyből SOC mechanizmusról beszélnek. Az önhangolást újabban evolúciós adaptáció eredményének is tulajdonítják.

A valódi rendszerek azonban általában erősen inhomogének, és először meg kellene győződnünk arról, hogy a homogén modellek alkalmazhatók-e rájuk. A heterogenitást a statisztikus fizikában rendezetlenségnek is szoktuk hívni, amikor ezekhez hasonlítjuk rendszereinket. Viszonylag gyenge és lokalizált rendezetlenség esetén ritka régió (RR) effektusokról szoktunk beszélni, amelyek azután elkenhetik a fázisátalakulást [3]. A ritka régiók – relevanciájuk szerint – különböző hatásúak lehetnek. Szakadós fázisátmenetet folytonossá tudnak tenni, úgynevezett Griffiths-fázisokat (GP) kelthetnek [4], vagy akár teljesen el is tüntethetnek egy fázisátalakulást. A GP lényege úgy foglалható össze, hogy a rendszer egyik globális állapotában lehetnek olyan RR-ek, amelyek ellenkező fázisban vannak, de járuléku mérhető. Ezek a nagy RR-ek lassan igazodnak a globális állapothoz és hatványfüggvény vagy még lassabb dinamikát okoznak – a kontrollparaméterek egy kiterjedt tartományában a kritikus pont környékén – a rendparaméterben. A GP-ben lassan bomló autokorrelációkat, ezáltal villanásos viselkedést is meg lehet figyelni [5]. Az agy gyorsmemóriájának egy lehetséges magyarázata is lehet a GP-s viselkedés [6]. Ezen felül a GP-ben a szuszceptibilitás divergál, így erős a stimulusokra való érzékenység, ami az információfeldolgozás szempontjából hasznos tulajdonság.

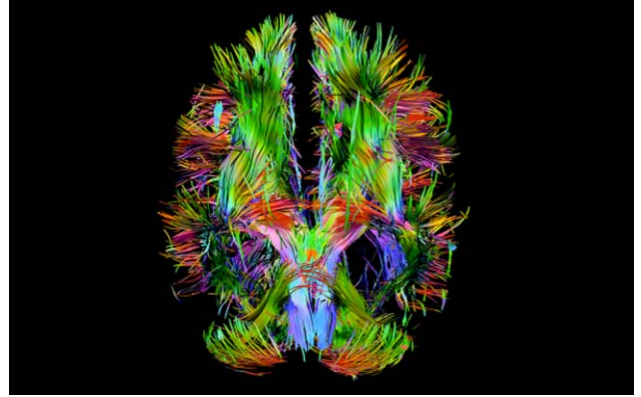
Ezáltal valós (neurális) rendszerek modellezésénél nagyon fontos szempont a heterogenitások figyelembevétele. Korábban a kontakt folyamat (CP) [7] hálózati dinamikájának tanulmányozása folytán az a hipotézis született [8], hogy a rendezetlenség csak véges gráf (topologikus) dimenzió D esetén okozhat GP-t. Itt D az euklideszi dimenzió általánosítása gráfcsomópont-távolságok esetére az alábbi relációban:

$$N_r \sim r^D,$$

ahol N_r azon j csomópontok száma, amelyek $r = d(i, j)$ lépésnél közelebb vannak egy tetszőleges i kezdőpont-hoz. Fenti hipotézisünk számos más terjedési modell esetén alátámasztást nyert [9], sőt véges méretű, skála-mentes hálózatok esetén is találhatunk hatványfüggvény-dinamikákat, véges időablakokban [10].

Konnektomok, modellek és módszerek

Napjainkban emberi konnektomokat (agyhálózati gráfokat) körülbelül 1 mm³-es felbontású, súlyozott diffúziós, funkcionális vagy strukturális MRI képek alapján lehet generálni. Az Open Connectome projekt (OCP) honlapjáról [11] DTI [12] módszerrel meghatározott gráfokat töltöttünk le (1. ábra) és topológiai szempontból analizáltuk. A DTI módszer lényege, hogy a vízmolekulák anizotróp áramlásából (a diffúziós tenzorból) következtet az axonkötegek pályájára,



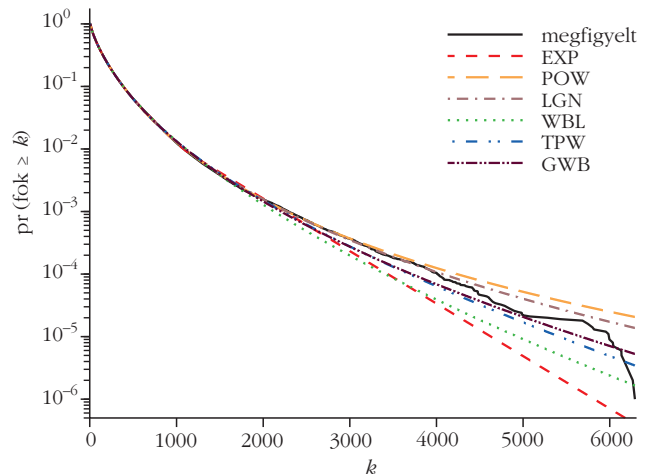
1. ábra. Agyhálózati konnektomkép DTI módszerrel [11].

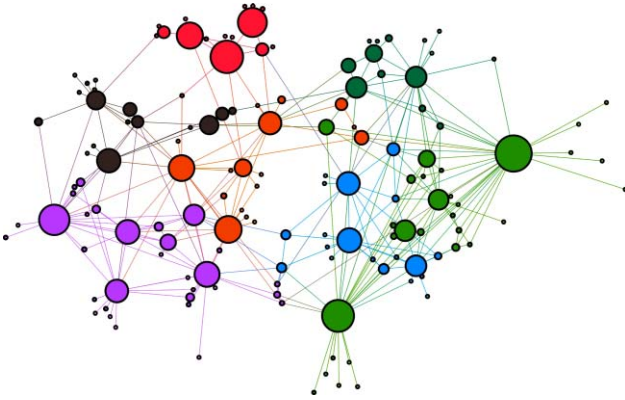
és állít elő egy térképet, amely megmutatja, hogy melyik terület melyikkel van összekötve. Ez – megfelelő szűrő és korrekciós algoritmusok alkalmazása után – egy irányítatlan, de súlyozott kapcsolati hálózatot eredményez.

Precíz módszerrel kimutattuk, hogy a fokszámoszlás nyújtott exponenciális alakú [13], tehát a skála-mentesség strukturális esetben ki van zárva (2. ábra). Megmutattuk, annak ellenére, hogy a kisvilág együttható nagyon nagy, a D gráfdimenzió kisebb 4-nél. Tehát ezek a hálózatok alapvetően a beágyazó $D = 3$ tér rövid távú kapcsolataival írhatók le, és a hosszú élek nem olyanok, hogy alapvetően tudják befolyásolni két pont topologikus távolságát. Azt is megmutattuk, hogy ezek a hálózatok robusztusak: a fenti eredmények még 20%-nyi (irányított) él eltávolítása után sem változnak. Ez azért fontos eredmény, mert arra utal, hogy állításaink túlnyomó része akkor is igaz marad, ha kiderül, hogy a konnektomok meghatározása pontatlan.

Az egyik ilyen, úgynevezett KKI-18-as jelű, konnektomon végeztem dinamikus modellszimulációkat. Ez a hálózat egy $N = 836\,733$ csomópontszámú, összefüggő, óriás komponenssel rendelkezik, amelyet 41 523 931 irányítatlan, de súlyozott él köt össze. Az élsúlyok eloszlása igen inhomogén, $w_{ij} = 1$ és $w_{ij} = 854$ között változik. Egy hálózat analizáló algoritmus 144

2. ábra. A KKI-18-as gráf fokszámoszlása és különböző, legjobban illeszkedő modellek becslései [13].





3. ábra. A KKI-18-as konnektom moduljai. A karikák mérete a csomópontok számával arányos. Köszönettel W. Cota-nak.

modult azonosított, amelyek közül a legkisebb 8, a legnagyobb 35 202 csomópontot tartalmaz (3. ábra). Fontos megjegyezni, hogy a csomópontok önmagukban 10^4 - 10^5 neuronból állhatnak, kiadván ezzel az emberi agy körülbelül 10^{11} idegsejtjét.

A valósághoz jobban hasonlító agyhálózat vizsgálata érdekében az élek 20%-át véletlenszerűen eltávolítottam úgy, hogy a gráf a neuromérésekhez hasonló mértékben lett irányított. Később kiderült, hogy a szimulációk ezen csonkítás nélkül is kvalitatívan egyező eredményekhez vezetnek.

Egy két állapotú ($x_i = 0$ vagy 1) terjedési modellt alkalmaztam a neuroaktivitás leírására. Ebben az úgynevezett küszöbmodellben a csomópont bejövő éleinek súlyozott aktivitásösszege hasonlítódik össze egy küszöbértékkel:

$$\sum_j x_j w_{ij} > K. \quad (1)$$

A feltétel teljesülése esetén egy inaktív csomópont λ valószínűséggel aktiválódhat. Az aktív csomópontok a következő időlépésben v valószínűséggel inaktíválódnak. Az egyszerűség kedvéért agykutató kollegáktól [14] kölcsönzött stochasztikus sejtautomata-algoritmust használtam, amelyben az összes lehetséges csomópont szinkronfrissítése történik egymásra következő Monte Carlo-lépések (MCs) között.

A dinamikus szimulációkat egy véletlen csomópont aktiválásával kezdtem és a kialakuló folyamatot addig követtem, amíg az aktivitás fennmaradt, de legfeljebb 10^5 MCs időlépésig. Mértém a

$$\rho(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

átlagos aktivitást, a $P(t)$ túlélési valószínűséget és a kialakuló

$$s = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T x_i$$

aktivitási lavina méretét (itt T a lavina időhossza). A méréseket minden egyes λ , v és K kontrollparaméter esetén 10^5 – 10^7 független futásra átlagoltam.

Egy esetleges kritikus fázisátalakulási pontban a mért átlagok skálaviselkedést mutatnak, például a túlélési valószínűség aszimptotikusan

$$P(t) \propto t^{-\delta} \quad (2)$$

alakú, ahol δ az úgynevezett túlélési exponens. Ez skálarelációval kapcsolható össze a kísérletekben mért $\tau_i = 1 + \delta$ lavinaidőhossz exponenssel. Kritikuság esetén az aktív helyek száma

$$N(t) \propto t^\eta \quad (3)$$

módon, az η exponenssel jellemezhetően változik, ami a lavina méretet leíró exponenshez a

$$\tau = \frac{1 + \eta + 2\delta}{1 + \eta + \delta} \quad (4)$$

skálarelációval köthető. A skálázási korrekciók figyelembe vételéhez mértem a skálaexponensek effektív értékeit is, például:

$$\delta_{\text{eff}}(t) = -\frac{\ln P(t) - \ln P(t')}{\ln t - \ln t'}, \quad (5)$$

$t - t' = 8$ -as differenciát használva.

A küszöbmodellt vizsgálva az derült ki, hogy a kontrollparaméterek semmilyen kombinációja esetén sem alakul ki kritikus viselkedés, hanem a nagy súlyú

$$W_i = \sum_j w_{ij}$$

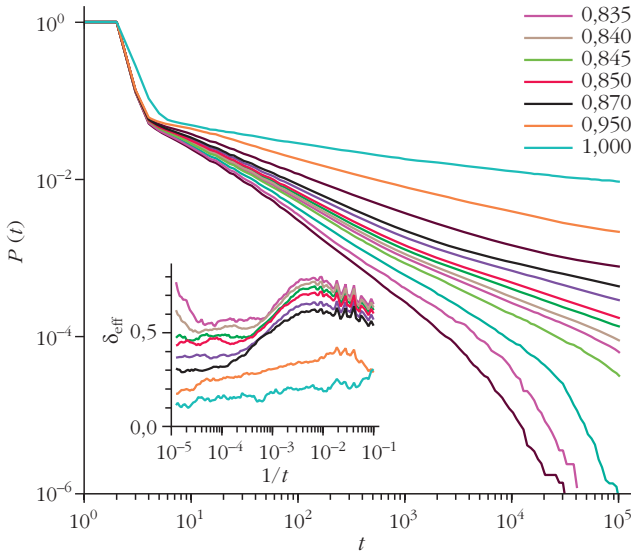
csomópontok („hub”-ok) pillanatok alatt felaktivizálódnak és tartósan dominálják a rendszert, vagy ha nem sikerül őket aktivizálni, a terjedés exponenciálisan rövid idő alatt kihál. Ez a szcenárió nem túl életszerű, mert a kisebb súlyú csomópontok szinte semmilyen szerepet nem tudnak játszani a folyamatban. Egy valós neurális hálózat esetén azt várjuk, hogy az összes neuronnak van valami szerepe. Ezért módosítottam a modellt, egy csomópontfüggő küszöb feltételezésével, ami gyakorlatban a bejövő súlyok normálását jelentette:

$$w'_{ij} = \frac{w_{ij}}{W_i}.$$

Ez a neuronok (vagy tartományok) homeosztázikus adaptációs érzékenységevel indokolható feltételezés, amelyre valóban vannak is jelek.

Variábilisküszöb-modell eredmények

A kontrollparaméterek olyan tartományát vizsgáltam, ahol $\lambda \approx 1$, ami hatékony jelterjedést biztosít, ugyanakkor fázisátmenet csak $K < 0,5$ esetén fordult elő. Ezért $K = 0,25$ -ot rögzítettem és a v vagy λ értékének variálásával kerestem a kritikus pontot, illetve annak környezetét. Mint a 4. ábrából kikövetkeztethető, ez $v = 0,95$ és $\lambda = 0,88(2)$ körül van. Felette a $P(t)$ gör-

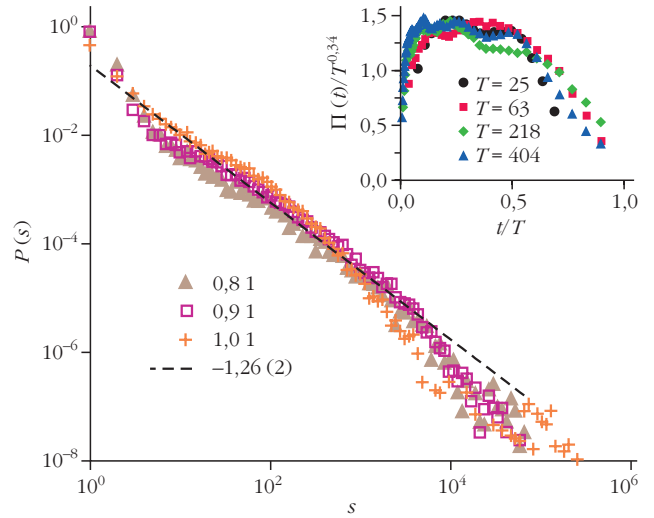
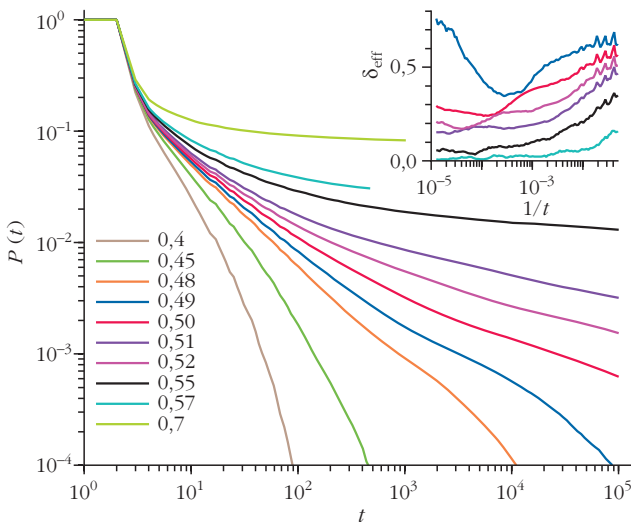


4. ábra. Túlélési valószínűség $K = 0,25$, $v = 0,95$ és $\lambda = 0,8, 0,81, 0,82, 0,83, 0,835, 0,84, 0,845, 0,85, 0,86, 0,87, 0,9, 0,95, 1$ (alulról felfelé). Kis ábra: effektív exponensek (5) $\lambda = 0,835$ -től $\lambda = 1$ -ig (felülről lefelé). A Griffiths-effektusok az $1/t \rightarrow 0$ limeszben konstanssá váló görbékben manifesztálódnak [17].

bék konstans értékhez tartanak, míg alatta ($0,845 < \lambda < 0,88$) változó kitevőjű hatványfüggvény-dinamikára, vagyis GP-re utalnak. A $\lambda = 1$ környékén megfigyelhető egyenes vonalak a lokális meredekségek $\ln(1/t)$ -s ábrázolásában ultra lassú kritikus dinamikára utalnak, akárcsak a 3-dimenziós CP erősen rendezetlen fixpontja [15] esetén. Fittelés $\lambda = 0,88$ -nál $P(t) \approx \ln(t^{-3,5(3)})$ aszimptotikus viselkedést eredményez.

Ebben a régióban a lavinaméret-eloszlások is hatványfüggvényfarokkal rendelkeznek, $\tau = 1,26(2)$ körül változó exponensekkel, ami kisebb, mint amit agyi elektródás kísérleteknél mértek: $\tau \approx 1,5$ [1]. Egy hullámoduláció is megfigyelhető a görbékben a moduláris hálózati struktúrának köszönhetően (5. ábra). Elektró-

6. ábra. Túlélési valószínűség 30% gátló élek és $K = 0,1$, $\lambda = 0,95$, valamint $v = 0,4, 0,45, 0,49, 0,5, 0,51, 0,52, 0,55, 0,57, 0,7$ (alulról felfelé) paraméterek esetén. Kis ábra: ezen görbék lokális meredekségei fordított sorrendben [17].



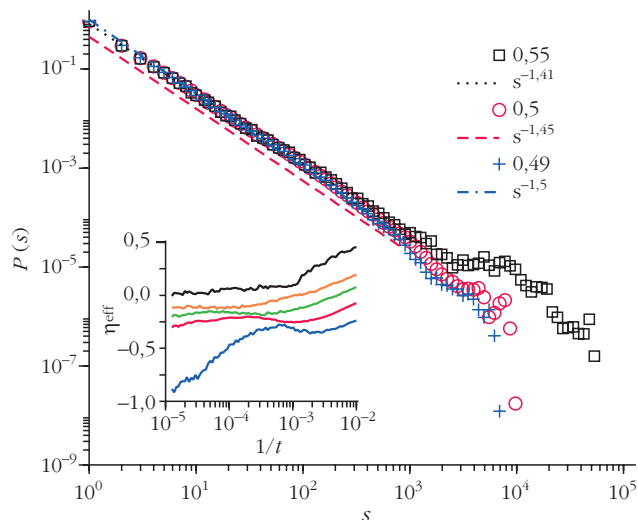
5. ábra. Lavinaméret-eloszlás $K = 0,25$, $v = 1$ és $\lambda = 1, 0,9, 0,8$ esetén. Szaggatott vonal: hatványfüggvényfit $\lambda = 0,8$ -re. Kis ábra: skálakollapszus $T = 25, 63, 218, 404$, valamint $\lambda = 0,86$, $v = 0,95$ esetén [17].

dás kísérleteknél és kritikus agymodelleknél fix T időre átlagolt lavinaméreték univerzális viselkedését skálakollapszussal szokták jellemezni [16]. Az 5. ábrán látható egy ilyen analízis is, amelyet $T = 25, 63, 218, 404$ időkre $\Pi(t)/T^{0,34}$ vertikális skálázással kaptam. Ezek az eredmények jól egyeznek a [16] cikkben említett kísérletekkel, sőt aszimmetrikus skálaformát mutatnak, amelyeket a [16]-beli modell nem tud reprodukálni.

Az eredeti, irányítatlan gráfot használva is hasonló GP-s dinamikát mutatnak a szimulációk, de ugyanazoknál a paramétereknél valamivel nagyobb az $\ln[P(\ln t)]$ és az $\ln[P(\ln s)]$ görbék meredeksége, vagyis a lavinák térben és időben is kisebbek az erősebb kötöttség esetén.

Azonban az igazi agyhálózatokban gátló mechanizmusok versengenek az ingerlőkkel. Ez a GP szempontjából azért is érdekes, mert emiatt a rendszer effektívgráf-dimenziója fragmentációs szétesés nélkül csökken. Ezt úgy modelleztem, hogy az élsúlyok bizonyos százalékát – a futások előtt – véletlenszerűen negatívra váltottam a konnektomban: $w'_{ij} = -w'_{ij}$. Ez spinüvegszerű extra heterogenitásokat és várhatóan erősebb RR effektusokat eredményez.

A 6. ábra mutatja a túlélési valószínűségeket, ha a linkek 30%-át gátlóvá tesszük $K = 0,1$ és $\lambda = 0,95$ paramétereknél. A kritikus pontot a lassú fejlődés és az oszcillációk miatt nehéz pontosan meghatározni, de $v = 0,57$ fölött a jelek perzisztens aktivitást mutatnak. Ez alatt és $v = 0,5$ felett a túlélési exponens folytonosan változik a $0 < \delta < 0,5$ tartományban. A lavinaméret-eloszlások hatványfüggvényfarkat mutatnak (7. ábra) $\tau \approx 1,5$ körüli exponenssel, ami közel van az agykutatás kísérleti értékeihez [1]. Ugyanakkor v -t mozgatva némi változást is láthatunk a GP-ben. Ez jobban látható az η -n, ami τ -hoz a (4) skálarelációval kötődik. 20% gátló él esetén ugyanezeket a τ -kat, míg 10%-os esetben $\tau \approx 1,3$ értékeket kapunk a kritikus pont környékén. Nagyobb küszöbértékeknél ($K = 0,2, 0,25$) a kritikus pont kisebb v -nél található, de a GP továbbra is jól látható.



7. ábra. Lavinaméret-eloszlás 30% gátló él és $K = 0,1$, $v = 0,95$, valamint $\lambda = 0,49, 0,5, 0,55$ esetén. Szaggatott vonal: hatványfüggvény-fittelés. Kis ábra: effektív η exponensek $\lambda = 0,49, 0,5, 0,51, 0,51, 0,55$ -ra (alulról felfelé) [17].

Konklúziók

A kritikussághoz való közelség optimális információfeldolgozást enged meg. A neurális változatosság hatékonyabbá teszi az agyműködést, ezért a heterogenitások hatását figyelembe kell venni a modellezésnél. A rendezetlenség GP-ket okozhat, de hogy ezt jól meg is tudjuk figyelni, nagy méretű konnektomokon kiterjedt szimulációk szükségesek, amelyek világossá teszik a végesméret-effektusoktól való eltéréseket. Az OCP projekt keretében elérhető körülbelül 10^6 csomópontos gráfok – HPC számítástechnikát alkalmazva – erre alkalmasak. A legegyszerűbb küszöbmodellek, azok túlságosan erős „hub”-jai miatt, annak ellenére nem mutatnak kritikus viselkedést ezeken a hálózatokon, hogy a vizsgált konnektomok nem skálamentesek és végtelen dimenziójúak. Viszont csomópontonként változó küszöbértékek esetén egyértelműen megjelennek a Griffiths-effektusok: lassú hatványfüggvény-dinamikák kiterjedt kontrollparaméter-térben, kritikus önszerveződés nélkül is [17]. Ez persze nem zárja ki, hogy a neurális hálózatok valamilyen önhangolást is

végezzenek. Mindenesetre dinamikus hatványfüggvényeket láthatunk a kritikus pont alatt, elkerülve ezzel a szuperkritikus, epileptikus állapotot is.

Az irányítottsági anizotrópia és a gátló élek hatásai nem bizonyultak releváns perturbációnak GP szempontjából. Korábban több konnektom topologikus hasonlóságát is kimutattuk [13], így a KKI-18-on elért eredmények univerzalitását várjuk. Ezek a gráfok robusztusaknak bizonyultak 20%-nyi véletlen (és irányított) élcsonkításra, ezért a DTI [12] mérési hibák valószínűleg érdemben nem befolyásolják eredményeinket. Kvázisztatikus érvényű vizsgálataink kiterjesztése időfüggő rendezetlenség esetre folyamatban van. Ebben a modellben ugyancsak érdekes kérdések a refraktív csomópontállapotok, vagy a plaszticitás hatásának felkutatása.

Irodalom

1. J. Beggs, D. Plenz: Neuronal avalanches in neocortical circuits. *J. Neurosci.* 23 (2003) 11167.
2. P. Bak, C. Tang, K. Wiesenfeld, *Phys. Rev. A* 38 (1988) 364.
3. T. Vojta: Rare region effects at classical, quantum and nonequilibrium phase transitions. *J. Physics A: Math. and Gen.* 39 (2006) R143.
4. R. B. Griffiths: Nonanalytic behavior above the critical point in a random Ising ferromagnet. *Phys. Rev. Lett.* 23 (1969) 17.
5. G. Ódor: Slow, bursty dynamics as a consequence of quenched network topologies. *Phys. Rev. E* 89 (2014) 042102.
6. S. Johnson, J. J. Torres, J. Marro: Robust short-term memory without synaptic learning. *PLoS ONE* 8(1) (2013) e50276.
7. T. E. Harris: Contact interactions on a lattice. *Ann. Prob.* 2 (1974) 969–988.
8. M. A. Muñoz, R. Juhász, C. Castellano, G. Ódor: Griffiths phases on complex networks. *Phys. Rev. Lett.* 105 (2010) 128701.
9. G. Ódor, R. Dickman, G. Ódor: Griffiths phases and localization in hierarchical modular networks. *Sci. Rep.* 5 (2015) 14451.
10. W. Cota, S. C. Ferreira, G. Ódor: Griffiths effects of the susceptible-infected-susceptible epidemic model on random power-law networks. *Phys. Rev. E* 93 (2016) 032322.
11. <http://www.openconnectomeproject.org>
12. B. A. Landman et al, *NeuroImage* 54 (2011) 2854–2866.
13. M. T. Gastner, G. Ódor: The topology of large Open Connectome networks for the human brain. *Sci. Rep.* 6 (2016) 27249.
14. M. Kaiser, C. C. Hilgetag: Optimal hierarchical modular topologies for producing limited sustained activation of neural networks. *Front. in Neuroinf.* 4 (2010) 8.
15. I. A. Kovács, F. Iglói, *Phys. Rev. B* 83 (2011) 174207.
16. N. Friedman et al, *Phys. Rev. Lett.* 108 (2012) 208102.
17. G. Ódor: Critical dynamics on a large human Open Connectome network. *Phys. Rev. E* 94 (2016) 062411.

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



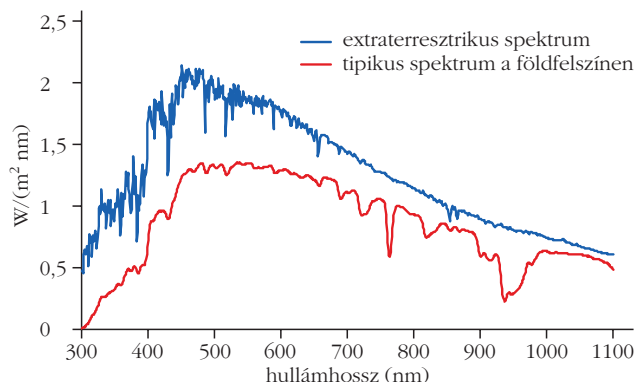
<https://www.facebook.com/pages/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/434140519998696?fref=ts>

A NAPBÓL ÉRKEZŐ ULTRAIBOLYA SUGÁRZÁS NAGY PONTOSSÁGÚ MÉRÉSÉNEK PROBLÉMÁI

Tóth Zoltán
Országos Meteorológiai Szolgálat
Marczell György Főobszervatórium

Az ultraibolya sugárzás hálózatszerű mérésének fontossága

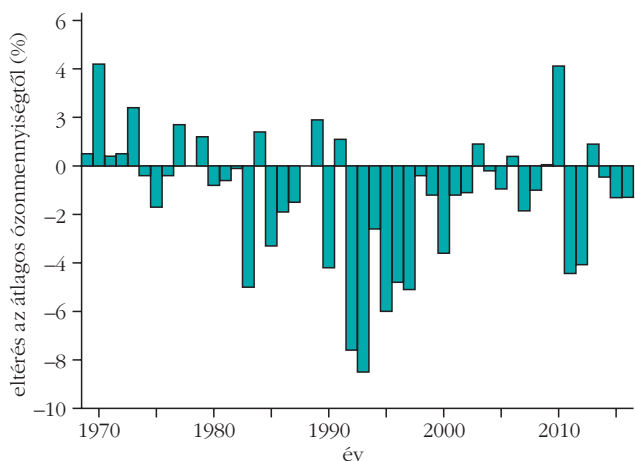
Az ultraibolya sugárzás a földfelszínre érkező napsugárzás töredéke, következésképpen nincs számottevő szerepe a légköri energiaháztartásban (1. ábra). Ennek következtében körülbelül három évtizeddel ezelőtt még nem szerepelt a napsugárzásmérő hálózatok mérési programjában, csak egyes helyeken kísérleti, kutatási jelleggel mérték rövidebb-hosszabb ideig az UV-sugárzást. A biológiai rendszerekre való hatása viszont óriási, de nem feledkezhetünk meg a különböző anyagokra gyakorolt roncsoló hatásáról sem. A sztratoszferikus ózon csökkenésének felfedezése adott lökést a nemzeti UV-sugárzásmérő hálózatok létrejöttének. Ismeretes, hogy az ózon erősen abszorbeál az UV-tartományban, ezért a légkör ózontartalmának hatása döntő a földfelszínre érkező UV-sugárzás mennyiségének alakulásában. A mérési sorozatok feldolgozása alapján ma már biztosan állíthatjuk, hogy az ózonkárosító anyagok iparból történő kivonása sikerrel járt, megállt a légköri ózontartalom csökkenése, és megindult a regeneráció (visszanövekedés). Ebből logikusan következne, hogy az UV-sugárzás csökken. Laboratóriumban ez így is lenne. Tegyük fel, hogy egy tartályba ózont teszünk, a tartályt átvilágítjuk UV-sugárzással, és a „kijövő oldalon” mérjük az UV-sugárzást. A tartálybeli ózonkoncentráció növelésével a mért UV-sugárzásszint csökken. A természetes, földi légkörben azonban az ózontartalom növekedése ellenére az UV-sugárzás enyhe növekedését tapasztaljuk (2. ábra, 3. ábra). A légkörben, bár benne természetesen ugyanazok a fizikai törvények uralkodnak, mégsem ilyen egyszerű a hatásmechanizmus, ugyanis nagyon összetett fizikai rendszer, így bármely fizikai jellemzőjét sok tényező határozza meg. A földfelszínre érő sugárzás mennyiségét befolyásolja a légkör sugárzását-bocsátó képessége, amely döntően a légköri szennyező anyagok mennyiségétől, a felhőzet mennyiségétől



1. ábra. A Naptól érkező elektromágneses sugárzás spektruma a légkörön kívül (extraterresztrikus spektrum) és a földfelszínen az OMSZ LI-1800 spektrofotométerével mérve.

és típusától, valamint a légkört alkotó gázok mennyiségétől függ [1]. Mivel ez utóbbi állandó, a felhőzet pedig ugyan erősen fluktuál rövid távon, de hosszú távú trend nem tapasztalható, így az első tényező a meghatározó. Az ipar modernizálása és a környezetvédelmi technikák bevezetése hatására csökken a légköri szennyező anyagok mennyisége, így a légkör sugárzását-bocsátó képessége növekszik (4. ábra). Ez persze csak tendenciában igaz, a nagyvárosokban felhőmentes esetekben is lehet igen alacsony a légkör átlátszósága [2]. A mérési adatsorok feldolgozása alapján azt állíthatjuk, hogy a légkör sugárzását-bocsátó képességének UV-sugárzásnövelő hatása túlkompenzálja az ózontartalom növekedésének UV-sugárzást csökkentő hatását, ezért tapasztaljuk az UV-sugárzás enyhe növekedését az ózommennyiség növekedése ellenére [3].

2. ábra. A teljes ózontartalom spektrofotométeres mérésekből számított éves átlagainak százalékos eltérése a sokéves átlagtól Budapesten fölött az 1969–2016 időszakra.



Tóth Zoltán (1961) az ELTE-n szerzett csillagász és meteorológus diplomát. Szakterülete a légköri napsugárzás-átvitel, nap-spektrofotometria, a légköri ózontartalom-mérés. Hazánkban először alkalmazta az ózontartalom zenitsugárzásból történő meghatározását. Az OMSZ hazai UV-sugárzásmérő hálózatának egyik megalapítója, fő működtetője. Nemzetközi kutatási projektek irányító testületének tagja. Az ELTE megbízott előadója, a Napsugárzás-védelmi Tudományos és Szakértői Testület elnökhelyettese.



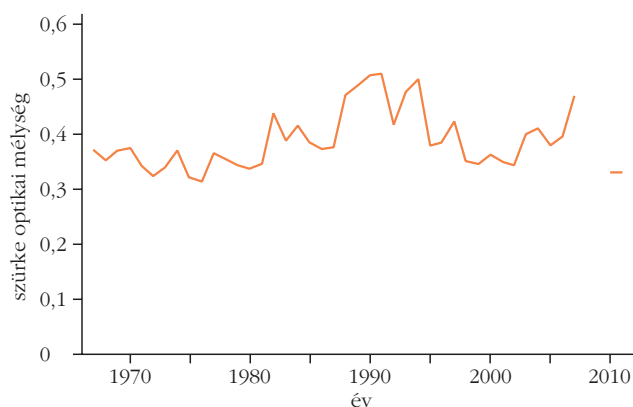
3. ábra. Az UV-sugárzás éves összegei az OMSZ mérőállomásain 1995 és 2016 között.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) által hazánkban, 1994-ben indított, akkor 4 mérőállomással működő UV-mérőhálózat az első tíz között volt a világon, olyanokkal együtt, mint Spanyolországé, Lengyelországé, az Egyesült Királyságé, Ausztráliáé, az Amerikai Egyesült Államoké és Kanadáé. Manapság már majdnem minden európai országban méri az UV-sugárzás szintjét. Azonban maga a mérés, annak fizikai háttere és műszaki megvalósítása, a hálózat megfelelő pontossággal történő üzemeltetése nem egyszerű, és sok buktatóval jár, ha referenciaértékű mérésről van szó. Az UV-sugárzás pontos mérése drága, a mérőhálózat működtetése nagyon precíz és folyamatos ellenőrzést igényel, döntő fontosságú a megfelelő minőségbiztosítás (kalibráció, ellenőrzés, adatellenőrzés). Az utóbbi időkben a piacon megjelent közép- vagy alsó kategóriás UV-szenzorok megnehezítik az egész kép értelmezését, így ebben az írásban praktikus tanácsokkal is igyekszem ellátni az e témában kevésbé jártas olvasót.

A beérkező sugárzás mértékegysége és értelmezése

A sugárzás mennyiségét az egységnyi felületre eső sugárzási teljesítményként, W/m^2 adjuk meg. Ez a pillanatnyi mennyiséget jelöli, azaz hosszabb időtar-

4. ábra. A pirheliométeres mérésekből számított szürke optikai mélység éves átlagai Budapesten (nagyobb optikai mélység gyengébb átlátszóságot jelent).



mig, folyamatosan mérve a beérkező sugárzást, akkor a mérés végén az értelmezés kétféleképpen történhet: vagy az átlagot képezzük, vagy pedig a mérés időtartama alatt beérkező sugárzási energiát – J/m^2 mértékegységben – számítjuk ki. Olyan laboratóriumi kísérleteknél, ahol a kísérlet alatt állandó nagyságú kibocsátott sugárzásra van szükségünk, és ennek stabilitását akarjuk ellenőrizni, nyilván célszerű az elemi mintavételek átlagolása. Természetes napsugárzásmérések esetén azonban a besugárzás napi menete van erőteljesen változik, éjszaka pedig hosszú ideig zérus, így a napi átlag nem igazán informatív, noha fizikailag nem inkorrekt. A légkörfizikai célú napsugárzás-mérési gyakorlatban alapvetően 10 perces adatokat használunk (speciális esetekben 1 perceseket), és a 10 perces érték még pillanatnyi adatot jelöl (noha a 10 percre vonatkozó érték az egyedi mintavételek átlagaként áll elő). Órás és annál hosszabb időtartamra már energiában adjuk meg a sugárzást.

Biológiaiul effektív UV-sugárzás

A Napból érkező UV-sugárzás pontos folyamatos mérése – mint említettük – élettani hatása miatt fontos. A biológiai rendszerek beérkező UV-sugárzásra adott válasza hullámhosszfüggő, ahogyan például szemünk is eltérően érzékeny a látható tartományon belüli hullámhosszakra. A biológiai rendszerek UV-érzékenysége spektrális eloszlását akciós spektrumnak nevezzük. Az emberi bőr akciós spektrumának külön elnevezése van: erythemaspektrum, amit a szabványosított McKinlay–Diffey-függvény ad meg [4]. Ha ismert egy biológiai rendszer akciós spektruma, az effektív dózis az alábbi módon számítható ki.

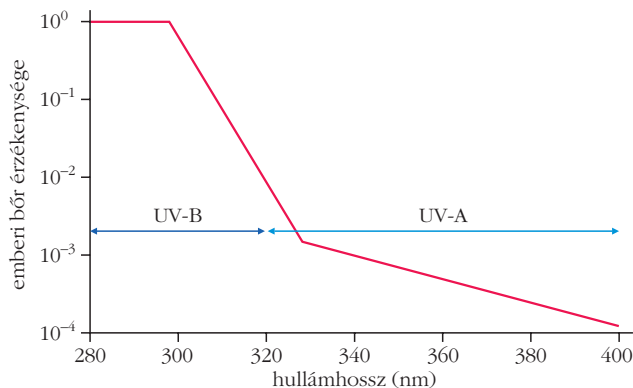
Legyen λ hullámhosszon a mért besugárzás teljesítménye I_λ , az adott biológiai rendszer spektrális válasza (az akciós spektrum λ hullámhosszon érvényes értéke) A_λ . Ekkor a biológiaiul effektív besugárzás ($I_{\text{eff},\lambda}$) a λ hullámhosszon:

$$I_{\text{eff},\lambda} = I_\lambda A_\lambda.$$

A teljes UV-tartományra vonatkozó biológiaiul effektív sugárzás, azaz az effektív dózis az ezen spektrális értékek egész UV-tartományra (általában 300–400 nm) vett integrálja:

$$I_{\text{eff}} = \int_{300}^{400} I_\lambda A_\lambda d\lambda.$$

Az erythemaspektrum látható az 5. ábrán. Szembetűnő, hogy az emberi bőr érzékenysége egy szűk spektrumtartományon erősen változik: míg 300 nm-es értéke 1, addig 330 nm-en már csak 0,001, azaz az érzékenység mindössze 30 nm alatt egy ezredére esik. A 6. ábrán egy adott időpontban a Brewer-spektrofotométerünkkel felvett fizikai spektrumot, és az abból számított biológiaiul effektív spektrumot tüntettük fel. Feltűnő, hogy mennyire különbözik a „biológiai” spektrum a „fizikai” spektrumtól: a görbe lefutása



5. ábra. Az emberi bőr UV-sugárzásra való érzékenysége hullámhosszfüggése (erythemaspektrum) [4].

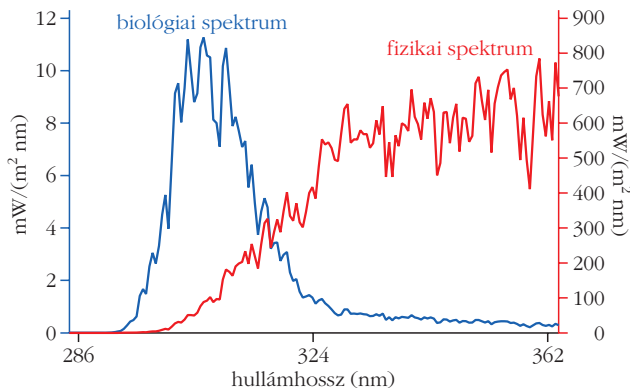
majdnem egymással ellentétes. Mivel a bőr a legrövidebb hullámhosszakra nagyon, és a hosszabbakra szinte alig érzékeny, a biológiailag effektív sugárzás azokon a hullámhosszakon lesz jelentős, ahol nagyon alacsony a beérkező fotonok száma. Ez jól mutatja, hogy ha az UV-sugárzás biológiai rendszerre való hatását akarjuk mérni, akkor a rendszer UV-sugárzásra adott válaszában figyelembevétele nélkül teljesen hibás eredményre jutunk, hiába mértük meg a lehető legpontosabban a sugárzást.

Az erythemával súlyozott UV-sugárzás speciális mértékegysége a MED/h (MED = Minimal Erythema Dose). Ez azt a sugárzásteljesítményt jelenti, amelynek konstans értékével egy II-es típusú bőrt [5] besugározva, a bőrön 1 óra alatt jelenik meg a bőrpír.

Ez még egy bőrtípuson belül, egyénenként is kissé változik, ezért a pontos számításokhoz és azok összehasonlíthatóságához szabványosítás szükséges. A szabványos átváltás SI mértékegysége: $1 \text{ MED/h} = 0,058275 \text{ W m}^{-2}$, órás és hosszabb időtartamra vonatkozó energia esetén: $1 \text{ MED} = 210 \text{ J m}^{-2}$.

Az elektromágneses sugárzás detektálásának alapelve

A sugárzás kvantitatív mérésének még egy évszázados múltja sincs. Bár korábban is létezett sugázmérés, azonban a kalorimetrián alapuló mérések nem tekinthetők „igazán pontosaknak”. Azonban a német *Wilhelm Hallwachs*, aki *Heinrich Hertz* asszisztense volt, 1887-ben egy kísérlet során azt találta, ha UV-fotonokkal sugároz be egy negatív töltésű, elektromosan szigetelt fémlamezt, akkor az elveszíti töltését, és a hatás hullámhosszfüggő. A jelenség magyarázata, hogy a fémbe belépő fotonok hatására abból elektronok lépnek ki, ezt Hertz később fényelektromos hatásnak nevezte el, de Hallwachs-hatásként is emlegetik. A jelenséget *Albert Einstein* magyarázta meg, aki ezért 1921-ben Nobel-díjat kapott. Einstein e munkája nyomán a jelenség pontosan számíthatóvá vált: ha precízen megméri a kilépő áramot vagy feszültséget, abból ki lehet számítani a belépő fotonok mennyiségét. Ez ma is a modern sugázmérés alapja: olyan eszközre van szükség, amiben a belépő fotonok



6. ábra. Brewer-spektrófotométerrel mért „fizikai” és „biológiai” spektrumok.

mennyiségével arányos áram képződik. Ennek műszaki megvalósítása nem egyszerű, és igen sok megoldás kínálkozik a hullámhossztartománytól, annak szélességétől, az elvárt pontosságtól, a megvalósíthatóság anyagi vonzataitól stb. függően. Ez külön írás témája lehetne.

Amíg a beérkező fotonokból elektromos jel lesz

Minden mérésnek, a legprecízebbnek is van valamikora hibája. A hibák elkerülhetetlenek, és a mérőberendezésen belül minden olyan eszköz, amely a fotonok útjában van, befolyásolja a végül kijövő jelet. Ezért elsődleges fontosságú arra törekedni a mérőberendezés tervezésénél, hogy minden szegmens a lehető legkisebb mértékben járuljon a hibához, és pontosan ismerjük e hibákat. A megvalósítás költségei persze annál magasabbak, minél nagyobb pontosságra törekszünk. Ez az oka annak, hogy többféle árkatégoriájú mérőeszköz létezik.

A sugázméréseknél el kell különítenünk a széles spektrumtartományon történő mérést, amely esetén a teljes tartományra vonatkozó integrált érték áll elő, és a nagy hullámhosszfelbontású, úgynevezett spektrális mérést, ahol minden egyes hullámhosszon (spektrális felbontástól függően) előáll egy mért érték. Az UV-sugárzás mérése alapvetően drága mérés-technika, de a széles tartományú mérés kevésbé költséges, mint a spektrális. Ennek fő oka az, hogy egy spektrométer jóval összetettebb felépítésű, tele precíziós optoelektronikai alkatrészszel és mechanikai mozgó alkatrészszel, amelyek ráadásul hosszú élettartamúak kell legyenek. Hosszú távú, szabadtéri mérésekről van szó, ezért mindkét esetben nagyon fontos az „időjárás-állóság”. Természetesen mind a széles sávú, mind a spektrális mérések esetén is többféle pontossági – azaz tulajdonképpen – (ár-)kategória létezik.

A detektorként szolgáló eszköz két legfontosabb paramétere az érzékenység és a sötétáram (más néven offset). Az érzékenység a létrejövő áram és a beeső sugárzási teljesítmény hányadosa. Az érzékenység a fizikai mérés technikában kifejezhető kvantumhatás-

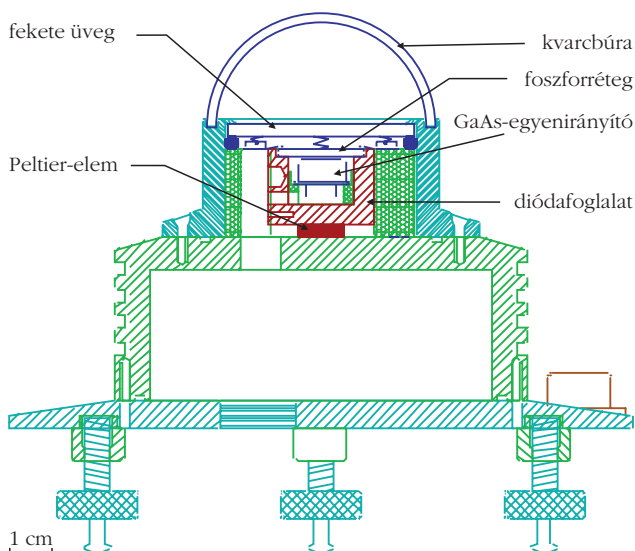
fokként, vagy a létrehozott elektronok és a beeső fotonok hányadosaként. Az érzékenységet a szaknyelv a detektor „válaszának” nevezi (response).

A sötétáram a tulajdonképpeni zaj, vagyis az eszköz valamely részében keletkező elektronok által létrehozott olyan jel, amely nem része a tényleges mérendő jelnek, így az a detektorba jutva mérési hibát okoz. Ezt pontosan ismerni kell, és a „valódi” jelnél több nagyságrenddel kisebbnek kell lennie. Legalapvetőbb forrása a berendezésben folyó áramok hőtermelése miatt létrejövő termikus elektronok. A mérési zaj feszültségben van megadva, és az annak megfelelő mért sugárzást „zajekvivalens sugárzásnak” hívjuk.

Széles sávú („broad band”) és spektrális UV-érzékelés

Széles sávú UV-mérők esetén detektorként UV-re érzékeny egyenirányítót (diódát) alkalmaznak. A 7. ábrán egy széles sávú UV-detektor (gyártó: Solar Light [7]) felépítését láthatjuk. Az UV-fotonok egy diffúzoron keresztül lépnek a műszertestbe. A diffúzor szerepe az, hogy a különböző irányból érkező fotonokat a beesési szög koszinuszának megfelelően (Lambert-féle koszinusz-törvény) szórja az optikai rendszerbe. Ezután a fotonok egy fekete üvegen haladnak át, amely kiszűri a látható hullámhosszak túlnyomó részét, hogy minél kevesebb „felesleges”, a mérési zajt növelő foton jusson az érzékelőre. Ezután egy foszforrétegre kerülnek, amelyből a beérkező fotonok hatására látható tartományú fotonok lépnek ki. Így az érzékelés egyszerűsödik, és olcsóbbá válik: a detektornak látható fotonokat kell érzékelnie. A közbelső lépés beiktatása a fotonok elektromos jellé történő átalakítására nyilván a pontosság csökkenésével jár. A nyereség ugyanakkor az, hogy a látható fotonok érzékelése pontosabb, mint az UV-fotonoké.

7. ábra. A Solar Light széles sávú UV-detektor felépítése.



A detektor érzékenysége hőmérsékletfüggő, ezért a „komolyabb” detektorok fontos része a Peltier-elem, amely biztosítja, hogy a detektor hőmérséklete mindig a gyári kalibrációnak megfelelő értékű legyen. Az ilyen detektoroknál – a sugárzás értéke mellett – a hőmérséklet is kimenő adat, így a Peltier-elem meghibásodása esetén a gyártó által megadott formulával számítható a hőmérsékleti korrekció.

Minden széles sávú UV-mérőnél fontos a karakterizáció, azaz az összes olyan faktor meghatározása, amely befolyásolja az eszköz által mért sugárzás értékét.

A mért E sugárzásérték a következőképpen adódik:

$$E = (S - S_0) c_0 c_1(O_3, SZA) c_2(SZA) c_3(T) c_4(rH) c_5(S),$$

ahol S az eszköz által kiadott elektromos jel (leginkább feszültség, de lehet áram is), S_0 a kiadott elektromos jel zérus besugárzás esetén (offset), O_3 a légkör ózontartalma, SZA a Nap zenittávolsága, T a detektor hőmérséklet és rH relatív nedvesség. A c értékek a paraméterezés együtthatói, a $c_5(S)$ tag a lineáris függéstől való eltérést jelenti (általában elhanyagolhatóan kicsi).

Az ózontartalom-függés azért van, mert az UV-tartományban az ózon erősen abszorbeál, és az ózontartalom módosítja a spektrális eloszlást, a detektor érzékenysége pedig erősen hullámhosszfüggő az erythema-függvény használata miatt.

$c_3(T) = 1$ a Peltier-elemet tartalmazó detektoroknál, $c_4(rH) = 1$, amelyekben nedvességszívó anyag (szilikagél) van, amit időnként cserélni kell.

A spektrális mérés kétféleképpen történhet: szűrő (filter) vagy monokromátor alkalmazásával. A szűrő a sugárzás szűk hullámhossztartományán áteresztő optikai eszköz. Az áteresztési függvény (szűrőfüggvény) ismeretében számítható a centrális hullámhosszra érvényes mért érték. Még nagyon jó filter esetén is ez a spektrális érzékelés kevésbé pontos fajtája.

A legpontosabb érzékelésfajta a monokromátor alkalmazása. A monokromátor a beérkező polikromatikus sugárzást egy nagy pontosságú diffrakciós rács segítségével szűk hullámhosszsávokra osztja, azaz kvázi-monokromatikus sugárzássá alakítja.

Referenciaértékű spektrális UV-sugárzásmérés – a Brewer-spektrofotométer

Az UV-sugárzás mérésére ma a legpontosabb, legmegbízhatóbb és ezáltal elsődleges referenciának minősülő berendezés a Brewer-spektrofotométer. Jelenleg alig több mint 200 ilyen működik a világon, ezek közül egy az OMSZ Marczell György Főobszervatóriumában, amelyet 1998-ban installáltunk. A Brewer-spektrofotométer igen összetett felépítésű berendezés, és itt nem lehet cél a működésének részletes ismertetése (8. ábra).

A Brewer-spektrofotométert úgy tervezték, hogy a kornak megfelelő legpontosabb méréstechnikát – a napkövető mechanikát, az optikát, az elektronikát és

a belső precíziós mechanikát (nagy pontosságú mozgatómotorok, mikrométerek stb.) – alkalmazza. Továbbá alkalmas automatikus, folyamatos, operatív mérésre, és élettartama – szabadtéri működés mellett, bármilyen zord körülmények között – hosszú. Ezek mellett a folyamatos, nagy pontosságú ellenőrizhetőséget is meg kellett valósítani úgy, hogy minden egyes lényeges szegmense operatív módon automatikusan ellenőrizve legyen a működés közben, és ezt a működtető szakember programozott – és szükség szerint kézi – vezérléssel folyamatosan követni tudja. Továbbá időnkénti labortesztek elvégzésére is lehetőséget kell nyújtson.

A Brewer-spektrofotométer felépítésének elméleti alapjait kanadai fizikusok dolgozták ki az 1970-es években, majd a műszaki megvalósítást a kanadai Saskatoonban működő SCI-TEC cég szakembereivel közösen végezték el. A prototípus 1981-ben készült el, és további fejlesztések után a 80-as évek közepén kezdték gyártani. Nyilván azóta is fejlesztették, de a hagyományos optoelektronikát és mechanikát alkalmazó méréstechnológiával nem lehet precízebbet kifejleszteni.

A Brewer-spektrofotométer 286,5 és 363 nm között 0,5 nm spektrális felbontással méri meg az UV-sugárzást, továbbá öt hullámhosszon történő mérésből, a Dobson-féle relatív intenzitások módszerével a légoszlop teljes ózontartalmát is meghatározza, és ebben jelenleg szintén a legpontosabb a világon.

Igen komplex előoptika működik benne, amelynek első szegmensei a belépő apertúrák. A Brewer-spektrofotométernek két különböző belépő apertúrája van, az egyik a globál UV-sugárzás mérésekor használatos, a másik pedig a direkt UV-sugárzás (a napkorong térszögéből érkező UV-fotonok) mérésekor. Az előoptika következő fontos szegmense a szűrőkerék, ami az előszűrést és a szórt fény (stray light, a jel fotonjai közé szóródott egyéb fotonok) szűrését végzi. Továbbá ezzel biztosítják a zérus beérkező sugárzást a sötétáram-tesztekhez.

Ezután a belépő résen a főoptikába – amelynek „lelke” a monokromátor – jutnak a fotonok. Minél kisebb a belépő rés, annál inkább „spektrálisan tiszta” lesz a felbontott sugárzás. Az optikai rács a tulajdonképpeni hullámhosszfelbontó komponens a monokromátorban. A rácson történő diffrakció eredménye, hogy a különböző hullámhosszak kissé eltérő szögekben érnek a kilépő réshez. A belépő rés és a rács síkja közti szög változtatásával lehet elérni, hogy csak a kiválasztott hullámhosszak haladjanak át a kilépő résen, míg a többit a monokromátor belsejében (speciális fekete felülettel) elnyeletik. A rácson a rovátkák kialakítása már évtizedek óta nem mechanikai úton történik, hanem a rovátkaszerkezetet holografikusan fotózzák az anyagra.

A fotonok a kilépő résen távoznak a monokromátorból. A kilépő rés behatárolja és definiálja a detektorba jutó hullámhosszsávot. Szélessége közvetlenül meghatározza a detektorra jutó spektrális sáv félszélességét.



8. ábra. A Budapesten működő (152-es számú) Brewer-spektrofotométer.

Minél szűkebb a rés, annál nagyobb felbontás érhető el, viszont ezzel együtt csökken a detektort érő fotonok száma, következésképpen csökken a jel/zaj viszony. Többféle rés áll rendelkezésre, és az egyes mérésfajtákhoz kiválasztható a megfelelő résméret.

A zaj további csökkentésére dupla monokromátort alkalmaznak.

A Brewer-spektrofotométer érzékelője egy fotoelektron-sokszorozó, amelynek holtideje (az az időtartam, amíg a detektor egy esemény [fotonbeérkezés] után nem képes érzékelni a következő eseményt) 10^{-7} s nagyságrendű. A mérés során a holtidőt is folyamatosan, automatikusan nyomon követjük, így ha a gyári értéktől jelentős eltérés mutatkozik, meg lehet tenni a szükséges lépéseket. Nagyon fontos a fotoelektron-sokszorozó (1700-1800 V körüli) feszültségének stabilitása. E feszültség pontos meglétét is folyamatosan ellenőrizzük. A mérési és működésellenőrzési adatokat a Brewer vezérlő számítógépén – amin a vezérlőprogram is fut – rögzítjük. A végleges archiválásra az adatok feldolgozása után kerül sor.

A Brewer által mért spektrumokból bármilyen biológiai rendszerre/hatásra ki tudjuk számítani a biológiailag hatékony sugárzást. Az emberi bőrre hatékony (erythemával súlyozott) spektrumokat operatív módon számítjuk, így ezek alapján rendelkezésre állnak az adatbázisunkban.

A működés ellenőrzése több módon folyik. A kalibrálással gyárilag hiteles állapotban tartjuk a berendezést, azaz biztosítjuk a visszakövethetőséget (traceability). A tulajdonképpeni hitelesítés (bár a minőségbiztosítási szaknyelv szerint ez nem hitelesítés, mert szabadtéren, természetes körülmények közötti mérési adatok

kat szolgáltató mérőeszköznél ez nem tehető meg a mérésen hivatalos definíciója szerint) legfontosabb lépése az etalonként működő elsődleges standard Brewerhez történő kalibrálás. A Brewer-spektrométerek elsődleges standard csoportja egy három Brewer-spektrofotométert tartalmazó műszer csoport, amelyet folyamatos laboratóriumi és szabadtéri ellenőrzés alatt tartanak, és szinte alkatrészenként rendszeresen ellenőrznek. Ezt a Brewer Triádot a torontói székhelyű IOS (International Ozone Service) elnevezésű cég működteti. A hátról egyet meghatározott időközönként a 4000 m tengerszint feletti magasságban lévő Mauna Loa Observatóriumba szállítanak egy mérősorozatra, amely magasság felett már „szinte nincs légkör”, így gyakorlatilag a Nap légkörön kívüli (műholdas) mérésekből jól ismert spektrumát mérheti, azaz ki van kizárva a légkör zavaró hatása. A világ különböző pontjain működő Brewer-spektrofotométerek kalibrálása egy utazó standard Brewerrel történik, amit szintén az IOS működtet. Az utazó standardot kalibrálják a referenciacsoporthoz, az egyes Brewereket pedig az utazó standardhoz, így adódik át a referenciaskála.

Az állomási kalibráció két részből áll. Az egyik a napi rendszerességgel futó rutintesztek, a másik a külső gyári standard sugárforrásokkal havonta végzett kalibrálások.

A napi rutintesztek két legfontosabbja a Hg-lámpa teszt és a belső standard lámpa teszt.

A higanylámpateszt célja annak ellenőrzése, hogy pontosan történik-e a hullámhosszak kiválasztása. A teszt azt vizsgálja, hogy a higany emissziós vonalainak csúcsát a megfelelő helyen találja-e meg a monokromátor. A mérési programot úgy dolgoztuk ki, hogy minden egyes mérési sorozat (ózonmérés és UV-spektrum mérés) előtt lefusszon egy Hg-lámpateszt. Ha ez a teszt sikertelen, a mérés automatikusan leáll. A belső standardlámpateszt a detektor pontosságának ellenőrzésére szolgál, és a mi mérési gyakorlatunkban naponta háromszor fut le. Érdemes megemlíteni a brewer referencia-UV-mérések minőségbiztosításának legújabb nemzetközi fejlesztési munkálatait. Ezek a „COST ES1207 – EUBrewNet” (<http://www.eubrewnet.org/cost1207/>) elnevezésű, Európán kívüli résztvevőkkel együttműködő EU projekt keretében folynak, amelyben hazánk részéről e sorok írója dolgozik. Ennek célja az európai Brewer-spektrofotométeres monitoring állomások olyan koherens mérőhálózatának létrehozása, amely a berendezés optoelektronikájának minden egyes szegmense operatív nyomon követésével konzisztens minőségellenőrzési és minőségbiztosítási eljárás alapján működik, mind a spektrális UV, a teljes ózontartalom és az aeroszol optikai mélység mérésének tekintetében. Továbbá általános fejlesztések is történnek az UV-spektrofotometria területén.

Néhány fontosabbat felsorolunk az e projekt keretében végzett munkáinkból, érzékeltetésül, hogy manapság a modern spektrofotometriában milyen részleteket kell vizsgálni a referencia értékű mérések szinten tartása és a még nagyobb pontosság/megbízhatóság elérése érdekében.

Módszert dolgoztunk ki az UV- és látható tartományokban meghatározott spektrális sugárzásátbocsátó képesség közötti összefüggés vizsgálatára különböző sugárzásátbocsátási helyzetekre, különös tekintettel extrém esetekre (vulkáni por, szaharai homok) nap-spektrofotométeres és napfotométeres mérések alkalmazásával.

Az eddigieknél pontosabb módszereket dolgozunk ki a fotoelektron-sokszorozó és a spektrális válaszfüggvény hőmérsékletfüggésének vizsgálatára, a hőmérsékletfüggés hullámhosszfüggésének ellenőrzésére, ezek összehasonlítására a szimpla és dupla monokromátoros Brewerekre, valamint a régi és új verziójú elektronikával működő Brewerekre.

Az erre alakult munkacsoportunk egy hosszabb kísérletsorozattal kvantitatívan kimutatta, hogy mekkora a kalibráló standard lámpa melegítő hatása a teflon diffúzor hőmérsékletére. Ezt eddig senki, a gyártó sem vizsgálta, ugyanakkor hatással van a kalibrációra.

A Budapesten működő Brewert sikeresen bekötöttük a Brewerek kísérleti on-line hálózatába, amelyben az optoelektronika nyers tesztadatainak kvázi-real-time ellenőrzése operatív módon folyik egy Madridban működő központi szerveren.

A mért adatok

A pontos mérési adat előállításához feltételezzük, hogy a spektrométerünk kalibrált. Ez azt jelenti, hogy a gyárilag ajánlott időközönként kalibráltuk az abszolút standard sugárforráshoz, vagy olyan sugárforráshoz, amelynek érvényes kalibrálási bizonyítványa van arról, hogy az abszolút standard sugárforráshoz kalibrált.

Ezek figyelembevételével egy adott λ hullámhosszon a mért spektrális sugárzásáram-sűrűség (E_{λ}) az alábbi módon áll elő (mivel az alábbiak egy adott λ hullámhosszra vonatkoznak, a λ nem szerepel az indexekben).

Legyen E_s az abszolút standard sugárforrás által kisugárzott sugárzásáram-sűrűség ($\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$), D_s pedig az ezzel besugárzott detektor által kiadott feszültség (mV). Ekkor a korábbiak alapján a detektor K spektrális válasza:

$$K = \frac{D_s}{E_s}.$$

K mértékegysége értelemszerűen: $\text{mV m}^2 \text{nm W}^{-1}$.

Legyen E_U az ismeretlen sugárforrásból (Nap) származó spektrális sugárzásáram-sűrűség ($\text{W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$), a detektor által ennek hatására kiadott feszültség pedig D_U (mV). Ekkor:

$$E_U = \frac{D_U}{K}.$$

Így a mért spektrumot az egyes λ hullámhosszon előálló E_U értékek sorozata adja.

UV-sugárzásmérő hálózatok

Mérőhálózatok működtetésénél minden szinten fontos az egységesség. Ezért elsődleges fontosságú, hogy a mérőhálózatunk minden mérőállomásán ugyanolyan típusú eszközöket használjunk, hiszen még az azonos alapelven működő eszközök műszaki megvalósítása is kissé eltérő lehet különböző gyártóknál. Legalább egy referenciaeszközzel van szükség, amit sötétben tartanak, és csak kalibrálásra vesznek elő. A célszerű eljárás az, ha az egyes mérőállomásokon széles sávú UV-detektorok működnek, amelyek egyszerűbb felépítésük következtében nem igényelnek állandó szakmai felügyeletet. A mi hazai hálózatunk öt UV-mérőállomásból áll: Budapest, Kecskemét, Kékestető, Sármellék, Siófok. Budapesten, az OMSZ Marczell György Főobszervatóriumában tartjuk a referenciadetektort, amit évente egyszer a Brewer-spektrofotométerhez, mint elsődleges referenciához kalibrálunk, és ehhez kalibráljuk az állomási detektorokat, alapesetben évente legalább egyszer. Minden hálózati detektor kap egy szorzófaktort a kalibráció után. A szorzófaktor lehet egészen nagy, akár 2 fölötti is, ha azt stabilan tartja, akkor nem okoz problémát. Azonban, ha a detektor koszinusz-korrektója romlik, vagy eleve gyárilag nem elég jó, akkor a szorzószámnak jelentős napmagasságfüggése lehet. Ebben az esetben vagy napmagasságfüggő szorzófaktort kell alkalmazni, ami csökkenti a mérés pontosságát, mert eltérő égboltviszonyok mellett különböző lehet ez a függés, vagy le kell cserélni a detektort.

Továbbá, különösen a nyári időszakban, olykor előfordulhat erős UV-sugárzás hatása miatti érzékenységsökkenés. Ha ennek gyanúja merül fel a folytonosan nyomon követett mérési adatok alapján, akkor az adott detektort úgynevezett „távkalibrálási” módszerrel ellenőrizzük. Ez nyilvánvalóan nem „igazi” kalibrálás, de általa tetten érhető a kalibrációs faktor esetleges változása. Ezt egy adott vidéki hálózati detektor esetén a következőképpen végezzük el. Minden olyan napon, amikor teljesen derült volt az égbolt mind Budapesten, mind a szóban forgó mérőhelyen, mindkét helyen mért megfelelő más napsugárzási paraméterek összehasonlításával megvizsgáljuk, hogy milyen volt a légkör sugárzásátbocsátó képessége. Ha az általunk használt kritériumok szerint a két helyen a napsugárzás-átbocsátó képesség eléggé közel volt egymáshoz, akkor a budapesti Brewer-spektrofotométeres adatok és az adott hálózati detektor adatai összehasonlíthatók egymással. Ha az eltérés nagyobb az indokoltnál, akkor detektorcsere szükséges.

Az UV-mérőhálózatokban használt készülékek közül a legelterjedtebb a Solar Light, mivel ez a legrégebb óta gyártott eszköz, így hosszú távú megbízhatóság tekintetében a legtöbb tapasztalat ezzel kapcsolatban gyűlt össze. Az OMSZ mérőhálózatában is ilyen eszközöket használunk.

A fentiekből kiderül, hogy milyen fontos a minőségbiztosítási eljárás minden egyes lépése. Például, ha

a Budapesten működő Brewer-spektrofotométer résmaszkoló motorjának tápfeszültsége nem pontosan az előírt 12 V, akkor az UV-dózis Siófokon mért értékét is befolyásolja.

Az UV-sugárzásmérő hálózatok működtetésére és a kalibrálási eljárásokra egy ajánlott egységes módszert dolgoztunk ki egy korábbi EU kutatási projekt (COST 726) keretében működő munkacsoportban [7].

Fontos megjegyezni, hogy a minőségbiztosítási eljárások egy-egy mérési adat megkívánt pontosságát biztosítják, a biológiailag effektív érték azonban még így is csak tájékoztató jellegű, ha egy adott személyre, adott időszakban gyakorolt határról van szó. A pontosan megmért és abból számolt, például emberi bőrre hatékony UV-dózis referenciaérték az adott körülmények között, de egy adott személyre nem pontos, hiszen a hatás függ attól, hogy az illető milyen helyzetben van, mennyire takart a teste ruhával, milyen irányban mozog stb. Továbbá a szemre gyakorolt hatás speciális, hiszen nagy eséllyel álló helyzetben tartózkodunk a szabadban, így – főleg derült időben – alacsony napálláskor a szemünket érő UV-sugárzás még veszélyesebb lehet.

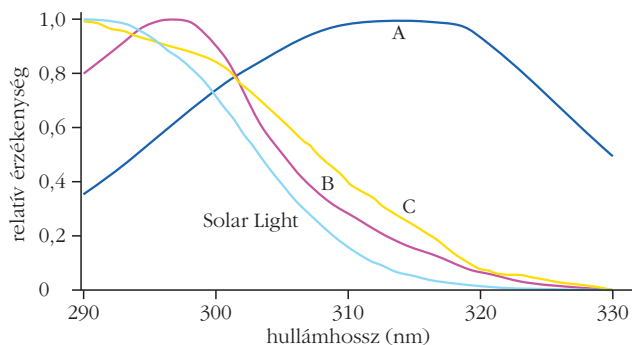
Egyéb olcsóbb UV-detektorok

Az UV-sugárzás iránt egyre fokozódó érdeklődés hatására egy sor műszergyártó cég – meglovagolva a téma „divatossá válását” – UV-sugárzásérzékelőket kezdett gyártani. A professzionális méréstechnikánál alacsonyabb árkategóriájú szenzorok pontossága elég széles sávban, és jóval a professzionális érzékelők pontossága alatti tartományban mozog.

További probléma az alkalmazott súlyfüggvény. Meglepő módon, több, konstrukciója miatt még komolyabbnak nevezhető UV-detektorban nem elég pontosan alkalmazzák a standard McKinlay–Diffey-függvényt. Ezekkel a detektorokkal úgy kerültünk „közelebbi kapcsolatba”, hogy egy hazai intézmény számára kalibráltuk azokat. A 9. ábrán három ilyen UV-detektor spektrális válaszfüggvényét tüntettük fel, nem jelezve a gyártók neveit, elkerülendő az esetleges hitelrontási vádat. Így a név helyett *A*, *B*, *C* betűkkel jelöltük azokat. Jól látható, hogy a válaszfüggvények jelentősen eltérnek a McKinlay–Diffey-spektrumtól, sőt az *A* jelű közelítőleg sem hasonlít arra. Ennek következtében az általuk mért effektív dózis jelentősen különbözne a valótól abban az esetben is, ha a detektor amúgy igen pontos lenne. Mivel ezek nem spektrális eszközök, így az érték utólag se korrigálható.

Így a gyanútlan vásárló egy elsőre jónak tűnő, de használhatatlan mérőeszközt kap.

Manapság tendencia, hogy az oktatás számára különböző projekteket hirdetnek meg, amelyek keretében csatlakozni lehet bizonyos mérési kampányokhoz, ezzel is „testközelből” megismertette a tudományos igényű mérési tevékenységet a diákokkal. Például egy futó program keretében egy egyszerű foto-



9. ábra. Különböző „kommersz” UV-detektorok és a Solar Light 501 UV-detektor spektrális válaszfüggvénye.

méterrel aeroszol optikai mélységet mérnek a diákok. Az ilyenek esetében nagyon fontos, hogy az adott oktatási intézménynél a program koordinálásával megbízott tanár mindenképpen konzultáljon szakemberrel az esetleges műszerbeszerzéskor. A szakember általában a professzionális méréstechnikát ismeri, de mivel nagy tapasztalata van, és rálát a szakterületre, az adott eszköz megadott gyári specifikációiból és egyéb esetleg rendelkezésre álló adatokból megbízható véleményt tud kialakítani a beszerzendő mérőműszerekről.

Ne felejtjük, már az gyanús, ha nem talál részletes specifikációt az érdeklődő a gyártó honlapján az adott eszközről!

A jövő UV-méréstechnikája

A modernizáció természetesen az UV-méréstechnikában is fontos szerepet játszik. Az utóbbi évtizedben nagy lendületet vett a töltéscsatolt detektort (CCD) alkalmazó diódasoros spektrométerek (diode-array spectrometer) fejlesztése. Ezek gyorsaságban messze túlszárnyalják a hagyományos monokromátoros spektrométereket. Összehasonlításképpen: míg a Brewer-spektrofotométer körülbelül 5 perc alatt állít elő egy

10. ábra. A Napsugárzási Világközpontban kifejlesztett diódasoros spektrofotométer.



UV-spektrumot a 286,5 és 363 nm hullámhosszak között, addig egy diódasoros spektrométer a másodperc tört része alatt – ha kell, jóval nagyobb spektrális felbontással is – 50 spektrumot állít elő. Előnyük továbbá az is, hogy súlyuk egy hagyományos spektrofotométer súlyának tizede, legfeljebb 2-3 kg, és mozgó alkatrészeket egyáltalán nem tartalmaznak. Azonban ezek a modern eszközök pontosságban és megbízhatóságban még jelentősen a hagyományos méréstechnika alatt maradnak.

A svájci Davosban működő Napsugárzási Világközpontban (World Radiation Center) több éves munkával az addigiaknál jóval pontosabb diódasoros spektrofotométert fejlesztettek ki (10. ábra), amelynek operatív üzemben működő prototípusa 2013-ban készült el. Néhány példány több helyen hosszú távú tesztelés alatt van, de már megrendelésre is gyártanak. Ezek pontosabbak a hasonló elven működő eddigi eszközöknél, és van még néhány ígéretes típus. Az OMSZ is beszerzett egyet, amellyel a kezdeti mérési eredmények nem is tűnnek rossznak. Valószínűleg a közeljövőben a pontosabb típusok már lassanként elkezdhetnek „beszivárogni” a mérőhálózatokba, ugyanis bizonyos körülmények között jelentőségük megnő. A gyorsan változó felhőzet idején felvett UV-spektrumok a Brewer-spektrofotométerrel vagy más UV-spektroradiométerekkel nem értelmezhetők, és így használhatatlanok. Gondoljuk csak el: vannak időjárási helyzetek, például nagyon erős szél esetén, amikor akár 10-20 másodperc alatt jelentősen változik a felhőzet az égbolton. Figyelembe véve, hogy a Brewer 5 perc alatt szkenneli végig az UV-spektrumot, a spektrum 300 nm körüli tartománya egészen más felhőstruktúra alatti viszonyokat tükröz, mint mondjuk a 330 nm körüli. Azonban egy szupergyors diódasoros spektrométer gyorsabb, mint a felhőzet átrendeződésének sebessége, és a mért spektrum minden hullámhosszra egyidejűnek lesz tekinthető.

Ezen a modern eszközökben egy sor probléma még nincs megoldva, továbbá a pontosabb típusokból még egyetlenegy sem üzemel elég hosszú ideje ahhoz, hogy hosszú távú megbízhatóságukról pontos képet tudjunk alkotni. Így a nagy precizitású, dupla monokromátoros Brewer-spektrofotométer „egyeduralkodását” várhatóan még sokáig nem veszélyeztetik.

Irodalom

1. Németh, P., Tóth, Z., Nagy, Z., *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* 32 (1996) 177–181.
2. Giavis, G. M., Kambezidis, H. D., Sifakis, N., Tóth, Z., Adamopoulos, A. D., Zevgolis, D., *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 67 (2005) 1524–1532.
3. Tóth, Z., *Proceedings of the 4th International Conference on Solar Radiation & Daylighting SOLARIS 2008* (Hong Kong) (2008) 27–35.
4. McKinlay, A. F., Diffey, B. L.: *CIE J.* 6 (1987) 17–22.
5. COST-713, Action: *UV Index for the Public*. European Communities, Brussels, 27 (2000).
6. *501 UV-Biometer Owner's Manual*. Solar Light Co. Inc. (2006)
7. COST-726 Working Group 4 and WMO SAG UV: *A Practical Guide to Operating Broadband Instruments Measuring Erythemally Weighted Irradiance*. (2009)

RONCSOLÁSMENTES KÉPALKOTÁS NEUTRONOKKAL ÉS RÖNTGENSUGÁRZÁSSAL A BUDAPESTI NEUTRON CENTRUMBAN

Szentmiklósi László, Kis Zoltán, Belgya Tamás, Maróti Boglárka, Horváth László Zoltán, Papp Mariann

MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium

A radiográfia („rajzolj a sugárzással”) direkt és roncsolásmentes képalkotási technika, ahol a tárgyon átbocsátott sugárnyaláb módosulásának érzékelésével a tárgy egy vetületi képét kapjuk, így a láthatatlan sugárzás és az anyag kölcsönhatása egy megfelelő detektor segítségével az emberi szem számára is megjeleníthető képpé alakul. Több irányú vetület és matematikai algoritmusok segítségével előállíthatjuk a tárgy háromdimenziós képét, a tomogramot [1].

A vizsgált objektumok belső szerkezetének minél informatívabb roncsolásmentes ábrázolásához esetenként többféle, az anyag mélyébe hatoló, azonban azzal egymáshoz képest eltérő módon kölcsönható sugárzástípusot (termikus, gyors vagy hideg neutron, gamma, röntgen, THz) érdemes használni (multi-modality imaging).

Az MTA Energiatudományi Kutatóközpont és az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont konzorciuma, a Budapesti Neutron Centrum (BNC) koordinálja a Kutatóreaktornál folyó tudományos és szolgáltató tevékenységet. A Kutatóreaktor, a köré szerveződött mérőhelyekkel együtt, az egyik legjelentősebb kutatási infrastruktúrának számít hazánkban, sőt Közép-Európában is. A BNC ad otthont két neutronos képalkotó mérőállomásnak (RAD és NORMA néven), amely a hazai és nemzetközi tudományos közösség, valamint az ipari K+F projektek számára is elérhető nyílt kutatási infrastruktúra (1. ábra).

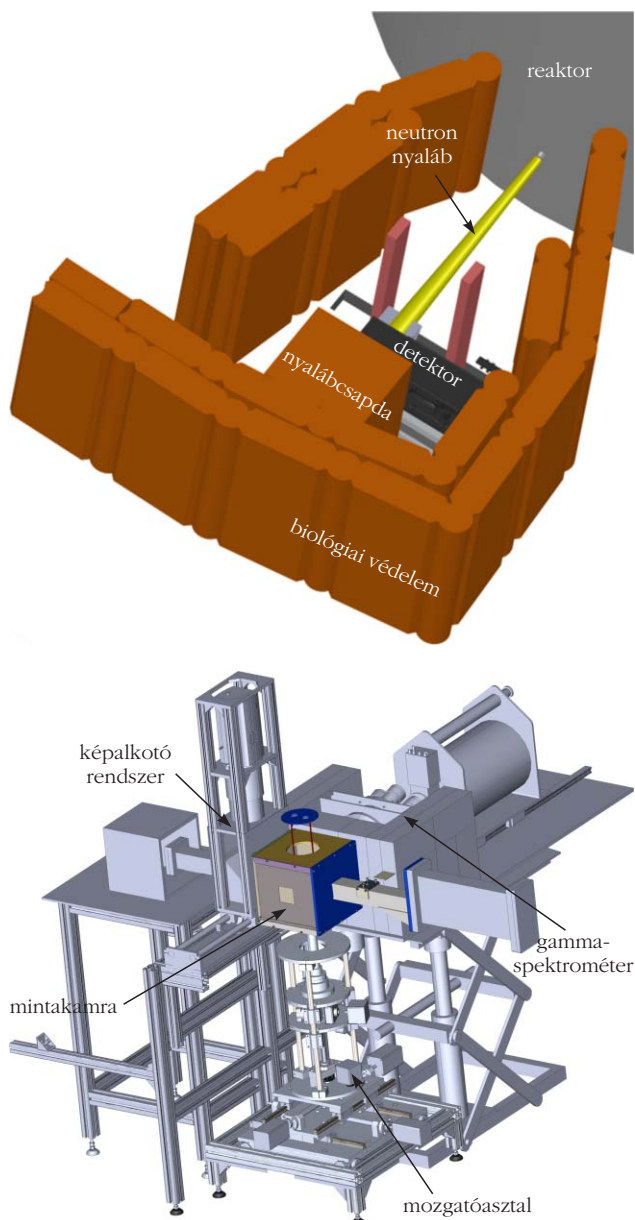
A 2. számú radiális nyalábra telepített RAD berendezésen statikus vagy dinamikus képalkotás végezhető neutron- és röntgensugárzással, akár 20 cm-es látómező és masszív mintamanipulátor segítségével. A mérőhely a közelmúltban a digitális képrögzítés és a tomográfia képességeivel bővült [2].

A NORMA berendezés pedig világszinten is egyedülálló eszköz, amelyben a neutronos képalkotási és a sugárzásos neutronbefogáson alapuló elemanalitikai technika egy készülékbe van integrálva annak érdekében, hogy láthatóvá tegyük a heterogén tárgyak

belső szerkezetét és a kiválasztott pontokban meghatározzuk ezen részek lokális elemösszetételét [3].

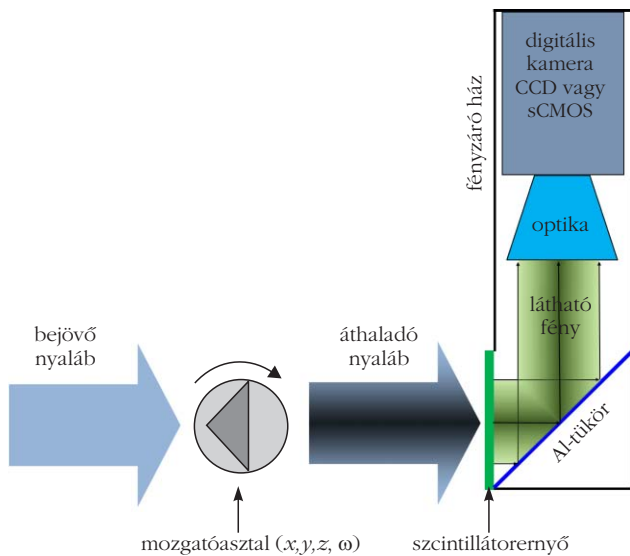
A következőkben áttekintést adunk a BNC fenti két képalkotó nagyberendezésének főbb jellemzőiről, és bemutatjuk alkalmazásait a mérnöki és anyagtudományok területéről.

1. ábra. A Budapesti Neutron Centrum RAD (fölről), illetve NIPS-NORMA (alul) mérőhelyének rajza.



A szerzők köszönetüket fejezik ki az OTKA K124068 számú projekt és a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj anyagi támogatásáért.

A szerzők az MTA EK Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium munkatársai, interdiszciplináris alap- és alkalmazott kutatásokat folytatnak neutronos elemanalitikai és roncsolásmentes anyagvizsgálati technikák felhasználásával az anyagtudomány, az archaeometria, a geológia és a magfizika területén, valamint fejlesztik és üzemeltetik az ezekhez szükséges, a Budapesti Neutron Centrum részeként működő mérőállomásokat. Ezek közül több unikális berendezés, így máshol nem megvalósítható kísérleteket is lehetővé tesznek, jellemzően nemzetközi együttműködések és EU-projektek formájában.

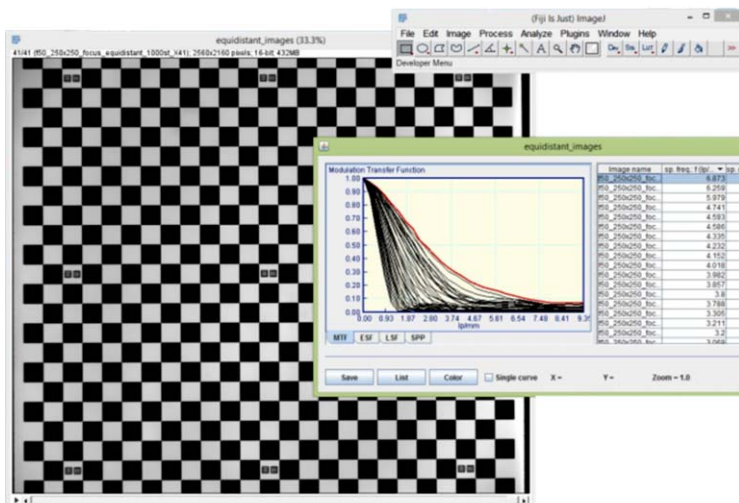


2. ábra. A digitális képdetektálás főbb részeit.

A digitális képkészítés

A neutron- és röntgenradiográfia alapja tehát a sugárnyaláb gyengülésének megfigyelése, miközben az áthalad az útjába helyezett anyagon. A mintán kölcsönhatás nélkül áthaladó nyaláb intenzitását évtizedeken keresztül filmmel, vagy úgynevezett image plate technikával tették láthatóvá. Ezeket a minta mögé helyezve exponálták, majd a mérőfülkéből kihozva, külön lépésben előhívták. A képek kiértékelhetőségét és archiválhatóságát, továbbá a módszer termelékenységét, időfelbontását drasztikusan növelte a digitális képkészítés elterjedése a 2000-es évek elején. A digitális technika minősége (térbeli felbontás, kontraszt) manapság már megközelíti és esetenként meg is haladja a korábbi filmes technika képmínőségét.

3. ábra. Az optika élesre állítása egy sakktablamintázat fekete-fehér látmeneteinek segítségével. A kis ábrán a fókuszálás során felvett képek modulációs átviteli függvényei (MTF) látszanak. A legjobb felbontást a pirossal jelölt görbéhez tartozó pozícióban kapjuk.



A tárgyon áthaladó sugárzás először egy neutron- vagy röntgenérzékeny, látható fényt kibocsátó (legtöbbször ZnS alapú) szcintillátorernyőbe ütközik. Az itt keletkező zöld ($\lambda = 520 \text{ nm}$) színű fényt egy 45° -ban elhelyezett tükrös, majd egy objektív juttatja el a digitális kamera (esetünkben egy 1 Mpx-es CCD, illetve egy 5,5 Mpx-es sCMOS) fényérzékeny chipjére (2. ábra). A kiolvasott kép eredendően digitális formában kerül a számítógépbe a valós idejű megjelenítésre, vagy a merevlemezen történő tárolásra. Ha a képkészítést a mintát tartó tárgyasztal forgatásával szinkronizáljuk, a tomográfiához szükséges több száz vagy akár ezer vetületi kép felvétele automatizálható.

Amennyiben a nyaláb képét minta nélkül (*open beam image*), valamint a kamera sötétáramának képét (*dark beam image*) nyaláb nélkül felvesszük és ezekkel korrigáljuk a mérést, akkor a tárgy képeiből kvantitatív nyalábgyöngölési adatokat kaphatunk.

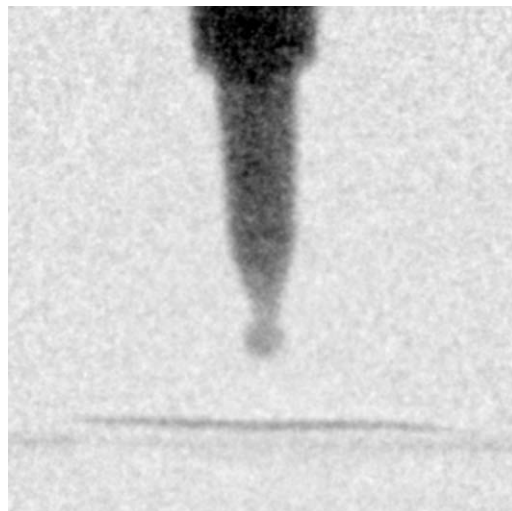
$$\frac{I}{I_0} = \frac{I_{\text{transmitted}} - I_{\text{darkbeam}}}{I_{\text{openbeam}} - I_{\text{darkbeam}}} = e^{-\mu_m \rho d},$$

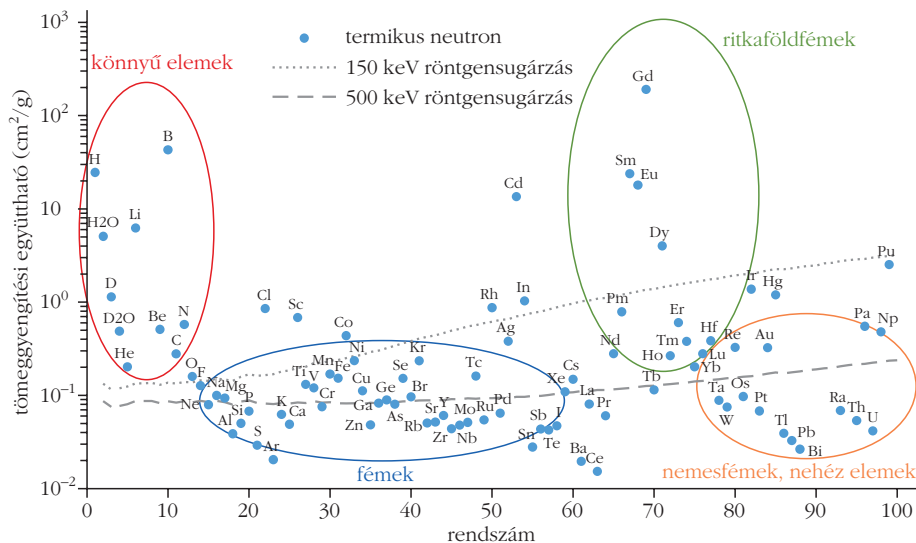
ahol μ_m ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$) az anyagi minőségtől és a sugárzás minőségétől függő tömeggyengítési együttható, ρ (g cm^{-3}) a sűrűség és d (cm) az anyagvastagság.

A mérési feladatnak megfelelően többféle, cserélhető szcintillátorernyő áll rendelkezésünkre, amelyekkel a látómező és az expozíciós idő függvényében körülbelül 75–200 μm között változik az elérhető legjobb térbeli felbontás. A látómező változtatása az optikai leképező rendszer állításával lehetséges; az 50 mm, 105 mm és 300 mm fix gyújtótávolságú objektívek cseréje és élesre állítása a fényszáró optikai házán belül szintén jórészt automatizált (3. ábra).

Egy másik, ezzel csereszabatos videokamerával pedig 640×480 képpont felbontású, 25 Hz frekvenciájú (40 ms ciklusidejű) mozgóképet is készíthetünk, ezt nevezzük dinamikus radiográfiának (4. ábra).

4. ábra. A néhány száz mikron vastag szén nanocsőreteg nedvesedése egy fecskendőből lecseppenő vízcseppelel. (A kísérlethez a mintát Kukovecz Ákos – Szegedi Egyetem „Lendület” Pórusos Nanokompozitok kutatócsoport – biztosította.)





5. ábra. A tömeggyengítési együttható a rendszám függvényében termikus neutronok, illetve 150 és 500 keV-es röntgenfotonok esetén.

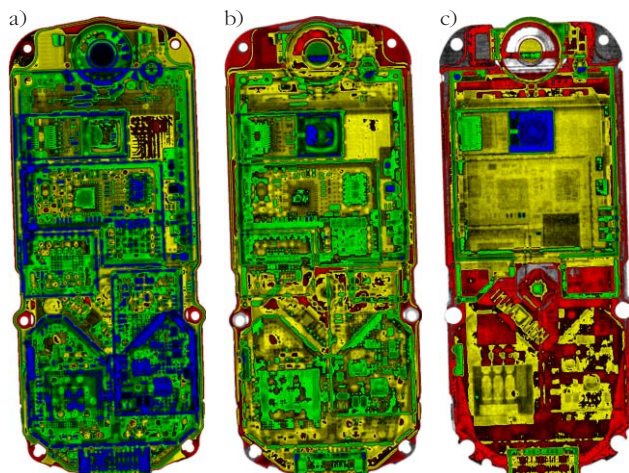
Többmodalitású leképezés

Míg a röntgensugárzás az elektronokkal lép kölcsönhatásba, a neutronok az atommagokkal. Ebből következik, hogy a gyengítési együttható röntgensugárzás esetén viszonylag sima görbe szerint növekszik a rendszámmal.

A tömeggyengítési együttható neutronok esetén, akár még adott elem izotópjai (például hidrogén és deutérium) között is nagymértékben változik (5. ábra). A röntgen- és a neutronsugárzásra vonatkozó tömeggyengítési együtthatók alapján a könnyű elemek, a fémek, a ritkaföldfémek és a nehéz elemek jól elkülöníthető csoportokat képeznek. Megfigyelhető továbbá, hogy a kétféle röntgenenergia esetén a rendszámától való függés mértéke jelentősen különbözik.

A neutronos és röntgenes kép összevetésével tehát az anyag jellege már behatárolható (6. ábra). Ha mind neutron-, mind röntgensugárzásra jó kontrasztot ka-

6. ábra. Egy mobiltelefon 150 keV-es röntgen (a), termikus neutron (c) és kompozit képe (b). A bal oldali ábra kiemeli a fémes részeket, míg a jobb oldalon a kijelző, a nyomtatott áramkör és a műanyag készülékház válik jobban láthatóvá [5].



punk, az egy fémes anyagot (például bronz, ezüst) jelezhet, az ólom nagy röntgenkontrasztot ad, de a neutronos képen jóval gyengébben jelenik meg, míg szerves anyagok csak a neutronos képen válnak láthatóvá [4]. Fontos kiemelni, hogy a kontraszt megadható az anyagi minőség ismeretében, azonban visszafelé a kapcsolat nem egyértelmű: több különféle anyag okozhat egyforma nyalábgyengítést.

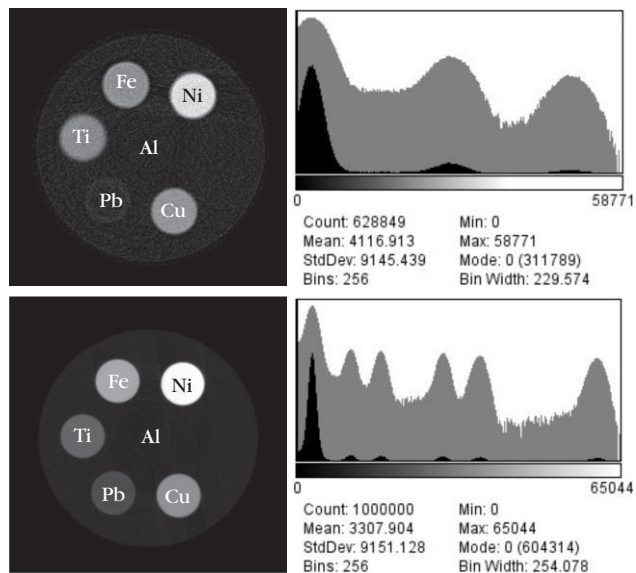
Kontrasztkülönbség figyelhető meg továbbá egy tárgy termikus és a hideg neutronos képei között is.

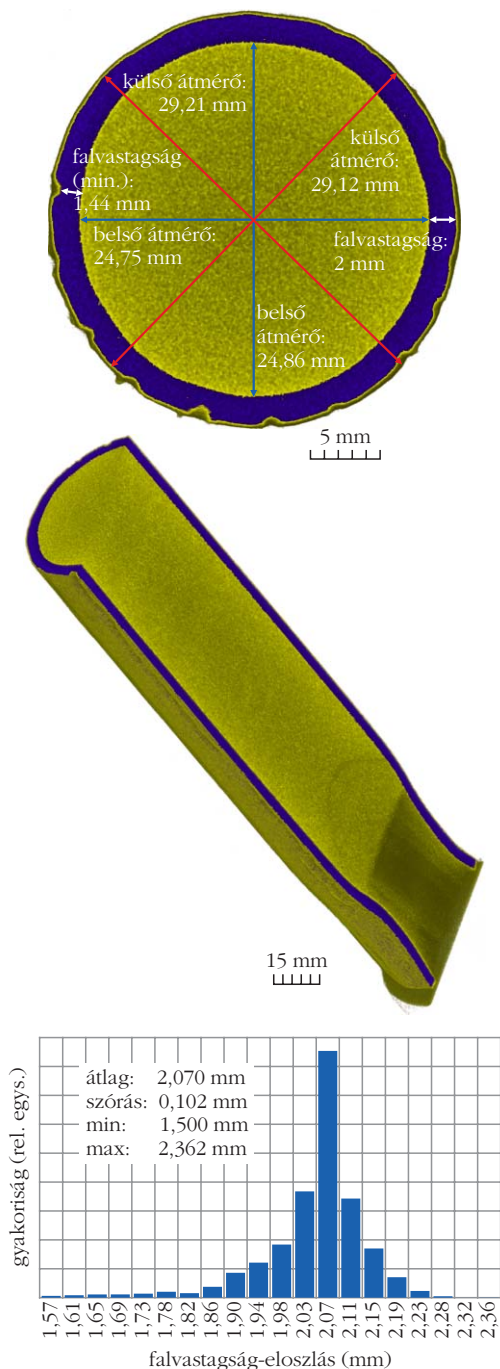
A 7. ábrán látható, hogy a hideg neutronok ugyan általában nagyobb kontrasztot adnak, mint a termikus neutronok, azonban kevésbé képesek az anyagfajták szelektív megkülönböztetésére.

Háromdimenziós képalkotás (tomográfia)

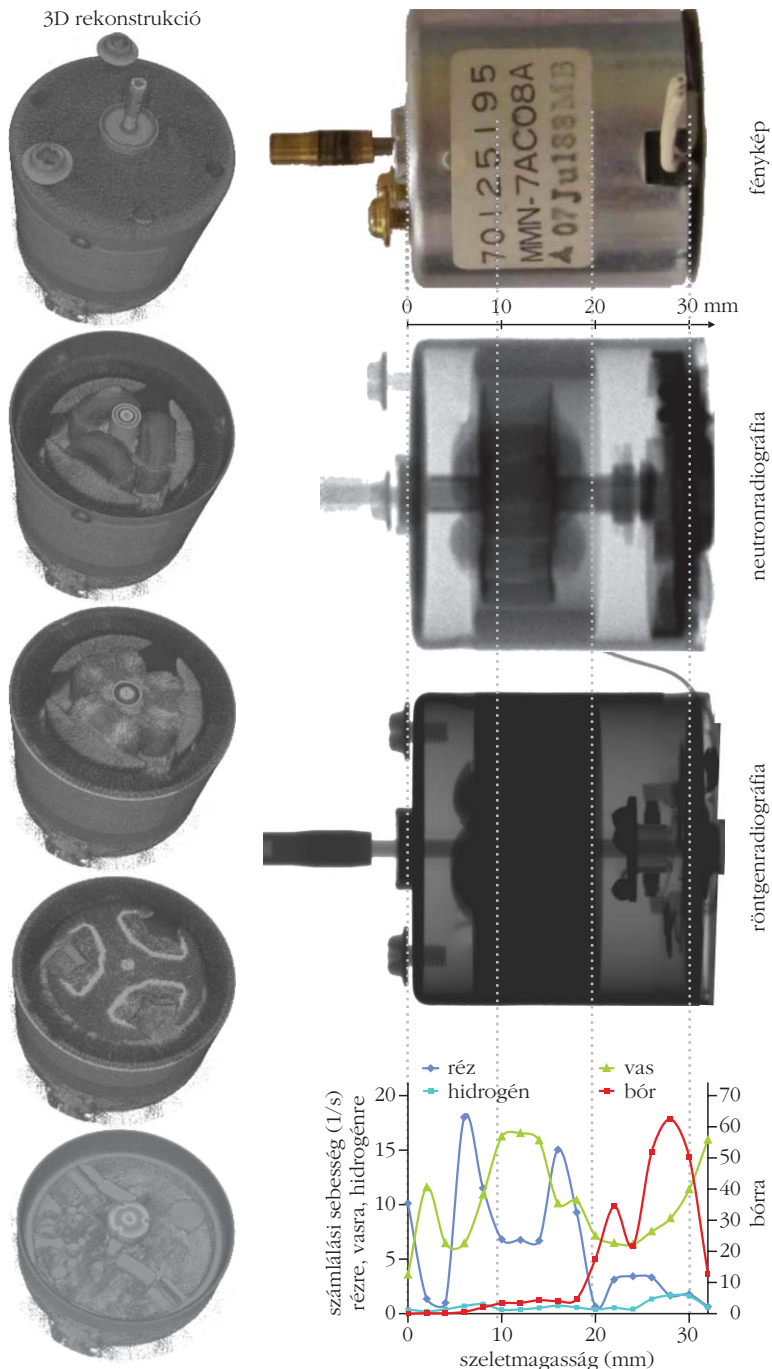
A háromdimenziós kép előállítása a vetületi képekből számítógépes rekonstrukcióval történik. Ilyenkor a vetületi képekből az úgynevezett Radon-transzformáció és a szűrt visszavetítéses algoritmus [1] segítségével, a vetületi kép sorainak megfelelően, vízszintes metszetenként állítjuk elő a tárgy keresztmetszeti képeit, majd ezeket 3D adatmátrixba töltve meg is jelenítjük. Ekkor lehetőség van a tárgy részeit átlátszóvá tenni, vagy a tömeggyengítési együttható alapján hamisszínes képet készíteni (renderelés),

7. ábra. A hideg neutronos (felső sor) és termikus neutronos leképezés (alsó sor) összehasonlítása egy hatféle anyagból álló IAEA-PSI kontraszt fantom esetén. Figyeljük meg a két hisztogramban lévő csúcsok számának eltérését.





8. ábra. Egy porral egyenletesen megtöltött fémcső falvastagságának roncsolásmentes ellenőrzése röntgentomográfiával (fölről kereszt-, középen hosszmetsetet). A hisztogram a falvastagság-ingadozást mutatja.



9. ábra. Egy léptetőmotor fotója, neutronos és röntgenképe, valamint alul a vas, réz, hidrogén és bór elemek eloszlása a hossz tengely mentén. A bal oldali oszlopban a 3D rekonstrukció különböző magasságoknál készített metszeit ábrázoltuk, ezzel segítve az elemösszetétel-profil értelmezését.

illetve a CAD tervrajzokhoz képesti eltéréseket megjeleníteni (8. ábra, nominal-actual comparison).

A képi és elemösszetétel-információ együttes értelmezése

Ha a lokális anyagi összetétel közvetlen, de mégis roncsolásmentes meghatározására van szükség, a NIPS-NORMA mérőhely kínál megoldást [2]. Itt egy elemöss-

zetétel mérésére alkalmas neutronindukált prompt-gamma spektroszkópiai eszközt, egy számítógép-vezérelt mozgatóasztalt és egy képkövető rendszert építettünk egybe. A kapott 2D vagy 3D képi információt felhasználva a tárgy kiválasztott részeit a nyaláb és a gammadetektor látóterének egymást átfedő részébe, az izotér fogatba mozgatjuk, és az itt neutronbefogás során keletkező gamma-fotonok elemzésével 2-3 mm térbeli felbontású elemösszetétel-mérést végezhetünk. Ezt hívjuk radiográfiával vezérelt prompt-gamma aktivációs

leképezésnek, PGAI-NT módszernek [6]. Ez a világon egyedülálló berendezés jelenleg kizárólag a BNC-ben üzemel, egy alkalmazását mutatja a 9. ábra.

Összefoglalás

A neutronos és röntgenképkalkotással mélységi, akár időfelbontott szerkezeti információt kaphatunk két és három dimenzióban megjelenítve, roncsolásmentesen. A Budapesti Neutron Centrumban a közelmúltban végzett technikai fejlesztéseknek köszönhetően nemzetközileg is jegyzett mérőhelyek állnak rendelkezésünkre, amely a felhasználói programok, illetve kétoldali megállapodások révén hozzáférhetők a magyar és a nemzetközi kutatói közösség (CERIC-ERIC, IPERION CH), valamint az ipar számára (SINE 2020).

Irodalom

1. I. S. Anderson, R. L. McGreevy, H. Z. Bilheux (szerk.): *Neutron imaging and applications*. Springer, New York, 2009.
2. Z. Kis, L. Szentmiklósi, T. Belgya, M. Balaskó, L. Z. Horváth, B. Maróti: Neutron based imaging and element-mapping at the Budapest Neutron Centre. *Physics Procedia* 69 (2015) 40–47. doi: 10.1016/j.phpro. 2015.07.005
3. Z. Kis, L. Szentmiklósi, T. Belgya: NIPS-NORMA station – a combined facility for nondestructive element analysis and neutron imaging at the Budapest Neutron Centre. *Nucl. Instr. Meth. A* 779 (2015) 116–123. DOI: 10.1016/j.nima. 2015.01.047
4. J. Banhard et al: X-ray and neutron imaging – Complementary techniques for materials science and engineering. *International Journal of Materials Research* 101/9 (2010) 1069–1079.
5. Papp M.: M.Sc. disszertáció, ELTE TTK Kémia Intézet, 2016.
6. Kis Z., Belgya T., Szentmiklósi L., Kasztovszky Zs. és az Ancient Charm Együttműködés: Műtárgyak roncsolásmentes vizsgálata neutronokkal – az EU ANCIENT CHARM projekt. *Fizikai Szemle* 61/7–8 (2011) 235–239.

AZ MTA ATOMKI TANDETRON LABORATÓRIUMA – egy részecskegyorsítóra alapozott új kutatási infrastruktúra

Rajta István, Vajda István, Biri Sándor, Sulik Béla,
Gyürky György, Soltész Géza, Szűcs Zsolt, Fülöp Zsolt
MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

A Magyar Tudományos Akadémia Atommagkutató Intézet (MTA Atomki [1]) 1954-ben jött létre. Az első, saját fejlesztésű, 800 kV terminálfeszültségű, Cockroft–Walton típusú gyorsítóját 1961-ben helyezték üzembe. Az intézet alapító igazgatója, *Szalay Sándor* három Nobel-díjas kutató mellett töltötte posztdoktori éveit külföldön, mielőtt meghonosította Magyarországon a kísérleti magfizikai kutatást. Az Atomki jelenlegi, igen szerteágazó tematikái közül ma is az egyik legfontosabb az atomok és atommagok ütközéseinek vizsgálata a keV–MeV energiatartományban. Ezek az energiák a magfizika területén kicsinek tűnnek, ám például a nukleáris asztrofizika, vagy a molekuláris ütközések szempontjából éppen ez a lényeges energiatartomány. Ez a kis-energiás gyorsítók világa.

Az Atomki infrastrukturális szerkezetét meghatározza, hogy jelenleg itt található Magyarország kutatási célt szolgáló gyorsítóinak túlnyomó része [2–4]. Az Atomkin kívül hazánkban két kutatási célokra használt gyorsító üzemel még a Wigner Fizikai Kutatóközpontban [5].

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.

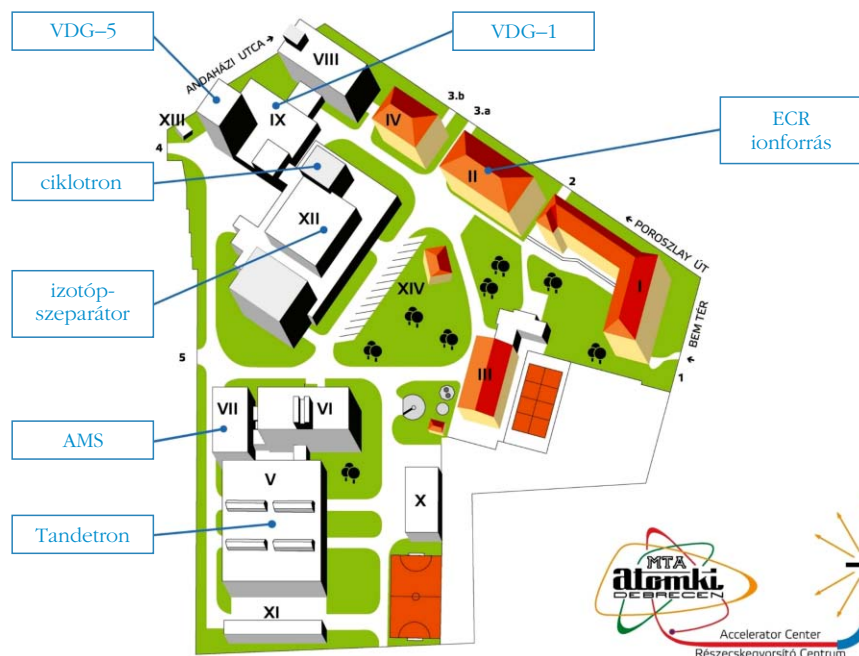
Köszönjük az MTA Infrastruktúra pályázatok és az MVM Paksi Atomerőmű támogatását, valamint a Magyar Állam és az Európai Unió által nyújtott támogatást (GINOP-2.3.3-15-2016-00005).

Az MTA Atomki munkatársai közül – Rajta István irányítása mellett – a szerzőkön kívül is számos kolléga vett részt a Tandetron Laboratórium létrehozásában. A jelen szerzőlista tagjainak (kutatók, mérnökök, technikusok) – az ötlet kipattanásától a megvalósításig – fontos szerepe volt a projekt megvalósításában. Itt szeretnénk megköszönni a szerzőlistában nem szereplő számos kollégának áldozatos munkáját is.

Magyarországon az első részecskegyorsítót *Simonyi Károly* és munkatársai építették Sopronban 1949–51 között. A gyorsító később a KFKI-ba került, 2004 óta az ELTE Természettudományi Karának látgymányosi épületében kiállítva látható [6]. A budapesti és a régebbi debreceni gyorsítók többsége saját építésű, és szinte mindegyikükről elmondható, hogy fejlesztői közvetlenül, vagy közvetve a Simonyi-féle gyorsítóiskolához tartoznak [7].

Az Atomki Gyorsítóközpont [4] nagyberendezései: a ciklotron [8], az 1 és 5 MV feszültségű Van de Graaff-gyorsítók [3], amelyek évtizedekkel ezelőtt épültek, továbbá az ECR ionforrás [9], egy izotópszeparátor, neutronforrások és a jelen cikkben részletesen bemutatott 2 MV-os új Tandetron gyorsító. A Részecskegyorsító Központ gyorsítóit az atom- és magfizikai kutatások területén főként olyan kutatócsoportok használják, amelyek erős nemzetközi beágyazódottsággal rendelkeznek. Nagyobb lélegzetű kutatási projektjeikben az Atomki gyorsítói a maguk specifikus, alacsonyabb energiatartományokban kapnak jelentős szerepet, elsősorban felszereltségük, valamint az üzemeltetők szakértelmének és az Atomki kutatói kooperációs nyitottságának köszönhetően. Az intézet Részecskegyorsító Központja a KFI (korábban: NEKIFUT) regiszterben [10] Stratégiai Kutatási Infrastruktúra címmel rendelkezik, gyakorlatilag nemzeti gyorsítóközpont. 2013-ban bekerült az EU MERIL (Mapping of the European Research Infrastructure Landscape) adatbázisába [11].

Az alap kutatásokon túl a gyorsítók számos hazai és nemzetközi alkalmazott kutatási projektet szolgálnak



1. ábra. MTA Atomki – vázlatos alaprajz.

technikáját vonultatták fel, sok esetben az akkori ipari technológiákat fejlesztve készültek hazai alkatrészek és szaktudás felhasználásával. A gyorsítókba beépített tudás bizonyítéka, hogy még ma is jól működnek, magas szinten szolgálva az új tudósnemzedékeket is.

Az orosz gyártmányú MGC-20-as ciklotron – a tudomány szolgálatán túl – lehetővé tette az első debreceni PET készülék elindítását, épületében helyet adva az orvosi ellátásnak is. A különböző célokat szolgáló izotópok termelésében, a magfizikai alap- és alkalmazott kutatásokban a ciklotron ma is kulcsszerepet játszik.

Összességében elmondhatjuk, hogy az Atomki majdnem

mindegyik épületében található egy gyorsító, ahogy ez az 1. ábrán látható.

A jelenleg működő gyorsítóink által lefedett energiatartomány: 50 eV – 27 MeV, ezt az 1. táblázatban részletesen, a nyalábválasztékkal egyetemben összefoglaltuk. A nagy nemzetközi gyorsítóközpontokhoz hasonlóan a nyalábidő-igénylés formalizált, és a Gyorsítók Programtanácsának szakmai bírálata alapján az intézet igazgatója dönt a gyorsítóidő odaítéléséről.

A gyorsító berendezéseket – az AMS kivételével – a Részecskegyorsító Központ üzemelteti. A Részecskegyorsító Központ 2009-ben új szervezeti egységként alakult meg intézetünkben. Korábban a gyorsítók és a hozzájuk tartozó személyzet az intézet különböző osztályaihoz tartoztak. Világossá vált azonban, hogy a részecskegyorsítók egyetlen központi egységbe való áthelyezése számos területen előnyös lesz. A nyaláb-

az egészségtudományok (például gyógyszerkutatás, biológiai minták vizsgálata), anyagtudományok (például mikromegmunkálás, ionnyaláb-analitika, sugártűrés-vizsgálatok), a környezetkutatás (környezeti minták, aeroszolok analízise), vagy például a kulturális örökség megőrzése (régészeti tárgyak analízise) területén, nem beszélve az olyan alkalmazásokról, mint a széles spektrumú izotóptermelés. Több területen végzünk szakképzést is, például a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség felkérésére. Tagjai vagyunk magyar és nemzetközi platformoknak, konzorciális projekteknek – például a Magyar Ionnyaláb-fizikai Platform (HIPP), CHARISMA (FP7), IPERION-CH (H2020), ENSAR2 (H2020). A gyorsítóinkon folyó kutatások eredményeire joggal vagyunk büszkéek, de tudjuk, hogy a jövőt csak csúcstechnológiát képviselő, a kutatások jövőképe szerint megvalósított, legkorszerűbb berendezésekkel alapozhatjuk meg.

Az alábbiakban egy rövid áttekintést adunk az Atomki gyorsítóparkjának történetéről. A listában végdátummal nem rendelkező berendezéseink ma is kiválóan működnek. Berendezéseink többsége saját építésű, a vásárolt berendezéseknél feltüntettük a gyártót.

- 100–300 kV neutrongenerátorok, 1958–1960.
- 800 kV Cockroft–Walton-kaszád, 1961–1992.
- 1 MV Van de Graaff elektrosztatikus gyorsító, 1970–
- 5 MV Van de Graaff elektrosztatikus gyorsító, 1971–
- MGC-20 Ciklotron, NIIFA, 1985–
- ECR ionforrás, 1996–
- Izotópszeparátor, 2009–
- AMS, ETH–Zürich, 2011–
- Tandetron, HVEE, 2014–

Az 1992-ben leállított kaszkádgenerátor szabadtéri kiállításra került intézetünk főbejárata mellett. A Van de Graaff generátorok koruk és a keleti blokk csúc-

1. táblázat

MTA Atomki gyorsítóinak ion- és energiaválasztéka		
gyorsító	részecske	energiatartomány
ciklotron	H, D, He	1–27 MeV
VdG-1	H, D, He	50 keV – 1,5 MeV
VdG-5	H, D, He, C, N, O, Ne	800 keV – 5 MeV
ECR ionforrás	H-Xe és molekulák	50 eV – 30xQ keV
izotópszeparátor	He, Ne, Ar, N, S, Se	50 eV – 50 keV
AMS	C-14	400 keV
Tandetron	H	200 keV – 4 MeV

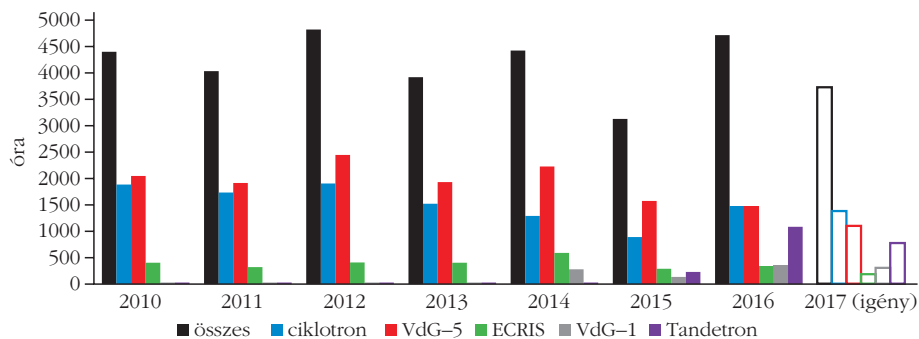
Az ECR-nél a Q a lefosztást jelenti. A Tandetron által biztosított energiatartomány jó közelítéssel lefedi a két Van de Graaff-gyorsító energiatartományát.

idők szervezése és szétosztása egyenletesebb és jobban optimalizálható. Az üzemeltető személyzet (körülbelül 20 fő) több gyorsítónál is bevetethető, a csoportok bármikor kisegíthetik egymást. A 2. ábrán bemutatjuk az utóbbi néhány évben felhasznált gyorsítónyaláb-időket és a 2017. első félévi igényeket. Idén először féléves időszakra gyűjtöttük be az igényeket, máris látszik, hogy az első félévre beérkezett igények megközelítik a korábbi éves szintet. Látható, hogy a 2015-ös indulás óta, 2016-ban nőtt a Tandetron felhasználása, és a 2017 év végére várhatóan meg fogja haladni az első éves felhasználásokat.

A felsorolt nagyberendezések közül a továbbiakban a Tandetron típusú elektrosztatikus gyorsítóval és a berendezésre épülő Tandetron Laboratóriummal foglalkozunk.

Az Atomki gyorsítóin dolgozó kutatócsoportok összefogásával 2012-ben az MTA Infrastruktúra pályázatára kidolgoztunk egy hosszú távú fejlesztési koncepciót *Asztrofizikától a nanotechnológiáig: az Atomki gyorsítókra épülő kompetenciaközpontja* címmel. Ez néhány éves távon egy korszerű, nagy áramú gyorsítóra épülő laboratórium kiépítését célozta meg. Első lépésként megpályáztunk és elnyertünk egy új, 2 MV-os Tandetron gyorsítót. A Tandetron Laboratóriumot a jövő évtizedek fő teherviselőjének szánjuk, amely minőségi változást jelent a folyó kutatásokban, és a többségükben már 2012-ben megfogalmazott, új kutatási területeket is megnyitja a magyar és nemzetközi kutatóközösség számára. A Tandetron Laboratórium projektet az MVM Paksi Atomerőmű is támogatta.

A koncepció alapján benyújtottunk és elnyertünk három további pályázatot is. Az első pályázat egy úgynevezett kihozott nyaláb megvalósítását célozta meg, a második egy nyalábelosztó kapcsolómágnes beszerzését szolgálta. A harmadik pályázat célja pedig egy pásztázó ionnanoszonda beszerzésére törekedett. Az első kettő ideiglenes helyén már működik, a csúcstechnológiájú nanoszondát pedig jelenleg helyezzük próbaüzembe. Mindezzel azonban a tervezett laboratórium teljes kiépítésének még mindig csak körülbelül 30 százalékát értük el. A teljes laboratórium kiépítését egy negyedik pályázat, a jelenleg folya-



2. ábra. MTA Atomki gyorsítóinak kihasználtsága.

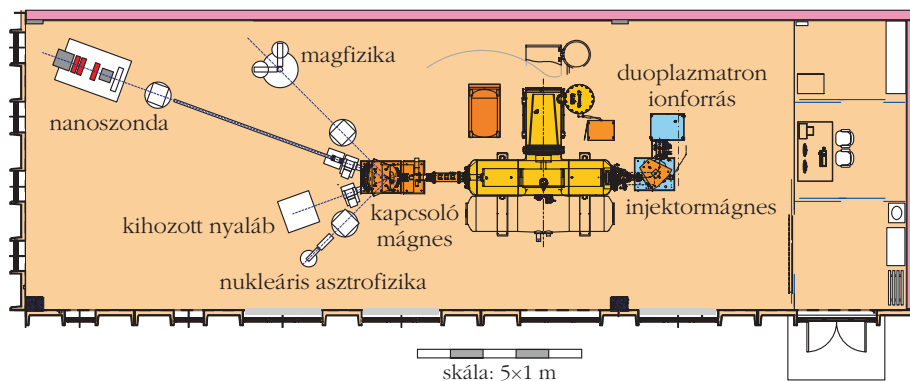
matban lévő a GINOP-2.3.3-15-2016-00005 projekt keretében kívánjuk megvalósítani.

A High Voltage Engineering Europa B.V. [12] holland cég által gyártott Tandetron típusú részecskegyorsítót 2014 májusában helyeztük üzembe (3. ábra). 2015. januárban beüzemeltük a negatív hidrogénionokat előállító duoplazmatron ionforrást az injektormágnessel és egy ideiglenes kapcsolómágnessel. Ez az egyszerű első elrendezés azonnal lehetővé tette két kutatási nyalábvég megvalósítását: az ionnyaláb kihozatalát a vákuumból a levegőbe és egy nukleáris asztrofizikai nyalábvég összeállítását. A gyorsító hivatalos ünnepélyes átadására egy nemzetközi tudománypolitikai konferencia keretében került sor (INARIE – Integrating Access to Pan-European Research Infrastructures in Central and Eastern Europe, 2015. november 30. – december 2.).

A 4. ábrán látható a Tandetron Laboratórium alaprajza, középen a gyorsító. A duoplazmatron ionforrás és az injektormágnes a jobb oldalon, a már működő és a beüzemelés alatt álló nyalábvégek a bal oldalon helyezkednek el. Időközben, szintén MTA Infrastruktúra támogatásból a Wigner Fizikai Kutatóközponttal közösen pályázva, beszereztünk egy – kilenc nyalábvég csatlakoztatását lehetővé tévő – professzionális kapcsolómágnessel is.

3. ábra. A Tandetron részecskegyorsító.





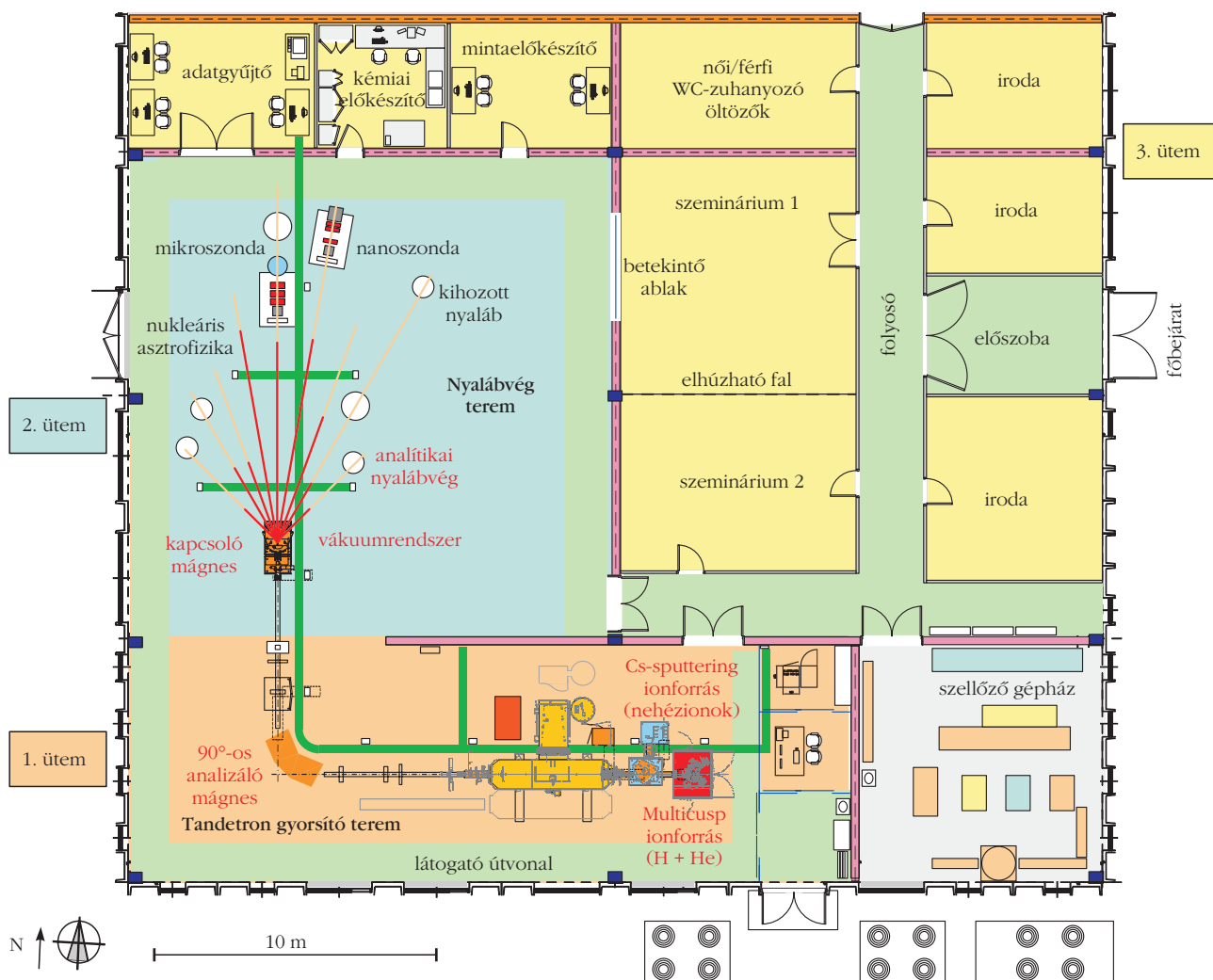
4. ábra. A jelenlegi elrendezés alaprajza.

héliumion-forrás kiválasztását. A duoplazmatron ionforrást át fogjuk alakítani cézium sputtering ionforrássá, ami lehetővé teszi nagy tömegszámú, negatív ionok előállítását. A Tandetron nagyenergiás oldalára kerül majd a 90°-os analizáló mágnes. A meglévő kapcsolómágnezt a jelenlegi (ideiglenes) helyéről át fogjuk telepíteni az analizáló mágnes kimenetére. A nanoszondát is új helyére, a kapcsolómágnes jobb oldali 10°-os kimenetére költöztetjük.

Az Atomki a fent említett GINOP pályázattal támogatást nyert a projekt folytatására. A tervezett elrendezést az 5. ábra mutatja. Egy multicusp ionforrás és egy 90 fokos analizáló mágnes beszerzésével a gyorsító elrendezése jelentősen átalakul és eléri az eredetileg tervezett, végső formáját. A multicusp ionforrásrendszer (piros téglalappal jelölve) tartalmazni fog egy ± 30 fokos eltérítő mágnezt, ami lehetővé teszi a hidrogén- vagy a

A mikroszkop is ide fog költözni a régi Van de Graaff-gyorsítótól, ezáltal sokkal jobb minőségű ionnyalábot kap majd (stabilitás, nyalábméret stb.). Az új analitikai nyalábvég a kapcsolómágnes egy másik kimenetére kerül. További nyalábvégek kifejlesztése is lehetővé válik a jelenlegi és a jövőbeli belső és külső felhasználók számára. Az ehhez szükséges vákuumrendszer helyét piros vonalakkal mutatja az ábra.

5. ábra. A tervezett, végleges elrendezés alaprajza.



2017 tavaszára elkészült a GINOP projektben tervezett fejlesztéseket befogadó nyalábtér. A 6. ábrán található fotó mutatja az aktuális állapotot.

A továbbiakban, a teljesség igénye nélkül, igyekszünk részletesebben bemutatni a Tandetron gyorsító működési elvét és a kapcsolódó kutatásokat.

A tandem típusú gyorsítók az elektrosztatikus gyorsítók családjába tartoznak, amelyeknél kétszer használjuk ki az ionokat gyorsító nagyfeszültséget. A gyorsítandó részecskékből negatív ionokat állítunk elő az ionforrás segítségével, ezeket eljuttatjuk a gyorsító szakasz elejére. A pozitív töltésű, nagyfeszültségű terminálig fognak gyorsulni a negatív ionok. A terminálelektroda belsejében, esetünkben argongázon áthaladva a negatív töltésű ionok elvesztik egy vagy több fölös elektronjukat (ezt a folyamatot lefosztásnak nevezzük), ezáltal semlegesek vagy pozitív töltésűek lesznek. A pozitív töltésű ionok azután a pozitív nagyfeszültség hatására tovább gyorsulnak a földpotenciálon lévő gyorsítókimenet felé, ahogy ez a 7. ábrán látható.

A 8. ábra mutatja a gyorsító kis- és a nagyenergiás oldalának áttekintő nézetét a felhasznált ionoptikai eszközökkel. Amikor nyalábot viszünk át a gyorsítón, a főbb optikai komponensek a következők: apertúra, mágneses eltérítő tekercs, elektrosztatikus fókuszáló lencse (Q-snout), lefosztó csatorna, elektrosztatikus kvadrupól triplét (Q-pole). A Q-snout lencse célja, hogy a gyorsítandó ionnyalábot a lefosztó csatorna közepére fókuszálja. A lefosztó csatornában, a kívánt töltésállapotú ionok létrehozása érdekében a gáz nyomása változtatható, tipikusan 10^{-2} mbar tartományban megfelelő. A lefosztás után a már pozitív töltésű ionnyaláb tovább gyorsul a nagyenergiás gyorsítócsőben. A gyorsítócső után következik az elektrosztatikus kvadrupól lencse, amely az ionnyalábot a céltárgyra fókuszálja. Egy leválasztó zsilip található a gyorsító nagyenergiás végén.

A gyorsító a gyártói specifikációkat bőven meghaladó módon teljesít. Elektrosztatikus gyorsító esetén a nagyfeszültséget jellemző paraméterek a hosszú távú stabilitás és a fodrozódás (ripple). A nagyfeszültséget esetünkben egy

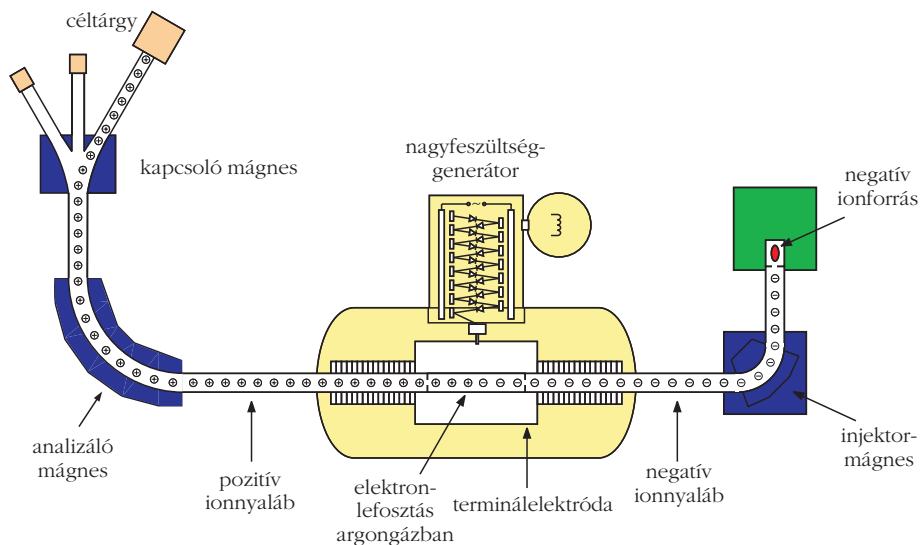


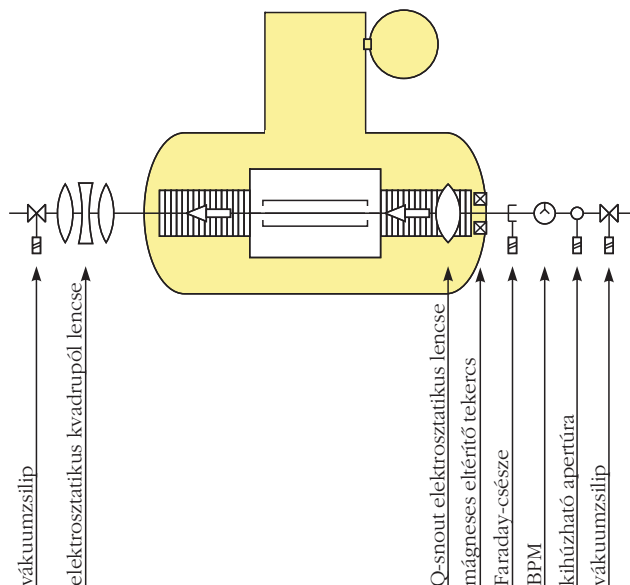
6. ábra. Tandetron Laboratórium 2017 tavaszán.

hangolt rezgőkörön (RLC) keresztül párhuzamosan táplált, nyomástartályba helyezett, kén hexafluorid (SF_6) szigetelésű kaszkádgenerátor szolgáltatja. 1,5 millió voltos feszültségnél a nagyfeszültség stabilitását jellemző feszültségingadozás a gyártói 200 V-os tartománnyal szemben jobb, mint 50 voltot adódott a másfél órás mérés alatt. A fodrozódást pedig 25 V helyett 20 V alattinak mértük. A gyorsító által szolgáltatott ionnyaláb így stabil és kis energiaszórású lesz, ami alapvető fontosságú a legtöbb tudományos kísérlet elvégzéséhez.

A gyorsító – a gyártó által meghatározott követelményrendszer alapján – magyar cégek által megtervezett és felújított épületbe került, amelyben automata vezérlésbe integrált épületgépészet működik. Mérve, szabályozva és naplózva van többek között a belső hőmérséklet, a páratartalom, a technológiai hűtővíz hőmérséklete és vezetőképessége.

7. ábra. Tandem elvű gyorsító vázlatos képe.





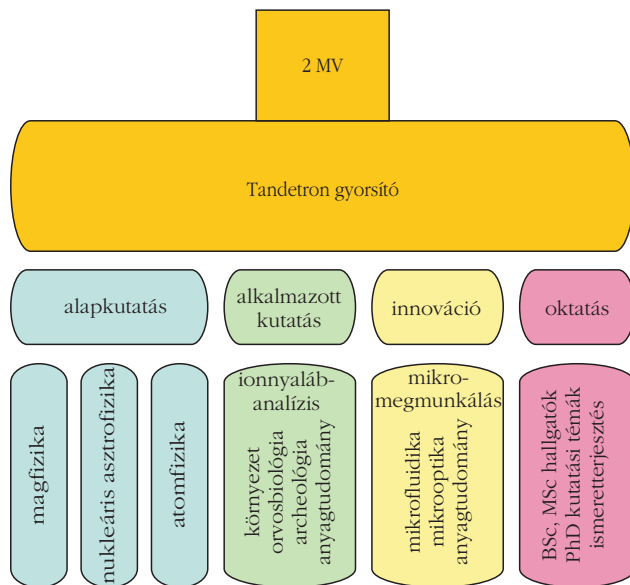
8. ábra. Releváns ionoptikai eszközök sematikus rajza.

A kialakítás során – a berendezést kiszolgáló igényes környezet megépítésén túl – fontos szempont volt a felhasználói igények biztosítása is. A később telepítésre kerülő proton nanoszonda számára nagyon fontos a rezgésmentesség biztosítása. A nanoszonda, a korábban bemutatott pásztázó proton mikroszondához képest [13] a nanométeres tartományba eső nyalábátmérő elérését tűzte ki célul. A cél érdekében az épületgépszeti berendezések rezgéscsökkentő, speciális tervezésű gépalapokra kerültek. A padozat stabilitását pedig egy acélhajas erősítésű, az aljzatrétegtől és az oldalfalaktól rugalmas réteggel elválasztott, egyben húzott, úgynevezett úsztatott beton biztosítja.

A laboratórium teljes területén beléptető rendszer működik, ahol helyiségenként lehet a jogosultságokat kiosztani. Így a gyorsítóterembe csak az arra jogosult személy léphet be. A gyorsító által esetlegesen keltett sugárzás méréséről egy környezeti monitorizáló rendszer gondoskodik. E rendszer három detektora foton-sugárzásra érzékeny, spektrális felbontásra is alkalmas. A negyedik detektor a foton-sugárzás érzékelésén túl alkalmas neutronsugárzás érzékelésére is. A telepített detektorok hatósági hitelesítése nem lehetséges, ezért a pontos dózis és dózisteljesítmény mérésére hordozható, hitelesíthető műszert alkalmazunk.

Amennyiben a céltárgynál hatóság által meghatározott dózisteljesítményt meghaladó sugárzás keletkezik, a rendszer, a kisenergiás nyalábmegszakítót azonnal betolva, megszünteti az ionáramot, ezzel a sugárzást.

A gyorsítóra alapozott Tandetron Laboratórium lehetőségeit a 9. ábrán összesítettük. Az alap- és alkalmazott kutatásokon túl lehetőség nyílik eddig fel nem tárt területek megnyitására, innovációra is. A nemzeti gyorsítóközpont részeként kiemelt fontosságú az oktatásban való minél integráltabb részvétel. A Tandetron Laboratórium kiváló lehetőséget biztosít a gyorsítókra alapozott kutatások és technikák megismertetésére és oktatására. A magfizika magas színvonalú oktatása nagy fontossághoz jut a Paks-2 projektben is.



9. ábra. A Tandetron Laboratórium felhasználási területei.

Az alábbiakban a teljesség igénye nélkül felsoroljuk azokat a súlyponti, új kutatási témákat, amelyek kibontakoztatását a Tandetron Laboratórium keretei között tervezzük megvalósítani.

Világszínvonalú ionnyaláb analitika, ion-megmunkálás, például:

- Ionnyalábos megmunkálással mikrofluidikai eszközök fejlesztése; biológiai szűrők, a cirkuláló ráksejtek kiszűrése vérből (együttműködő partner: Pannon Egyetem).

- Mikro- és nanonyalábokkal a távközlésben használható integrált optikai elemek, hullámvezetők és optikai rácsok készítése; különleges „nano-on-micro” optikai elemek fejlesztése a távközlés és biokémiai szenzorok számára (mikrolézerek, optikai mikrorezonátorok) (partner: Wigner FK).

- A nanoionnyalábbal a rezonáns abszorpción alapuló lézeres iongyorsítás megvalósításához polimer céltárgyak, valamint fotonikus kristályok és optikai eszközök készítése (partner: Wigner FK).

- A nanoionnyalábbal különleges, úgynevezett metaanyagok készítése, például negatív törésmutatóval, valamint kémiai mikroreaktorok készítése (partner: Wigner FK).

Nukleáris asztrofizika: a csillagokban lejátszódó folyamatok megértése szempontjából fontos magreakciók tanulmányozása a mérhetőséget biztosító nagy nyalábbintenzitásokkal, különös tekintettel a hidrogénfúzió bizonyos reakcióinak – az Atomki korábbi gyorsítóival nem megvalósítható – vizsgálatára. A gyorsító kiváló kiegészítője lesz a LUNA nemzetközi együttműködés kisenergiás föld alatti gyorsítójának (partner: LNGS, INFN, Olaszország). Ebben a témakörben már megjelent az első tudományos folyóiratcikk, ami teljes egészében az új gyorsítón készült [14].

Magfizika: a fűrtös szerkezetű és a vastag neutronhéjjal rendelkező, könnyű magok, valamint ezekben lejátszódó nagyenergiás gamma-bomlások vizsgálata. Az Atomkiban nemrég egy olyan anomáliát sikerült

megfigyelni gamma-bomlásban, ami összhangban van egy hipotetikus új részecske létével, ez pedig kapcsolatot teremthet a látható világunk és a sötét anyag között. A Tandetron, egy modern (ENSAR, FP7 által is támogatott) e^+e^- párspektrométerrel ideális lehetőségeket teremt a kísérletek folytatására (partner: IFJ, Krakó, Lengyelország).

Magfizikai alap kutatásokban az együttműködések egyik legvalószínűbb területe az ELI-NP munkájához való kapcsolódás. Romániában hamarosan működésbe lép az ELI (Extreme Light Infrastructure) berendezés egyik pillére, amelynek célja lézerekre alapozott magfizikai kutatások végzése. Az Atomki kutatói részt vesznek az ELI-NP kutatási tervének kidolgozásában és a Tandetron gyorsítón kialakítandó kutatói környezet lehetőségét biztosíthat arra, hogy az együttműködés mindkét oldal számára kölcsönösen hasznos legyen.

Atomfizika és alkalmazásai: az ionbombázással kiváltott sugárkárosodási folyamatok első lépcsőjének (molekulák ionizációja és fragmentációja) vizsgálata a daganatterápiában alkalmazható ionokkal való ütközések hatására. Az elkészült laboratóriumban elérhető ionok energia- és töltésállapot-tartománya éppen a daganat roncsolása szempontjából legérdekesebb, úgynevezett Bragg-tartomány feltérképezésére alkalmas (partnerek: Lisszaboni Egyetem, Portugália, Madridi Egyetem, Spanyolország, Caeni Egyetem, Franciaország).

Biológiai alkalmazások: élő sejtek besugárzása ionokkal. Itt nem a primer folyamatot, hanem a sejtre gyakorolt hatásokat vizsgáljuk. A levegőre kihozott nyaláb sejtenyészetek vizsgálatára alkalmas, a kihozott mikronyaláb és pásztázó ionszonda igen kis méretű nyalábjá pedig már a sejt egyes szerkezeti elemeinek szelektív besugárzását is lehetővé teszi majd (partner: Debreceni Egyetem).

Atom- és felületfizika: az ionterelési és a felületi ionszarnázódási mechanizmusok (surface channeling) vizsgálata. Ezen önszerveződő folyamatok megértése és alkalmazása erősen kutatott téma. A tandet-

ron energiatartományában tervezett szisztematikus vizsgálatokkal a témában intenzív nemzetközi együttműködésekkel az élvonalban maradunk (partner: TU Wien, Ausztria).

Környezetanalitika: aeroszolvizsgálatok. A városi levegő legjelentősebb szennyezője – negatív egészségügyi és környezeti hatásaival, például szmog – a légköri aeroszol. Fontos a források azonosítása és járulékaik meghatározása. Az aeroszol komplexitása és változékonysága miatt ez különleges mérési technikát igényel, ilyen például a gyorsítóra alapozott ionnyaláb-analitika (partner: Wigner FK).

A Laboratórium a felsoroltak mellett természetesen további, előre nem látható kutatási témák számára is jó alapot jelent. Készen állunk, hogy azok művelésére lehetőséget biztosítsunk. Számítunk rá, hogy mind a hazai, mind a nemzetközi kutatói közösség további projektekként jelentkezik a Tandetron Laboratóriumban.

Irodalom

1. <http://www.atomki.mta.hu>
2. Koltay E.: Részecskegyorsítók az ATOMKI-ban. *Fizikai Szemle* 14 (1964) 373.
3. Kiss Á. Z.: Gyorsított ionnyalábokkal végzett kutatások az ATOMKI-ban. *Fizikai Szemle* 59 (2009) 417.
4. <https://www.atomki.hu/osztalyok/1/bemutakozas>
5. <http://www.rmki.kfki.hu/nuclphys1/EG2R.html>
6. Kostka P.: A hazai fizikatörténet jeles emléke. *Természet Világa* 135 (2004) 11.
7. Klopfer E.: Tisztelgés a Simonyi-féle gyorsítóépítő iskolának. *Fizikai Szemle* 55 (2005) 317.
8. Berényi D.: A magyar ciklotron. *Fizikai Szemle* 46 (1996) 333.
9. Biri S., Pálkás J., Berényi D.: Elektron ciklotron rezonancia ionforrás – új lehetőség a magyarországi nehézion-fizikában. *Fizikai Szemle* 44/3–4–5 (1994) 89. 163. 198.
10. <http://kfiadattar.nkfi.gov.hu/web/guest?urlap?entityType=0&entityId=20384>
11. <http://portal.meril.eu/meril/view/facility/15132>
12. <http://highvolteng.com>
13. Rajta I.: Protonnyalábos mikromegmunkálás: Egy új, direkt írásos, 3-dimenziós litográfias eljárás. *Fizikai Szemle* 57 (2007) 187.
14. Gyürky Gy., et al.: Cross section measurement of the astrophysically important $^{17}\text{O}(p, \gamma)^{18}\text{F}$ reaction in a wide energy range. *Phys. Rev. C* 95 (2017) 5805.

Jobb egy mentőötlet mint öt mentő egylet

– írta Karinthy Frigyes az egyletistápolás margójára.

**Most Társulatunknak lenne szüksége
egyletmentő ötletekre!**



**Ezek az ötletek nem vesznek el,
ha a <http://forum.elft.hu>
linken, az ELFT stratégiai vitafórumán adjuk elő.**



Z BOZONOK JELENTŐSÉGE NEHÉZION-ÜTKÖZÉSEKBEN

Zsigmond Anna Julia

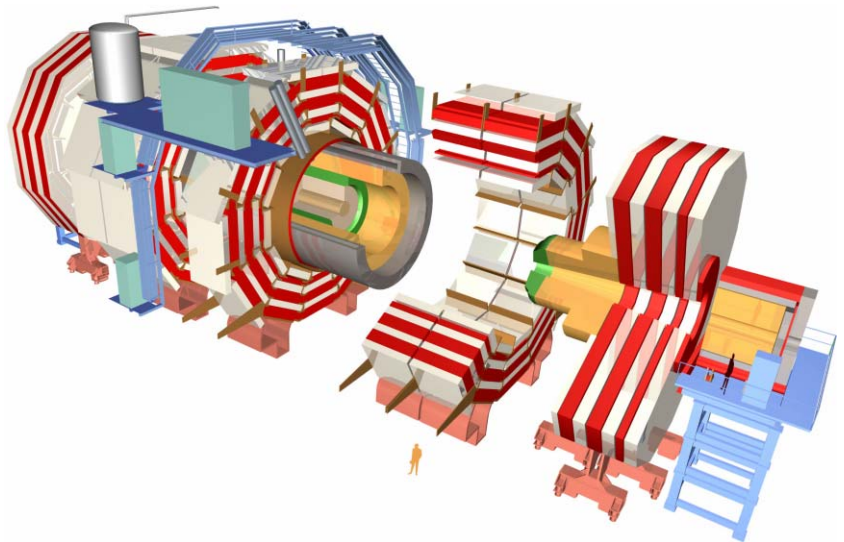
Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
Max Planck Institut für Physik, München

Nagyenergiás nehézion-ütközésekben a Világegyetem korai időszakában létező sűrű és forró anyagot, a kvark-gluon plazmát tanulmányozzuk. A kvarkok az erős kölcsönhatásban résztvevő anyagi részecskék, amelyeket a gluonok, az erős kölcsönhatás közvetítő részecskéi tartanak össze. A kvarkok és gluonok, együttes nevükön partonok, a hadronok építőkövei. Ilyen hadronok például a proton és a neutron, amelyek az atommagokat, és így a hétköznapi anyag nagy részét alkotják.

Elsőként a Brookhaven National Laboratory kísérletei figyelték meg a kvark-gluon plazmát arany atommagok 200 GeV nukleonpáronkénti tömegközépponti energiájú ütközéseiben. A várakozásokkal ellentétben azt találták, hogy egy erősen kölcsönható közeg jön létre, amely majdnem tökéletes folyadékként viselkedik [1–4].

Az atommag-atommag ütközések fontos tulajdonsága a kezdeti geometria, vagyis a két atommag átfedésének mértéke, amit centralitásnak is hívunk. A részecskekeletkezés az események centralitásától függ. A keletkezett kis impulzusú részecskék száma jó közelítéssel arányos az ütközésben résztvevő nukleonok számával. A nagy impulzusátadással járó kemény folyamatok, mint például a fotonok vagy gyenge bozonok és a nagyenergiájú hadronzárporok, más néven jetek keletkezése, ugyanakkor az elemi nukleon-nukleon ütközések számával skáláznak.

Az LHC (Nagy Hadronütköztető) révén elért ütközési energiák első alkalommal nyitották meg a lehetőségét a nagy tömegű, gyenge bozonok keletkezésének és vizsgálatának nehézion-ütközésekben. A Z és



1. ábra. A CMS kísérlet sematikus rajza.

W bozonok mérése fontos viszonyítási alap, mivel ezek az ütközés elején, a kvark-gluon plazma kialakulása előtt keletkeznek és el is bomlanak, ennél fogva keletkezésük csak az ütközés kezdeti geometriájától függ, és azt a forró és sűrű közeg nem módosítja. A Z bozon bomlása elektron- vagy müonpárookra különös érdeklődésre tart számot, mert a leptonok nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban, így gyakorlatilag szabadon keresztüljutnak a közegen. Ez lehetőséget ad arra, hogy nehézion-ütközésekben ellenőrizzük a kemény folyamatok skálázási tulajdonságait, és hogy a Z bozonokat referenciaként használjuk módosult folyamatok, mint például nagy energiájú partonok és hadronzárporok elnyomásának tanulmányozásakor.

Az LHC nehézion-fizikai programja 2010. év végén kezdődött ólom atommagok 2,76 TeV nukleonpáronkénti, tömegközépponti energiájú ütközéseivel, majd 2011. év végén nagyobb adatmennyiség felvételére került sor. A kialakult kvark-gluon plazmának köszönhető hatások leválasztásához a méréseket proton-proton ütközések eredményeivel hasonlítjuk össze. Ehhez az LHC 2011-ben és 2013-ban szolgáltatott azonos 2,76 TeV-os tömegközépponti energiával proton-proton ütközéseket.

Jelen írásunkban a CMS kísérlet nehézion-fizikai csoportjának eredményeiről számolunk be. Az 1. ábrán a CMS kísérlet [5] sematikus vázlata látható. Bevezetésként a Z bozonok és jetek témaköréből mutatunk be eredményeket, majd a legújabb mérésre, a Z bozonok és jetek korrelációjának vizsgálatára térünk át. Z bozon-jet párok keletkezésének megfigyelését és mérését a 2015-ben elért nagyobb ütközési energia (nukleonpáronként 5,02 TeV) és nagyobb adatmeny-

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 26-án elhangzott előadás alapján készült.

A munkát az OTKA (NK 81447, K 81614, K 109703) és Swiss National Science Foundation (152601) pályázatok támogatták.



Zsigmond Anna a müncheni Max Planck Institut für Physik posztdoktori kutatója, ahol a GERDA kísérlet tagjaként a neutrínó nélküli kettős béta-bomlás keresésében vesz részt. 2016-ig a Wigner Fizikai Kutatóközpont fiatal kutatójaként a CMS kísérletben végzett kutatásokat nehézion-ütközések témájában. PhD dolgozatát az ELTE-n védte meg *Z bozonok keletkezésének tanulmányozása nehézion-ütközésekben a CMS kísérletben* címmel.

nyiség tette lehetővé. Az eredményeket az ugyancsak 2015-ben felvett referencia proton-proton ütközésekkel hasonlítjuk össze.

Z bozonok vizsgálata

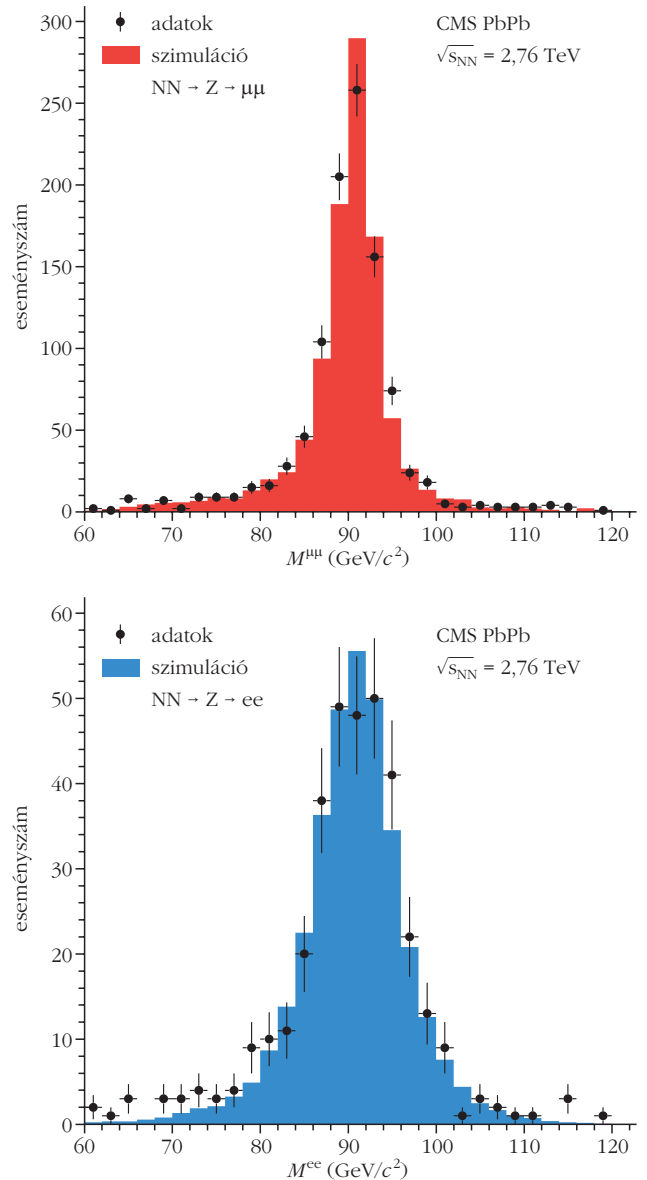
A Z bozonokat ellentétes töltésű leptonpárookra való bomlásaik alapján azonosítjuk. A CMS kísérlet kitűnő pontossággal képes nagy energiájú müonokat és elektronokat azonosítani, és azok transzverzális (nyalábirányra merőleges) impulzusát (p_T) meghatározni. A müonokat a belső nyomkövetőben és a külső müondetektorokban megfigyelt nyomok kombinált illesztése alapján rekonstruáljuk. Az elektronokat egy, az elektromágneses kaloriméterben keletkezett zápor alapján azonosítjuk, és a fékezési sugárzást figyelembe vevő, kívülről befelé haladó nyomkövetéssel választjuk külön a fotonoktól.

A keletkezett Z bozonok számát a 60–120 GeV/ c^2 invariáns (nyugalmi) tömegtartományban talált leptonpárok száma alapján határozzuk meg proton-proton és ólom-ólom ütközésekben egyaránt. A 2. ábrán a Z bozon csúcs látható a müonos és az elektronos bomlási csatornában, összehasonlítva a szimulációkkal. Az adatok és a szimuláció jó egyezést mutatnak, ami demonstrálja, hogy a folyamat hátere nehézion-ütközésekben is alacsony. A talált, ellentétes töltésű müon-, illetve elektronpárok számát a szimulációból meghatározott hatásfokokkal korrigálva meghatározható a Z bozonok keletkezési hozama.

A Z bozonok hozamát az események centralitásának függvényében vizsgálva azt találjuk, hogy az adott centralitásosztályban a hozam arányos az elemi nukleon-nukleon ütközések átlagos számával. Ez az eredmény megerősíti a kemény folyamatok skálázási tulajdonságaival kapcsolatos várakozásainkat. Az ólom-ólom ütközésekben mért, és az elemi nukleon-nukleon ütközések átlagos számával elosztott hozamot a referencia proton-proton ütközésekben mért hatáskeresztmetszettel elosztva kapjuk a nukleáris módosulási faktort, amely nem-módosuló folyamatokra egy, elnyomás esetén pedig egynél kisebb értéket vesz fel. A Z bozonok nukleáris módosulási faktora a mérési bizonytalanságokon belül egynek adódik centralitás, transzverzális impulzus és rapiditás függvényében is. Ezen mérésekkel beláttuk, hogy a Z bozonokat nem befolyásolja az erősen kölcsönható közege, illetve hogy a lehetséges kezdeti állapotú effektusok a mérési bizonytalanságokon belül vannak [6].

Jetelnyomás tanulmányozása

Két nagyenergiás részecske ütközésekor gyakori folyamat, hogy egymással ellentétes irányban egy nagy transzverzális impulzusú partonpár keletkezik. Az erős kölcsönhatás kvarkbezárási tulajdonságának köszönhetően ezek a partonok nem jutnak el a detektorig, hanem kvark-antikvark párok keletkezésével

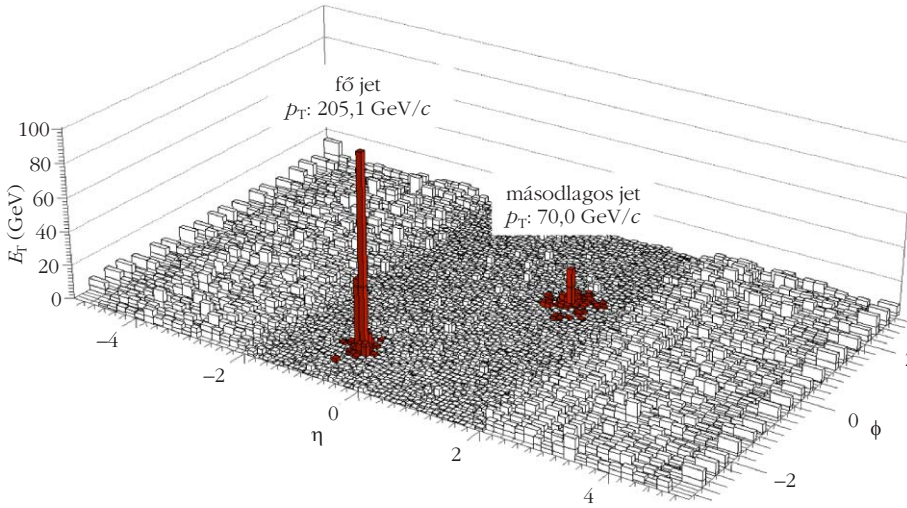


2. ábra. A kiválasztott müonpárok (felül) és elektronpárok (alul) invariáns tömeg-eloszlása ólom-ólom ütközésekben.

egy-egy hadronzáport hoznak létre, amit jetnek hívunk. A jeteket az elektromágneses és a hadronikus kaloriméterek együttes információja alapján rekonstruáljuk egy adott méretű kúpban.

Nagyenergiás nehézion-ütközésekben a kemény folyamatban keletkezett jetek kölcsönhatnak a kvark-gluon közzeggel, amiktől elveszítik energiájuk egy részét. Ezt a folyamatot hívjuk a jetek elnyomásának. A jetelnyomás vizsgálata hozzájárul a kvark-gluon plazma tulajdonságainak jobb megértéséhez. Az LHC-nál elért energiák lehetővé tették, hogy közvetlenül megfigyeljünk olyan eseményeket, amelyekben egy nagyenergiás jetet rekonstruálunk, de az ellentétes irányban csak kis impulzussal, vagy egyáltalán nem találunk jetet. Egy ilyen eseményre mutat példát a 3. ábra.

A jetpárokkal végzett mérések a CMS kísérletben azt találták, hogy centrális események felé haladva egyre aszimmetrikusabbak az események, vagyis ahogy a

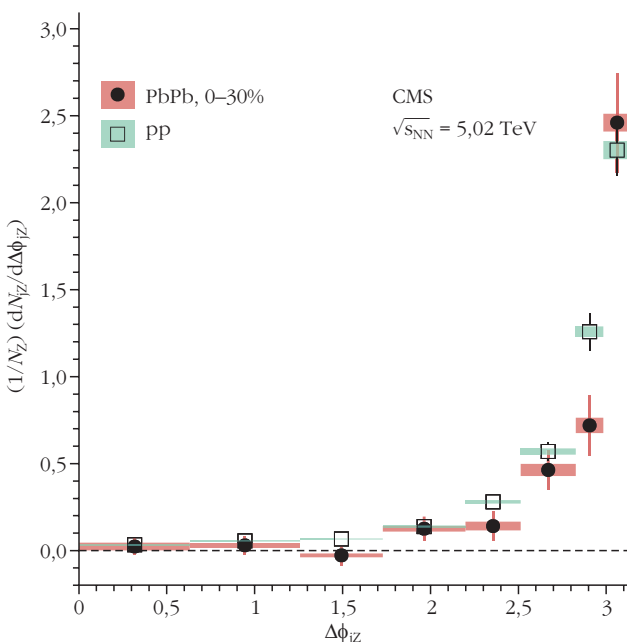


3. ábra. Egy ólom-ólom ütközés aszimmetrikus jettárral.

kvark-gluon plazma térfogata nő, úgy egyre több jet veszíti el energiájának egy részét [7, 8]. Az energiamegmaradás ezekben az ütközésekben sem sérül, mert a jet által a közegben leadott energiát, a jet irányához képest nagy szögben szóródott kis impulzusú részecskék hozzák. Azt is megmutatták, hogy a nehéz b kvarkot tartalmazó jetek a könnyű jetekhez hasonló mértékben veszítik el energiájukat ólom-ólom ütközésekben [9], vagyis a partonok fajtájától (ízétől) nem függ jelentősen a kvark-gluon plazma hatása.

A jettárral végzett mérések csak a relatív energiavesztésről adnak információt, hiszen mindkét jet kölcsönhat a közeggel mielőtt detektáljuk őket. Ezzel szemben foton-jet párok mérésével az abszolút energiavesztésről is képet kaphatunk, hiszen a foton erős kölcsönhatás nélkül jut el az elektromágneses kaloriméterbe. A foton megadja a jet kezdeti irányát

4. ábra. A Z bozon és jet által bezárt azimutális szög eloszlása proton-proton és ólom-ólom ütközésekben.



és energiáját, valamint azonosítja az eredetét, ugyanis a legvalószínűbb folyamatban a fotonnal együtt u vagy d kvark keletkezik.

A CMS kísérlet foton-jet párok vizsgálatával és proton-proton ütközésekkel való összehasonlításukkal megmutatta, hogy a jet iránya a közegben nem változik, de centrális eseményekben a jetek átlagosan energiájuk 15%-át veszítik el [10]. A foton-jet események vizsgálatánál nehézséget okoz az ütközés során keletkező rengeteg foton közül a jettel együttesen keletkező elsődleges fotonok

kiválogatása. Erre a nehézségre adnak megoldást a Z bozonok, mert ahogy megmutattuk, ezek azonosítása rendkívül kis háttérrel megvalósítható.

Z bozonok és jetek korrelációjának vizsgálata

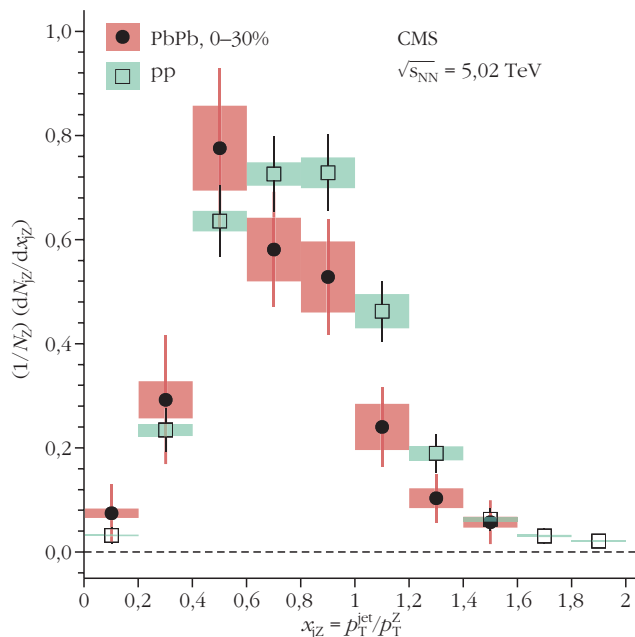
A Z bozon a fotonhoz hasonlóan megadja a parton kezdeti energiáját, és legvalószínűbb esetben a könnyű u és d kvarkokkal keletkezik együtt, így ezek energiavesztéséről nyerhetünk kvantitatív információt. A CMS kísérletben a 2015-ben felvett nagy statisztikájú, 5,02 TeV tömegközépponti energiájú ütközésekben Z bozonok segítségével vizsgáltuk a jetlenyomást [11].

Az ólom-ólom ütközések közül nagy transzverzális impulzusú Z bozonokat válogattunk ki a müonos és az elektronos bomlási csatornában, és összepárosítottuk őket az eseményben rekonstruált jettekkel. A mérésekhez centrális ólom-ólom ütközéseket használtunk, amelyek a teljes hadronikus hatáskeresztmetszet, vagyis az összes hadron kölcsönhatásával járó esemény 30%-ának felelnek meg.

A 4. ábrán a Z bozon és a jetek által bezárt azimutális (nyalábirányra merőleges síkban mért) $\Delta\phi_{jZ}$ szög eloszlása látható proton-proton és ólom-ólom ütközésekben. Azt figyelhetjük meg, hogy mindkét ütközési rendszerben a jeket a Z bozonnal ellentétes irányban detektáljuk, tehát a kvark-gluon plazma nem változtatja meg jelentősen a jet irányát.

Az energiavesztés méréséhez a jetek és a Z bozonok transzverzális impulzusának arányát (x_{jZ}) számoltuk ki, és proton-proton ütközésekkel összehasonlítva ábrázoltuk az arány eloszlását az 5. ábrán. Ólom-ólom ütközésekben x_{jZ} átlagosan alacsonyabb, mint proton-proton ütközésekben a parton közegbeli energiavesztésének köszönhetően. A mért eloszlások segítségével pontosíthatjuk a jetlenyomás leírását modelleinkben és a szimulációkat.

Az eddigi eredményekhez a Z bozonnal ellentétes irányban rekonstruált jeket használtuk, azonban az

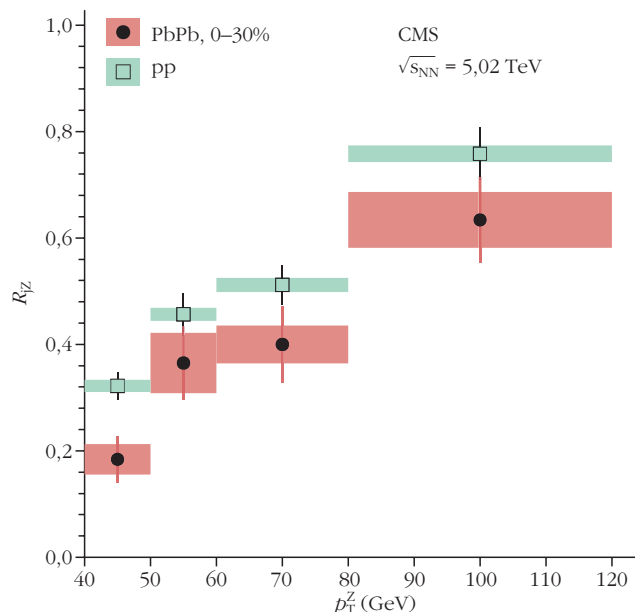


5. ábra. A jet és a Z bozon transzverzális impulzusának aránya proton-proton és ólom-ólom ütközésekben.

energiavesztésnek köszönhetően előfordulhat, hogy a kilépő hadronzapor energiája nem elég, hogy jetként rekonstruáljuk. A 6. ábrán a Z bozon transzverzális impulzusának függvényében látható a Z bozonnal ellentétes irányban talált jetek átlagos száma (R_Z) a két ütközési rendszerben. A Z bozon transzverzális impulzusától függetlenül kevesebb jetet találunk ólom-ólom ütközésekben, mint proton-proton ütközésekben, és az arányuk a mérési bizonytalanságokon belül állandó.

Összefoglalás

A CMS kísérlet méréseivel beláttuk, hogy a Z bozonok hozama az elemi nukleon-nukleon ütközések számával skálázik ólom-ólom ütközésekben, tehát a Z bozonok keletkezését nem befolyásolja az ütközésekben kialakuló erősen kölcsönható, sűrű és forró közeg. Ezzel szemben az erős kölcsönhatásban résztvevő partonok szóródnak a kvark-gluon plazmában, ennél fogva a belőlük kialakuló nagyenergiás jetek vizsgálata a közeg transzporttulajdonságairól szolgáltat információt. Korábbi mérésekben megfigyeltük, hogy a centrális ólom-ólom ütközésekben a jetpárok aszimmetrikusak, és a hiányzó energiát a jetkúpon kívüli alacsony impulzusú részecskék hordozzák. A 2015 végén felvett nagyobb tömegközépponti energiájú és nagyobb adatmennyiségű ólom-ólom ütközésekben először vált lehetővé a Z



6. ábra. A Z bozonnal ellentétes irányban talált rekonstruált jetek aránya a Z bozon transzverzális impulzusának függvényében proton-proton és ólom-ólom ütközésekben.

bozonok és jetek korrelációjának vizsgálata. Azt találtuk, hogy a Z bozonnal párban keletkező jetek megtartják az irányukat, de elveszítik energiájuk egy részét. A Z bozonnal együtt keletkező jetek átlagos száma a proton-proton ütközésekben mérthez képest a Z bozon transzverzális impulzusától függetlenül alacsonyabb, vagyis a jetek egy része annyi energiát veszít, hogy jetként nem tudjuk rekonstruálni. Az itt bemutatott eredmények pontosítják tudásunkat a kvark-gluon plazma transzporttulajdonságairól, amit a szimulációk fejlesztésére tudunk használni.

Irodalom

1. BRAHMS Collaboration, *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 1, arXiv:nucl-ex/0410020.
2. PHENIX Collaboration, *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 184, arXiv:nucl-ex/0410003.
3. PHOBOS Collaboration, *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 28, arXiv:nucl-ex/0410022.
4. STAR Collaboration, *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 102, arXiv:nucl-ex/0501009.
5. CMS Collaboration, *JINST* 3 (2008) S08004.
6. CMS Collaboration, *JHEP* 03 (2015) 022, arXiv:1410.4825.
7. CMS Collaboration, *Phys. Rev. C* 84 (2011) 024906, arXiv:1102.1957.
8. CMS Collaboration, *Phys. Lett. B* 712 (2012) 176, arXiv:1202.5022.
9. CMS Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 113 (2014) 132301, arXiv:1312.4198. [Erratum: *Phys. Rev. Lett.* 115 (2015) 029903].
10. CMS Collaboration, *Phys. Lett. B* 718 (2013) 773, arXiv:1205.0206.
11. CMS Collaboration, Accepted to publication in *Phys. Rev. Lett.* (2017), arXiv:1702.01060.

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

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

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtákar, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

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

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

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

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

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

TÖKÉLETLEN HOLOGRÁFIA

A rögzítőanyag nemlinearitásának és véges feloldóképességének hatása a rekonstruált holografikus képre

Bányász István

MTA Wigner FK,

Nukleáris Anyagtudományi Osztály

A digitális holográfia alapja a rekonstruált holografikus kép intenzitáseloszlásának kiszámítása a CCD vagy CMOS eszközzel detektált interferenciaképből a diffrakciós integrálok segítségével, hiszen ebben az esetben lehetetlen a hologramok optikai rekonstruálása. Ez a manapság rendelkezésre álló programok és nagy teljesítményű számítógépek segítségével könnyen kivitelezhető. Azonban a korai lézeres holográfia idején az 1960–1980-as években a számítástechnikai lehetőségek sokkal szerényebbek voltak, és csak kevés publikáció született a holografikus leképezés numerikus modellezéséről.

A kutatók már a korai holografikus cikkekben is arra a következtetésre jutottak, hogy a rekonstruált holografikus kép a gyakorlatban egyáltalán nem ideális. Mint az a fizikai optikából jól ismert, a felvételhez használt lézervény hullámhossza és a hologram numerikus apertúrája meghatározzák a rekonstruáláskor elérhető maximális térbeli feloldóképességet. Ha a hologram rekonstruálására használt fényhullám nem azonos a felvételkor használt referenciahullámmal (virtuális kép) vagy annak konjugáltjával (valós kép), a rekonstruált holografikus képben aberrációk jelennek meg, amelyek tovább rontják minőségét. A rekonstruált holografikus képek első numerikus meghatározásai Carter és Dougal [1], Champagne és Massy [2, 3], valamint Nowak and Zajac [4] munkáiban találhatók. Ezen szerzők jelentős közelítéseket használtak a diffrakciós integrálok kiszámításakor, így eredményeik a nagy numerikus apertúrájú hologramokra és az optikai tengelytől távoli tárgypontokra nem voltak érvényesek.

Jelen cikk írója Varga Péter témavezetésével és Kiss Gábor közreműködésével egy módszert dolgozott ki a rekonstruált holografikus kép intenzitáseloszlásának közelítés nélküli kiszámítására [5]. A módszer a fényhullám terjedését leíró kettős skaláris Fresnel–Kirchhoff-integrál közelítés nélküli formájának numerikus integrálásán alapult. E módszerrel már nagy numeri-

kus apertúrájú hologramok és az optikai tengelytől távoli tárgypontok esetében is pontosan ki lehet számítani a rekonstruált holografikus kép intenzitáseloszlását.

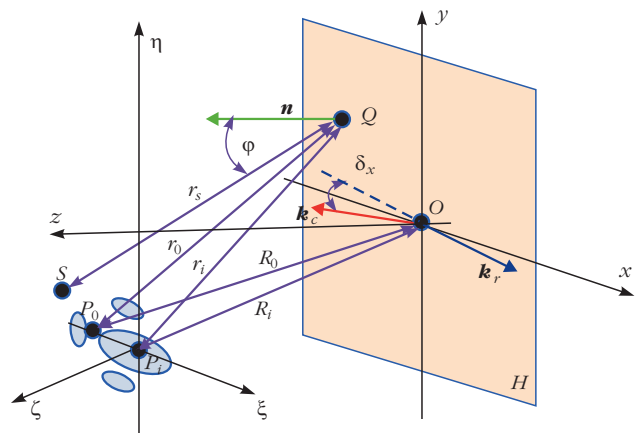
A modell

A diffrakciólimitált holografikus leképezés és az aberrációk

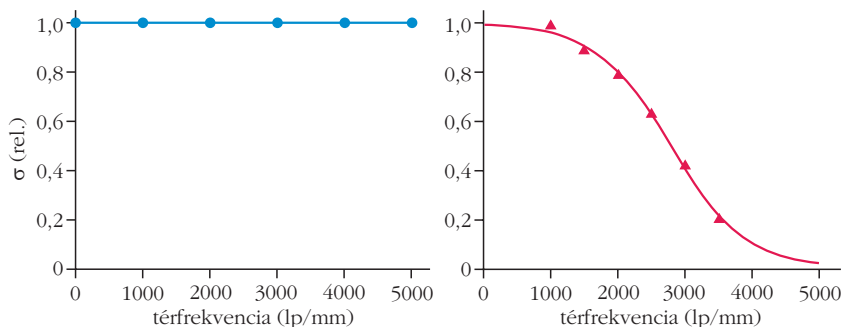
Egy pontforrás hologramjának felvétele és rekonstruálása látható az 1. ábrán. A P_0 pontforrás hologramját a téglalap alakú H holografikus lemezen rögzítjük. x, y a hologramhoz rögzített koordináta-rendszer tengelyei. $\mathbf{k}_r$ a sík (kollimált) referencianyaláb hullámvektora. A hologramot egy olyan síkhullámmal rekonstruáljuk, amelynek $\mathbf{k}_c$ hullámvektora egy kis δ_x szöget zár be a referencianyaláb konjugáltjával. A véges hullámhossz és numerikus apertúra, valamint a kis rekonstrukciós szöghiba miatt a pontforrás rekonstruált valódi képe aszimmetrikus, komplex eloszlás lesz a P_i ideális képpont körül, amely egy torzított $\sin(x)/x \cdot \sin(y)/y$ (sinc $\times$ sinc) eloszlásra emlékeztet (lásd a halványkék foltokat az 1. ábrán).

A rekonstruált holografikus kép komplexamplitúdó-eloszlása a kettős Fresnel–Kirchhoff-integrállal számítható ki. Az első integrál megadja a tárgynyaláb komplexamplitúdó-eloszlását a hologram síkjában. A második integrál pedig a tárgy rekonstruált, valós holografikus képének komplexamplitúdó-eloszlását adja meg a kép síkjában. Az egyszerűség kedvéért lineáris polarizációt (skaláris integrál) és egy dimenziós hologramot tételezünk fel:

1. ábra. Pontforrás hologramjának felvétele és rekonstruálása.



Bányász István 1983-ban végezte el az ELTE fizikus szakát. Ugyanott 1987-ben szerezte meg egyetemi doktori címét. 1994-ben a fizikai tudomány kandidátusa lett. 35 éve dolgozik az optika különböző területein. Jelenlegi kutatási területei: ionnyalábos technológiákkal készített integrált optikai elemek tervezése, készítése, minősítése és ionolumineszcencia. Az ELFT régi tagja, az SPIE nemzetközi optikai mérnöki társaság első magyar szenior tagja. Több mint húsz éve számos rangos nemzetközi folyóirat bírálója.



2. ábra. Balra az ideális, jobbra a valódi ezüst-halogenid rögzítőanyag modulációátviteli függvényének négyzetgyöke a térfrekvencia függvényében.

$$I(u, z) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} W(x) R(x) O(\xi) \cdot \frac{\cos \vartheta(\xi, x) \cos \rho(x, u, z)}{r_1(\xi, x) r_2(x, u, z)} \cdot \exp(i k [r_1 - r_2]) d\xi dx. \quad (1)$$

ahol $I(u, z)$, $W(x)$, $R(x)$ és $O(\xi)$ a rekonstruált kép, valamint a rekonstruáló és referencianyaláb, valamint a tárgynyaláb komplex amplitúdói, x és ξ a tárgy- és képkkoordináták, r_1 és r_2 , valamint ϑ és ρ pedig felvételtkor, illetve rekonstrukciókor határozzák meg a tárgy- és képvonal futópontjait összekötő vonalak hosszát és szögét, $i = (-1)^{1/2}$ és $k = 2\pi/\lambda$ a hullám-szám. Ha a W rekonstruáló nyaláb az R referencianyaláb konjugáltja, akkor nem torzítja a rekonstruált kép komplex amplitúdójának *fázisát*. Ettől függetlenül W torzítja a rekonstruált kép komplex amplitúdójának *nagyságát*, ha intenzitása nem egyenletes a hologram síkjában, ami a gyakorlatban mindig így van, mert a rekonstruáló és referencianyaláb általában úgynevezett „vágott Gauss” típusú.

A holografikus rögzítőanyag véges térbeli feloldóképességének és nemlinearitásának befoglalása a diffrakciós modellbe

Az ezüst-halogenid (többnyire ezüst-bromid) holografikus emulziókban nagyon kis ezüst-halogenid szemcsék vannak, méretük általában néhány nanométer (ultra nagy feloldóképességű emulziók) és 50 nm között van. A rögzítőanyag szemcsézettsége nyilvánvalóan korlátozza a benne rögzíthető interferenciacsíkok szélességét. Egy holografikus rögzítőanyag modulációátviteli függvénye (MTF) definíció szerint a benne rögzített síkhullám-hologramok diffrakciós hatásfoka a holografikus rácsok térfrekvenciájának függvényében. A térfrekvencia a milliméterenkénti interferenciacsík-párok száma, mértékegysége a vonalpár/mm (lp/mm). Már a korai holografikus cikkekben közöltek mért MTF-görbéket [6, 7]. Biedermann [6] és Falconer [8] elméleti modelleket javasoltak a rögzítőanyag MTF-ének leírására. Jelen cikk szerzője egy egyszerű analitikus függvényt javasolt az ezüst-halogenid holografikus rögzítőanyagok MTF-ének le-

írására, és sikeresen illesztette ezt a függvényt a mért MTF-ekre, valamint befoglalta a holográfia diffrakciós modelljébe [9].

E modell szerint az ezüst-halogenid holografikus rögzítőanyag MTF-ének négyzetgyöke (σ) a következő függvénnyel írható le (2. ábra):

$$\sigma(v) = \frac{1}{\exp\left(\frac{v - v_0}{c}\right) + 1}, \quad (2)$$

ahol v a síkhullámhologram térfrekvenciája, v_0 a rögzítőanyag térbeli feloldóképességének határa, c pedig $\sigma(v)$ gradiense a feloldási határ körül.

Lin javasolta a róla elnevezett görbesereg használatát a holografikus rögzítőanyagok, köztük az ezüst-halogenid emulziók, nemlinearitásának leírására [10]. A Lin-görbék definíció szerint az adott rögzítőanyagban felvett síkhullámhologramok diffrakciós hatásfokának négyzetgyöke, σ az E_0 átlagos expozíció és a V interferenciacsík-láthatóság (moduláció) függvényében. A moduláció definíciója a következő:

$$V = \frac{2\sqrt{R}}{R + 1},$$

ahol R a referencia- és tárgynyaláb intenzitásának aránya, $R = I_r/I_o$.

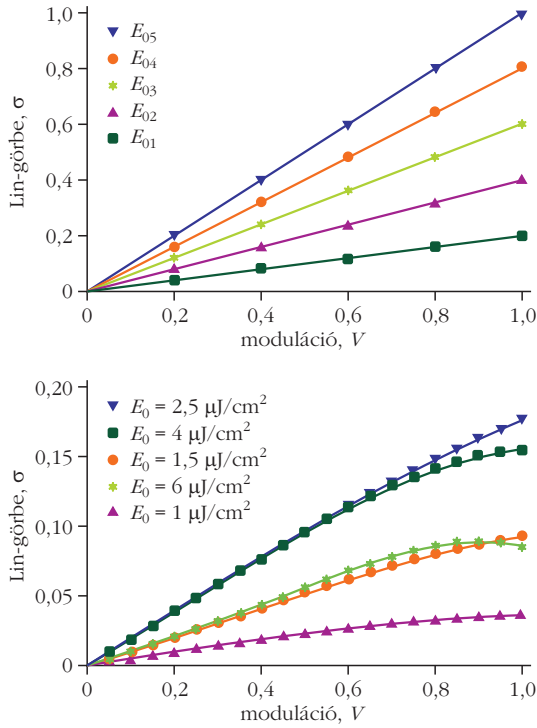
E cikk szerzője a mért $\sigma(E_0, V)$ Lin-görbesereget ezüst-halogenid és egyéb holografikus rögzítőanyagok esetében a következő analitikus függvénnyel modellezte [11]:

$$\sigma(E_0, V) = f(E_0) (1 - e^{-V}) \exp\left(-\frac{[V - V_0(E_0)]}{w^2(E_0)}\right), \quad (3)$$

a következő paraméterekkel:

$$Par(E_0) = c_{i01} \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{c_{i11} - E_0}{c_{i12}}\right) + 1} + c_{i13} \right) \cdot \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{E_0 - c_{i21}}{c_{i22}}\right) + 1} + c_{i23} \right) \cdot \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{c_{i31} - E_0}{c_{i32}}\right) + 1} + c_{i33} \right), \quad (4)$$

ahol Par a V_0 és w értéket vesz fel. A függvénynek összesen 27 paramétere van. Egy ideális és egy valódi holografikus rögzítőanyag Lin-görbéi láthatók a 3. ábrán.

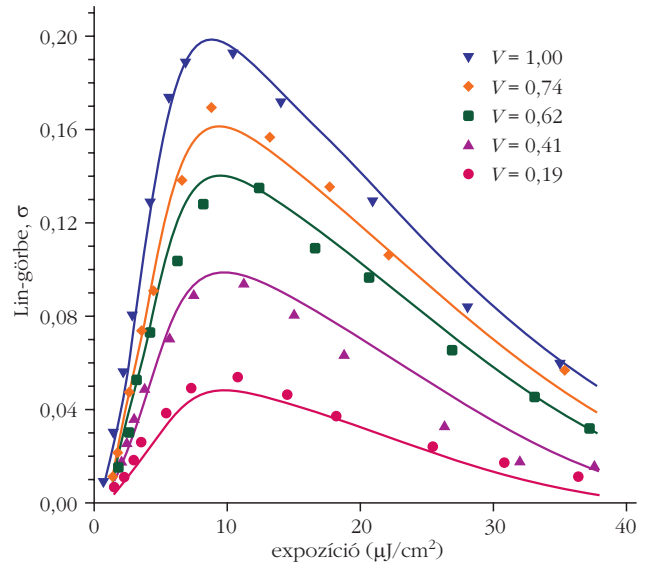
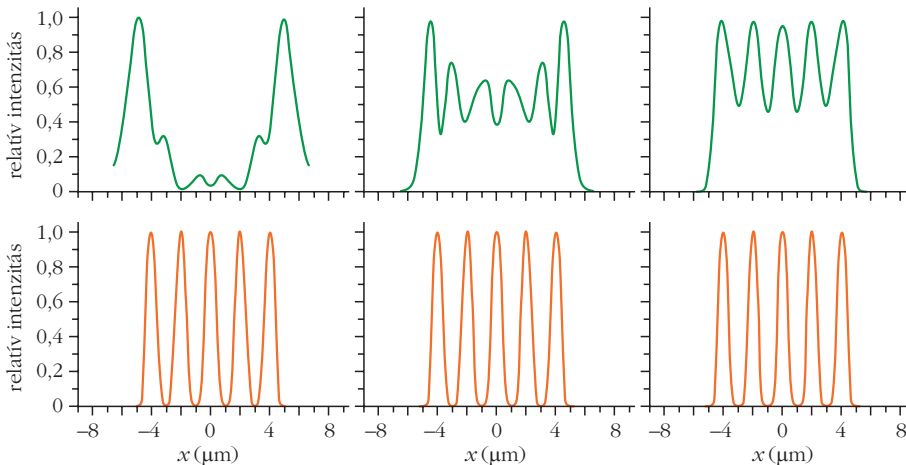


3. ábra. Fölül az ideális, alul a valódi ezüst-halogenid holografikus rögzítőanyag $\sigma(E_0, V)$ Lin-görbéi.

A holografikus rögzítőanyag MTF-e és nemlinearitása könnyűszerrel beilleszthető az (1) diffrakciós modellbe. A módosított kettős Fresnel–Kirchhoff-integrál a következő:

$$I(u, z) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{\xi_1}^{\xi_2} \sigma[E_0(x), V(x), v(x)] \cdot W(x) R(x) O(\xi) \cdot \frac{\cos \vartheta(\xi, x) \cos \rho(x, u, z)}{r_1(\xi, x) r_2(x, u, z)} \cdot \exp(i k(r_1 - r_2)) d\xi dx. \quad (5)$$

4. ábra. Ötelemű Ronchi-rács számított, rekonstruált holografikus képei. A rögzítőanyagnak csak az MTF-e lett figyelembe véve. A v_0 feloldási határok a következők voltak (balról jobbra és fentről lefelé): 500, 750, 1000, 1500, 2780 és 4000 lp/mm. A megfelelő c paraméterek: $c = 560 v_0/2780$.



5. ábra. Az Agfa 8E75HD holografikus emulzió mért és illesztett Lin-görbéi.

ahol σ tartalmazza a rögzítőanyag teljes hatását, O , R és W a tárgy, a referencia- és a rekonstruáló nyalábok komplex amplitúdói.

A következőkben nem tételezzük fel rekonstrukciós hibákat. Továbbá feltételezzük, hogy $\sigma(E_0, V, v) = \sigma_1(E_0, V) \cdot \sigma_2(v)$ (vagyis σ szeparálható).

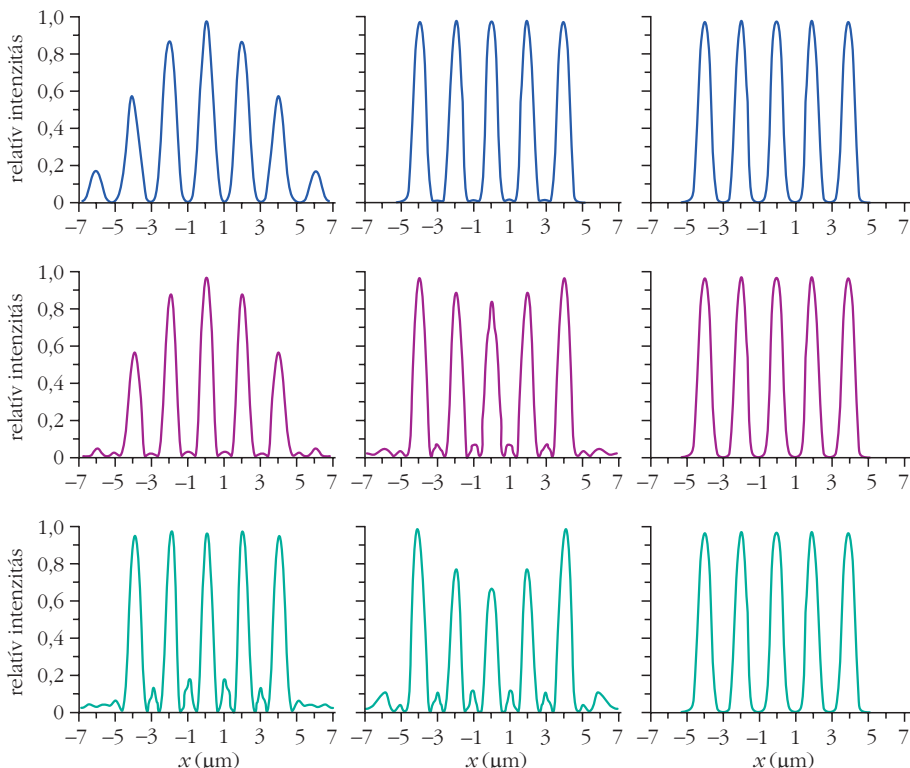
Eredmények

Egy 5 elemű Ronchi-rács rekonstruált holografikus képei

A rögzítőanyag MTF-e rekonstruált képre gyakorolt hatását mutatja be a 4. ábra. Látható, hogy a rács vonalai nincsenek feloldva, ha a feloldási limit 1000 lp/mm alatt van, $v_0 = 1500$ lp/mm esetében viszont a rácsvonalak már teljesen fel vannak oldva.

Az Agfa-Gevaert 8E75HD holografikus emulzió Lin-görbéit e cikk szerzője és társai mérték meg és illesztették [12]. Az eredmények az 5. ábrán láthatók, a (3) függvénnyel a mért adatok jól közelíthetők.

Egy 5 elemű Ronchi-rács számított rekonstruált képei láthatók a 6. ábrán, a számítások az 5. ábra Lin-görbéinek felhasználásával készültek. Az ábrából több tanulság vonható le. Ha az első oszlopot nézzük, ahol a tárgynyaláb intenzitása a hologram felvételekor magasabb, mint a referenciálya-bé, láthatjuk, hogy a két alacsonyabb expozíció esetében a rekonstruált vonalak intenzitása nem azonos. A legnagyobb expozíció esetében ez az intenzitás majdnem azonos, viszont a mellékmaximumok a



6. ábra. Ötelemű Ronchi-rácsnak a Lin-görbék alapján számított, rekonstruált holografikus képei. Az oszlopok R intenzitásarányai balról jobbra: 0,1, 1, 10, az egyes sorokban szereplő E_0 átlagos expozíciók főnről lefelé: 12,5, 22,5 és 40 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

vonalak között a 15%-ot is eléri. A második oszlopban, ahol a tárgynyaláb hologramon mért intenzitásának maximumában mért R érték 1 (maximális moduláció), az expozíció növelésével romlik a rekonstruált kép minősége. Végül a harmadik oszlopban, ahol az intenzitásarány a hologram közepén 10 (máshol még magasabb), mind a három expozícióval jó minőségű rekonstruált képet kapunk. Az eredményeket számszerűbb formában mutatja be a 7. ábra, ahol a 6. ábra rekonstruált képeinek paraméterei láthatók az átlagos expozíció függvényében.

A 7. ábrán világosan látszik, hogy 10 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ körül a maximális átlagos expozíciónak optimális értéke van, itt a rekonstruált kép kontrasztja maximális, fluktuációja minimális, míg fényessége (a diffrakciós hatások) még viszonylag magas.

Egy báromelemű Ronchi-rács mért rekonstruált holografikus képe

Végül bemutatom a nagy feloldóképességű holográfia gyakorlati megvalósításának egy példáját, ezüst-halogenid emulzióban $\lambda = 632,8$ nm hullámhosszon (He-Ne lézer). A tárgy egy báromelemű Ronchi-rács, amelynek hossza 300 μm , vonalszélessége 1 μm és kitöltési tényezője 1 volt (króm maszk üveghordozón). Agfa-Gevaert 8E75HD-t használtunk

rögzítőanyagként. A tesztábráról (függetlenül álló vonalak és vízszintes referencia-tárgynyaláb szög) több átlagos expozíció értékkel és intenzitásarányal úgynevezett off-axis hologramok készültek. A tárgynyaláb fő beesési szöge $37,5^\circ$, a kollimált referenciányalábé pedig $-37,5^\circ$ a hologram normálisához képest. A hologram numerikus apertúrája 0,764 [13]. Az egyik rekonstruált valódi kép mikrofényképe és két rekonstruált kép mikrofotometriával felvett profilja a 8. ábrán látható.

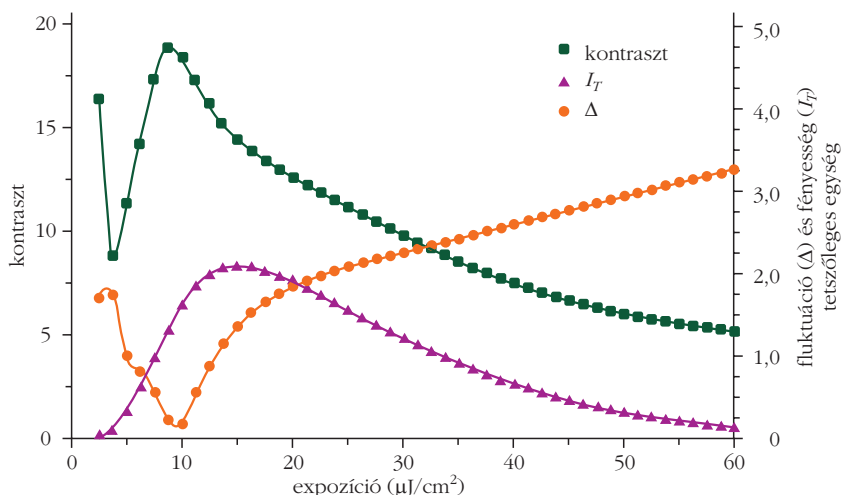
Diszkusszió és konklúzió

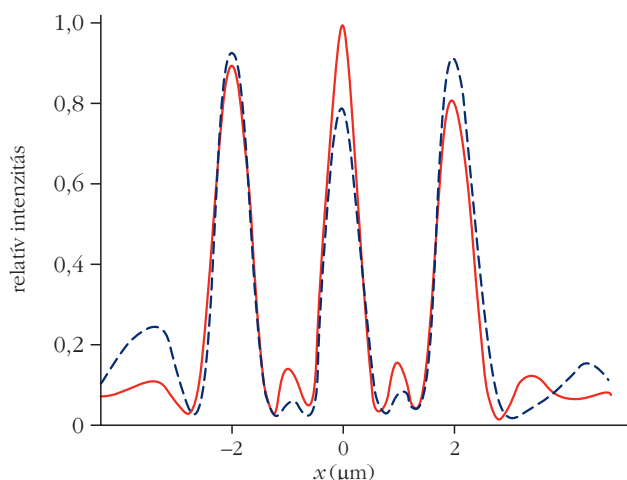
Ha „precíziós” holográfiát szeretnénk megvalósítani, figyelembe kell vennünk a rögzítőanyag véges feloldóképességét és nemlinearitását. Ez érvényes minden holografikus rögzítőanyagra, beleértve a bikromátos zselatint, a termoplasztikus

anyagokat és a CCD, illetve CMOS detektorokat. (Az utóbbiakat a digitális holográfiában használják.)

Megmutattam, hogy a holografikus rögzítőanyag karakterisztikái modellezhetők és beilleszthetők a rekonstruált holografikus kép komplexamplitúdó-eloszlását leíró kettős Fresnel–Kirchhoff-integrálba (vagy más diffrakcióelméleti formalizmusba). A bemutatott modell lehetővé teszi a hologram felvételi paramétereinek (geometria, intenzitásarány, átlagos expozíció) optimalizálását. Egy másik projekt keretében azt is bebizonyítottuk, hogy a holografikus rögzítőanyagok karakterisz-

7. ábra. Ötelemű Ronchi-rács számított rekonstruált holografikus képének kontrasztja, fényessége (I_T) és fluktuációja (Δ) a maximális átlagos expozíció függvényében. A minimális intenzitásarány $R = 1$.





8. ábra. Háromelemű Ronchi-rács rekonstruált, valós holografikus képének mikrofényképe és két rekonstruált képének profilja.

tikai nemcsak makroszkopikus mérésekkel (diffrakció hatások) határozhatók meg, hanem a felvett hologra-

mok kvantitatív mikroszkopikus (fáziskontraszt, interferencia) vizsgálatával is [14–16]. A módszert a digitális holográfiában is alkalmaztuk [17].

Irodalom

1. W. H. Carter, A. A. Dougal: Field Range and Resolution in Holography *J. Opt. Soc. Am.* 56 (1966) 1754.
2. E. B. Champagne: Nonparaxial Imaging, Magnification and Aberration Properties in Holography. *J. Opt. Soc. Am.* 57 (1967) 51.
3. E. B. Champagne, N. G. Massey: Resolution in Holography. *Appl. Opt.* 8 (1969) 1879.
4. J. Nowak, M. Zajac: Numerical Investigations of Holographic Imaging Quality. *Opt. Appl.* 15 (1985) 239.
5. I. Banyász, G. Kiss, P. Varga: Holographic image of a point source in the presence of misalignment. *Appl. Opt.* 27 (1988) 1293.
6. K. Biedermann: A function characterizing photographic film that directly relates to brightness of holographic image. *Optik* 28 (1968/69) 160–176.
7. A. A. Friesem, A. Kozma, F. G. Adams: Recording parameters of spatially modulated coherent wavefronts. *Appl. Opt.* 6 (1967) 851–856.
8. D. G. Falconer: Noise and distortion in photographic data storage. *IBM J. Res. Dev.* 14 (1970) 521–526.
9. I. Banyász: Evaluation of the imaging properties of holograms recorded in materials of limited spatial resolution. *Opt. Engineering* 32 (1993) 2539–2547.
10. R. Collier, K. Burckhardt, L. Lin: *Optical Holography*. Academic Press, New York, 1971, Chapter 10.
11. I. Banyász: Method for the evaluation of the effects of film nonlinearities on the holographic image. *Opt. Lett.* 18 (1993) 658–660.
12. I. Banyász, A. Fimia, A. Belendez, L. Carretero: Nonlinear recording of amplitude holograms in Agfa 8E75HD: comparison of two developers. *Optics Communications* 111 (1994) 225–232.
13. I. Banyász: Resolution problems in holography. *Proc. SPIE*, 1574 (1991) 282–293.
14. I. Banyász: Direct measurement of the refractive index profile of phase gratings, recorded in silver halide holographic materials by phase-contrast microscopy. *Appl. Phys. Lett.* 83 (2003) 4282–4284.
15. I. Banyász: Fourier analysis of high spatial frequency holographic phase gratings. *J. Mod. Opt.* 52 (2005) 2443–2451.
16. I. Banyász, Higher-order harmonics in bleached silver halide holograms. *Optics and Lasers in Engineering* 44 (2006) 926–942.
17. I. Banyász, J. Kornis: High-resolution lensless Fourier-transform digital holography. *Proc. SPIE* 5856 (2005) 71–79.

EINSTEIN, A »HADITENGERÉSZ«

Illy József
Einstein Papers Project
California Institute of Technology

1943 tavaszán, az Egyesült Államok hadseregének, haditengerészetének és Nemzeti Védelmi Kutatótanácsának együttes ülésén *Stephen Brunauer*, a Haditen-

Köszönöm *Futó László* ny. főiskolai docens szakmai segítségét.

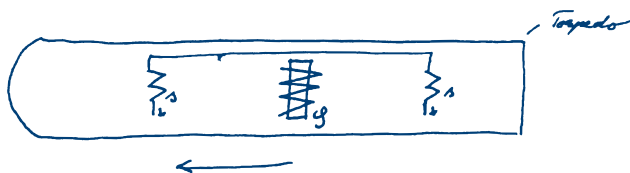


Illy József 1956-ban szerzett fizika-matematika tanári oklevelet a József Attila Tudományegyetemen (JATE), Szegeden. 1982-től a fizikai (tudománytörténet) tudományok kandidátusa, 1983-ban egyetemi doktor, JATE. 1991 óta az Einstein Papers Project szerkesztője a Boston Universityn, majd a California Institute of Technology.

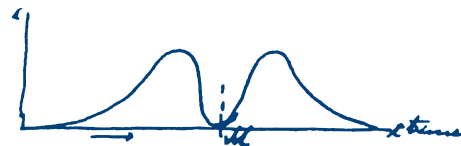
gerészet Fegyverkezési Hivatala Nagyerejű Robbanószert Kutató és Fejlesztő Csoportjának vezetője kíváncsian megkérdezte, vajon dolgozik-e *Albert Einstein* valamelyik hivatalnak. Ó, ő pacifista! Őt nem érdekli semmi, aminek gyakorlati jelentősége lenne, csak az, hogy egyesített mezőelméletén dolgozzék! – kapta a tagadó válaszokat. Brunauer azonban nem tudta elképzelni, hogy Einsteint ne érdekelné, ki győz ebben a Hitlerrel vívott háborúban, ezért, saját szakállára, találkozót kért Einsteintől [1].

Mielőtt folytatnám, ismerkedjünk meg ezzel a fiatal tengerészttel.

Stephen Brunauer 1903-ban Budapesten született Brunauer Istvánként. Mivel az első világháború után, zsidó származása (az 1920. évi XXV. törvénycikk, az úgynevezett numerus clausus-törvény) miatt nem vet-



1. ábra. A mágneses gyutacs áramköre [4].



2. ábra. Az áramerősség változása a gyutacsban a hajótest alatti áthaladáskor [4].

ték föl az egyetemre, kivándorolt az Egyesült Államokba, elvégezte a New York-i Városi Főiskolát (City College of New York), mégpedig magna cum laude minősítéssel mind kémiából, mind angol nyelvből, majd a Mezőgazdasági Minisztérium kémiai és talajtani hivatalában állt munkába, a Kötöttnitrogén-laboratóriumban. Közben egy év alatt doktori fokozatot szerzett a Johns Hopkins Egyetemen.

1938-ben főnökével, Paul Emmett-tel és honfitársával, Teller Edével publikálta a ma róluk BET-nek nevezett módszert, amellyel ki lehet számítani például finom szemcsés por fajlagos (egységnyi tömegre vonatkozó) felszínét abból a gázból, amely a szemcsékre tapad [2].

A szépen induló életpályát azonban megszakította a világháború. A japánok Pearl Harbor elleni váratlan légitámadása hadüzenetre kényszerítette az Egyesült Államokat, és Brunauert is behívták, hogy mint a nitrogénkémiai jártas szakember, vezesse a robbanószerkezetek fejlesztését a haditengerészetnél.

Einstein 1943. május 13-án fogadta Brunauert, aki egyenesen föl tette a nagy kérdést: hajlandó lenne-e Einstein az ő csoportjának dolgozni. Szorongva várta a választ a megrögzött pacifistától. Nagy meglepetésére Einstein azonnal igent mondott. „Az emberek azt hiszik – tette hozzá –, hogy csak az elmélet érdekel és semmi, ami gyakorlatias. Ez nem igaz. Dolgoztam a zürichi [helyesen: berni, I. J.] szabadalmi hivatalban, és sok találmány kifejlesztésében vettem részt. A pörgettyűs iránytűben is.” Einstein ugyanis 1920-tól 1926 végéig nyári szabadidejének jó részét Hermann Anschütz-Kaempfe kieli üzemében töltötte, és élvezte, hogy fizikusi és nem csekély mérnöki tudását csillogtathatja az Anschütz által fölalt pörgettyűs iránytű kidolgozásában. A kész iránytű szabadalmi jogdíjából 1938-ig részesedett.

Einstein „igenje” szenzációként hatott a Fegyverkezési Hivatalban. „Einstein közénk állt!” Einstein is meg lehetett elégedve, ha másért nem, hát azért, mert, mint mondta: „a haditengerészetnél vagyok, de nem kérték, hogy tengerészhatat vágassak”. Egyenruhára sincs szüksége, tette hozzá, megteszi anorákja is, és majd felgyűri a nadrágja szarát.

Pontosabban szólva, nem volt tagja a haditengerészetnek. Szerződéses polgári alkalmazottja volt. A bérét a megengedett maximumban, napi 25 dollárban határozták meg, „nevetségesen kicsi összegben”, írja Brunauer visszaemlékezésében.

Einstein „igenjéből” természetesen sajtószenzáció is lett. Június 25-én a Reuter Iroda jelentése alapján a *New York Times* közölte, hogy „Einstein professzor csatlakozott az Egyesült Államok Haditengerészetéhez

nek Robbanóanyag-hivatalához »rendkívüli tagként«. A Hivatal kiadványa, a *Star Shell* szerint a robbanóanyagokat irányító folyamatokat fogja kutatni. Részmunkaidőben fog dolgozni, a princetoni Felsőbb Kutatások Intézetében...¹

Mit kapott Einstein „házi feladatnak”?

Ötleteket vártak tőle, miként lehetne a „nagy torpedóbotrányt” megszüntetni. A torpedókkal több nehézség is adódott, többek közt az, hogy a kontakt (becsapódó) és a mágneses gyutacs megbízhatatlan volt [3].

A kontakt gyutacs akkor lép működésbe, amikor a torpedó eltalálja a hajót. 90 fokos ütközésnél azonban a gyutacs nem mindig működött. A mágneses gyutacsnak pedig akkor kellett gyújtania, amikor a torpedó a hajótest alá ért. Ezzel meg az volt a baj, hogy érzékelte a Föld mágneses mezejének változását is, nemcsak a hajótest mágneses mezejének növekedését, így a hajó felé haladtában – kivált, ha erős volt a földmágnesesség, azaz közelebb voltak a mágneses sarkhoz – akkor is robbantott, amikor a torpedó még nem ért el a hajó alá. Ez okból inkább a kontakt gyutaccsal foglalkoztak. Valószínű, hogy Einsteinól a mágneses gyutacs átdolgozását várták, fölhasználva Kirkwood és mások, köztük Neumann János hidro- és aerodinamikai kutatásait.

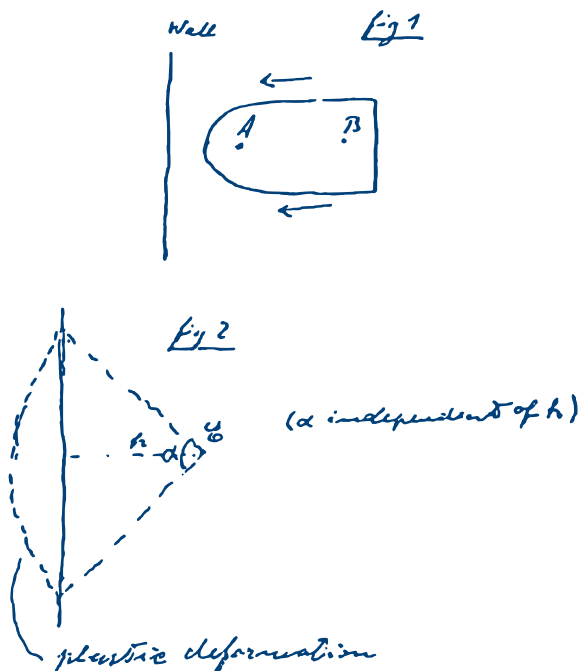
Június 18-án küldte el vagy adta át Brunauernek első ötletét, magyarázattal [4].

A torpedó két végén lévő s tekercs ellentétes irányú, így a közepén lévő, váltóárammal táplált S elektromágnes mágneses mezeje által keltett változó elektromos áram egyenlő nagyságú és ellentétes fázisú feszültséget kelt bennük, ezért ha a két s tekercsnél zárjuk az áramkört, ezen az – Einstein által be nem rajzolt – vezetéken nem folyik áram (1. ábra).

Amint azonban a torpedó a hajó alá ér, a hajó vasteste előbb az elülső, majd a hátsó tekercs indukcióját növeli meg, emiatt áram lép föl, amelynek lefutását a 2. ábra mutatja.

Ha a „gyutacs” úgy van beállítva, hogy akkor robbantson, amikor a növekvő áram visszaesik (azaz mindkét tekercs indukciója megint azonos lesz, hiszen mindkettő a hajó alatt van), a torpedó a hajótest M közepe alatt fog fölrobbanni. A gyújtóberendezést

¹ Azok a tengerésztisztek, akikkel Einstein a hírrel kapcsolatban lefényképezték, és a *New York Times* 1943. június 26-i számában közzétették, a Princetoni Egyetem katonai tanszékének munkatársai voltak, és semmi közük sem volt Einstein háborús ténykedéséhez.



3. ábra. Ötletek a robbanótöltet hatásosabb elhelyezkedéséről (fig 1, A) és hatékonyságáról (fig 2) [9].

akkor kell élesíteni, amikor a torpedó már elhagyta a kilövő tengeralattjárót, nehogy annak teste már elindítsa a folyamatot.

Einstein szerényen hozzáfűzte: meglehet, hogy az ötlet nem új, és műszakilag nehezen valószínűsíthető meg.

A levélre nem Brunauer válaszolt, hanem főnöke, William Blandy ellentengernagy, részben azért, hogy üdvözölje Einsteinot „a fedélzeten”, részben, hogy mindjárt ki is oktassa ezt az Albert Einsteinnak nevezett civilt, hogyan kell viselkedni a tengerészetnél. „Levelét, helyesen, kettős borítékban küldte – írta – »szigorúan bizalmas« megjegyzéssel a belső borítékon. Ezen felül a szabályzat előírja, hogy a »szigorúan bizalmas« megjegyzést a levél minden lapjára világosan rá kell bélyegezni.” [5]

Blandy Einstein ötletére is válaszolt. Igen, vannak hasonló szerkezetek a tengerészetnél, és majd küld két szakértőt a továbbiak megvitatására. Az egyik John Bardeen volt, aki majd 1956-ban a tranzisztorért, 1972-ben pedig a szupravezetés elméletéért kap Nobel-díjat. Ő a háború alatt, szintén polgári alkalmazottként, azon dolgozott, miként lehet megvédeni az amerikai hadihajókat és tengeralattjárókat a mágneses torpedóktól és aknáktól.

A találkozásra 1943. július 2-án került sor. „Dr. Einstein javaslata nem elsősorban a mérnöki szempontok problémájára irányul – írták emlékeztetőjükben –, hanem arra, miként lehet a robbanást a hajótesthez közelre állítani... Ez ugyan fontos része az általános problémának, de ennek részletes megfontolását el kell odáznai más, sürgős munka miatt.” [6]

Ez az emlékeztető megemlíti Einstein más javaslatát is. Így például, hogy a primer és a szekunder tekercset egymásra merőlegesen is el lehet helyezni. Így a kölcsönös induktancia anélkül érhető el, hogy nehéz-

kes beállításokkal kelljen küszködni. Ha pedig a célhajó feneke lapos, a fenék szegélyénél induló jelet lehet eléggé erőssé tenni ahhoz, hogy a fenék alatt eltűnve elég legyen a robbantáshoz.

Einstein két javaslatát modellkísérlettel is kipróbálták. Eredményükről sajnos, nem tudunk.

Június közepén Brunauer bejelentette, hogy Neumann Jánossal együtt fogja meglátogatni Einsteinot.

Neumann-nak a hidrodinamikai turbulencia és a lökeshullámok iránti érdeklődését a nemlineáris parciális differenciálegyenletek megoldásának problémái táplálták. Mielőtt csatlakozott volna a Los Alamos-i Tudományos Laboratóriumhoz (azaz az atombomba kidolgozásához), a Haditengerészet Fegyverkezési Hivatalában dolgozott, és a lökeshullámokkal foglalkozott [7]. Bizonyára e témáról beszélgettek, mivel Einstein később említette Brunauernek, hogy sikerült egyszerűsíteni a víz alatti robbanás matematikai leírását, és ezt megvitatta Neumann-nal is. (Neumann éppen 1942-ben dolgozta ki a lökeshullámok elméletét [8].)

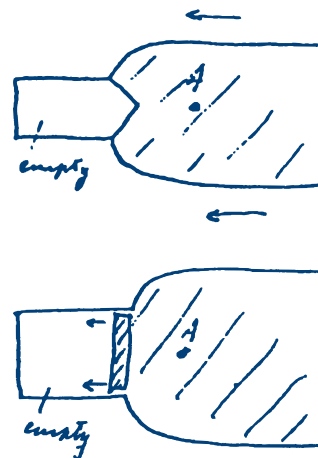
A hiányosan fennmaradt levelezésből arra lehet következtetni, hogy Brunauer most a torpedó romboló hatásának optimalizálását várta Einsteintól. Augusztusban Einstein be is számolt neki ötleteiről. Levelében (3. ábra) vázlatokat is adott [9].

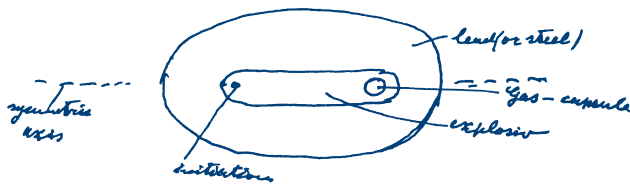
Az E helyzetben föllépő robbanás, ha elég erős, behorpasztja, sőt be is törheti a hajó oldalát. A deformáció nagysága b -val nő, így csökken annak valószínűsége, hogy a robbanás át tudja lyukasztani a hajófalat.

Az elmélet ellenőrzésére ilyen robbanás által okozott károsodásról készült fényképeket kért. Végül is két robbantást javasolt: egy gyöngébbet, amely átlukasztja a hajó falát, majd egy a másodikat, hogy sugárirányú repedéseket hozzon létre.

Két további ötlete szerint (4. ábra) üres csúcsot kell szerelni a torpedó csúcsára, hogy „a perforációt biztosítsa” [10]. Ez a megfogalmazás kissé ködös. Schwarz úgy véli, hogy valami lövedékre gondolt, ami innen kilöve biztosítja, hogy a torpedó ne csak behorpassza, hanem be is törje a hajófalat [11]. Einstein azonban a pótcsúcsot üresnek („empty”) jelzi.

4. ábra. Rajzok az előző ábrát tartalmazó levél hátoldaláról. Einstein „üregfektással” (felső rajz), vagy egy gyorsított tömeg segítségével (alsó rajz) gondolta biztosítani a hajófal áttörését [10].





5. ábra. Torpedó- vagy aknagytacs [13].

A másik vázlaton az üres pótcsúcsban korong van, amely becsapódáskor előrecsúszik. Ez arra utal, hogy mindkét esetben azt akarta biztosítani, hogy ezek a csúcsok, ütközéskor belapulva és a falra „ragadva”, meggátolják, hogy a torpedó elcsússzék a hajótesten.

Brunauer el volt ragadtatva ezektől az ötletektől. Kérte Einstein, hogy öntse mindezt matematikai alakba, *Kirkwood* lemezek károsodásával foglalkozó elméletére támaszkodva. Az elméleti fizikus Einstein józanságára jellemző, hogy szerintre erre „egyedül a kísérlettől várhatunk megbízható tájékoztatást”.

Augusztusban Einstein a fordított feladattal kapcsolatos ötlettel állt elő: hogyan védhető meg a hajó torpedótámadás ellen. Sajnos, a részletekről nincs értékelhető feljegyzés.

Eddigi munkásságának elismeréseképp *Vannevar Bush* följánlotta, hogy Einsteint kinevezik a Nemzeti Védelmi Kutatóbizottság tanácsadójának. Ezt el is fogadta.

Októberben újabb ötlete született [12]. A torpedó nagyobb kárt tenne a hajóban, ha nem merőleges becsapódáskor robbanna, hanem akkor, amikor párhuzamosan halad a hajóval. Ez a helyzet úgy állhat be, hogy a hajó által magával ragadott vízréteg elfordítja a merőlegesen közeledő torpedó csúcsát, és mivel propellerje a falnak nyomva tartja, a torpedó a hajótesthez simul, majd kezd eltávolodni tőle. Ez az a pillanat, amikor robbannia kell. Vagy olyan szerkezet kell hozzá, amely akkor gyűjt, amikor a torpedó egy bizonyos része érintkezik a hajótesttel, vagy egy óraműnek kell elindulnia az első érintkezéskor, amely bizonyos idő múlva robbant; de lehet a kettő kombinációja is, azaz az óramű akkor indul, amikor a torpedó bizonyos része érintkezik a hajótesttel.

Einsteinnek ezen ötletei végül is ötletek maradtak. A „nagy torpedóbotrány” problémáját hadmérnökök oldották meg.

Utolsó javaslata egy sajtóságos gyutacs volt.

„A gyújtás és a gázdoboz úgy van elhelyezve – írta –, hogy az utóbbi nyomása a legrövidebb idő alatt föllépjen” (5. ábra) [13]. Föltehetőleg a hajófalat akarta ezzel berobbantani. Az is meglehet azonban, hogy ez nem a torpedó gyutacsa akart lenni, hanem víziaknáé. Erre lehet következtetni *George Gamow* visszaemlékezéséből. Ő – saját állítása szerint – Brunauerrel fölváltva látogatta Einsteint, és hozta-vitte az általa kért és készített dokumentumokat. Gamow így ír: „Nagyon sok javaslat volt, például parabola alakjában elhelyezett, víz alatti aknák sorozatos robbantása, amely (parabola) japán tengerészeti támaszpont bejáratára nézne, majd ezt követően légitámadás japán repülőgép-hordozók ellen. Einstein dolgozószobájában fogadott ... és végig-

mentünk valamennyi javaslaton, pontról pontra. Szinte mindegyiket jóváhagyta, mondogatván... »Ó, igen, nagyon érdekes, nagyon, nagyon elmés« – és másnap a hivatali vezető admirális nagyon boldog volt, amikor jelentettem neki Einstein megjegyzéseit.” [14]

Brunauer másképp emlékezett. „Az utóbbi években Gamow azt a látszatot keltette, mintha ő lett volna a kapcsolat a haditengerészet és Einstein között, hogy kéthetente látogatta, és a professzor csak »hallgatta«, de maga nem tett hozzá semmit – mindez csak mese. A leggyakrabban én látogattam, és ez úgy kéthavonta esett meg.”

Mennyi időt töltött Einstein ezzel a „hadikutatással”? Amikor Brunauer erről kérdezte, azt válaszolta, hogy három hónap alatt öt napot [10]. Brunauer ezt kevesellte, és megajánlott heti egy napot. Einstein elfogadta. Az alatt a körülbelül két év alatt, amíg szerződéses viszonyban állt a haditengerészettel, a tizedét kapta annak az összegnek, ami a Felsőbb Kutatások Intézetében egy havi fizetése volt.

Miként értékelhetjük Einstein haditechnikai kutatását? Ezt megtette Brunauer. „Nem lenne helyes, ha konkrét eredményeket tulajdonítanánk neki – írta. – A háború során kidolgozott új és hatékonyabb nagy erejű robbanóanyagokat kutatócsoportok hozták létre, és Einstein ilyen csoport tagja volt. De másképp is segített: morálisan. Felemelő volt az a tudat, hogy Einstein velünk van.”

Irodalom

1. A hivatkozás nélküli idézetek Brunauer következő visszaemlékezéseiből valók:
S. Brunauer: Einstein and the Navy..., An Unbeatable Combination. *On the Surface* 9 (Jan. 24, 1986), 1–2.
S. Brunauer: Einstein in the U. S. Navy. In Burton, H. Davis és Hettinger, William P. Jr.: *Heterogeneous Catalysis: Selected American Histories*. American Chemical Society, Washington, DC, 1982, 217–226.
2. S. Brunauer, P. H. Emmett, E. Teller: Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *Journal of the American Chemical Society* 69 (1938) 309–319.
Lásd még B. H. Davis, J. Halász: B. E. & T. Scientists in the Background of Surface Science. *ChemTech* 21 (1991) 18–25; magyarul: B. E. & T.: Tudósok a felület tudományának hátterében. *Magyar Kémikusok Lapja* 48 (1993) 286–293.
3. F. J. Milford: US Navy Torpedoes. Part Two. The Great Torpedo Scandal, 1941–43. *Submarine Review* (Oct. 1996), www.geocities.com/Pentagon/1592/ustorp2.htm?20075
4. Einstein Brunauernek, 1943. június 18. *Albert Einstein Archives, Jerusalem* (a továbbiakban AEA) 81 025.
5. William H. P. Blandy Einsteinnek, 1943. június 22. AEA 81 011.
6. Conference between Naval Ordnance Laboratory Representatives and Dr. Albert Einstein, 1943. július 2. AEA 81 024.
7. 1941 és 1945 között 11 cikke, illetve jelentése foglalkozik lökés-hullámokkal.
8. 1942–1943-ban jelent meg a *Theory of Shock Waves*. Progress Report to the National Defense Research Committee, Div. 8, U.S. Dept. Comm. Off. Techn. Serv. (Aug. 31, 1942.) PB 32719, January 29, 1943, pp. 37.
9. Einstein Brunauernek, 1943. augusztus 22. AEA 81 032, 1. oldal.
10. Ugyanott, 2. oldal.
11. F. Schwarz: Einstein's Ordnance. *AmericanHeritage.com History's Homepage. Invention & Technology Magazine* 13/4 (1998).
12. Einstein Robert Finkelsteinnek, 1943. október 27. AEA 78 939.
13. Einstein Brunauernek és Gamownak, 1944. október 15. AEA 81 030.
14. G. Gamow: *My World Line: An Informal Autobiography*. Viking, New York (1970) 149–150.

A CASSINI BOLYGÓSZONDA BÚCSÚZNI KÉSZÜL

Szabados László

MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

A Naprendszer leglátványosabb bolygóját, a Szaturnuszt több mint egy évtizeden át közelről kutató Cassini űrszonda hamarosan befejezi tevékenységét. Ez év áprilisában megkezdődött – a szondát működtető szakemberek által adott elnevezéssel – a *Nagy Finálé*, amelynek során a Cassini fokozatos pályamódosítások hatására idén szeptemberben a Szaturnuszba csapódva fejezi be eddig rendkívül eredményes tevékenységét.

E cikkben a Szaturnusz bemutatása után áttekintjük a Cassini küldetésének történetét, eddigi legfontosabb eredményeit, és arra is kitérünk, hogy az űrprojekt felelős vezetői a szonda megsemmisítésének miért éppen ezt a módját választották (1. ábra).

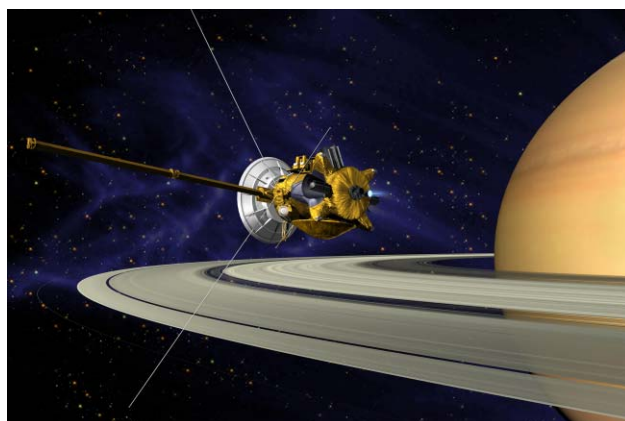
A Szaturnusz és környezete

A bolygó

Az éjszakai égen szabad szemmel fényes pontként látható Szaturnusz a Nap körül keringő óriás gázbolygók közé tartozik. A legnagyobb bolygó, a Jupiter külső szomszédjaként 29,5 év alatt végez egy keringést a Nap körül, nagyjából azonos síkban mozogva, mint az összes többi bolygótársa. Pályája elliptikusabb, mint a Földé, keringése során 1,5 milliárd kilométerre kerül a Naptól, amikor legtávolabb van tőle, míg napközben ez a távolság a tizedével csökken.

A Naptól ilyen nagy távolságban már kevés az egysegyi felületre beérkező napsugárzás, emiatt a bolygó felszínén rendkívül alacsony a hőmérséklet: átlagértéke $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ közé esik, attól függően, hogy a bolygó melyik külső rétegét vizsgáljuk, hiszen egy gázbolygónak nincs szilárd felszíne.

A Szaturnusz közepes sugara 58 230 km, azaz a bolygó nagyjából 9-szer akkora, mint a Föld (2. ábra). Gázbolygó lévén azonban a tengely körüli forgás során fellépő erők hatására alakja erősen lapult: egyenlítői sugara 60 270 km, míg ez a pólusok irányában csak 54 360 km. Bár a bolygó térfogata 764-szerese a Földének, a tömege csupán 95-ször több saját bolygónk tö-



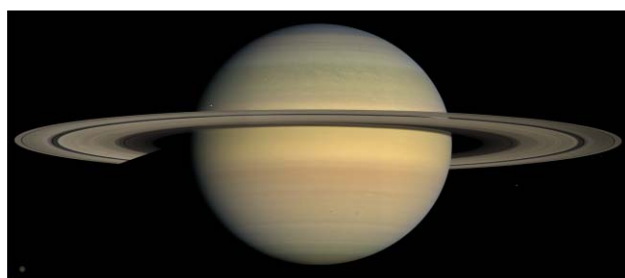
1. ábra. A Cassini a Szaturnusznál (fantáziarajz).

megénél, mivel a Szaturnusz átlagos sűrűsége meglepően alacsony: mindössze 0,687 gramm köbcentiméterenként, ami még a víz sűrűségénél is kisebb.

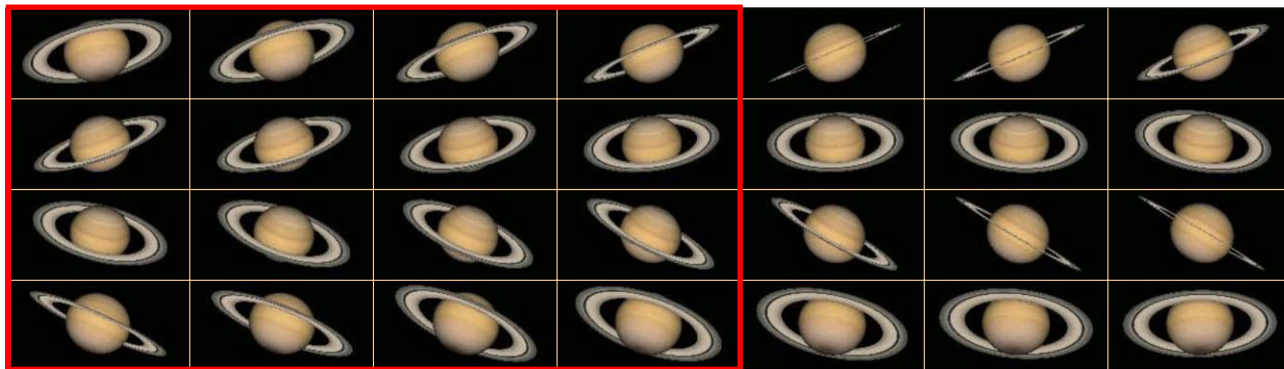
A bolygót burkoló atmoszféra kémiai összetétele pontosan ismert: nagyrészt hidrogén alkotja (96,3 térfogatszázalékban), a második leggyakoribb elem a hélium (3,3%), és fontos még a metán (CH_4 , 0,4%) és az ammónia (NH_3 , 0,01%) jelenléte. Nyomokban még előfordul acetilén, etán, metán, propán és foszfin is a Szaturnusz atmoszférájában. A gáz halmazállapotú összetevők mellett még jegek is előfordulnak: az ammónia, a víz (H_2O) és az ammónium-hidroszulfid (NH_4SH) molekuláinak szilárd halmazállapotú kristályai vagy szemcséi.

A Szaturnusz atmoszférája sávok szerkezetűnek látszik, hasonlóan a Jupiteréhez, de itt a sávok a bolygó egyenlítője felé egyre szélesednek, és megjelenésük kevésbé feltűnő. A világos és sötétebb árnyalatú sávok a bolygó gyors tengelyforgása következtében alakulnak ki, amely forgás ráadásul függ az egyenlítőtől mért távolságtól (a bolygórajzi szélességtől) is. E differenciális tengelyforgás jellegzetessége az, hogy az egyenlítőhöz közeledve rövidebb a forgási periódus, a pólusok felé pedig hosszabbodik. A Szaturnusz nagyjából 10 és fél óra alatt tesz meg egy fordulatot a forgástengelye körül, így az egyenlítője környékén majdnem 10 km/s a forgás sebessége. A forgási periód-

2. ábra. A Szaturnusz nap-éj egyenlősége közelében. A Cassini 2008. júliusi felvétele (forrás: NASA/JPL/Space Science Institute).



Szabados László (1948) az MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetének kutató professor emeritusa, az SZTE címzetes egyetemi tanára, a *Magyar Tudomány* folyóirat egyik szerkesztője. Asztrofizikusként változócsillagokkal, főként cefeidákkal foglalkozik. Kimutatta, hogy a cefeidák többsége kettős rendszerhez tartozik (ami fontos a kozmikus távolságmérés kalibrálásában). Eddig 160 tudományos és 275 ismeretterjesztő írása jelent meg. A (265490) Szabados kisbolygót róla nevezték el.



3. ábra. A Szaturnusz 29,5 éves keringési periódusa során folyamatosan változik a napsugarak beesési szöge.

dus pontos értéke azonban mindmáig nem ismert, hiszen nincsen olyan pont a bolygó felszínén (sőt hagyományos értelemben vett felszín sincs), amelyhez viszonyítva a forgást követni lehetne.

Maga a forgástengely nem merőleges a bolygó Nap körüli keringésének síkjára, hanem $26,73^\circ$ -os szöget zár be a pályasíkra bocsátott merőlegessel. Ezért a Földhöz hasonlóan a Szaturnuszon is vannak évszakok, csak a majdnem 30 éves keringési periódus miatt egy-egy évszak jóval hosszabb ideig tart a Szaturnuszon, mint a Földön (3. ábra).

A bolygó belső részének összetételére és rétegződésére különféle mérések és elméleti modellek alapján lehet következtetni. Mivel a nyomás és a hőmérséklet a bolygó belseje felé fokozatosan nő, legbelül a hidrogén és a hélium szilárd, mégpedig fémes viselkedésű. A Szaturnusz centrumában a hőmérséklet eléri a $11\,700^\circ\text{C}$ értéket. Az ennek megfelelő hőenergiát a bolygó kisugározza, méghozzá 2,5-szer több energiát bocsát ki, mint amennyit a Nap sugárzásából elnyel. A belső energia egy része a bolygó lassú összehúzódásából származik, de a bolygó sugárzási többletéhez más, egyelőre nem azonosított folyamat is hozzájárul.

A Szaturnusz gyűrűi

A Szaturnusz ismertsége leginkább a bolygót körülvevő gyűrűknek tulajdonítható. Gyakran ezért is hivatkoznak gyűrűs bolygóként a Szaturnuszra. Az utóbbi évtizedekben kiderült, hogy a Naprendszer többi gázbolygóját (a Jupitert, az Uránuszt és a Neptunuszt) is gyűrűk övezik, de egyik gyűrűrendszer sem olyan látványos, mint a Szaturnusz körüli. A legbelső gyűrű a bolygó egyenlítője fölött 6630 km távolságban húzódik, a legkülső pedig a Szaturnusztól $120\,700\text{ km}$ távolságban ér véget. A több mint százezer kilométeres szélességgel szemben a gyűrűrendszer vastagsága elképesztően csekély, átlagosan 20 méter . A gyűrűt alkotó részecskék mérete a szemcsétől a 10 méteresig terjed. A gyűrű alkotóelemeinek összetétele viszonylag homogén, ugyanakkor

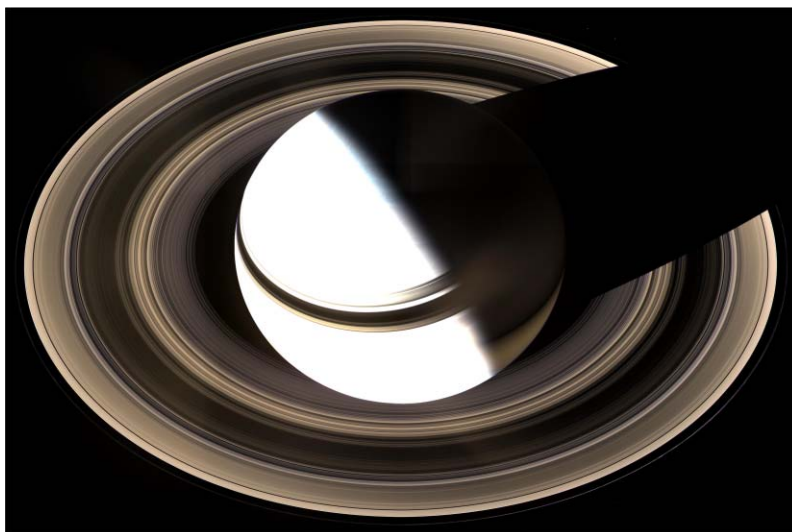
meglepő: a porszemek és a sziklák is 93%-ban vízjégből állnak, a maradék 7%-ot amorf szén teszi ki.

A gyűrűrendszer sok száz egyedi gyűrűből áll, és a gyűrűk között néhol jól kivehető üres tartományok, rések vannak (4. ábra). Az első ilyen *Giovanni Domenico Cassini* (1625–1712) itáliai származású francia csillagász fedezte fel 1675-ben, és ezt órála nevezték el Cassini-résnek.

A gyűrűk eredetére vonatkozóan két elmélet verseng. Az egyik szerint a gyűrűk egy szétesett hold megmaradt darabjai, a másik szerint pedig a Naprendszer őanyagának maradványai, amelyek nem tudtak holddá – azaz egyetlen testté – egyesülni a bolygó körül a többi hold keletkezésekor, azaz röviddel a Naprendszer kialakulása után. Ez utóbbi teóriának ellentmond az a tény, hogy a gyűrű anyaga cserélődik (a vízjég szublimál), és a gyűrűket alkotó részecskék életkora legfeljebb néhány százmillió év.

A Szaturnusz fő gyűrűrendszerén kívül a bolygótól $12\text{ millió kilométerre}$ még egy gyűrű húzódik, amely a Phoebe hold anyagából jött létre. Ez a gyűrű és a Phoebe pályasíkja egyaránt 27° -os szöget zár be a gyűrűrendszer és a többi hold keringési síkjával. A Phoebe és a belőle kialakult gyűrű további érdekessége az, hogy a többi holddal és a fő gyűrűrendszerrel ellentétes irányban keringenek a Szaturnusz körül.

4. ábra. A Szaturnusz gyűrűrendszere (forrás: NASA/JPL/Space Science Institute).



A Szaturnusz holdjai

A Szaturnusznak kiterjedt holdrendszere van. Az első hold, a Titan felfedezése *Christiaan Huygens* (1629–1695) holland fizikus-csillagász érdeme. A gyűrűrendszerbeli első rést felfedező Cassini később négy holdat is talált a Szaturnusz körül, a Iapetus, a Rhea, a Tethys és a Dione nevűt (a Szaturnusz valamennyi holdja a görög mitológiában szereplő titánokról kapta a nevét). Újabb holdak felfedezésére még egy évszázadot kellett várni: a Mimas és az Enceladus nevű kísérőket 1789-ben találta meg *William Herschel* (1738–1822) német születésű angol csillagász (eredeti foglalkozása zenész). Időrendben a Hyperion felfedezése következett (1848), majd a Phoebe holdé (1899).

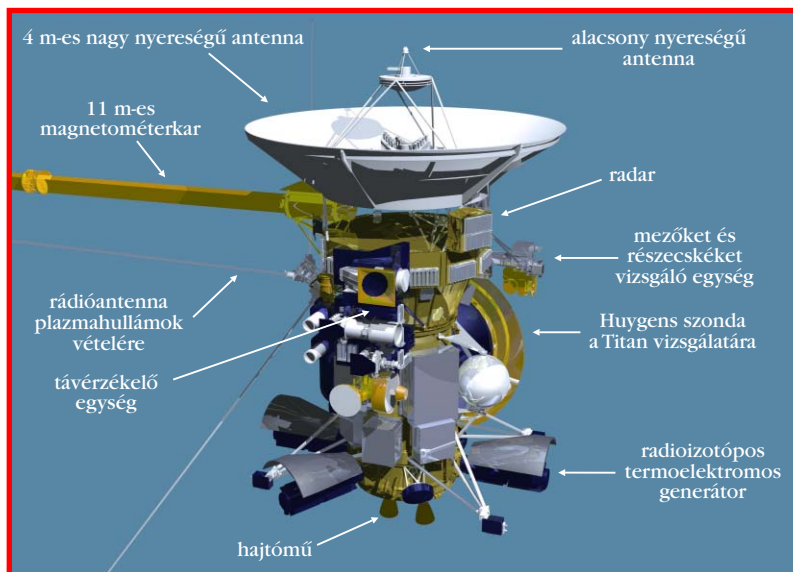
A Szaturnusz űrszondákkal végzett vizsgálata számos további hold felfedezését eredményezte. Jelenleg a Szaturnusz 62 holdjáról van tudomásunk, amelyek közül 34 átmérője 10 km-nél kisebb, további 14 pedig 10–50 km közötti méretű. A gyűrűk között viszont még tucatjával lehetnek legfeljebb néhány száz méter méretű további holdcscák.

A Szaturnusz legnagyobb holdja, a Titan azért különleges, mert a naprendszerbeli holdak közül egyedül ezt burkolja vastag atmoszféra.

A Szaturnusz korábbi vizsgálata űrszondákkal

A naprendszerbeli külső bolygókat már évtizedek óta vizsgálják űrszondákkal. Eleinte olyan bolygószondák fedélzetén elhelyezett műszerekkel végezték a méréseket és készítették a felvételeket, amelyek a bolygókat megközelítve hatalmas sebességgel el is száguldtak mellettük, mert pályájuk kifelé vezet a Naprendszerből. Ám a közelrepülés percei-óriái során összegyűjtött információ is rengeteg eredménnyel szolgált, egyben jó összehasonlítási alapot nyújtott az adott bolygó körül évekkel vagy évtizedekkel később keringési pályára állt szonda méréseivel történő összevetéshez.

Nem egészen negyven évvel ezelőtt rövid időn belül három amerikai űrszonda is elhaladt a Szaturnusz mellett. Elsőként a NASA Pioneer–11 szondája vizsgálta közelről a gyűrűs bolygót, amikor 1979 szeptemberében mindössze 20 000 km távolságra suhant el a bolygó atmoszférájának legfelső felhőrétegeitől. A Pioneer–11 felvételei alapján fedezték fel a nagyon vékony F-gyűrűt. Ugyancsak e szonda jóvoltából derült fény arra, hogy a gyűrűk között a Földről sötétnek látszó rések megfelelő szögből (ellenfényben) fényképezve világosak. Ez arra utal, hogy a rések sem üresek, a bennük található anyag szórja a ráeső napsugárzást.



5. ábra. A Cassini-Huygens űrszondán található főbb műszerek.

Egy év elteltével, 1980 novemberében a Voyager–1 repült el a Szaturnusz rendszere mellett. A szonda fedélzeti kamerái készítették az első nagy felbontású fényképeket a bolygóról, a gyűrűiről és a holdjairól. Először sikerült képet alkotni hét hold felszínének jellegzetességeiről. A Titan esetében – amelyet 4000 km-ről tudta vizsgálni – pedig bebizonyosodott, hogy atmoszférája az optikai hullámhossztartományban átlátszatlan, a hold felszíne egyáltalán nem látszik.

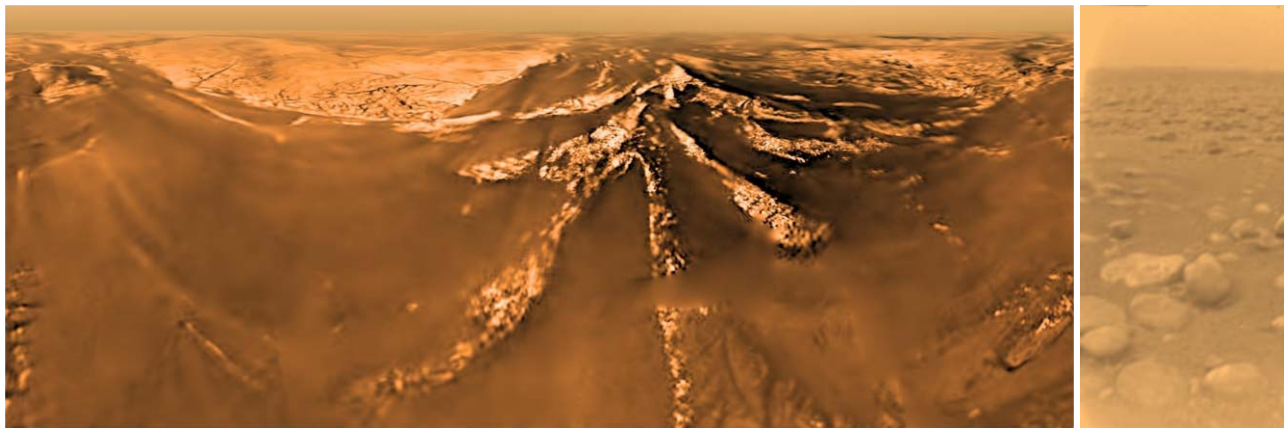
Szűk egy éven belül, 1981 augusztusában pedig a Voyager–2 haladt el a Szaturnusz mellett, százezer kilométerre megközelítve a gyűrűs bolygót. Újabb közelképek készültek és jutottak vissza a Földre a bolygóról és holdjairól (összesen 16 000 felvétel), és bizonyító erejű képek születtek arról, hogy a Szaturnusz atmoszférájában és gyűrűiben is változások zajlanak.

E három korai űrszonda eredményei közé tartozott még néhány olyan apró hold felfedezése, amelyek a gyűrűkhöz közel vagy éppen valamelyik részen keringenek, sőt addig ismeretlen két rést is azonosítottak a gyűrűkben.

A Cassini-Huygens küldetés

Egy naprendszerbeli égitest megismerésének legcélszerűbb módja az, hogy egy odairányított űreszközt pályára állítanak körülötte, így hosszú időn át lehetőség nyílik különféle mérési adatok összegyűjtésére. Ha az is kivitelezhető, akkor a szonda vagy annak egy részegysége leszáll a vizsgálandó égitest felszínére. Ez utóbbi megoldást elsősorban a Mars és a Vénusz bolygók kutatása során alkalmazták. Keringő szondákat azonban két óriásbolygó, a Jupiter¹ és a Szaturnusz tanulmányozására is bevetettek.

¹ A Jupiter helyszíni vizsgálatára vonatkozóan lásd: http://mta.hu/tudomany_hirei/a-juno-urszonda-megkezdte-az-adatgyujtest-a-jupiternel-106707.



6. ábra. A Huygens szonda DISR kamerájával ereszkedés közben, 2 km magasságból a Titanról készített panorámakép, balra és leszállás után a felszínről készített fotó, jobbra (forrás: ESA/NASA/JPL/University of Arizona).

A Szaturnusz vizsgálatára vonatkozó Cassini–Huygens űrszondát 1997. október 15-én indították. A szonda két fő egysége közül a Cassini feladata az, hogy a Szaturnusz körül keringve vizsgálja magát a bolygót, a gyűrűrendszert és minél több holdat, amikor éppen közel kerül valamelyikhez. A szonda másik egysége, a Huygens pedig a Titan hold részletes helyszíni vizsgálatára szolgált, azaz a hold felszínére leereszkedve.

A Cassini a NASA, a Huygens pedig az Európai Űrügynökség (ESA) szondája (5. ábra). A mérési adatokat a Földre továbbító nagy teljesítményű rádióantennákat az Olasz Űrügynökség (ASI) bocsátotta a misszió rendelkezésére. A Huygens fedélzetén magyar közreműködéssel készített berendezések is helyet kaptak: az MTA Rézecske- és Magfizikai Kutatóintézet (ma MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont) szakemberei a fedélzeti magnetométer és a plazmaspektrométer földi ellenőrző és kalibráló rendszerét alkották meg.

Az üzemanyag-takarékosság érdekében a Cassini–Huygens űrszonda pályája nem közvetlenül a Szaturnuszhoz vezetett. Az asztronautikában már jól bevált módon a szonda pálya menti sebességét úgynevezett gravitációs lendítéssel növelték, miközben a szonda több bolygó (kétszer a Vénusz, utána a Föld, majd a Jupiter) mellett elhaladva kihasználta azok tömegvonzását. Amikor a Cassini–Huygens egy-egy bolygó mellett elhaladt, természetesen tudományos vizsgálatokat is végzett, amelyek során kipróbálta a fedélzeti műszereit. A Jupiterről, a Naprendszer legnagyobb bolygójáról például a 2000–2001. év fordulóján bekövetkezett „találkozója” során az addigi legrészletesebb képeket készítette.

A szondapáros végül 2004. július 1-jén állt pályára a Szaturnusz körül. A Huygens 2004. december 25-én vált le az anyaszondáról, majd 2005. január 14-én síma leszállást végzett a Titan addig teljesen ismeretlen felszínére (6. ábra).

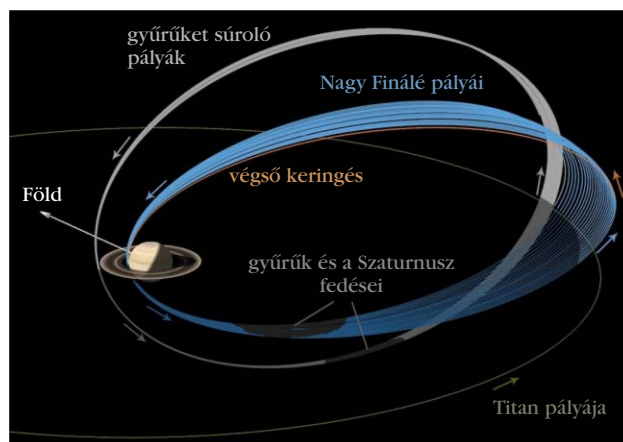
A Szaturnusz rendszerének eredetileg négy év időtartamúra tervezett vizsgálatát már kétszer meghosszabbították. 2017. április 22-én azonban végérvényesen utolsó fázisába lépett az észlelési program, és megkezdődött a Cassini Nagy Fináléja, amelynek so-

rán a szonda többszöri pályamódosítás után végül szeptember közepén a Szaturnuszba csapódik (7. ábra). A Cassini-küldetés felelős vezetői azért választották a szonda megsemmisítésének ezt a módját, hogy a Szaturnusz rendszerét még véletlenül se tegyék ki emberi eredetű szennyezésnek. Ha ugyanis a szonda műszereit egyszerűen csak kikapcsolják, akkor akár tetszőlegesen hosszú idő elteltével előfordulhat, hogy az akkor már kontrollálhatatlan pályán mozgó szonda valamelyik holdra zuhan, és földi eredetű szennyezést is szállíthat oda. Ezt pedig feltétlenül el kell kerülni, ha a kutatások egyik célja az élet lehetőségeinek keresése a Naprendszer más égitestein.

Melyek voltak az előre kitűzött tudományos feladatok?

- A Szaturnusz magnetoszférája háromdimenziós szerkezetének meghatározása és dinamikus viselkedésének vizsgálata;
- A bolygó dinamikus atmoszférájának vizsgálata a felhők szintjén;
- A Szaturnusz körüli gyűrűk háromdimenziós szerkezetének feltérképezése és a gyűrűrendszer dinamikus viselkedésének leírása;
- A holdak geológiai történetének és felszíni kémiái összetételének meghatározása;

7. ábra. A Cassini Nagy Fináléjának vázlatja (NASA/JPL/Caltech).



– a Iapetus hold keringési irányába eső félgömbjén (az úgynevezett vezető oldalon) levő sötét foltok természetének és eredetének tisztázása;

– A Titan hold felhőzetében és atmoszferikus ködösségében bekövetkező időbeli változások tanulmányozása;

– A Titan felszínének jellemzése a leszállás környezetében.

A Cassini fedélzeti műszerei

– *Plazmaspektrométer*: az elektronok és protonok energiájának és elektromos töltésének mérésére. A Szaturnusz ionoszférájából származó molekulák vizsgálata alapján meghatározza a bolygó mágneses mezejének konfigurációját. Méri a magnetoszféra belsejében található (részben a napszélből eredő) plazmát is.

– *Kozmikus port elemző készülék*: a Szaturnuszhoz közeli apró porszemek nagyságának, sebességének és irányának mérése.

– *Összetett infravörös-spektrométer*: a különféle objektumokról (atmoszféra, gyűrűk vagy holdak felcírá) érkező infravörös sugárzás mérésére, amelynek alapján következtetni lehet a hőmérsékletre és az összetételre. A Szaturnusz atmoszférájának háromdimenziós feltérképezése a hőmérséklet, a nyomás, a gázösszetétel, az aeroszolok és felhők eloszlásának meghatározásához.

– *Tömegspektrométer*: a töltött részecskék (protonok és nehéz ionok) és semleges részecskék (atomok) vizsgálatára.

– *Képkalkotó alrendszer*: felvételek készítésére a látható tartományban, valamint az infravörös- és ultraibolya-tartomány egy részében.

– *Magnetométer*: a Szaturnusz körüli mágneses mező erősségének és irányának mérésére. A mágneses mezőt részben a bolygó fémes magja kelti. A mágnesség mérésével lehetővé teszi a mag vizsgálatát.

– *Magnetoszférikus képkalkotó berendezés*: a Szaturnusz hatalmas mágneses mezeje által csapdába ejtett részecskék vizsgálatára.

– *Radar*: a Titan felszínének feltérképezésére és a felszíni objektumok (hegyek, kanyonok) magasságának meghatározására az elküldött és visszaverődött rádiójelek alapján, továbbá a Szaturnusz rádiósugárzásának vizsgálatára.

– *Rádió- és plazmahullám-vizsgáló*: a Szaturnusz felől érkező (például atmoszferikus villámoktól származó) rádiójelek, beleértve a Szaturnusz, a Titan és a napszél kölcsönhatásából adódó rádióhullámok vizsgálatára.

– *Rádiótudományi alrendszer*: földi rádióantennák segítségével figyeli, milyen változásokat szenvednek az űrszonda rádiójelei különböző objektumokon (például a Titan atmoszféráján vagy a Szaturnusz gyűrűin) való áthaladásakor.

– *Ultraibolyában leképező spektrográf*: a visszaverődő ultraibolya sugárzás alapján készít képeket a Szaturnusz felhői és gyűrűi szerkezetének és összetételének vizsgálatához.

– *Optikai és infravörös térképező spektrométer*: egy látható tartományban és egy infravörösben érzékelő kamerából áll.

A Huygens fedélzeti műszerei

– *Az atmoszféra szerkezetét kutató műszer*: mérte a Titan atmoszférájának fizikai és elektromos tulajdonságait. A berendezéshez tartozott az ereszkedés során és a talajt érésakor hallható hangokat rögzítő mikrofon is.

– *Doppler-kísérleti eszköz*: a szonda rádiójeleiben fellépő Doppler-eltolódás mérésére, amelynek alapján azonosítani lehet bármilyen elmozdulást.

– *Leszállási képkalkotó és spektrális sugárzásmérő*: több szenzorral és látómezővel végzett megfigyeléseket. Két képkalkotó (egy optikai és egy infravörös) az ereszkedés utolsó fázisában figyelte a felszínt. A szonda forgása közben készített felvételekből mozaikképet alkottak a landolás helyéről. Egy oldalirányú képkalkotóval a horizontot fényképezték.

– *Gázkromatográf és tömegspektrométer*: sokoldalú kémiai gázanalizátor a Titan atmoszférája kémiai összetételének meghatározásához.

– *Aeroszolgyűjtő és pirolizátor*: szűrők segítségével mintákat gyűjtött a légköri aeroszolrészecskékből, majd a mintákat felmelegítette, hogy az illóanyagok elpárologjanak, a szerves anyagok pedig felbomlanak. A mintát ezután a gázkromatográffal és a tömegspektrométerrel vizsgálták.

– *Felszínvizsgáló tudományos műszer-csomag*: a Titan felszíni tulajdonságainak meghatározásához.

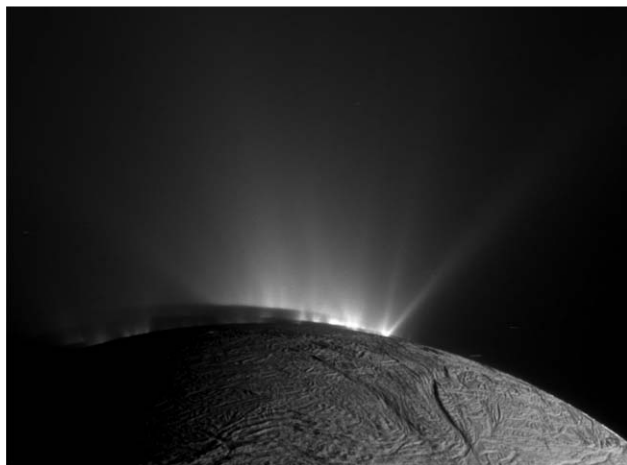
A Cassini és a Huygens eddigi legfontosabb tudományos eredményei

Ilyen felszereltséggel, a műszerek sokaságát bevetve egyáltalán nem meglepő, hogy megszámlálhatatlan tudományos eredmény született magáról a Szaturnuszról, valamint gyűrűrendszeréről és holdjairól. Itt most csak néhány igazán fontosat emelünk ki.

1. Az első sima leszállás egy külső naprendszerbeli holdon, a Titanon. Ennél távolabbi égitesten még nem szállt le ember alkotta eszköz. A Titanon a földihez hasonló felszíni képződményeket talált a Huygens szonda, folyómedreket, erózió pusztításának nyomait, de víz helyett metántartalmú csapadék esik ott, folyókat, tavakat és tengereket is létrehozva.

2. A Titan prebiotikus kémiájának első vizsgálata. A Titan atmoszférája rengeteg összetett molekulát tartalmaz. A hold felszínéhez közelebb metánt és etánt is kimutattak, és egyéb szerves molekulák is lehetnek, amelyek a felszínre jutva prebiotikus kémiai folyamatokat indíthatnak el.

3. Aktív, jeges kilövellések felfedezése a Szaturnusz Enceladus nevű holdján. Teljes meglepetésként érte a szakembereket, hogy az Enceladus felszínéből vizet tartalmazó anyag áramlik, sőt lövell ki (8. ábra). A hold felszíne alatt nagy kiterjedésű vízóceán



8. *ábra.* Vízkilövellések az Enceladuson (forrás: NASA/ESA/SSI/Cassini Imaging Team).

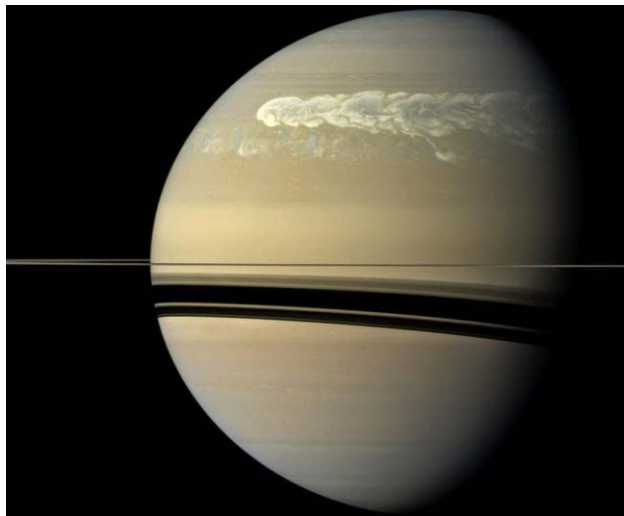
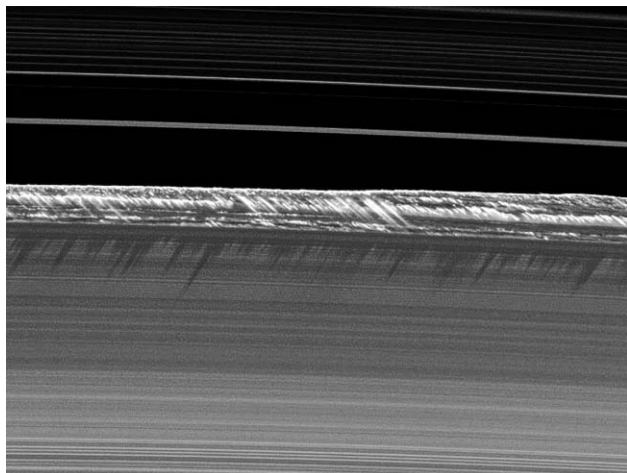
lehet, ezért a kutatásokat kiterjesztették az élet esetleges nyomainak kimutatására is.

4. A gyűrűk aktívak és dinamikusak. Újabb kis holdak kialakulása is a szemünk előtt történik a Cassini némelyik felvételén.

5. A 2010–2011-es nagy légköri vihar tanulmányozása. Korábban is megfigyeltek nagy viharokat a Szaturnusz amúgy viszonylag nyugodt atmoszférájában, ezek általában 30 évenként (évszakos effektus) lépnek fel. A mostani azonban hamarabb jelentkezett, ami a megfigyelés szempontjából nagyon kedvező (9. *ábra*). Addig soha nem észlelt molekulák kerültek a Szaturnusz atmoszférájába. A vihar „körbefolyta” az egész északi féltekét, és akkor csillapodott le (egy év után), amikor az örvénylés „farka” utolérte a viharzóna „fejét”.

6. A rádiósugárzás észlelt változásai nem a Szaturnusz belsejének rotációját tükrözik. A hosszúhullámú rádiósugárzás alapján korábban úgy vélték, hogy annak periodikus változásai a bolygó forgását követik. A Jupiter esetében hasonló mérésekből határozták meg a bolygó tengelyforgási idejét. A Szaturnusznál azonban az északi és déli félgömből érkező rádiósugárzás változásai nincsenek szinkronban egymással.

10. *ábra.* A gyűrűk síkjára merőlegesen beeső napfény árnyéka mutatja annak szerkezetét (forrás: NASA/JPL/SSI).

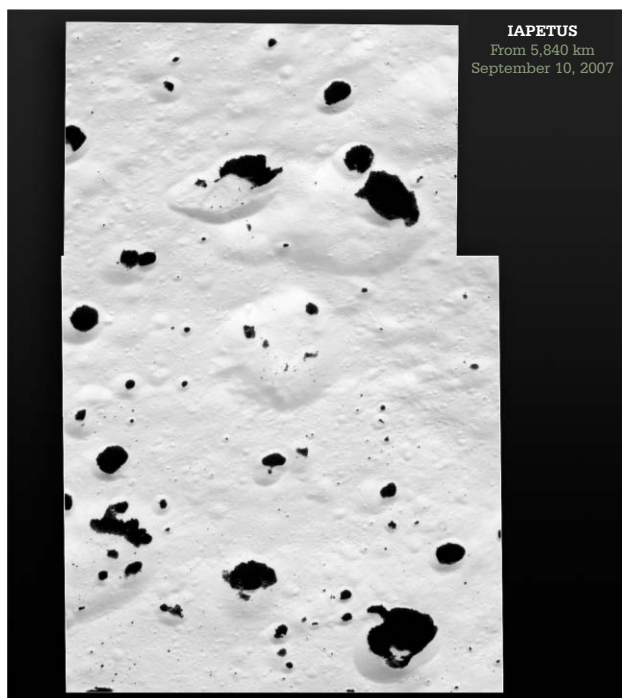


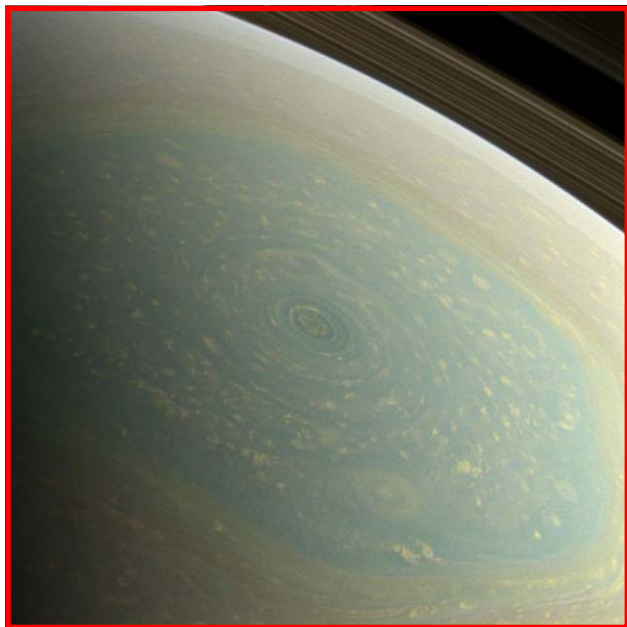
9. *ábra.* Vihar a Szaturnuszon (forrás: NASA/JPL-Caltech/SSI).

7. A gyűrűk vertikális (a síkra merőleges) szerkezetének első meghatározása. A Nap körüli pályáján egy keringés során két alkalommal (vagyis nagyjából 15 évenként) a Nap éléről világítja meg a gyűrűrendszert. A Cassini az egyik ilyen alkalommal a gyűrűt alkotó részecskék árnyékát vizsgálva meghatározta a gyűrűk síkjára merőleges szerkezetét (10. *ábra*).

8. A Iapetus rejtélyes (egy sötét és egy világos félgömbből álló) kétarcúságának megoldása. Már korábban is ismert volt, hogy a Iapetus hold egy világos és egy jóval sötétebb (rossz fényvisszaverő képességű) félgömbből áll, de ennek oka eddig ismeretlen volt. A Iapetus pályája mentén elszórtan elhelyezkedő rossz fényvisszaverő port a hold besöpri, és az az anyag a Iapetus vezető féltekéjén gyűlik össze (11. *ábra*).

11. *ábra.* Rossz fényvisszaverő-képességű por a Iapetus felszínén (forrás: NASA/JPL/SSI).





12. ábra. Hexagon alakú óriáshurrikán a Szaturnusz északi pólusán (forrás: NASA/JPL-Caltech/SSD).

9. Óriás hurrikánok felfedezése a bolygó mindkét pólusa környékén, és az északi poláris hexagon teljes feltérképezése. Szokatlan jelenség a hosszú idő óta jelen levő és majdnem pontosan hatszög alakú képződmény (valójában elképesztően erős örvényzóna) a bolygó északi pólusánál (12. ábra). A Nagy Finálé során a hexagon további vizsgálatával talán sikerül kideríteni e jelenség okát.

A Nagy Finálé időszakában a pályamódosítások hatására a Cassini minden keringése során a gyűrűk belső pereme és a Szaturnusz között halad át, tehát az utolsó 22 keringés alkalmával egészen közelről tudja tanulmányozni a bolygót és a legbelső gyűrűket is. De az igazi közeli vizsgálat majd az lesz, amikor a szeptemberi becsapódáskor a szonda a bolygó atmoszféráján áthalolva néhány másodperc alatt feltérképezi az óriásbolygó atmoszferikus szerkezetét, az ott uralkodó viszonyokat is.

Ajánlott irodalom

A Cassini-misszió amerikai weblapja: <https://saturn.jpl.nasa.gov/>

A Cassini-misszió európai weblapja: www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Cassini-Huygens

A FIZIKA TANÍTÁSA

BESZÁMOLÓ A 2016. ÉVI EÖTVÖS-VERSENYRŐL

Tichy Géza – ELTE Anyagfizikai tanszék

Vankó Péter – BME Fizika tanszék

Vigh Máté – ELTE Komplex Rendszerek Fizikája tanszék

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2016. évi Eötvös-versenye október 14-én délután 3 órai kezdettel tizennégy magyarországi helyszínen¹ került megrendezésre. Külön köszönettel tartozunk mindazoknak, akik ebben szervezéssel, felügyelettel a segítségünkre voltak. A versenyen a három feladat megoldására 300 perc állt rendelkezésre, bármely írott vagy nyomtatott segéd-eszköz használható, de zsebszámológépen kívül minden elektronikus eszköz használata tilos volt. Az Eötvös-versenyen azok vehetnek részt, akik vagy középiskolai tanulók, vagy a verseny évében fejezték be középiskolai tanulmányaikat. Összesen 77 versenyző adott be dolgozatot, 18 egyetemista és 59 középiskolás.

Az ünnepélyes eredményhirdetésre és díjkiosztásra 2016. november 18-án délután került sor az ELTE TTK Konferenciateremben. A mostani díjazottakon kívül meghívást kaptak az 50 és a 25 évvel ezelőtti Eötvös-verseny nyertesei is. Először az akkori feladatokat mutattuk be.

¹ Részletek: <http://mono.eik.bme.hu/~vanko/fizika/eotvos.htm>

Az 1966. évi Eötvös-verseny feladatai

1. feladat

Vízszintes asztallapon álló, $r = 5$ cm rádiuszú, $m = 100$ gramm tömegű golyónak nekigurítunk $v_0 = 280$ cm/s sebességgel egy ugyanilyen golyót. Hogyan folyik le a mozgás? A golyók és az asztallap között a csúszó súrlódási együttható a sebességtől függetlenül $\mu = 0,02$. Az ütközés rugalmatlan, centrális; a golyók közötti súrlódás és a gördülési ellenállás elhanyagolható. $g = 1000$ cm/s². Vizsgáljuk meg az energiaviszonyokat!

2. feladat

kitűzte: Károlyházi Frigyes
Vákuumban elhelyezett hengeres, egyenes drótot állandó értékű feszültségforrásra kapcsolunk. Ekkor a drót izzó állapotban fényt sugároz ki. Hogyan lehet a drót méreteit úgy megváltoztatni, hogy változatlan felvett teljesítmény mellett az összes kisugárzott látható fény mennyisége minél több legyen? A fajlagos ellenállás nem függ a hőmérséklettől.

3. feladat

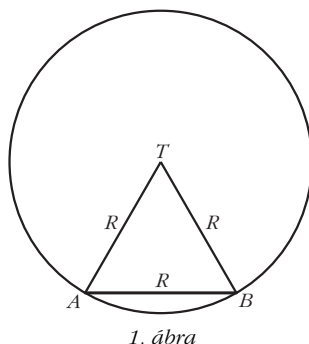
Messziről nézzük a Hold vízben tükröződő képét és azt látjuk, hogy eredetileg $0,5^\circ$ -os látószöge függőleges irányban megkétszereződött. A víz felszínén 12 cm hullámhosszúságú hullámok futnak felénk. Mekkora ezek amplitúdója?

Az 1966-os versenyen még csak érettségizett tanulók indulhattak (gimnazisták csak versenyen kívül). Ebben az évben csak egy I. díjat osztottak ki (II. és III. díjat pedig egyet sem), a díjazott: *Rácz Miklós*, érettségizett a Veszprémi Vegyipari Technikumban, tanárai: *Burger László* és *Pulai István*.

Az 1991. évi Eötvös-verseny feladatai

1. feladat

Egy rögzített T tengely körül könnyen forgó R sugarú mókuserékbe R hosszúságú létrát szereltünk. Egy olyan pillanatban, amikor a kerék éppen nyugalomban van és a létra vízszintes, a mókus elindul az A pontból, és úgy fut át a létrán a B pontba, hogy közben a kerék mozdulatlan marad (1. ábra).



Hogyan kell a mókusnak mozognia? Mennyi idő alatt futott át a létrán?

2. feladat

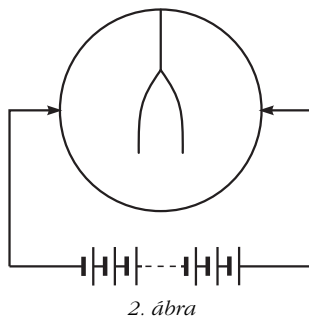
Egy zárt hengert könnyen mozgó, jól záró dugattyú oszt két részre. Kezdetben a dugattyú középen áll. Mindkét oldalon 1 dm^3 térfogatú, 10^5 Pa nyomású, 0°C hőmérsékletű levegő van, a bal oldali részben ezen kívül egy 2 g tömegű jégdarabka is található.

A rendszert lassan 100°C -ra melegítjük. Hol fog elhelyezkedni a dugattyú?

3. feladat

Fémről készült, igen vékony falú, zárt gömbhéj belsejében fonálon egy kétrét hajtott alufóliacsík függ. A gömb két áttelnes pontjára kívülről a 2. ábrán látható módon feszültséget kapcsolunk.

Megmozdul-e az alufóliacsík, és ha igen, hogyan?



Az 1991-es verseny díjazottjai: I. díjat kapott *Bodor András*, az ELTE fizikus hallgatója, érettségizett az ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnáziumban, tanára: *Zsigri Ferenc* és *Káli Szabolcs*, az ELTE fizikus

hallgatója, érettségizett a budapesti Fazekas Mihály Gimnáziumban, tanára: *Horváth Gábor*. Összevont II–III. díjat kapott *Egyedi Péter*, a BME villamosmérnök hallgatója, érettségizett a pécsi Leőwey Klára Gimnáziumban, tanárai: *Csikós Istvánné* és *Kotek László*; *Gefferth András*, a budapesti Fazekas Mihály Gimnázium III. osztályos tanulója, tanárai: *Tóth László* és *Horváth Gábor*; *Katz Sándor*, a bonyhádi Petőfi Sándor Gimnázium III. osztályos tanulója, tanára: *Erdélyesi János*; *Kőszegi Botond*, a budapesti Fazekas Mihály Gimnázium IV. osztályos tanulója, tanára: *Horváth Gábor*; *Miklós György*, a BME villamosmérnök hallgatója, érettségizett a budapesti Szent István Gimnáziumban, tanára: *Kovács István*; *Nagy Benedek*, a KLTE fizikus hallgatója, érettségizett a KLTE Gyakorló Gimnáziumban, tanára: *Dudics Pál*; *Rózsa Balázs*, a budapesti Fazekas Mihály Gimnázium IV. osztályos tanulója, tanára: *Horváthné Dvorák Cecília* és *Szendrői Balázs*, a budapesti Fazekas Mihály Gimnázium IV. osztályos tanulója, tanára: *Horváth Gábor*.

Az eredményhirdetésen jelen volt az 50 évvel ezelőtti győztes *Rácz Miklós* és a 25 évvel ezelőtti díjazottak közül *Gefferth András*, *Miklós György* és *Rózsa Balázs*, utóbbi az akkori feladatok ismertetése után röviden beszélt a versennyel kapcsolatos emlékeiről és pályájáról.

Ezután következett a 2016. évi verseny feladatainak és megoldásainak bemutatása. Az 1. és 3. feladat megoldását *Tichy Géza*, a 2. feladatét *Vankó Péter* ismertette.

A 2016. évi Eötvös-verseny feladatai

1. feladat

kitűzte: *Vigh Máté*

Vízszintes helyzetű, elegendően nagy méretű, téglalap alakú rajztáblán egy begrafitozott kicsiny pénzérme fekszik. A rajztáblát saját síkjában mozgatni kezdjük úgy, hogy középpontja R sugarú körön haladjon ω szögsebességgel, miközben oldalai az eredeti helyzetükkel mindvégig párhuzamosak maradnak. Az érme és a rajztábla közötti súrlódási együttható μ , amelynek értéke elég kicsi ahhoz, hogy az érme folyamatosan csússzon.

Hogyan mozog az érme hosszabb idő után? Milyen nyomot hagy eközben a rajztáblán?

Megoldás

Ha a rajztábla és a pénzérme között a súrlódási tényező elegendően nagy lenne ($\mu > R\omega^2/g$), akkor a pénzérme nem csúszna meg, hanem a táblához tapadva követné annak mozgását. A feladat szövege szerint nem ez a helyzet, így a rajztábla indításakor a pénzérme azonnal megcsúszik. Sejtethető, hogy néhány periódusidőnyi átmeneti (tranziens) szakasz után az érme mozgása állandósul. Megmutatjuk, hogy az egyenletes körmozgást végző pénzérme kielégíti a Newton-féle mozgásegyenletet.

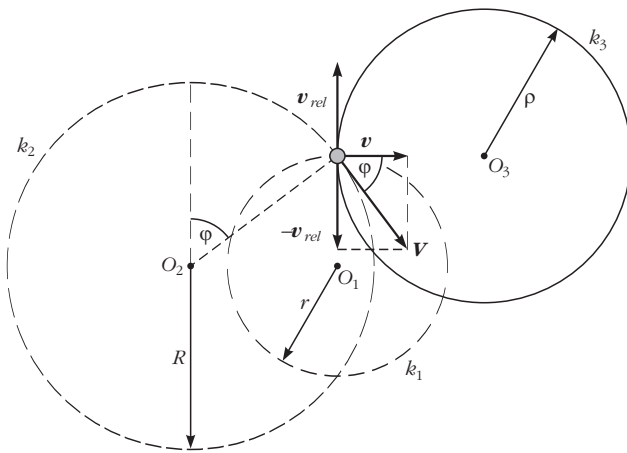
Az m tömegű pénzérmére vízszintes irányban egyetlen erő hat: a μmg nagyságú, de állandóan változó irányú csúszási súrlódási erő. Stacionárius kör-

mozgás esetén az érme sebességének nagysága állandó, ezért a súrlódási erő mindig merőleges a sebességvektorra. A pénzérme körmozgásának szögsebessége nem lehet más, mint a rajztábla mozgásának ω körfrekvenciája. A körpálya r sugarát a mozgásegyenletből határozhatjuk meg:

$$\mu m g = m r \omega^2, \text{ ebből } r = \frac{\mu g}{\omega^2}. \quad (1)$$

Érdekes, hogy r nem függ a rajztábla pályájának R sugarától.

Most térjünk rá arra a kérdésre, hogy milyen nyomot hagy az érme a rajztáblán! Ehhez a két test relatív mozgását kell elemezni. A 3. ábrán látható r sugarú k_1 kör a pénzérme pályáját mutatja az álló vonatkozta-



3. ábra

tási rendszerben, az R sugarú k_2 kör a rajztábla éppen az érmevel érintkező pontjának későbbi pályáját jelzi, végül pedig a ρ sugarú k_3 kör a táblán hagyott grafitnyomnak felel meg. Az érme ható csúszási súrlódási erő az O_1 pont felé mutat, tehát az érme rajztáblához viszonyított $\mathbf{v}_{rel}$ sebessége ezzel ellentétes. Az érme álló vonatkoztatási rendszerhez viszonyított $\mathbf{v}$ sebessége viszont erre merőleges, így a rajztábla érmevel éppen érintkező pontjának $\mathbf{V} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_{rel}$ sebességére fennáll a Pitagorasz-tétel:

$$\mathbf{V}^2 = \mathbf{v}^2 + \mathbf{v}_{rel}^2. \quad (2)$$

Mivel az állandósult mozgásszakaszban mindhárom sebességvektor ω szögsebességgel forog az időben, a nagyságukat kifejezhetjük a körpályák sugarával:

$$|\mathbf{V}| = R\omega, \quad |\mathbf{v}| = r\omega, \quad |\mathbf{v}_{rel}| = \rho\omega,$$

amit a (2) egyenletbe írva a sugarak között kapunk összefüggést:

$$R^2 = r^2 + \rho^2.$$

Ezt és az (1) eredményt felhasználva megkapjuk a pénzérme által a rajztáblán hagyott kör alakú grafitnyomok ρ sugarát:

$$\rho = \sqrt{R^2 - \left(\frac{\mu g}{\omega^2}\right)^2}.$$

Az érme megcsúszásának $\mu < R\omega^2/g$ feltétele miatt ez mindig valós.

Megjegyzés

Az ábráról leolvasható, hogy az érme mozgása nincs szinkronban a rajztábla mozgásával, hanem ahhoz képest folyamatosan „késik”. A fáziskésés φ szögét is a sebességvektorok által kifeszített derékszögű háromszög segítségével határozhatjuk meg:

$$\cos \varphi = \frac{|\mathbf{v}|}{|\mathbf{V}|} = \frac{r}{R} = \frac{\mu g}{R\omega^2},$$

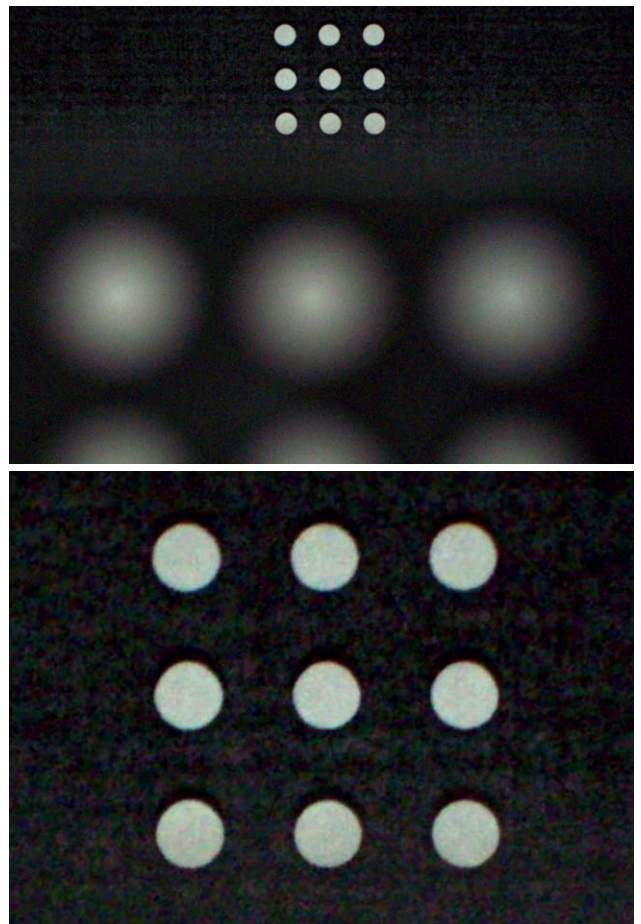
amely csúszó érme esetén biztosan kisebb 1-nél.

2. feladat

Kitűzték: Tichy Géza, Vankó Péter

Két egyforma, fekete lapon kilenc-kilenc kicsi fehér pötty van. A szomszédos pöttyök középpontjának távolsága 5,8 mm. A lapokról egy fényképezőgéppel képet készítettünk: a fényképezőgép a távolabbi, a lencsétől 25 cm távolságra lévő lapról éles képet adott, a közelebbiről viszont elmosódott a kép. A 4. ábrán fölül a teljes kép látható, alul pedig a kép tete-

4. ábra

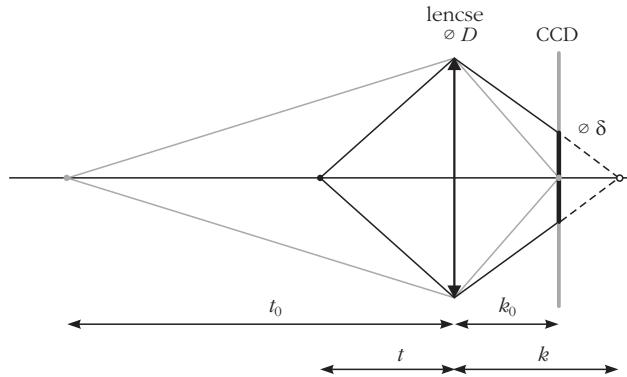


jének kinagyított részlete. A fényképezőgép lenszének fókusz távolsága 18 mm.

Becsüljük meg a megadott és a képekről lement adatokból a közelebbi tárgy távolságát a lenszétől, valamint a fényképezőgép lenszének átmérőjét!

Megoldás

A feladat megoldásának lényege, hogy megértsük, miért lesz a közelebbi tárgy képe elmosódott. Az 5. ábrán két pontszerű tárgy képe látható. A távolabbiról a lencse pontosan a CCD érzékelő síkjában hoz



5. ábra

létre éles, pontszerű képet. A közelebbiről viszont távolabb keletkezne éles kép, így a CCD-n egy elmosódott, δ átmérőjű folt keletkezik. Az ábra alapján:

$$\frac{D}{\delta} = \frac{k}{k - k_0},$$

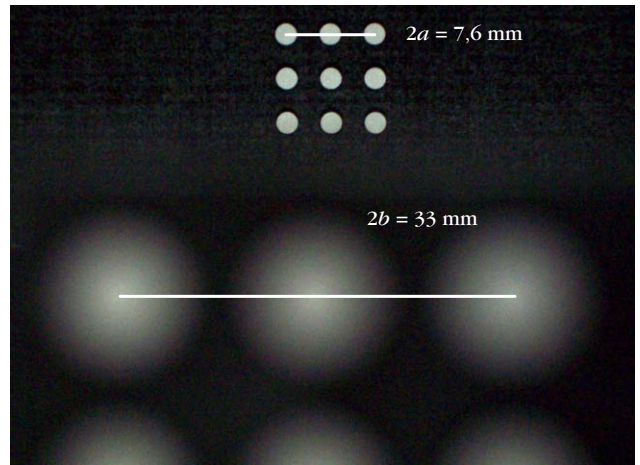
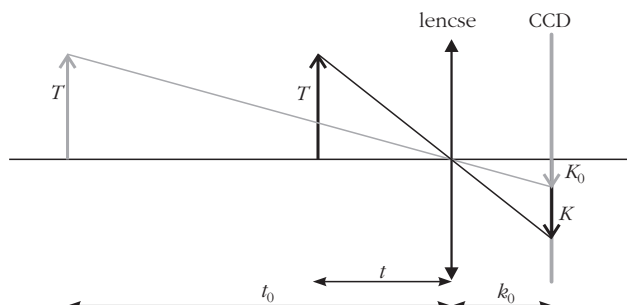
a leképzési törvény alapján pedig:

$$\frac{1}{t_0} + \frac{1}{k_0} = \frac{1}{f} \text{ és } \frac{1}{t} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}.$$

A 6. ábra alapján a közelebbi tárgy távolsága a két kép nagyításának arányából határozható meg:

$$\begin{aligned} \frac{K_0}{T} &= \frac{k_0}{t_0}, \\ \frac{K}{T} &= \frac{k_0}{t}, \\ \lambda &= \frac{K}{K_0} = \frac{t_0}{t}. \end{aligned}$$

6. ábra



7. ábra

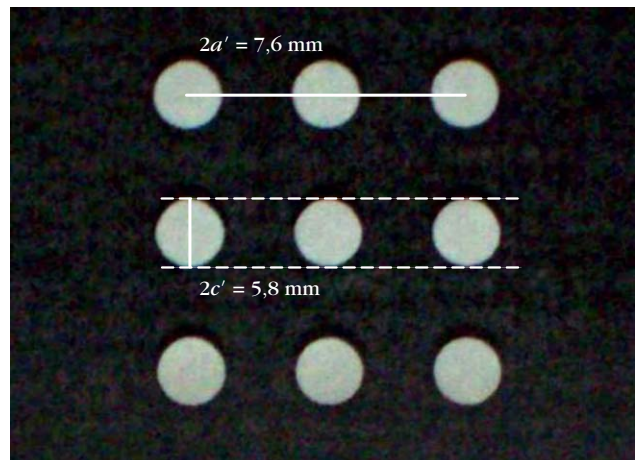
A felső ábráról leolvasható a szélső pöttyök közép-pontjának távolsága (a szomszédos pöttyök távolságának duplája) mindkét képen (7. ábra).

Ebből:

$$\lambda = \frac{K}{K_0} = \frac{2b}{2a} = \frac{33 \text{ mm}}{7,6 \text{ mm}} = 4,34 \text{ és}$$

$$t = \frac{t_0}{\lambda} = \frac{25 \text{ cm}}{4,34} = 5,8 \text{ cm}.$$

Az alsó (nagyított) ábráról leolvasható a pöttyök átmérőjének és távolságának aránya (8. ábra).



8. ábra

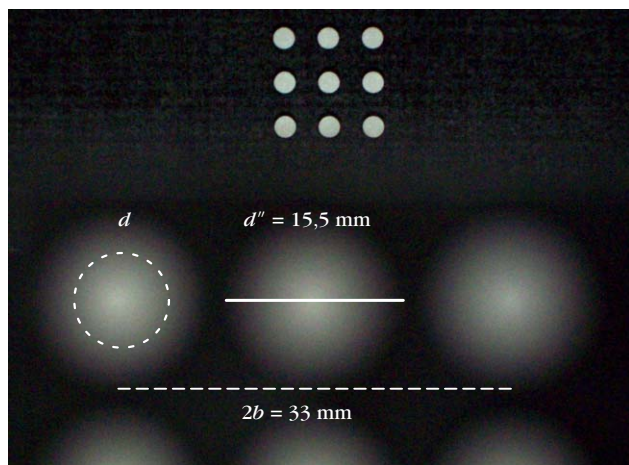
Ebből:

$$\rho = \frac{c'}{a'} = 2 \frac{c'}{2a'} = 2 \cdot \frac{5,8 \text{ mm}}{24 \text{ mm}} = 0,48.$$

Ez alapján kiszámíthatjuk, hogy mekkora lenne a felső ábrán a közelebbi pöttyök átmérője, ha nem lennének elmosódva:

$$d = \rho b = \rho \frac{2b}{2} = 0,48 \cdot \frac{33 \text{ mm}}{2} = 8,0 \text{ mm}.$$

A 9. ábráról leolvasható az elmosódott kép átmérője: $d'' = 15,5 \text{ mm}$. A két átmérő különbsége a kép elmosódottsága (ekkora lenne egy pontszerű tárgy elmosódott képe ezen a képen):



9. ábra

$$e = d'' - d = 7,5 \text{ mm.}$$

Ezután már csak néhány számítás van hátra. Az 5. ábrán jelölt képtávolságok:

$$k_0 = \frac{t_0 f}{t_0 - f} = 19,4 \text{ mm,}$$

$$k = \frac{t f}{t - f} = 26,2 \text{ mm.}$$

Két pötty távolsága a fényképezőgép CCD érzékelőjén (e távolság a valóságban $a_0 = 5,8 \text{ mm}$, meg van adva):

$$a_{\text{CCD}} = \frac{k_0}{t_0} a_0 = \frac{19,4 \text{ mm}}{250 \text{ mm}} \cdot 5,8 \text{ mm} = 0,45 \text{ mm,}$$

amiből a felső kép nagyítása a CCD-n kialakuló kép-hoz viszonyítva:

$$N = \frac{a}{a_{\text{CCD}}} = \frac{2 a}{2 a_{\text{CCD}}} = \frac{7,6 \text{ mm}}{2 \cdot 0,45 \text{ mm}} = 8,4.$$

Ebből az elmosódottság a CCD érzékelőn:

$$\delta = \frac{e}{N} = \frac{7,5 \text{ mm}}{8,4} = 0,9 \text{ mm,}$$

amiből a keresett lencseátmérő az 5. ábra alapján:

$$D = \delta \frac{k}{k - k_0} \approx 3,5 \text{ mm.}$$

Megjegyzések

1. A kért mennyiségek hibájára csak becslést adunk. A lehető legpontosabb (tized mm-es) leolvasás és egy kicsit „nagyvonalúbb” (fél mm pontos) leolvasás adataival is végigszámolva azt kapjuk, hogy a közelebbi tárgy távolságára kapott eredmény hibája 1-2%, a lencseátmérő hibája pedig 10-15%.

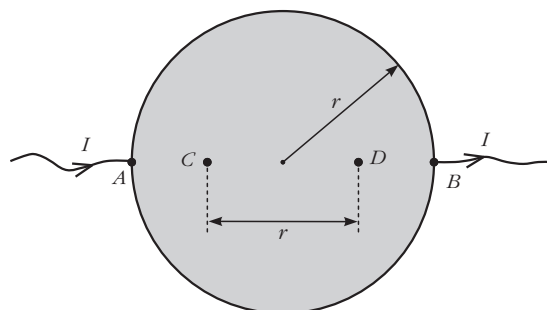
2. A közelebbi tárgy távolságát azért kérdeztük, hogy segítsük a gondolatmenetet. Ezt több versenyző is meghatározta, de nem tudtak továbblépni. A kép elmosódottságával – az egy helyes megoldón kívül –

szinte senki nem tudott mit kezdeni. Néhányan – helytelenül – a fény elhajlásával próbálták magyarázni az elmosódottságot.

3. feladat

kitűzte: Vigh Máté

Egy r sugarú, d vastagságú ($d \ll r$), ρ fajlagos ellenállású fémkorong A pontjába I erősségű áramot vezetünk, B pontjából pedig elvezetjük azt.



10. ábra

Mekkora feszültség mérhető a 10. ábrán látható C és D pontok között?

Megoldás

A fémkorong vizsgálata előtt érdemes egy végtelen fémlemez esetéből kiindulni. Képzeljük el, hogy egy végtelen fémlemez A pontjába $2I$ áramot vezetünk, a B pontból pedig elvezetjük azt. Ha csak az A jelű elektróda lenne jelen, a fémlemezben a bevezetett áram izotróp módon terjedne szét, így az A ponttól r_1 távolságra az áramsűrűség nagysága

$$j_1 = \frac{2I}{2\pi r_1 d}$$

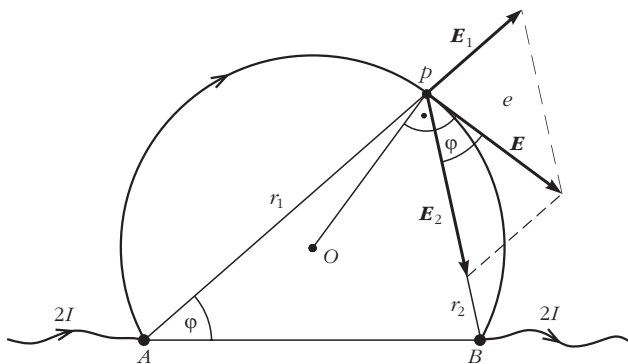
lenne. A differenciális Ohm-törvény értelmében ezt az áramsűrűséget a lemezben megjelenő $E_1 = \rho j_1$ térerősségű elektromos mező tartja fenn, így az A elektróda hatására a végtelen fémlemezben az r_1 távolsággal fordítottan arányos erősségű, az A ponttal ellentétes irányba mutató, „sugaras” elektromos mező alakul ki. Hasonlóan, ha csak a B jelű csatlakozó lenne jelen, akkor r_2 távolságban

$$E_2 = \frac{2\rho I}{2\pi r_2 d}$$

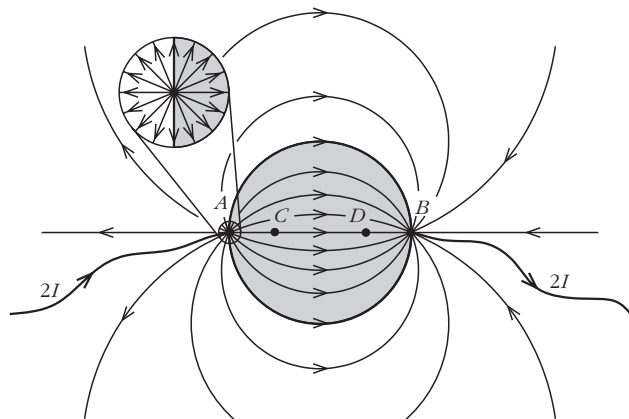
térerősségű, a B pont felé mutató elektromos tér jönne létre. Mivel mindkét elektróda jelen van, így a lemezben kialakuló elektromos tér (és áramsűrűség) az előbbi két eset szuperpozíciójaként (vektori összegeként) számolható.

Tekintsük most a végtelen fémlemez tetszőleges P pontját (lásd a 11. ábrát)! Itt az A és B elektródák hatására külön-külön E_1 és E_2 térerősség alakul ki, amelyek nagyságára az eddigiek szerint fennáll az

$$\frac{|E_1|}{|E_2|} = \frac{r_2}{r_1}$$



11. ábra



12. ábra

egyenlőség. Ebből és a váltószögek egyenlőségéből látszik, hogy az ABP háromszög hasonló a térerősségvektorok által meghatározott háromszöghöz, ezért az eredő térerősségvektor a PB szakasszal ugyanakkora szöget zár be, mint a PAB szög. Ez viszont azt jelenti, hogy az ABP háromszög (O középpontú) köré írt körét a P pontbeli eredő térerősség érinti, hiszen van két szögünk (PAB szög, illetve az $\mathbf{E}$ és $\mathbf{E}_2$ vektorok által bezárt szög), amelyek egyenlőségük miatt a kör ugyanazon PB ívéhez tartozó kerületi szögek.

A fentiekből következik, hogy az eredő térerősségvektor a fémsík tetszőleges pontjában érintője az A , B és a kiszemelt pontra illeszkedő körívnek, a lemezben kialakuló elektromos erővonalak (és így az áramvonalak is) tehát *körív alakúak*, amelyek átmennek az A és B pontokon.

Most gondolatban vágjuk ki a végtelen fémlapból a 12. ábrán látható, korong alakú részt! A korong pereme mentén az áramok a kivágás előtt is érintő irányban folytak, így az áramokra kirótt határfeltétel automatikusan teljesül. A korong kivágása tehát nem változtatja meg sem a külső, sem a belső árameloszlást, és így a feszültségviszonyokat sem. A végtelen fémlapban az áram be- és kivezetési pontjának közvetlen közelében az árameloszlás izotróp volt (itt a távolabbi elektróda hatása már nem érződik), így a korong kivágása előtt a fémlapba vezetett $2I$ erősségű áramnak pontosan a fele jutott be a korongba (lásd az ábrát). A feladatbeli kérdés tehát egyenértékű azzal, hogy mekkora volt a feszültség a végtelen fémlap C és D pontjai között a korong kivágása előtt?

Az A pontban bevezetett $2I$ áram hatására az elektródától r távolságra a fémlap potenciálja (az A és B pontok között félúton, a korong középpontjában elhelyezkedő referenciaponthoz képest) a térerősség integrálásával kapható meg:

$$\Phi(r_1) = \int_{r_1}^{r_0} E_1(r') dr' = \frac{2\rho I}{2\pi d} \int_{r_1}^{r_0} \frac{1}{r'} dr' = -\frac{\rho I}{\pi d} \ln \frac{r_1}{r_0},$$

ahol $r_0 = r$. Ennek felhasználásával az A pontbeli elektróda által a C és D pontok között létrehozott feszültség nagysága

$$U_{CD}^{(A)} = \frac{\rho I}{\pi d} \left(-\ln \frac{r}{2r_0} + \ln \frac{3r}{2r_0} \right) = \frac{\rho I}{\pi d} \ln 3.$$

Ugyanekkora potenciálkülönbséget hoz létre a B jelű elektróda is, így a szuperpozíció értelmében a C és D pontok között eső feszültség

$$U_{CD} = U_{CD}^{(A)} + U_{CD}^{(B)} = 2 U_{CD}^{(A)} = \frac{2\rho I}{\pi d} \ln 3.$$

Ekkora tehát a kivágott fémkorong C és D pontjai közötti feszültség is.

Régi és új díjazottak, valamint tanáraik.



Az esemény végén került sor az eredményhirdetésre. A díjakat *Patkós András*, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöke adta át.

Egyetlen versenyző sem oldotta meg mindhárom feladatot, így a versenybizottság első díjat nem adott ki.

Két feladat helyes megoldásáért *második díjat* nyert *Kovács Péter Tamás*, a Zalaegerszegi Zrínyi Miklós Gimnázium 12. osztályos tanulója, *Juhász Tibor* és *Pálovics Róbert* tanítványa, valamint *Tompa Tamás Lajos*, a miskolci Földes Ferenc Gimnázium 12. osztályos tanulója, *Zámborszky Ferenc* és *Kovács Benedek* tanítványa.

Egy feladat helyes megoldásáért *harmadik díjat* nyert *Forrai Botond*, a budapesti Baár-Madas Református Gimnázium érettségizett tanulója, *Horváth Norbert* tanítványa – a BME fizikus hallgatója; *Lajkó*

Kálmán, a Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium 12. osztályos tanulója, *Mező Tamás* tanítványa, valamint *Simon Dániel Gábor*, a Kecskeméti Bányai Júlia Gimnázium 11. osztályos tanulója, *Bakk János* tanítványa.

A második díjjal *Zimányi Gergely* adományából nettó 40 ezer, a harmadik díjjal nettó 25 ezer forint pénzjutalom járt, a díjazottak tanárai pedig a Typotex Kiadó könyvtulványait kapták. A verseny megszervezését az Eötvös Loránd Fizikai Társulat a MOL támogatásából fedezte.

Mind a díjazottaknak, mind tanáraiknak gratulálunk a sikeres versenyzéshez. Köszönetünket fejezzük ki az összes versenyzőnek, hogy részvételükkel, és tanáraiknak, hogy a felkészítéssel, tanításukkal emelték a versenyt, és ezzel a magyar oktatás színvonalát.

A TAVI MOLNÁRPOLOSKA ÁRNYÉKPAPUCSAI ÉS A VÍZ FELÜLETI FESZÜLTSEGE

– a felületaktív anyagok káros hatása a vízfelszíni rovarok viselkedésére

Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna – Fazekas Mihály Általános Iskola, Kiskunhalas

Rizmajer Erzsébet – Táncsics Mihály Gimnázium, Dabas

Kriska György – ELTE Biológiai Intézet és MTA ÖK Duna-kutató Intézet, Budapest

Horváth Gábor – ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Budapest

1994 óta minden év március 22-én ünnepeljük a *Víz Világnapját*. Az ENSZ ezzel igyekszik felhívni a figyelmet édesvízkészleteink veszélyeztetettségére. Általános és középiskolai fizikaórákhoz kapcsolódva ez inspirált minket olyan kutatásokra, amelyek során

környezetvédelmi szempontokkal egészítettük ki az iskolai fizikai ismeretek gyakorlati alkalmazását. Diákok bevonásával azt vizsgáltuk, hogy a környezetünkben található vizek felületi feszültsége mennyire befolyásolja a tavi molnárpoloskák és más vízfelszíni rova-



Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna mesterpedagógus, a Kiskunhalasi Fazekas Mihály Általános Iskola matematika-fizika szakos tanára és igazgatója. A hatásos tanulási-tanítási eljárások alkalmazása mellett azok fejlesztésével és kutatásával is foglalkozik. A tudástérképek tanulás- és gondolkodásfejlesztő módszeréről könyvet és folyóiratcikket írt. Tapasztalatait pedagógus szakvizsgát adó képzésben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem oktatójaként is továbbadja.



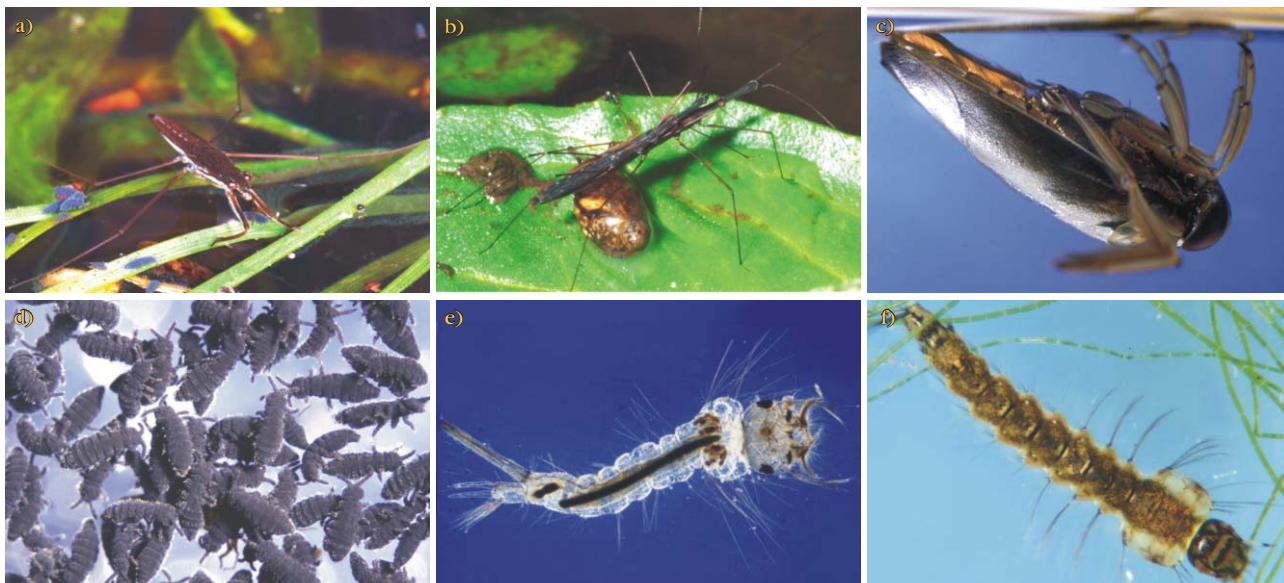
Rizmajer Erzsébet 2003-ban végzett az ELTE TTK biológia-környezettan szakán. Szakdolgozatát a vízi élővilágot érintő szennyezések hatásait vizsgáló témában írta. 2008-ban a Pécsi Tudományegyetemen szerzett kémia tanári diplomát. Jelenleg kémia-biológia tanár a Dabasi Táncsics Mihály Gimnáziumban, ahol az Öveges Laboratóriumban laboráns munkakörét is betölti.



Kriska György, PhD (ELTE, 2000), egyetemi adjunktus, tudományos főmunkatárs. Az ELTE-n több mint 20 éve tanít biológia tantárgypedagógiát és édesvízi gerinctelen állatismeretet. Számos publikációja jelent meg a vizuális ökológia tárgykörében, a Springer gondozásában kiadott *Freshwater Invertebrates in Central Europe* című monográfia társszerzője. Tudományos érdeklődése elsősorban a poláros fényszennyezés és a poláros ökológiai csapdák vizsgálatára irányul.



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



1. ábra. A vizsgált vízirovarok (Kriska György felvételei): a) tavi molnárpóloska (*Gerris lacustris*), b) vízmérő póloska (*Hydrometra stagnorum*), c) hátónúszó póloska (*Notonecta glauca*), d) vízi ugróvillás (*Podura aquatica*), e) csípőszúnyog (*Culex sp.*) lárvája, f) malária szúnyog (*Anopheles sp.*) lárvája.

rok viselkedését, amelyek a víz felületén élnek, aminek felületi feszültsége tartja fenn őket és a szákmányaikul szolgáló kisebb rovarokat [1] (1. ábra).

Az ipari és háztartási szennyvízzel nagy mennyiségben kerülnek az élő vizekbe különböző mosó- és mosogatószeresek. E felületaktív anyagok egyrészt kémiai úton közvetlenül (például feloldva a halak testét borító nyálkaréteget vagy blokkolva a fotoszintézist), másrészt a vízi környezet fizikai tulajdonságainak megváltoztatásával (például csökkentve a víz felületi feszültségét) közvetett módon fejtik ki káros hatásait. A felületi feszültség csökkentése elsősorban a vízfelszín rovarvilágára jelent veszélyt, de végzetes hatású lehet azon állatokra is, amelyek csak ideiglenesen, például légvétel céljából keresik fel a vízfelületet. A felületaktív anyagok káros hatását kísérletekkel szemléltettük, amelyekben nagy hígításban vizsgáltuk egy konyhai mosogatószer hatását a vízben vagy vízben élő rovarokra (1. ábra).

A molnárpóloskák és a vízfelszínen is élő más rovarok (például hátónúszó póloskák, keringőbogarak, ugróvillások) [2–4] hirtelen eltűnése egy vizes élőhelyről a felületi feszültség valamilyen szennyeződés miatti lecsökkenését jelezheti, ami fontos bioindikátor lehet [5, 6]. Az ezzel kapcsolatos vizsgálataink felhívták a diákok figyelmét arra, hogy a háztartásban használt vegyszereknek milyen nagy környezetkárosító hatása van a vizekben is.

A víz felületi feszültsége és mérése

A vízmolekulában kovalens kötással egy oxigénatomhoz két hidrogénatom kapcsolódik, és a kötések kialakulása után az oxigénatomon két nemkötő elektronpár foglal helyet. A vízmolekulában kialakuló kötés erősen poláros. A molekula geometriája és a kö-

tések polaritása együttesen jelentős dipólmomentumot eredményez. A vízmolekulában – az egyenlőtlen elektroneloszlás miatt – az oxigénatom negatív, a hidrogénatom pozitív részleges töltéssel rendelkezik, ami kedvez a hidrogénhidak kialakulásának. A hidrogén a hozzá közel eső másik vízmolekula oxigénjével másodlagos kémiai kölcsönhatásra, hidrogénkötés létrehozására képes. E hidrogénhidkötések okozzák a víz nagy felületi feszültségét. Felületi feszültségnek a folyadékfelszín kifeszített, rugalmas hártaként történő viselkedését nevezzük. A folyadékok belsejében található részecskéket teljesen körülveszik a szomszédos molekulák, ezért minden irányból egyenletes vonzás hat rájuk. A felszíni részecskékre viszont csak a folyadék felől hat a többi folyadékmolekula vonzása, ezért a felszíni molekulák a folyadék belseje felé próbálnak elmozdulni és a felszín a lehető legkisebb felülettel érintkezik a levegővel.

A felszín növeléséhez részecskéket kell a folyadék belsejéből a felszínre vinnünk. Eközben energiájukat növelnünk kell, tehát energiát kell befektetnünk. A folyadékfelszín növeléséhez szükséges energia függ a folyadék anyagi minőségétől és a felszínre vitt részecskék számától, utóbbi arányos a folyadékfelszín növekedésével. Egy adott folyadék felületi feszültsége függ a folyadék hőmérsékletétől (magasabb hőmérsékleten kisebb) és a folyadék felszínével érintkező másik anyag minőségétől.

A mosó- és mosogatószerek csökkentik a víz felületi feszültségét. Azon anyagokat (például vízben oldódó sókat), amelyek a víz felületi feszültségét nagy koncentrációban is csak kis mértékben változtatják meg, felületinaktívnak nevezzük. Azokat pedig, amelyek már kis mennyiségben is jelentősen módosítják a víz felületi feszültségét, felületaktív anyagoknak hívjuk (például alkoholok, magasabb széntartalmú zsírsavak, éterek). Ez utóbbiak felületi feszültsége kisebb

a vízénél, így csökkentik az elegy felületi feszültségét. A felületaktív anyagok a kisebb felületi feszültségük miatt főleg a víz felületén halmozódnak fel. A nagy apoláros és a kis poláros résszel rendelkező molekulájú vegyületek felületaktív anyagként viselkednek. A poláros rész vízben oldódik, az apoláros nem. A felületre kiszoruló és azt már közepes koncentrációban is telítő, nem párolgó felületaktív ionok vagy molekulák teszik lehetővé, hogy az oldatból viszonylag hosszú életű vékony hátyát készítsünk, vagy buborékokat fűjünk.

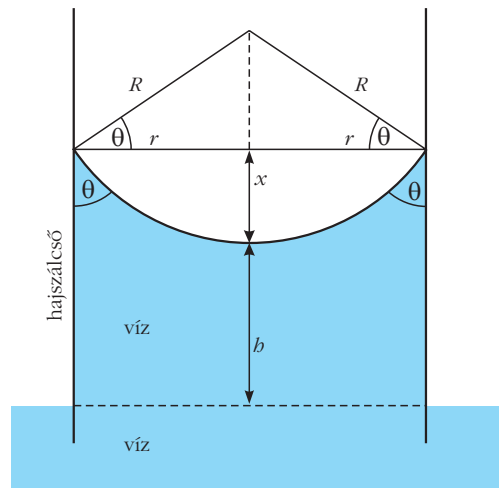
Az iskolákban is könnyen elvégezhető következő két egyszerű kísérlet jól példázza a felületaktív anyagok hatásait:

1. Vízrel töltött Petri-csészében a víz felszínére hintőport szórunk, majd egy csepp étert cseppentünk rá. Azt tapasztaljuk, hogy a csésze közepén egy kör alakú tiszta ablak keletkezik, mert a porszemcséket a vízénél jóval kisebb felületi feszültségű s ezért a felszínen gyorsan szétterülő éter a csésze széle felé tolja. E jelenséget használja ki egy holyva, ami mikor a víz felületén gyorsan kell elmenekülnie, kis felületi feszültségű olajat fecskendez ki potrohvégeiből, s a vízfelszínen hirtelen szétterülő olajcsepp maga előtt tolja a rovar, ami így gyorsan kikerül a számára veszélyes területről [7].

2. Kémcsőből, gumidugóból, sörétből és 1 mm átmérőjű, kör alakú drótból készítsünk olyan úszót, amit óvatosan vízbe helyezve nem merül el, drótkarikája 2 cm-re álljon ki a vízből. Ha az úszót a víz alá nyomjuk és elengedjük, akkor fölemelkedik a felszínig, de nem bújik ki a vízből, jelezve, hogy a felületi hátya alulról is rugalmas. De ha mosogatószer cseppentünk a vízre, akkor az úszó kibújik a vízből, mert a mosogatószer lecsökkenti a felületi feszültséget. E kísérlet jól szemlélteti, milyen nehézséget kell leküzdeniük a vízben élő rovaroknak, amikor ki akarnak mászni a vízből, vagy a levegőből a víz alá szándékoznak bujni [8]. Ekkor testükkel át kell szakítaniuk a víz felületi hátyáját. Ezt többnyire csak úgy tehetik meg, hogy egy vízen úszó levélre vagy egy vízinövény vízből kiálló szárára kapaszkodva kerülnek a levegőre. Visszafelé hasonló gonddal küszködnek. Ha a levegőből szeretnének a víz alá jutni, akkor ezt vízinövényekbe kapaszkodva tehetik meg, vagy röptükben fejest ugorva szakítják át a felületi hátyát.

A víz α felületi feszültsége (vagy más néven kapillárisállandója) többféleképpen is mérhető. Itt csak a három legkönnyebben kivitelezhető módszert említjük, amelyek iskolákban is megvalósíthatóknak tűnnek [9]:

1. A *szakításos módszernél* függőleges síkú, téglalap alakú, L szélességű drótkeretet lassan emelünk ki a vízből, és mérjük azon $F = 2\alpha L$ erőt, ami a keretet szélességében átfogó, a két függőleges oldal között feszülő, L hosszúságú, vízszintes drótszálhoz tapadó vízvárta elszakításához szükséges. F igen kicsi volta miatt ehhez igen érzékeny (digitális) erőmérőre van szükség, és F -ből le kell vonni a vízvárta nélkül mérhető, a keret és a függőlegesen mozgó vízszintes drótszál végei



2. ábra. Egy r sugarú kapilláriscsőbeli víz emelkedésének geometriája a víz felületi feszültségének mérésekor.

közt ébredő sűrűlási erőt. De nem is e nehézség teszi gyakorlatilag kivihetlenné a víz α -jának illeten mérését, hanem az, hogy a tiszta csapvíz és más, csak kis koncentrációban szennyezett természetes vizek nem képeznek hátyát a drótkeretben, vagy ha igen, akkor az igen rövid időn belül szétszakad.

2. A *hajszálcsöves módszernél* egy r sugarú vékony üvegcsövet állítunk függőlegesen a vízbe és megmérjük a csőbeli víz vízfelület fölötti h emelkedési magasságát, amit a csőbeli közel gömb alakú vízfelszín (meniszkusz) legalsó pontjától mérünk (2. ábra). Legyen ρ a víz sűrűsége, g a gravitációs gyorsulás, θ a vízfelület illeszkedési szöge az üvegfalnál és R a meniszkusz sugara (2. ábra). A meniszkusz fölfelé ható görbületi nyomása

$$p_g = \frac{2\alpha}{R}, \text{ ahol } R = \frac{r}{\cos\theta}.$$

A csőben a vizet $F = p_g r^2 \pi$ erő húzza fölfelé, ami egyensúlyt tart a meniszkusz alatti, V térfogatú vízoszlop $G = \rho V g$ súlyával. A 2. ábra szerint $x = R - R \sin\theta$. Az R sugarú gömb x magasságú gömbsüvegének térfogata:

$$V_{GS} = \frac{\pi (3R - x) x^2}{3}.$$

Az R sugarú meniszkusz alatti vízoszlop térfogata:

$$V = r^2 \pi (h + x) - V_{GS}.$$

Az $F = G$ egyenlőségből a víz felületi feszültsége:

$$\alpha = \frac{\rho g r}{2 \cos\theta} \left[h + \frac{r}{\cos\theta} - \tan\theta - \frac{r}{3 \cos^3\theta} (2 + \sin\theta) (1 - \sin\theta)^2 \right]. \quad (1)$$

Tehát mérni kell a helyi g gravitációs gyorsulást, a víz ρ sűrűségét, az r sugarú kapilláriscsőbeli víz menisz-

kuszának θ illeszkedési szögét és a meniszkusz legalsó pontjának h magasságát ahhoz, hogy (1) szerint megkapjuk a víz α felületi feszültségét. Habár az iskolában g , ρ , θ és h mérése nem lehetetlen, de eléggé nehézkes. Eötvös-inga vagy másféle graviméter hiányában g nem mérhető, a kapillárisbeli meniszkusz kicsiny átmérője okán θ és h gyakorlatilag csak mikroszkópos és közeli (makro) felvételek kiértékeléséből határozhatók meg. A csak alig szennyezett természetes vizek sűrűségeit is nagy pontossággal kell mérni a közöttük lévő elenyésző különbségek miatt. Mindezek folytán e mérések szinte csak fizikokémiai analitikai laboratóriumokban lennének kivitelezhetők, az iskolákban róluk le kell mondani.

3. A *csepegtetési módszernél* vastag falú, függőleges, alul síkra csiszolt kapilláriscsőből, úgynevezett sztalagmométerből lassan csepegtetjük ki a vizet, és mérjük bizonyos számú csepp súlyát. Mivel a csepp felszíne az r külső sugarú csővel $2\pi r$ hosszúságú darabon érintkezik, a felületi feszültségből eredő erő legfeljebb $G^* = 2\pi r\alpha$ súlyú cseppet tud fenntartani. A valóságban a ρ sűrűségű, T hőmérsékletű leszakadó csepp súlya a csepp befűződése miatt G^* -nál kisebb:

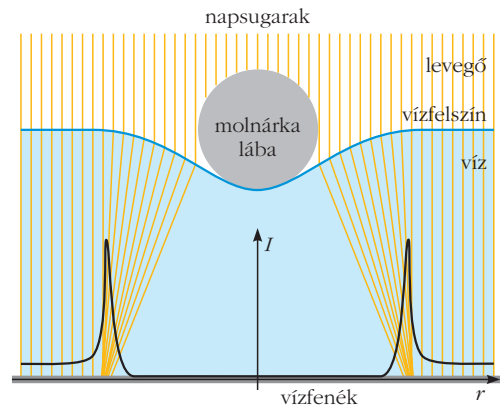
$$G = k(r, \alpha, \rho, T) r\alpha, \quad (2)$$

ahol $3,8 \leq k(r, \alpha, \rho, T) \leq 4,5$. Pontos méréseknél az r -től, α -tól, ρ -tól és T -től függő k -t táblázatból kell kikeresni. A (2) egyenlet α -ra történő iteratív és interpolációs megoldását igen megnehezíti, hogy a $k(r, \alpha, \rho, T)$ négyváltozós függvény csak véges felbontású numerikus táblázatos formában ismert. E bonyolult korrekció összehasonlító méréseknél gyakran mellőzhető, és ekkor két különböző vízre nézve $\alpha_1/\alpha_2 \approx G_1/G_2$, azaz a felületi feszültségek közelítőleg úgy aránylanak egymáshoz, mint a cseppek súlyai [9].

A víz felületi feszültségének pontos, számszerű mérését a fönti bonyolult mérőmódszerekkel valójában csak egyetemi szintű fizikokémiai laboratóriumokban lehet kivitelezni. Az említett mérés technikai nehézségek miatt az iskolai fizikaórákon kénytelenek vagyunk lemondani a víz felületi feszültségének pontos, számszerű méréséről, és meg kell elégednünk az összehasonlító, relatív mérési módszerekkel. Iskolai méréseink során mi is így jártunk el. Cikkünkben a különböző vizek felületi feszültségeit hasonlítottuk össze három eltérő relatív mérési módszerrel: (i) tavi molnárpóloska árnyékpapucs-területének mérésével, (ii) vízben úszó penge terheléses mérésével, (iii) burettából történő csepegtetéssel.

A víz felületi feszültsége és a tavi molnárpóloska árnyékpapucsi

2015 őszén 13-14 éves diákokkal végeztünk a víz felületi feszültségével kapcsolatos vizsgálatokat. Először tavi molnárpóloskával (*Gerris lacustris*) kísérleteztünk, amely a vízfelületen él és ott vadászik a vízbe pottyant apróbb rovarokra. Négy hátsó, hosszú lábá-

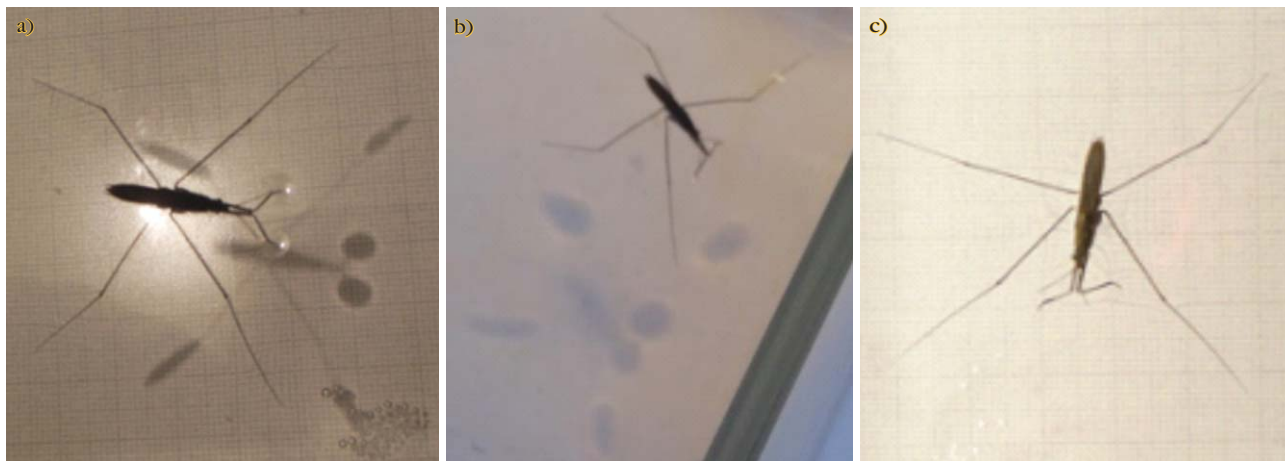


3. ábra. Az I fényintenzitás változása a tavi molnárpóloska függőleges fénysugarakkal megvilágított lába alatt a lábtól mért r távolság függvényében függőleges keresztmetszetben ([10] alapján).

val támaszkodik a víz felületi hártájára, így nem süllyed el. E lábakat nem nedvesíti a víz, mert rengeteg kicsi, vékony szőrszál borítja őket, amelyek a közük szoruló levegővel együtt ideális víztaszító burkot képeznek [10]. A molnárpóloska két mellső lábával ragadja meg vízfelszíni zsákmányát, aminek előemésztett testnedveit hosszú szűrő-szívó szájszervével szívja ki. Ha a vízben tartózkodó molnárpóloskát napfény éri, s a víz eléggé tiszta és sekély, akkor a vízfénéken jellegzetes árnyékképe látható: a teste és hat lábának árnyékán túl a lábak végén közel ellipszis alakú sötét árnyékfolt jelenik meg, mintha papucsot húzott volna a rovar [10]. A napfény sugarai a lábaknál besüllyedő és domború lencsét képező vízfelületen megtörnek, így a lábak vége alá nem jut napfény, s kialakulnak a papucsszerű árnyékfoltok (3. ábra).

Ha a víz felületi feszültsége egy kritikus érték alá csökken, akkor a molnárpóloskát már nem képes megtartani, és így nem tud mozogni [11–13]. Ez a helyzet bizonyos szennyezett vizekkel, amelyeken a molnárpóloska nem tud megélni. A mérési feladat annak kvalitatív meghatározása volt, hogy mennyire kell lecsökkenteni a víz felületi feszültségét ahhoz, hogy egy molnárpóloska elsüllyedjen benne. E mérés nem számszerűleg jellemezte a felületi feszültséget, hanem a vízbe csöppentett, felületi feszültséget csökkentő mosószer cseppszámával, ami megtehető, mert a víz felületi feszültségét a belé adagolt, nagyobb cseppszámú felületaktív vegyszer jobban csökkenti.

Egy tiszta csapvízzel töltött üvegtál vízfelületére egy molnárpóloskát helyeztünk, amit a Kiskunhalas melletti Sóstón fogtunk, de megtalálhattuk őket más természetes víztesteken is, például pocsolyákon, tavakon, patakokon, folyókon. Először a molnárpóloska mozgását figyeltük a vízfelületen. Kezdetben a vízfelület rendben megtartotta a rovar, amely lábaival csapkodva néha ide-oda mozgott a felszínen (4.a ábra). Ezután szemcseppentőből konyhai mosogatószer cseppentettünk több, üvegedényben levő, azonos mennyiségű vízbe, így különböző töménységű oldatokat készítettünk, nagyobb töménységet elérve, jobban csökkentve a felületi feszültséget. Egyre töményebb oldatra helyezve figyeltük a molnárpóloskát. Egyszer csak észrevettük, hogy a

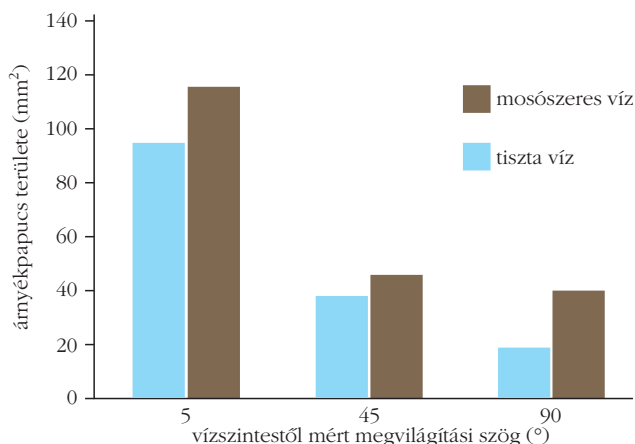


4. ábra. a) A tiszta víz megtartja a molnárpoloskát, árnyékpapucsai jól fényképezhetők. b) Ahogy süllyed a rovar a mosószerrel szennyezett vízben, úgy nőnek az árnyékpapucsok. c) Szinte már csak a rovartest nagyra nőtt árnyéka látszik, mert a molnárpoloska lábai teljesen be-süllyedtek a jelentősen lecsökkent felületi feszültségű vízbe (Kiszi Magdolna felvételei).

lábai egyre lejjebb süllyedtek a vízben (4.b ábra). A töményebb oldatba áthelyezést akkor hagytuk abba, amikor a molnárpoloska lábai teljesen a vízbe süllyedtek (4.c ábra). A víz felületi feszültsége ekkor csökkent le annyira, hogy már nem tudta megtartani a molnárpoloskát. Az ehhez tartozó mosószercseppszámmal jellemeztük a molnárpoloska elsüllyedését előidéző kritikus felületi feszültséget. E kísérletet többször is elvégeztük különböző, kisebb és nagyobb testű molnárpoloskák-kal, és mindig ugyanazt az eredményt kaptuk: ugyanazon mosószercseppszámnál süllyedtek el a rovarok. A kísérletbe vont molnárpoloskákat a lábaikra tapadt mosószer leáztatásához tiszta vízbe raktuk, majd miután a rovarok a lábaik aktív tisztogatásával eltávolították a szennyeződést, természetes élőhelyükön szabadon engedték őket. Méréseinkkel bizonyítottuk a mosószerek felületi feszültséget csökkentő káros hatását a vizeken élő molnárpoloskákra. Később öt másik vízi-rovarral is kísérleteztünk (lásd alább).

Vizsgálatunk közben a molnárpoloskát felülről világítottuk meg egy, a Napot imitáló, közel párhuzamos fénysugarakat kibocsátó lámpával, aminek megvilágítási szöge a függőlegetől a vízszintesig volt változtat-

5. ábra. Egy molnárpoloska egyik árnyékpapucsának mm^2 -ben mért területe (függőleges tengely) három különböző megvilágítási irányra, tiszta és mosószeres víz esetén (vízszintes tengely).



ható. Az üvegtál alá milliméterpapírt helyeztünk. Egy adott megvilágítási szögnél és felületi feszültségnél (vízbe cseppentett mosószermennyiségnél) felülről lefelé, függőlegesen fényképeztük le a molnárpoloska vizes tál alján kialakult árnyékát. Egy adott felületi feszültségnél három megvilágítási szöget állítottunk be. Ezután csökkentettük a felületi feszültséget, és ugyanebben a három szögben megvilágítva a rovar ismét felvételeket készítettünk. A mérés végén adódó digitális fényképsorozat képeiből képmetsző programmal kivágtuk a molnárpoloska árnyékát és vizsgáltuk a lábvégek árnyékpapucsainak ellipszisszerű alakját, végül – a mögötte jól látszó milliméterpapíron – leolvastuk területét. Az árnyékpapucs mm^2 -ben mért területét három különböző megvilágítási szögre az 5. ábra mutatja tiszta és annyira mosószeres víz esetén, hogy a molnárpoloska már elsüllyedt.

E kísérletet egy nagyobb üvegtál-cával kell végezni, amiben legföljebb 1-2 cm vastag vízréteg lehet, mert csak ekkor látszik jól a lámpával felülről megvilágított molnárpoloska árnyéka. A diffúz fényt ki kell zárni, lehetőleg besötétített helyiségben érdemes vizsgálni.

Egyik megfigyelésünk az volt, hogy adott felületi feszültség (mosószercseppszám) mellett a függőlegetől mért megvilágítási szög növekedésével (ami a Nap zenitjétől mért egyre nagyobb szögtávolságának felel meg) a molnárpoloska árnyékpapucsai egyre jobban megnyúltak. Másik észrevételünk szerint adott megvilágítási szög mellett a felületi feszültség csökkentésével egyre mélyebbre süllyedő rovarlábak egyre jobban meggömböcskészték a vízfelületet, ami így egyre domborúbb lencseként egyre jobban kiszórta a fényt a lábak alól (3. ábra), miáltal az árnyékpapucsok területe egyre nagyobbá vált. Amint növeltük a víz mosószertöménységét, az árnyékpapucsok mérete nőtt (4.b ábra), majd egyszer csak a papucsok eltűntek (4.c ábra), és ekkor molnárpoloskáink elsüllyedtek a lecsökkent felületi feszültség miatt. Az 5. ábra szerint az árnyékpapucs területe a vízszintestől mért megvilágítási szög növekedésével csökkent és a mosószeres vízben mindig nagyobb volt, mint a tisztában.

Eredményeink szerint a mosószeres szennyezés anynyira lecsökkentheti a vizek felületi feszültségét, hogy a molnárpoloskák elsüllyedhetnek és elpusztulhatnak. A felületi feszültség csökkenése nemcsak a molnárpoloskákra, hanem más a vízfelszínen élő vagy a vízfelszínhez alulról kapcsolódó ízeltlábúakra is veszélyes. A vízbe pottyant szárazföldi rovarok tetemei is elsüllyednek, így nem találják meg őket a velük táplálkozó vízi állatok. Következtetéseink szerint a táplálékláncra nagy veszélyt jelenthet a víz felületi feszültségét csökkentő vegyi anyagokkal történő szennyeződés.

Város körüli vizek felületi feszültségeinek összehasonlítása

Vizsgáltuk a Kiskunhalas környéki természetes vizek (Sóstó, Dong-éri csatorna, egy szeméttelp rekultivációja során kialakított mesterséges tó) felületi feszültségét, kontrollként pedig csapvíz szolgált. A szóban forgó vizekből vízmintákat gyűjtöttünk, amelyek felületi feszültségeit kvalitatíven hasonlítottuk össze vízen úszó penge terhelésével és bürettáblából történő csepegtetéssel.

Vízen úszó penge terheléses mérése

Egy 0,8 g tömegű borotvapengét helyeztünk lapjával párhuzamosan a vízhártyára. A pengét fokozatosan terheltük apró súlyocskák ráhelyezésével, mindaddig, amíg a penge nem süllyedt. A víz felületi feszültségét ekkor a penge elsüllyedését előidéző súllyal jellemeztük, mert a két mennyiség arányos egymással. Azt tapasztaltuk, hogy a legnagyobb felületi feszültsége a csapvíznek, majd a Sóstónak, a Dong-ér csatornának és végül a rekultivációs tónak volt (1. táblázat). Gyanúnk szerint a szeméttelp rekultivációja során nem történt mély talajcsere, így az ott maradt szennyező anyagok folyamatosan oldódtak, belekerültek a csapadékvízbe [14]. A Dong-ér pedig közismerten erősen szennyezett.

Mivel a vizek egymást szennyeznék, amikor a pengét az egyik vízből a másikba átraknánk, ezért az öt vízmintába öt pengét vettünk, és nem cseréltük fel őket. A pengéket egy tiszta fémvilla segítségével helyeztük a vízminták felszínére, hogy kezünk bőrének zsírossága ne befolyásolja az eredményeket. A pengét és a kis terhelősúlyokat a vízből mágnessel emeltük ki. Ha a penge fölbillent a terhelősúlyok forgatónyomatéka miatt, akkor azt a mérést figyelmen kívül hagyva megismételtük. Ügyelni kellett arra is, hogy akkor mérjünk, amikor már kiegyenlítődt a szertári levegő és a vízminták hőmérséklete, mert a felületi feszültség hőmérsékletfüggő. A mérősorozatokat az őszi hónapokban eltérő hőmérsékleteken, több alkalommal is elvégeztük a négy vízmintán, amelyekre mindig az 1. táblázat szerinti sorrendet kaptuk.

Utolsó mérésünkkor a Dong-ér vizének felületi feszültsége a korábbiakhoz képest megnőtt, mert kitisztították a csatornát: az oldalán látszott a kihúzott szemét. A víz gyorsabb áramlása, ezzel együtt öntisz-

1. táblázat			
Borotvapenge különböző vízmintákbeli elsüllyedését okozó terhelés grammal mért tömege 17 °C-on			
csapvíz	Sóstó	Dong-ér csatorna	rekultivációs tó
2,2 g	2,0 g	1,5 g	1,2 g

tulása okozta a vízminőség javulását és a felületi feszültség növekedését. Miután vízmintáinkból kiszűrtük a lebegő anyagokat (homokot, levéltörmelék, egyéb szennyeződések), mindegyik felületi feszültség többé-kevésbé csökkent, legnagyobb mértékben a Sóstóé. Ugyanakkor a felületi feszültségek sorrendje nem változott. Ezek szerint főleg az oldott anyagok koncentrációjától függ a felületi feszültség.

Ezek után levontuk a következtetéseket: (1) A felületi feszültség friss vízminták esetében a következő sorrendben csökkent: csapvíz > Sóstó > Dong-ér > rekultivációs tó. (2) Régi vízmintákat nem érdemes vizsgálni, mert álltukban megváltozhatnak. (3) A lebegőanyagoktól szűrt friss víz felületi feszültsége eltérhet a nem szűrtétől.

Csepegtetési módszer

Vízmintáink felületi feszültségeit bürettáblából történő csepegtetéssel is összehasonlítottuk. A teljes vízminta tömegének és térfogatának mérésével meggyőződünk arról, hogy a vízsűrűség minden esetben 1%-on belül $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$ volt. Ezután meghatároztuk egy lecsöppenő vízcsepp

$$m = \rho \frac{V}{N}$$

tömegét, ahol $V = 5 \text{ cm}^3$ a betöltött víz térfogata, N az ebből lecsöppenő cseppek száma. A [9] szerint a víz felületi feszültségének növekedtével egyenes arányban nő a lecsöppenő vízcsepp tömege.

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \approx \frac{m_1}{m_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Tehát a felületi feszültség fordítva arányos a cseppszámmal. Minden mérés után a bürettát csapvízzel átöblítettük. A cseppszámokat négy személy számlálta, az eredményeket átlagoltuk. Minden vízmintán kétszer mértünk. E módszerrel is ugyanazon felületi-feszültség-sorrendet kaptuk, mint a borotvapengéssel: csapvíz ($N = 92$) > Sóstó ($N = 94$) > Dong-ér ($N = 96$) > rekultivációs tó ($N = 98$).

A mosószer miatt lecsökkent felületi feszültség hatása vízfelszíni rovarok viselkedésére

Kísérleteinkben a vízfelszínen élő tavi molnárpoloskák (*Gerris lacustris*), vízmérő poloskák (*Hydrometra stagnorum*) és vízi ugróvillások (*Podura aquatica*)

viselkedését hasonlítottuk össze tiszta csapvíz és mosószerrel szennyezett csapvíz felszínén [15]. Az első hígításnál 1200 ml csapvízhez adtunk egy csepp mosószer (ami 60 000-szeres hígításnak felelt meg), majd az egyre kisebb hígításoknál mindig 100 ml-rel csökkentettük a csapvíz mennyiségét, egyre töményebb mosószeres oldatokat előállítva.

Az 1. kísérletben a rovarokat a csapvíz felszínére helyeztük és följegyeztük a viselkedésüket: ekkor a molnárpoloska és vízmérő poloska a vízfelszínen szabályosan mozgott, végtagjai nem szakították át a víz felületi hártáját, a rovartest nem érintkezett a vízzel, a vízi ugróvillások pedig folyamatosan pattogtak a vízfelszínen, végtagjaik és ugróvillájuk nem szakította át a felületi hártát.

A 2. kísérletben mosószeres oldatokra – a hígabbtól a töményebb felé haladva – helyezve vizsgáltuk a vízi-rovarok viselkedését. A puha ecsettel történő áthelyezések előtt a rovarokat tiszta csapvízre tettük, majd szűrőpapírra, hogy az újabb kísérlet elvégzésekor testük száraz és mosószermentes legyen. A vízmérő poloskánál 25 000-szeres hígításnál (500 ml csapvíz + 1 csepp mosogatószer), a molnárpoloskánál 30 000-szeres hígításnál (600 ml csapvíz + 1 csepp mosogatószer), az ugróvillásoknál pedig 50 000-szeres hígításnál (1000 ml csapvíz + 1 csepp mosogatószer) szakították át a végtagok a vízfelületi hártát, miáltal a rovarok mozgásképtelenné váltak és elmerültek a vízben.

A 3. kísérletben a víz felületi feszültsége csökkenésének hatását vizsgáltuk a levegőből lélegző vízi-rovarok viselkedésére. E kísérletet kétféle szúnyogfaj (*Culex sp.* és *Anopheles sp.*) lárváival és kifejlett hátonúszó poloskákkal (*Notonecta glauca*) végeztük. E rovarok légzéskor felúsznak a vízfelszínre, majd a testvégi légzőnyílásaik körül található kitinszálak és más testfüggelékek segítségével feltapadnak a víz felületi hártájára. Az *Anopheles* lárvák nem csak légzéskor keresik fel a vízfelszínt, mert táplálékukat is a vízfelszínen sodródó törmelékből szerzik. E kísérletet az előzőekhez hasonlóan elvégezve a következő eredményeket kaptuk:

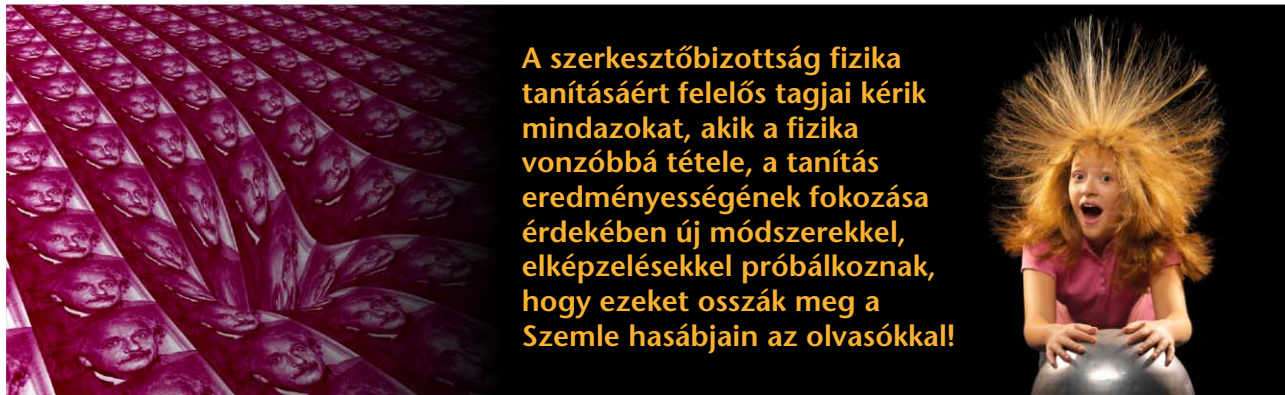
Az *Anopheles* lárvák 15 000-szeres (300 ml csapvíz + 1 csepp mosószer), míg a *Culex* lárvák 500-szoros (10 ml csapvíz + 1 csepp mosószer) hígítású oldatban már nem voltak képesek megkapaszkodni a vízfelszí-

nen, így légzés nélkül elpusztultak. Figyelemre méltó a *Culex* lárvák nagy tűrőképessége a felületaktív anyaggal szemben, ami valószínűleg hozzájárul ahhoz, hogy e szúnyogok a jelentősen szennyezett poszolyákban is képesek kifejlődni.

A hátonúszó poloskánál a felületi feszültség csökkenése a légzésükkori jellegzetes testtartásuk módosulását eredményezte: testük hossz tengelye légzéskor 30°-os szöget zár be a vízfelszínnel tiszta csapvíz esetén, míg 25 000-szeres hígítású mosószeres vízben (500 ml csapvíz + 1 csepp mosószer) e szög 80°-ra nőtt, azaz majdnem merőlegessé vált a vízfelületre.

Irodalom

1. Kriska György: *Az édesvizek és védelmük: Elméleti és gyakorlati kézikönyv*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 2003., 216 o., ISBN: 9631628590
2. Kriska György: Vízminőségjelző víziméh. *Természetbúvár* 1992/3 45.
3. Scheuer Zsuzsanna, Kriska György, Liszi János: Vízi ugróvillás. *Élet és Tudomány* 1994/16 502–503.
4. Scheuer Zsuzsanna, Kriska György, Liszi János: Keringőbogár. *Élet és Tudomány* 1994/19 598–599.
5. Gánócy Anita: Antropogén hatások vizsgálata vízparti életközösségekben. *A Biológia Tanítása* 10/2 (2002) 18–24.
6. Vass Máté: Miért nem képes a molnárpoloska mindenütt járni a vízben? Detergens hatása élővízeinkre. *Természet Világa (Diákmelléklet)* 140/7 (2009) CVI–CVII.
7. Ulrich Sedlag: *A csodálatos rovarvilág*. (ford.: Aradszky Gézőné) Natura, Budapest, 1982., 206 oldal, ISBN: 9632313704
8. Horváth Ákos, Horváth Gábor: Vízipók csodapók és a többiek. A vízirovarok és a víz felületi feszültsége. *Élet és Tudomány* 1988/43 1295–1298.
9. Budó Ágoston, Pócsa Jenő: *Kísérleti fizika I.: Mechanika, hangtan, bőtan*. 7. kiadás. Tankönyvkiadó, Budapest, 1978.
10. Zheng Y., Lu H., Yin W., Tao D., Shi L., Tian Y.: Elegant shadow making tiny force visible for water-walking arthropods and updated Archimedes' principle. *Langmuir* 32 (2016) 10522–10528 (doi: 10.1021/acs.langmuir.6b02922)
11. Hu D. L., Chan B., Bush J. W. M.: The hydrodynamics of water strider locomotion. *Nature* 424 (2003) 663–666.
12. Gao X., Jiang L.: Biophysics: water-repellent legs of water striders. *Nature* 432 (2004) 36–36.
13. Bush J. W. M., Hu D. L.: Walking on water: biolocomotion at the interface. *Annual Review of Fluid Mechanics* 38 (2006) 339–369.
14. Kende Zoltán: Kiskunhalas környéki hulladéklerakó jövőbeni kármentesítésének természetvédelmi szempontú hatásbecslése. *Tájökológiai Lapok* 11/1 (2013) 155–168. (kiadó: Szent István Egyetem, Környezet- és Tájgazdálkodási Intézet)
15. Rizmajer Erzsébet: *Ökológiai vizsgálatok alkalmazása a biológia tanításában*. Diplomamunka. ELTE Biológiai Intézet, 2003. 42 o. (témavezető: Kriska György)



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

IFJÚ FIZIKUSOK NEMZETKÖZI VERSENYE 2016

– magyar szemmel

Hömöstre Mihály,^{1,2} Adorján Dániel,³ Bánóczyi Tímea,¹
Boross Péter,² Ispánovity Péter Dusán,² Jenei Péter,²
Nagy Balázs Norbert,¹ Plaszkó Noel,² Varga-Umbrich Eszter⁴

¹Német Nemzetiségi Gimnázium, Budapest

²Eötvös Loránd Tudományegyetem, TTK

³Szent István Gimnázium, Budapest

⁴Pápai Református Kollégium Gimnáziuma, Pápa

2016. június 26. és július 3. között az oroszországi Jekatyerinburgban került megrendezésre az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye. A 2015 júliusában meghirdetett 17 nyílt végű problémát (lásd iyp.org) a magyar diákok majdnem egy éves kutatómunkával oldották meg, hogy a 29. alkalommal megrendezett versenyen 28 másik ország diákjaival mérjék össze felkészültségüket. A magyar csapat (*Bánóczyi Tímea*, 11. osztály, Német Nemzetiségi Gimnázium; *Kádár István*, 12. osztály, ELTE Radnóti Miklós Gimnázium; *Nagy Balázs Norbert*, 11. osztály, Német Nemz. Gimn.; *Plaszkó Noel*, 12. osztály, Földes Ferenc Gimnázium; *Varga-Umbrich Eszter*, 10. osztály, Pápai Ref. Koll. Gimn.) nagyszerű szerepléssel a 9. helyen végzett, ami ezüstérmes helyezést jelentett. A bővebb magyar csapat további tagjai (*Adorján Dániel*, 11. osztály, Szent István Gimn.; *Szabó Tamás*, 11. osztály, Német Nemz. Gimn.; *Svasti Áron*, 11. osztály, budapesti Piarista Gimn.) hazánkat az Ausztriában rendezett felkészülési versenyen (lásd ayp.at) sikerrel képviselték.

Az IYPT versenyről részletesen egy korábbi *Fizikai Szemle* cikk beszámolt [1]. A továbbiakban a diákok és felkészítőik által közösen végzett kutatásokból szeretnénk ízelítőt adni. Reméljük, hogy sok fizikatanárnak sikerül kedvet csinálni, hogy a jövőben ők is belekóstoljanak a verseny által felkínált érdekes feladatok megismerésébe, és bátorítsák tehetséges diákjaikat a részvételre. Fontos kihangsúlyozni, hogy a következő fejezeteket az IYPT-n résztvevő diákok (felkészítő tanáraik segítségével) írták.

Forró vizes szökőkút

Egy Mohr-pipettát részlegesen tölts meg meleg vízzel! Fogd be a pipetta tetejét, majd fordítsd a pipetta csúcsát felfelé! Szökőkútszerűen kilépő vizet láthatunk. Vizsgáld meg a szökőkút magasságát befolyásoló tényezőket, és optimalizáld ezeket a maximális magasság eléréséhez!

A kísérlet elvégzését mindenkinek ajánljuk, kis gyakorlással 4-5 méter magas szökőkút érhető el. A jelenség magyarázata látszólag egyszerű: megfordításkor a bezárt levegő felmelegszik, azáltal megnő a nyomása, és kinyomja a vizet a pipetta nyitott száján. A versenyen a legtöbb csapat meg is elégedett ezzel a magyarázattal. Azonban, ha belegondolunk, akkor

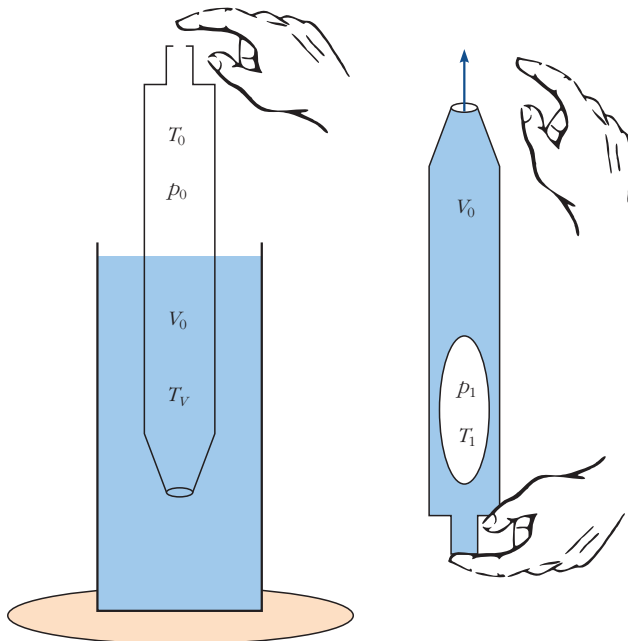
szobahőmérsékletéről (300 K) a víz forráspontjára (373 K) melegedő (kezdetben normál légköri nyomású) levegő nyomása (állandó térfogaton) csupán $2,5 \cdot 10^4$ Pa-lal nő, amivel a szökőkút maximális magassága 2,5 m lehetne. De akkor hogyan lőhetünk mégis 4-5 m magasra?

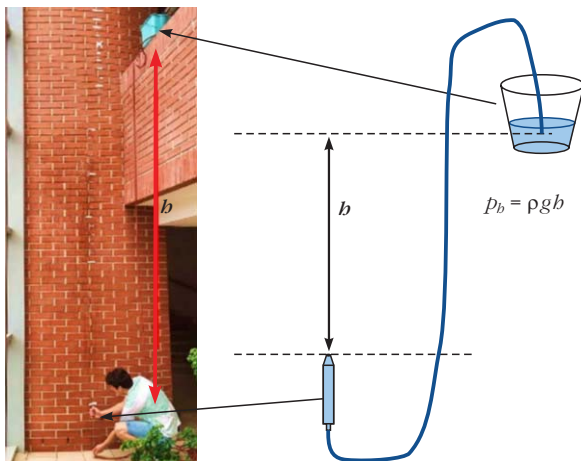
A pipetta vízzel való feltöltését úgy végeztük, hogy a pipettát forró vízzel teli mérőhengerbe engedtük. Ezt követően a szabad végét befogtuk, kiemeltük a vízből, majd – amint lehetett – a csúcsát is befogtuk, és megfordítottuk. A kéz védelmét és a záródást vizes zsebkendővel biztosítottuk. Az eljárás (elmélet szempontjából fontos) két pillanatát az 1. ábra mutatja.

A pipetta belsejében a feltöltés pillanatában egyszerre van szobahőmérsékletű levegő és forró víz, ami rögtön intenzíven párologni kezd. Így a pipettában (a vízen és levegőn kívül) vízgőz is lesz. Míg nem zárjuk le a pipettát (1. ábra bal oldala) addig a vízgőz és levegő parciális nyomásának összege egyenlő a külső légnyomással ($p_0 \approx 10^5$).

$$p_0 = p_{0l} + p_{0g}, \quad (1)$$

1. ábra. Sematikus ábra a pipettáról: balra a megfordítás előtti utolsó pillanatban, valamint jobbra a kilövés előtti utolsó pillanat. Az ábrán az elméleti levezetésben használt jelölések láthatók.





2. ábra. A kalibrációs mérés összeállítása (fölső), valamint a szökőkút magassága a nyomás függvényében (alul).

ahol p_{0l} a pipettában lévő levegő nyomása kezdetben; p_{0g} a pipettában lévő gőz nyomása kezdetben.

Az elméletünk nagyon fontos feltevése, hogy rendszerünk mindvégig egyensúlyban van, így a pipettában lévő levegő minden időpillanatban vízgőzzel telített. Ez azért fontos, mert a telített vízgőz p_g nyomása csak a T hőmérséklet függvénye, amely számítható a

$$p_g = 6,11 \cdot \exp\left(\frac{17,6(T - 273)}{T - 30}\right) \text{ hPa} \quad (2)$$

August–Roche–Magnus-formula [2] segítségével. Ennek megfelelően, ha tudjuk T_0 hőmérsékletet, valamint a p_0 nyomást, akkor p_{0l} és p_{0g} számolható. Az elméletünk többi meghatározó paramétere: a kezdeti T_0 hőmérséklet, a betöltött víz T_v hőmérséklete és V_0 térfogata mérhető.

A megfordítást követően a pipettában lévő forró víz melegíteni kezdi az ujjunkkal elzárt gőz-levegő elegyet, ezért a nyomás megnő. A kilövés előtti utolsó pillanatot vizsgálva (1. ábra jobb oldala) továbbra is igaz, hogy a bent lévő p_1 nyomás az adott hőmérsékletű gőz és a levegő parciális nyomásának összege lesz:

$$p_1 = p_{1l} + p_{1g}, \quad (3)$$

ahol p_{1l} a pipettában lévő levegő, p_{1g} a pipettában lévő gőz parciális nyomása a kilövés előtti pillanatban. Láthatjuk, hogy a parciális nyomások ebben az esetben is csupán a megnövekedett T_1 hőmérséklettől függenek, hiszen p_{1g} a (2) egyenletből, p_{1l} pedig Gay-Lussac második törvényéből számítható, mint:

$$p_{1l} = p_{0l} \frac{T_1}{T_0}. \quad (4)$$

Sajnos T_1 mérése gyakorlatilag lehetetlen, így számításánál azzal a közelítéssel élünk, hogy a kilövés előtti pillanatig a gázelegy, a pipetta és a víz termodinamikai egyensúlyi állapotba kerül, ennek megfelelően a közös hőmérséklet

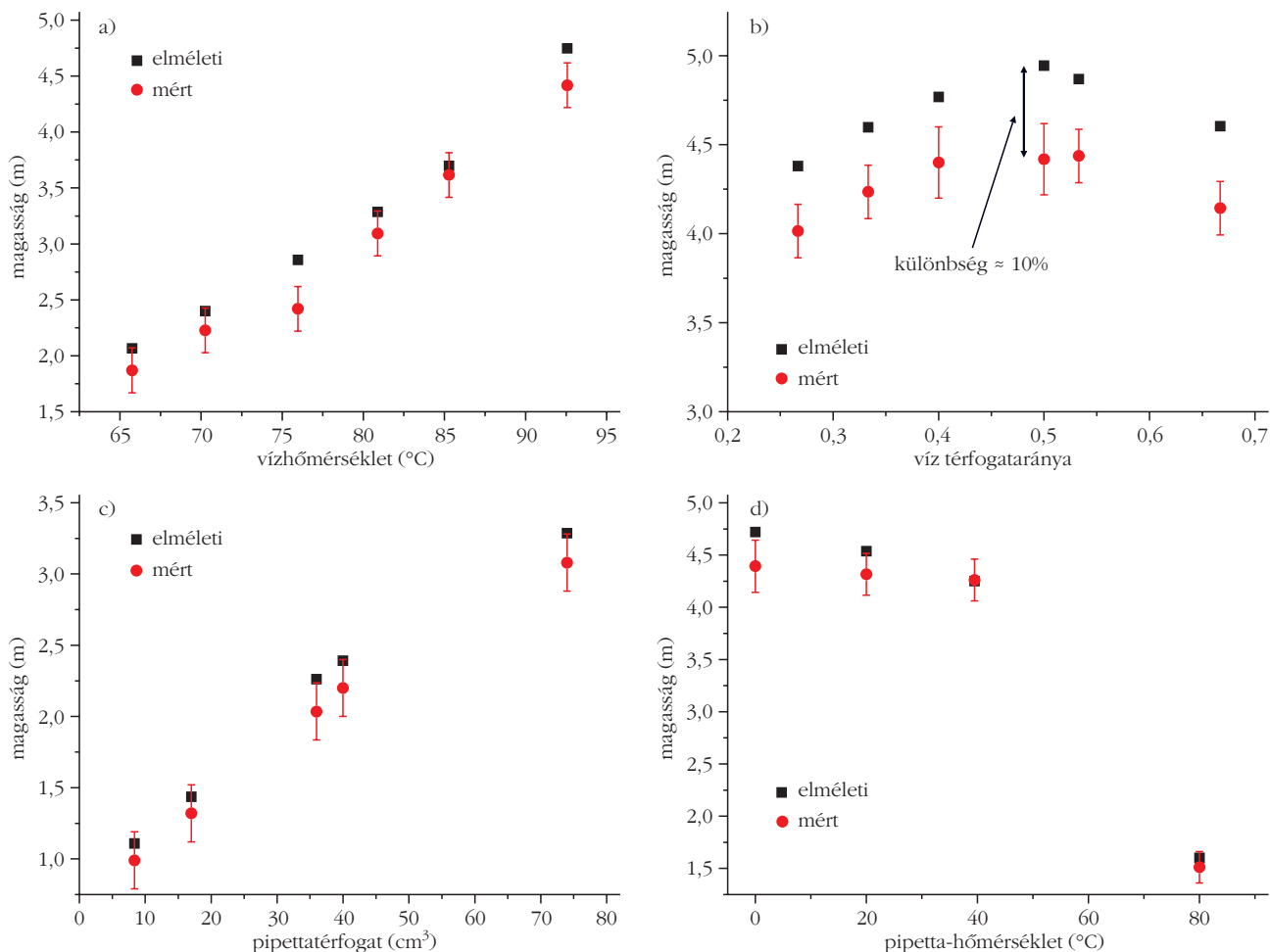
$$T_1 = \frac{c_v m_v T_v + c_a m_a T_0}{c_v m_v + c_a m_a}, \quad (5)$$

ahol c_v a víz fajhője, m_v a víz tömege, T_v a víz kezdeti hőmérséklete, c_a az üveg fajhője, m_a a pipetta (kezdetben vízbe nem lógó részének) tömege. Itt fontos megjegyezni, hogy magasabb hőmérsékleten több vízgőz van a bezárt levegőben. A vízrészecskék kilépése is hőt von el a pipettában lévő víztől, így a valós T_1 hőmérséklet biztosan kisebb, mint az (5) egyenletből számolt. Számításaink alapján ennek elhanyagolása csupán 5-10% hibát okoz, ezért nem foglalkoztunk vele.

Az (1–5) egyenleteket felhasználva ki tudjuk számolni a pipettában lévő nyomást közvetlen a kilövés előtt. Egyértelmű, hogy ez a paraméter a kulcsa a szökőkút magasságának, azonban mi a pontos összefüggés köztük? Első gondolatként a nyomásból a kiáramlás sebességét próbáltuk számolni a Bernoulli-egyenlet segítségével. Ez azonban nehézkes, hiszen a formula alapfeltevései csak közelítőleg teljesülnek, emellett a sebesség ismeretében is újabb problémákba ütköztünk. Nevezetesen: ahhoz, hogy tudjuk számolni milyen magas lesz a szökőkút, tudnunk kell a légellenállás hatásával számolni, amely a kilövéstől kezdve lassítani fogja a vizet. A légellenállást egy folyamatosan változó alakú „testnél” számolni azonban több mint nehéz.

A probléma kiküszöbölése végett egy „kalibrációs” mérést végeztünk. A mérési összeállítást a 2. ábra felső része mutatja. Magasban lévő, vízzel teli vödörből egy vastag gumicsővön keresztül vezetünk vizet a pipettába, így a hidrosztatikai nyomást kihasználva tudtuk a pipettában lévő nyomást szabályozni.

Ebben az összeállításban több különböző nyomáson is megmértük a szökőkút magasságát, így tudjuk, hogy adott nyomásnál mekkora veszteséget okoz a légellenállás, valamint a kiáramlásnál a súrlódás. A 2. ábra alsó fele oldala mutatja a kalibrációs mérés eredményét. A szaggatott vonal jelzi a veszteség nélküli esetet, ilyenkor a szökőkút a vödörben lévő víz tetejéig érne. Az adatpontokra az ábrán megadott exponenciális görbét illesztettük, így a nyomás ismeretében a szökőkút magassága már



3. ábra. A szökőkút magassága a (a) vízhőmérséklet, (b) víztérfogat, (c) pipettatérfogat és (d) pipetta-hőmérséklet függvényében.

számolható. A következő lépés az elméletünk által jósolt magasság és a kísérleti tapasztalatok összevetése volt.

A kísérlet megvalósítása is sok nehézséget rejtett, hiszen 4-5 méter magas vízoszlopot kell lemérni, ráadásul több száz kilóesre van szükség. A mérési idő és pontosság optimalizálására azt a megoldást választottuk, hogy egy 10 cm-ként beszkálázott fal előtt lőtünk a pipettával és körülbelül 15 méterről szemmel olvastuk le a magasságot.

Különböző paraméterek hatását vizsgáltuk az elérhető maximális magasságra, miközben a többi tényezőt nem változtattuk. Mérési eredményeinket összevetettük az elméleti összefüggésünk alapján jósolt magassággal (3. ábra).

a. A kezdeti vízhőmérséklet hatása a legfontosabb tényező. A (2) egyenlet alapján exponenciális jellegű függést várnánk, amelyet méréseink is tükröznek (bár nagyobb nyomáson a veszteségek is nagyobbak, így a görbe kissé kisimul).

b. A kezdeti vízmennyiség hatása: a 3.b ábra vízszintes tengelyén a víz és pipetta térfogatának aránya látható. A félig töltött pipetta bizonyult a legjobbnak. Ez könnyen megérthető, hiszen ha kevés a víz, akkor nem melegszik fel a pipetta, ha viszont túl sok, akkor már a befogás előtt is nagy a levegő-gőz elegy hőmér-

séklete, így a továbbiakban csak kis nyomásnövekedés lehetséges.

c. A pipetta térfogata (fajtája): megállapítható, hogy a pipetta méretével nő a szökőkút magassága. Ennek magyarázata, hogy az egyre nagyobb pipettákba (a tömegükhöz viszonyítva) egyre több víz tölthető, így magasabb végső T_1 hőmérséklet érhető el, valamint nagyobb pipetták esetén a fajlagos veszteségek is kisebbek.

d. Kezdeti pipetta-hőmérséklet hatása: ezt a paramétert a pipetta előzetes (melegített) vizes kádban való fürdetésével állítottuk be, amellyel az előzőekben említett T_0 -t tudjuk befolyásolni. Ennek megfelelően a pipetta-hőmérséklet növekedésével csökken a magasság.

A 3. ábrán látható, hogy elméleti modellünk kiválóan követi a méréseket, azonban észrevehető, hogy mért adatpontjaink mindig az elméleti alatt maradnak. Ennek magyarázata egyszerűen abból fakad, hogy alapfeltevésünk nem pontos. Viszonylag gyors folyamat lévén nem tud mindig egyensúlyba kerülni a rendszer, így a levegő-gőz hőmérséklete általában kisebb, mint a számolt. Mégis, elméleti modellünket sikeresnek tekinthetjük, hiszen jól követi a kísérleti tapasztalt összes trendet.

Nagy Balázs Norbert

Késlekedő inga

A feladat során – az általunk épített kísérleti összeállítással – egy kúpingához hasonló inga mozgását vizsgáltuk. De pontosan hogyan néz ki a mérési eszközünk és mit kellett vele mérnünk? A feladat szövege a következő volt:

Készíts erős cérnából és egy nehezebből álló ingát. A felfüggesztési pont egy R sugarú, vízszintes kör kerülete mentén fusson körbe. Bizonyos körülmények között a nehezék egy R -nél kisebb sugarú körpályára áll. Vizsgáld meg a nehezék mozgását és annak stabil pályáit!



4. ábra. A késlekedő inga kísérleti összeállítása.

Készítsük el!

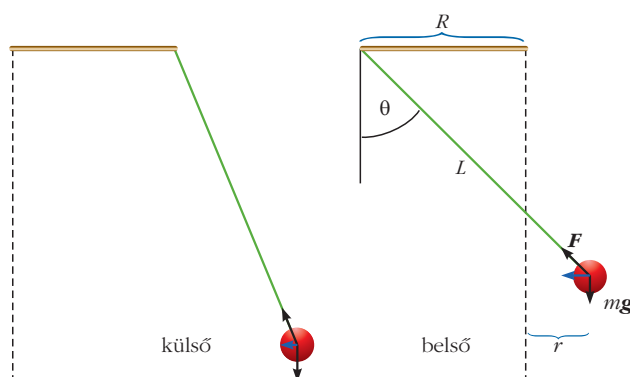
A feladat szövegének megfelelően egy labdát rögzítettünk egy erős fonál végéhez, amelynek másik végét egy vízszintes körpályán mozgó felfüggesztésre kötöttük (4. ábra). A rendszert elindítva a test egy körpályára áll be, amelynek sugara eltérhet a felfüggesztési pont által leírt kör sugarától. Esetünkben az ingatest egy pingponglabda volt, a fonál pedig egy erős horgászszinór, amit egy forgó motorhoz csatlakoztatott, vízszintes síkban forgó rúdra kötöttünk. Fontos volt, hogy a motor konstans szögsebességgel tudjon forogni – aminek a nagyságát viszonylag finoman tudjuk hangolni –, valamint, hogy felfutási ideje rövid legyen.

Összeállításunk alá egy kamerát helyeztünk, hogy az inga mozgását a készült videók segítségével elemezni tudjuk. A kamera térbeli torzításait is figyelembe véve, eredményeinket háromdimenziós rendszerben ábrázoltuk és elemeztük.

Lehetséges pályák

A motor bekapcsolása előtti első kérdés, hogy végül milyen pályára állhat be a test. A két lehetséges esetet az 5. ábra szemlélteti.

5. ábra. Lehetséges pályák.



Ezek közül az egyik triviális: a labda egy „külső pályán” kezd keringeni, amelynek sugara nagyobb, mint a felfüggesztési pont körpályájé. Ugyanakkor, bizonyos körülmények között előfordulhat kisebb sugarú körpálya is. Ezt nevezhetjük „belső pályának”, hiszen a test végig a felfüggesztési pont által rajzolt kör területe alatt tartózkodik. Ebben az esetben a fonál metszi a forgástengelyt, azaz a felfüggesztés és a labda ellentétes fázisban keringenek. A test körpályán mozog, ezért az erők eredője mindkét esetben a kör középpontja felé mutat.

Mitől függ a pályák sugara?

Ideális esetben a rendszer három paraméterrel jellemezhető: a fonál L hosszával, a felfüggesztési pont körpályájának R sugarával, valamint a motor ω szögsebességével. Ezen felül a változók közé vehetjük a g nehézségi gyorsulást is. Ezekkel a paraméterekkel a test végső pályája pontosan jellemezhető, leírható.

A mozgás, illetve a lehetséges állapotok leírása

A testre ható erőket, valamint a geometriai feltételt felírva kiszámolhatjuk a végső körpálya r sugarát. Az 5. ábra jelöléseit használva, az erőket vízszintes (6) és függőleges (7) komponensekre bonthatjuk fel:

$$F \sin \theta = m \omega^2 r, \quad (6)$$

$$F \cos \theta = mg, \quad (7)$$

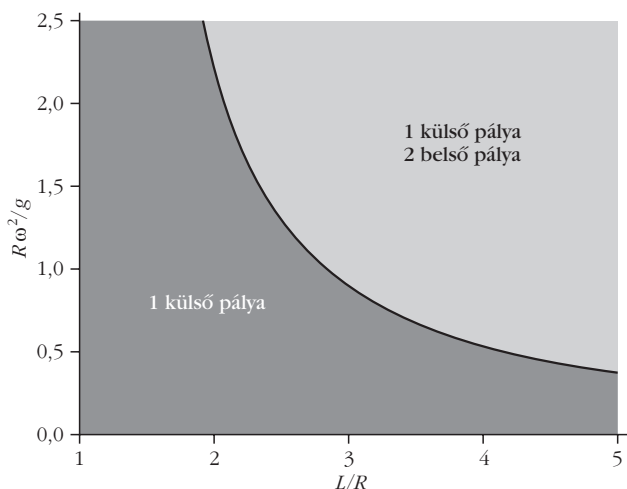
$$r + R = L \sin \theta. \quad (8)$$

Az erőkomponensek mellett a (8) geometriai feltételt felhasználva kapjuk a (9) egyenletet:

$$\frac{R \omega^2}{g} = \frac{\frac{r}{R} + 1}{\frac{r}{R} \sqrt{\left(\frac{L}{R}\right)^2 - \left(\frac{r}{R} + 1\right)^2}}. \quad (9)$$

Az egyenlet dimenziótlan alakjával egy paramétertér rajzolható fel (6. ábra).

6. ábra. A lehetséges pályák kialakulását bemutató paramétertér.



Adott hosszúságú kötélnél, viszonylag alacsony szögsebességnél az egyenletnek egyetlen megoldása lesz: csak egy külső pálya lehetséges. A paraméterteret ezt sötéttel jelöltük. A gyakorlatban ezt a pályát szinte mindig lassú felfutású bekapcsolás esetén lehet elérni. Fontos megemlíteni, hogy ez a pálya a paraméterter teljes területén létezik, így a világos területeken is. Érdekes módon, bizonyos körülmények között az egyenletnek három pályasugár is megoldása lesz. Az ábrán ezek a területek világossal vannak jelölve. A stabilitásvizsgálat megmutatta, hogy a három megoldás közül csak kettő eredményez stabil pályát: ezek a külső, valamint az egyik belső pálya. Az egyenlet harmadik megoldása instabil pályát ír le.

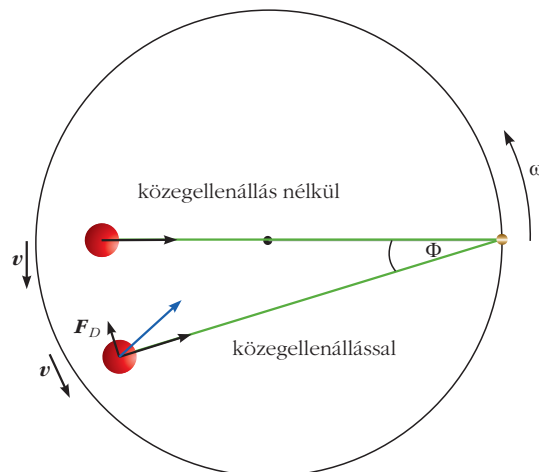
A közegellenállás

Közvetlenül a bekapcsolás után a labda szabálytalanul kezd mozogni, szabályos körök helyett hurkot rajzol. Azonban a közegellenállás miatt ezek a tranziensjelenségek az idő elteltével csökkennek, és a test egy stabil pályára áll be. A Reynolds-szám meghatározásával pontosabb információt kaphatunk a közegellenállás nagyságáról és típusáról. Ez kiszámolható a test relatív sebességéből és a levegő kinematikai viszkozitásából. A Reynolds-szám értéke 10^3 és 10^4 közé esett. Ebből három következtetést is levonhatunk: először, hogy a közegellenállás turbulens, ami azért is fontos lehet, mert ez tovább növelheti a rendszer előrejelezhetetlen viselkedését közvetlenül a bekapcsolás után. Másodszor, megtudjuk, hogy a közegellenállási együttható értéke konstans. És végül a legfontosabb, hogy a közegellenállás a sebességgel négyzetesen arányos. Ezekből az adatokból a közegellenállás kiszámolható és hatása a számítógéppel jól szimulálható.

Érdekes észrevételek

Nilvánvaló, hogy egyenletes körmozgás esetén az eredő erőnek a kör középpontja felé kell mutatnia. Ez akkor is igaz, ha a közegellenállás nem elhanyagolható. De hogyan befolyásolja a közegellenállás a test pályáját? Egyértelmű, hogy a test felfüggesztési ponthoz képesti relatív helyzete eltérő lesz. Ha nem lenne közegellenállás (például vákuumban végeznénk a kísérletet), akkor a labda a felfüggesztési pont és a forgástengely függőleges síkjában forogna. Azonban, ha közegellenállási erő is hat a testre, akkor a labda elhagyja eredeti pozícióját, és egy kicsivel az előtt fog mozogni (7. ábra). Azaz a labda eredeti helyzetéhez képest „sietni” fog.

A belső pályák sugarát tovább vizsgálva újabb érdekességeket fedezhetünk fel. A test és a felfüggesztési pont pályájának sugarát összehasonlítva azt láthatjuk, hogy a labda nem mindig a kisebb sugarú pályán mozog. Bizonyos körülmények között a belső pálya r sugara nagyobb lehet, mint R . Azonban ez csupán a paraméterter nagyon kis tartományán fordulhat elő. Ehhez viszonylag hosszú fonálra és alacsony szögsebességre van szükség. Ilyen esetekben a pályasugár csak kicsivel nagyobb R -nél.



7. ábra. Az ingatest pozíciója közegellenállással és anélkül.

Összefoglalás

Sokféle pálya alakulhat ki a kísérlet során, amelyek közül lesz stabil, illetve instabil. A különböző paramétereket vizsgálva megállapíthattuk, hogy a paraméterter mely területei lesznek a számunkra megfelelőek, ahol az ingatest kisebb sugarú körpályán is mozoghat, mint a felfüggesztési pont. Emellett több érdekes dolgot is tapasztaltunk munkánk során, amelyeket a jövőben, további eredményekkel kiegészítve publikálunk.

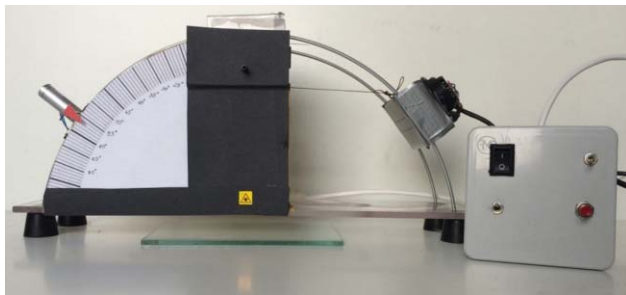
Bánóczki Tímea, Adorján Dániel

Érintésmentes tolómérő

A 15. feladat szerint meg kellett tervezni és építeni egy olyan eszközt, ami egy lézermutatót használva érintésmentesen képes meghatározni egy üveglap vastagságát, törésmutatóját és egyéb tulajdonságait.

Az általunk tervezett és épített eszközzel – aminek fényképe és vázlata az 8. ábrán látható – meg tudtuk mérni egy tetszőleges üveglap törésmutatóját, vastagságát, fényáteresztő-képességét és még a felszín egyenetlenségeire is kaptunk információkat. Érdemes megjegyezni, hogy „műszerünket” otthon talált eszközökből, költségek nélkül barkácsoltuk.

Az eszközben félkörív alakú sínen a lézermutató és az érzékelő kamera egy motor segítségével szimmetrikusan mozgatható úgy, hogy közben a lézersugár beesési szöge bármely pillanatban leolvasható. A lézersugár az eszköz alján, közvetlenül az asztal síkjára elhelyezett üveglapra esik. A mérés során fontos, hogy a beesési pont mindig a mérőeszköz geometriai középpontjába legyen. Ezt a talpak alatti, megfelelő vastagságú alátét elhelyezésével érhetjük el. Az üveglapról két fénysugár verődik vissza. Egy a felső felületről, a másik az alsóról, amely az üveg és a levegő felületén kétszer is megtörik. A két sugár egy fehér papírfelületre érkezik. A két fénypontot a papíron lévő két referenciacsíkkal együtt a mögötte lévő kamerával lehet filmezni. A keresett mennyiségeket a kapott film képkockáinak kiértékelésével határozhatjuk meg. A



8. ábra. A megépített mérőeszköz fényképe (fölről) és a mérőeszköz vázlata (alul).

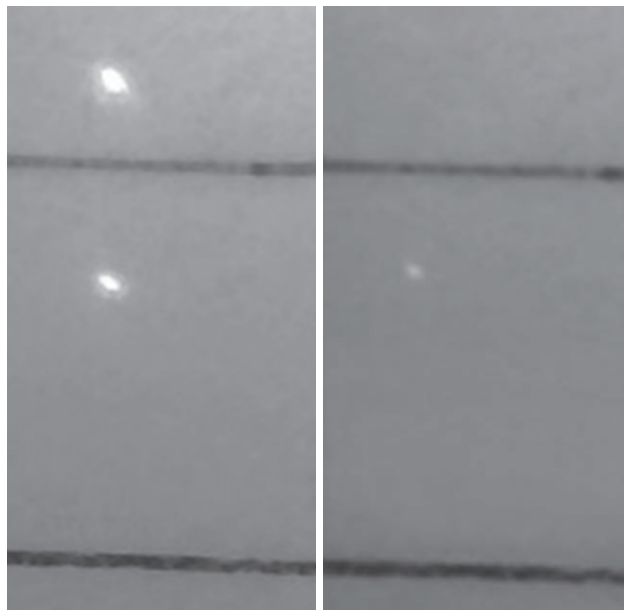
film képkockákra darabolását, a rajta lévő fényes pontok egymástól való távolságának, illetve fényességének meghatározását a *Matlab*-ban írt programjaink végezték, azonnal kiírva a vastagság és törésmutató értékeit. A következőkben röviden ismertetjük a mérések menetét.

Az üveglap törésmutatójának a meghatározása

Jól ismert, hogy ha egy üvegfelületre megfelelő szögben érkezik a fénysugár, akkor annak visszavert sugara a beesési síkra merőleges polarizációt szenved. Ezt a „megfelelő” szöget nevezzük Brewster-szögnek [3]. A Maxwell-egyenletekből és a törési törvényből levezethető, hogy ilyen esetekben:

$$\tan \alpha_{Br} = n, \quad (10)$$

ahol α_{Br} a Brewster-szög, míg n a vizsgált anyag levegőre vonatkoztatott relatív törésmutatója. Ha ennél a beesési szögnél a beeső fénynyalábot a beesési síkkal párhuzamosan polarizáljuk, akkor a visszavert fénysugár fényintenzitása erősen lecsökken, jó esetben gyakorlatilag nullára esik. Látható, hogy a törésmutató kiszámításához meg kell meghatározni a Brewster-szöget. A szög meghatározásához a fent bemutatott összeállítást használtuk, de a lézerefényforrás elé polárszűrőt helyeztünk. Így a beeső fény a beesés síkjában lineárisan polarizálttá vált. Ennek köszönhetően, a Brewster-szöggel megegyező beesési szög esetén a visszavert lézerefény teljesen eltűnik, hiszen visszaverődéskor az a rezgésirány is kiszűrődik belőle, amit a lineárisan polarizáló szűrő még meghagyott. A szög megkereséséhez a lézert és az érzékelő kamerát léptetőmotorral mozgattuk és közben filmeztük a két lézerfoltot. A feladat ezután az volt, hogy az elkészült filmből kikeressük azt a képkockát, amin nem, vagy



9. ábra. A lézerfoltok képe a mérés kezdetekor (balra) és a Brewster-szögnek megfelelő beesési szögnél (jobbra).

legkevésbé látható a lézer fénye. Ennek megtalálását is a számítógépre bíztuk, ami végignézve a képkockákat megkereste azt, ahol a lézerfolt intenzitása minimális, majd ebből kiszámolta a kérdéses szöget. A 9. ábrán látható két képkocka közül az elsőn látható a kezdeti két lézerfolt, a második a Brewster-szögnek megfelelő kép, ezen már csak az alsó, üveg aljáról visszaverődő, csökkent intenzitású [4] fénysugár érzékelhető, míg a felső teljesen eltűnt.

Az üveglemez vastagságának a meghatározása

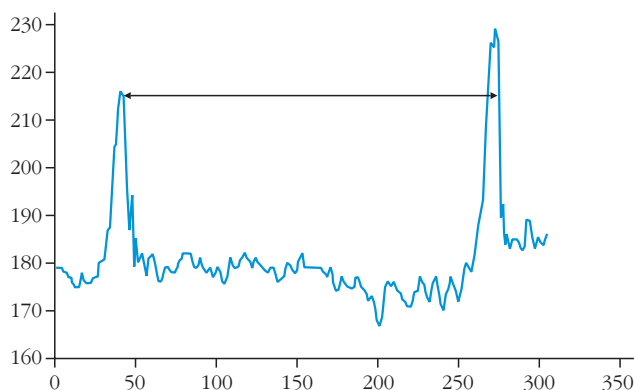
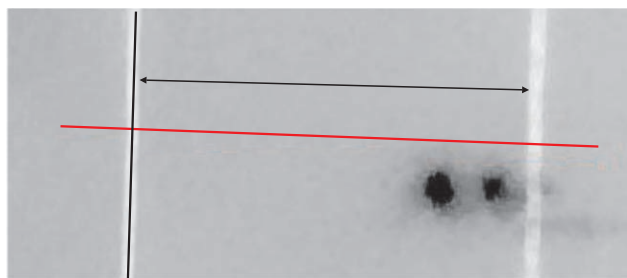
Módszerünk lényege az, hogy az üveglapról visszaverkező két párhuzamos sugárnyaláb közötti x távolság megméréseivel a lemez d vastagsága meghatározható, ha ismerjük az üveg n törésmutatóját, illetve az adott α beesési szöget:

$$d = \frac{x}{2 \tan \left(\sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) \right) \sin (90^\circ - \alpha)}. \quad (11)$$

A törésmutató értékét az előző mérésből már tudjuk, most csak a két nyaláb közötti x távolságot kell megmérnünk. A mérési pontosság növelése érdekében a két fénypont távolságának a meghatározását nem szabad szemmel végeztük, hanem ugyancsak a *Matlab*-ban írt program segítségével mértük. Először kalibráltuk az eszközt. A kalibráció elvégzéséhez beazonosítottuk a két referenciavonalat (itt világos vonalak, mert a képet a feldolgozáshoz invertáltuk), amelyek távolságát ismertük és a programunknak ezt az értéket már megadtuk.

A kalibrációs vonalakra merőleges egyenes mentén megkerestük a legvilágosabb pontokat – 10. ábra –, és így a két vonal helyét.

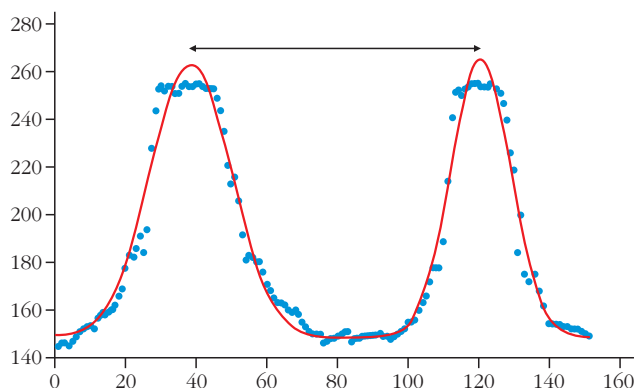
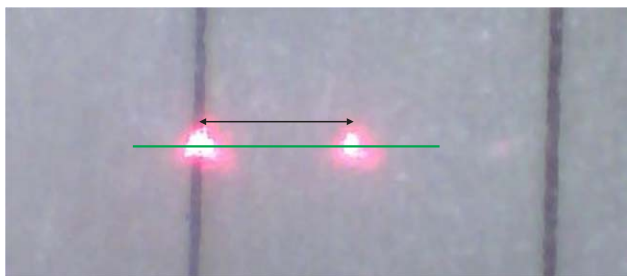
A következő lépésben a két lézersugár foltjának helyét az alábbi eljárással tudtuk megtalálni:



10. ábra. A referenciavonalak beazonosítása (föül) és a köztük lévő távolság meghatározása (alul).

A program a két pontot összekötő egyenes mentén megrajzolta a kép fényintenzitás-görbéjét. A keresett távolság a kapott görbe két csúcspontja közötti távolságból adódik. Mivel a lézer intenzitásprofiljára jól illik a Gauss-görbe, ezért a kapott pontsorra Gauss-görbéket illesztettünk és ezek csúcspontjai közötti távolsággal számoltunk. A 11. ábrán látható az intenzitásgörbe pontsora és a rájuk illesztett görbe. A két

11. ábra. A két lézerfolt (föül) és helyzetüket meghatározó intenzitáspontra illesztett Gauss-görbe (alul).



csúcs közötti távolság ismeretében a program vissza-számolta a távolság valódi értékét, amelyből a leírtaknak megfelelően már megkaptuk az üveglap vastagságát. Mérésünket több ízben csavarmikrométerrel ellenőriztük, az eltérés 1%-nál kisebb volt.

A vastagságmérést több helyütt, egymástól 2 mm távolságban is elvégeztük az üveglapokon és a kapott értékekből következtethettünk az üvegfelület egyenletlenségeire.

Az üveglapok fényáteresztő-képességét úgy vizsgáltuk, hogy különböző vastagságú, de azonos anyagú üvegek esetén képelemző program segítségével mértük az üvegbe belépett, majd visszavert fénynyaláb intenzitását. Mivel eszközünk csak néhány milliméter vastagságú eszközök vizsgálatára alkalmas, amelyekben a fényelnyelés még nem túl jelentős, ezért mérhető eredményt csak színezett üveg esetén kaptunk.

Varga-Umbrich Eszter

Lemezen gördülés

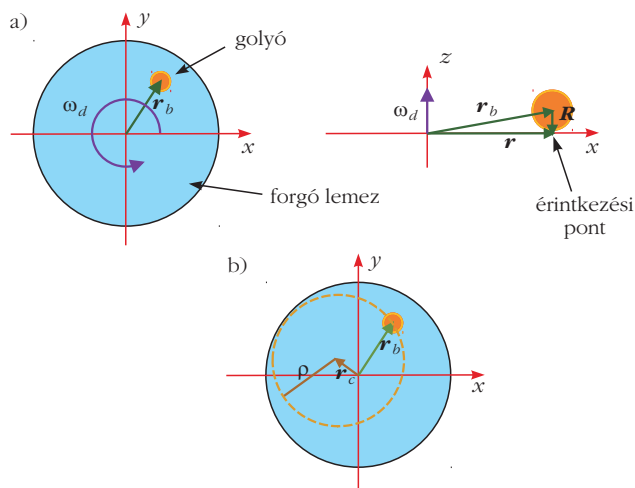
Ha egy gömb alakú testet vízszintesen forgó lemezre helyezünk, bizonyos körülmények között a test úgy mozog a korongon, hogy arról nem esik le. A következőkben a megvalósuló mozgást vizsgáljuk.

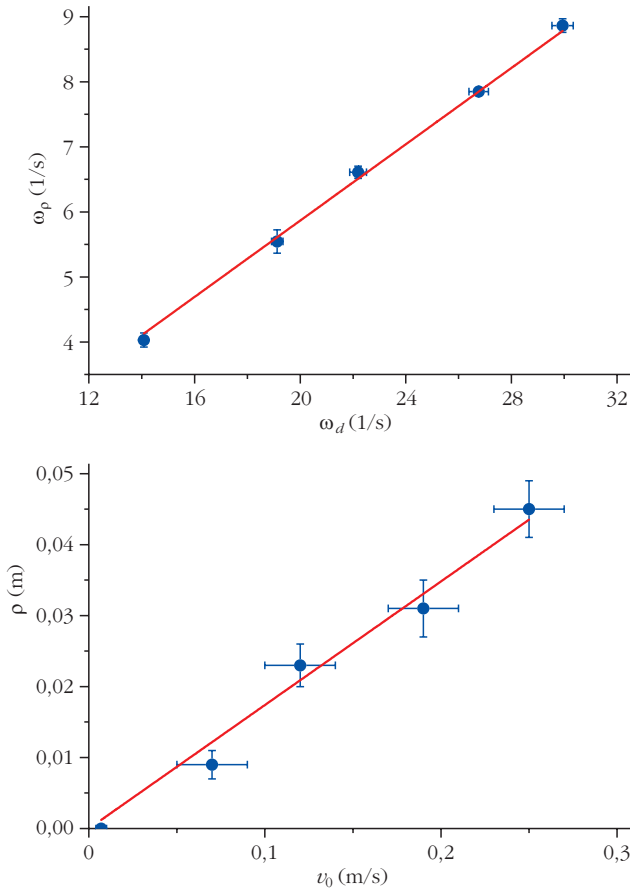
Mint az *Klaus Weltner* 1979-es cikkében is megjelent, néhány feltevést alkalmazva (a golyó nem csúszik meg, tehát csak tapadási súrlódás van jelen) a mozgást a következő differenciálegyenlet írja le egy forgó korongon mozgó tömör vagy üreges gömb esetén [5]:

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{I}{R^2 m + I} \left(\boldsymbol{\omega}_d \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right), \quad (12)$$

ahol $\mathbf{r}$ jelöli a golyó és a korong érintkezési pontjába mutató vektort, I a tehetetlenségi nyomatékot, m a tömeget, $\boldsymbol{\omega}_d$ pedig a korong szögsebességét (12.a ábra). Ez alapján a mozgás pályája körpálya (12.b

12. ábra. Az egyenletek felírásakor használt vektorok.





13. ábra. Mért és számított értékek összehasonlítása: fölül a létrejövő forgás szögsebessége a forgó lemez szögsebességének függvényében, valamint alatta a létrejövő körpálya ρ sugara a golyó kezdősebességének függvényében. (A méréshez használt golyó adatai: $m = 0,0248$ kg, $r = 8,5$ mm, $I = 7,17 \cdot 10^{-7}$ kg m².)

ábra), amelynek középpontja az alábbi módon határozható meg:

$$\mathbf{r}_o = \mathbf{r}(0) + \frac{\boldsymbol{\omega}_p}{\omega_p^2} \times \left. \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right|_{t=0}, \quad (13)$$

míg a körpálya sugara:

$$\rho = \frac{\left| \left. \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right|_{t=0} \right|}{\omega_d} \frac{R^2 m + I}{I}, \quad (14)$$

$\boldsymbol{\omega}_p$ pedig a létrejövő forgás szögsebességét jelöli, amely az alábbi formulával adható meg:

$$\boldsymbol{\omega}_p = \boldsymbol{\omega}_d \frac{I}{R^2 m + I}. \quad (15)$$

Az imént ismertetett összefüggések igazolására méréseket végeztünk (13. ábra).

Azt tapasztaltuk, hogy a mozgás első néhány másodpercét a modell helyesen írja le, az idő múlásával azonban a pálya sugara növekszik, a forgás középpontja sem marad állandó, majd egy spirális íven a golyó elhagyja a lemezt. Az itt említett jelenségek

megértése érdekében tanulmányozni kezdtük a gördülési súrlódás és a közegellenállás hatását is. Kihasználtuk, hogy a gördülési ellenállásnak csak forgatónyomatéka van:

$$\mathbf{M}_g = -\delta \frac{\boldsymbol{\omega}_b}{|\boldsymbol{\omega}_b|}, \quad (16)$$

ahol δ a gördülési ellenállási együttható. A közegellenállásnak – bár fejt ki erőt – nincs forgatónyomatéka:

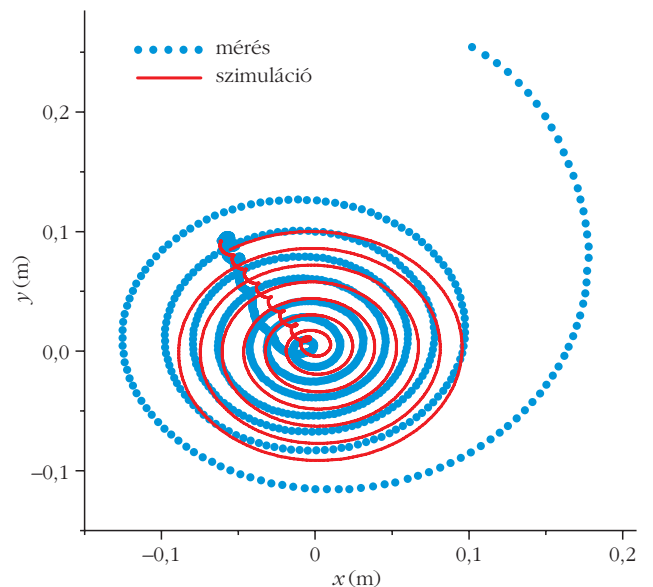
$$\mathbf{F}_{közeg} = -6\pi\eta R \frac{d\mathbf{r}}{dt}. \quad (17)$$

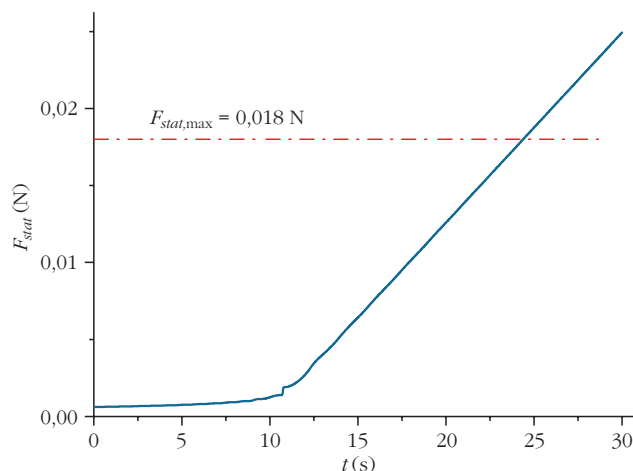
Emellett felhasználva azt a feltételt, hogy a golyó nem csúszik meg, és figyelembe véve azt is, hogy a forgó lemez nem feltétlenül vízszintes, a golyóra az alábbi mozgásegyenletet kaptuk:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = & \frac{I}{I + mR^2} \left(\boldsymbol{\omega}_d \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) - \frac{6\pi\eta R^3}{I + mR^2} \frac{d\mathbf{r}}{dt} + \\ & + \frac{R^2}{I + mR^2} \mathbf{G} + \frac{\delta R}{I + mR^2} \frac{\boldsymbol{\omega}_d \times \mathbf{r} - \frac{d\mathbf{r}}{dt}}{\left| \boldsymbol{\omega}_d \times \mathbf{r} - \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right|}, \end{aligned} \quad (18)$$

ahol $\mathbf{G}$ a golyóra ható nehézségi erő lemezzel párhuzamos komponense. A differenciálegyenlet analitikus megoldásával nem próbálkoztunk, azonban numerikus szimulációkat végeztünk az egyenlet alapján és azokat összehasonlítottuk mérési eredményeinkkel. Azt találtuk, hogy teljesen zárt pályák nem jöhetnek létre, azonban, ha a gördülési ellenállás együtthatója elegendően kicsi, akkor beszélhetünk kvázi-zárt pályákról. Sikertelenül modelleztünk a pálya növekvő sugarát, ami ugyancsak a gördülési ellenállás fellépéséből következik (14. ábra).

14. ábra. A golyó mozgásának pályája. A mérés összehasonlítása a szimulációval. A golyó először a forgó lemez közepe felé halad, majd onnan kifelé, egy jellegzetes spirál pályán elhagyja azt.





15. ábra. A tapadási súrlódási erő változása az időben a szimuláció alapján, és a mérés során használt golyóra vonatkozó maximális tapadási súrlódási erő.

Továbbra sem értettük, miért hagyja el egy idő után egy logaritmikus spirális karon a golyó a lemezt (14. ábra pontsora). Ezért azt határoztuk meg a szimulációban, hogy a tapadási súrlódási erő miként változik az idő függvényében (15. ábra). Méréssel meghatároztunk a kísérletek során használt golyóra vonatkozó maximális tapadási súrlódási együttható értékét, majd e két eredményt hasonlítottuk össze.

Amint az a 15. ábrán is látszik, a folyamat során e maximumot valóban eléri a súrlódási erő. Ezután már nem tisztán gördül a golyó, hanem megcsúszik és közelítőleg logaritmikus spirális pályán elhagyja a lemezt. Az általunk vizsgált esetben a megcsúszás időpontja nagy pontossággal megegyezett a szimulációból nyert megcsúszási időponttal.

A probléma vizsgálata során egy már ismert eredményt használtunk fel, és vizsgáltuk annak érvényességi feltételeit. Azt találtuk, hogy bár a modell pontosan leírja az első néhány fordulatot, hosszabb időtartamokra nem használható, ugyanis olyan jelenségeket tapasztaltunk, amelyek az ott felírt egyenletekből nem következnek. Ezért megvizsgáltuk az elhanyagolt tényezőket, mint a gördülési ellenállás és a közegellenállás, és ezeket is számításba véve létrehoztuk saját modellünket. Ez alapján a mozgást már hosszabb időtartamokra is tudjuk szimulálni, valamint általa megérthetjük azt is, miért nem jöhet létre teljesen zárt pálya, és mi az oka annak, hogy a golyó egy spirális ágon elhagyja a lemezt.

Plaszko Noel

Köszönetnyilvánítás

A versenyre való felkészülés és a versenyen való részvétel anyagi háttérét a MOL Nyrt. és az Emberi Erőforrások Minisztériuma biztosította. A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.

Irodalom

1. Hömöstrei Mihály, Pham Thi Linh, Beregi Ábel, Laukó András, Béda Ármin, Nagy Péter, Ispánovity Péter Dusan, Jenei Péter: Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye magyar szemmel. *Fizikai Szemle* 64/12 (2014) 430.
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Clausius%E2%80%93Clapeyron_relation
3. Budó Á., Mátrai T.: *Kísérleti fizika*. III. kötet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
4. https://de.wikipedia.org/wiki/Fresnelsche_Formeln
5. K. Weltner: Stable circular orbits of freely moving balls on rotating discs. *American Journal of Physics* 47 (1979) 984.

KÖNYVESPOLC

Radnóti Katalin: ÓRÁRÓL ÓRÁRA

Fizikaórák megjegyzésekkel ellátva

SZTE BTK NTI és MTA–SZTE TTK, Szeged, 2017.

Fizikatanárok, fizika tanárszakos hallgatók már biztosan feltették maguknak a következő kérdéseket: Mi a természettudományos tárgyak tanításának célja? Hogyan lehet a fizikát más tantárgyak ismeretanyagához kapcsolni? Milyen IKT eszközöket lehet bevonni a tanítási-tanulási folyamatba? Hogyan lehet a jellegzetes tanulói tévképzeteket feltárni, tanárként azokra milyen módon érdemes reagálni? Mi a kísérletezés és a hipotézisalkotás szerepe a fizikaórákon? Miként lehet csoportmunka keretében egy-egy témakört feldolgozni? Egyáltalán mitől lesz jó hangulatú és hatékony egy fizikaóra?

Jelen könyvajánló Radnóti Katalin legújabb, *Óráról órára* című könyvéről szól, amelyben a fenti kérdésekre is válaszokat találhatunk. A kiadvány az MTA–SZTE Természettudomány Tanítási Kutatócsoport munkájához kapcsolódik és elsődlegesen fizikát tanító tanároknak, tanárjelölteknek készült. A könyv egész tanórákat mutat be, amelyek mindegyikéhez elemzések kapcsolódnak. A szerző szándéka az volt, hogy az óralátogatások során szerzett élményeken keresztül mutasson rá a fizikatanítás meghatározó céljaira és a tanulói gondolkodás fejlesztésének lehetőségeire.

A könyv alapvetően egy hallgatói segédlet, amely a fizika tanárszakos hallgatóknak nyújt támogatást abban, hogy a tanárképzéshez kapcsolódó iskolai tanítási gyakorlatokat teljesítsék. Számos ötletet, módszert, kísérletet, tesztet, feladatlapot találhatunk a könyvben. Továbbá – mivel a megfigyelt órák nagy része tanárjelöltek által tartott vizsgatanítás vagy bemutató óra volt – kézzelfogható mintát is ad a hallgatóknak saját bemutató órájuk megtervezéséhez.

Ugyanakkor pályán lévő természettudományos tárgyat tanító tanárok számára is kínál lehetőséget a könyv. Megismerhetik belőle a kutatásalapú tanulás/tanítás iskolai alkalmazásait. Ezen újszerű szakmódszertani elem fő jellemzője az, hogy a tanulók egy tudományos kutatási folyamat részeivé válnak és saját maguk ismerhetik fel az egyes fizikai törvényeket. A diákok az órán elvégzett mérő-kísérletek adataiból, vagy internetről származó mérési eredményekből, esetleg szimulációs programokból származó értékekből különböző összefüggéseket sejtene meg, hipotéziseket alkotnak (például az adatok táblázatban, vagy koordináta-rendszerben történő ábrázolása után). Mivel az elsődlegesen szerzett tapasztalat mindig marandóbb, így a kutatás alapú tanulás/tanítás során azt várhatjuk, hogy a tanulók a fizikai törvényeket nem pusztán matematikai képletként, hanem valódi összefüggésként látják majd. A kutatási jelleg akkor is megmarad, ha a diákok ténylegesen nem mérnek, hanem más, például a törvényt vizsgáló tudósok eredeti mérési eredményeit használják fel. Erre példa a könyvben található egyik fakultációs óra, ami arról szólt, hogy a diákok *Henrietta Swan Leavitt* (1868–1921) eredeti mérési eredményei alapján keresnek összefüggést a Kis Magellán-felhőben lévő néhány csillag abszolút fényessége és látszólagos fényváltozásának periódusideje között. Ez a módszer akkor használható jól, amikor az adott jelenség tante remben történő vizsgálata nem valósítható meg.

Az elemzések pedagógiai értelemben véve *reflexiók*, így – a tanárok számára alapvető fontosságú – reflektív gondolkodás fejlesztésében is segítséget nyújthat a könyv. Az okostelefonok és számítógépes programok fizikaórán való felhasználásáról is számos jó példát ismerhetünk meg. Emellett néhány játékos feladat is előkerül (például kérdés-válasz kártyák, keresztrejtvények), amelyek akár eredeti formájukban, akár a ben-nük szereplő ötleteket hasznosítva is kipróbálhatók.

Fontos megemlíteni a tanárok által használt szimulációkat is. Az egyik a magyar fejlesztésű Geomatech projekt, a másik a Coloradói Egyetem (Boulder) által

készített PhET, amelyek számos – a tanulási és tanítási folyamatban jól használható – interaktív szimulációt biztosítanak.

A könyv a fentiek mellett kiváló tanári kérdéseket is tartalmaz. Olyanokat, amelyek segítenek feltárni a tanulói tévképzeteket, vagy gondolkodásra készítetik a diákokat, illetve arra biztatják őket, hogy magyarázatokat találjanak az egyes kísérleti tapasztalatokra. Ezek az óra menetét előre vivő kérdések külön sorban és dőlt betűvel szerepelnek a könyvben, ezzel is elkülönülve a leírásoktól.

Az egyes tanórák témakör szempontjából lefedik a fizika főbb területeit. Átélhetünk a mechanikához kapcsolódót fizikaórát, emellett találunk a hőtan, az elektromosságtan, a mágnességtan és az optika témakörében is több órát, továbbá a csillagászat is megjelenik (például a Hubble-törvény feldolgozásáról, valamint a kozmikus méterrúdról szóló fakultációs óra).

A bemutatott tanórák oktatásszervezési mód tekintetében igen sokfélék: csoportmunkát, páros munkát, tanulói kísérletezést alkalmaznak a pedagógusok. Találunk emellett hagyományos, frontálisan szervezett órát is, amelyeken a tanár érdekes és jól kigondolt kérdésekkel mozgatta meg a diákokat.

A könyv összesen 23 darab teljes fizikaóra bemutatását és az azokhoz kapcsolódó megjegyzéseket, mellékleteket tartalmazza. A leírásokból képet kapunk az órák menetéről, valamint elolvashatjuk a főbb mozzanatoikat, a táblára felkerült leglényegesebb információkat, a tanári kérdéseket és diákok fontosabb megjegyzéseit.

Az élményszerű leírások magukkal ragadják az olvasót, így ténylegesen az órákon érezhetjük magunkat. A könyv záró fejezete a megfigyelések összegzését írja le, vagyis azt, hogy mi volt a közös az egyes tanórákban, és az egyes tanárok hogyan valósították meg a fizikatanítás céljait.

A leírtakat összefoglalva elmondható, hogy az *Óráról órára* című kiadvány a jelen magyarországi fizikatanítás javításában egy fontos törekvés. Minden természettudományos tantárgyat tanító tanárnak és tanárjelöltnek tudom ajánlani, mert a benne szereplő ötletek közvetlenül hasznosíthatók és számos fontos oktatási kérdésre választ kaphatunk belőle. A könyv egész tartalma ingyen hozzáférhető az MTA–SZTE Természettudomány Tanítása Kutatócsoport www.edu.u-szeged.hu/ttkcs/publikaciok/konyvek/honlapjan.

Balázs Ádám

Forrai Gimnázium és Művészeti Szakgimnázium, Budapest



BESZÁMOLÓ EGY MEGEMLÉKEZÉS KAPCSÁN

A Budapest IX. kerületi Ifjú munkás utcai Kőrösi Csoma Sándor Kéttannyelvű Általános Iskola és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Tehetségpontja közösen emlékezett meg *Marx György* születésének 90. évfordulójáról. A megemlékezés az iskola Gyermeknap alkalmából tartott programsorozatába illeszkedett, fizika tartalmú játékos vetélkedő formájában.

A rendezvénynek tekintélyt adott, hogy kérésünkre *Kürti Jenő*, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék egyetemi tanára nyitotta meg. Marx Györgyre emlékezve kiemelte suggesztív előadókésztségét, amellyel őt magát is annyira megnyerte, amikor középiskolás korában egy előadását hallotta az Univerzum történetéről, hogy meghatározta pályaválasztását: fizikus lett.

A rendezvény bevezetőjében a kollegák és a tanulók számára is hangsúlyoztuk, hogy Marx professzor nemcsak Kossuth-díjas magyar fizikus, a leptontöltés felfedezője, tudománytörténész, tanszékvezető egyetemi tanár, a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja volt, hanem kiváló ismeretterjesztő, a fizika népszerűsítője, a fizikaoktatás elhivatott támogatója is. Felhívtuk a figyelmet a laikusok számára is olvasmányos könyvére, a *Marslakók érkezése* címűre, amelynek alcíme: *Magyar tudósok, akik nyugaton alakították a 20. század történelmét*. A játék e témához is kapcsolódott. Címe – Fizika, szeretlek! – nem titkolt szándékunkra, a fizika népszerűsítésére, valamint a tv-ből ismert játékra egyaránt utalt. 7-8. osztályos fizikai és fizika-, valamint kultúrtörténeti játékos feladatok következtek.

A villámkérdések közben ketyegő doboz csokirepeszeket szórt, a szóbeszéd arról folyt, miért is hívták a II. világháború idején az Egyesült Államokban dolgozó, magyar származású atomfizikusokat „marslakóknak”, és miért is volt *Neumann János*, a 20. század legnagyobb hatású matematikusa, a modern, tárolt programmal vezérelt elektronikus számítógép létrehozója – *Fejér Lipót* nagy matematikusunk szavai szerint –, már diákkorában „Magyarország legnagyobb Jancsija”.

A vetélkedőn a magyar és magyar származású tudósokról szólva hangsúlyoztuk a kiváló iskolák és kiváló tanárok szerepét a kiemelkedő tehetségek gondozásában.

A kiemelkedő iskolák sorában nemcsak a Minta-gimnáziumot és a Fasori Evangélikus Gimnáziumot említettük, hanem a kerületben működött és újra működő, Lónyay utcai Református Gimnáziumot is, ahol

Marx professzor végezte középiskolai tanulmányait. Itt megszerzett érettségijének 70 éves évfordulója alkalmából, *Zubonyainé Pelka Zsuzsa* 2015 májusában az iskola számára kiállítást készített Marx professzor munkásságáról, amelyet *Patkós András*, az ELFT elnöke nyitott meg. A kiállítás anyagát most a vetélkedő iskola tanulói és tanárai tekinthették meg.

Az ELFT-vel való kapcsolatnak másik szála is van. A Társulat székhelye 2014. augusztus óta – az önkormányzat támogatását élvezve – a IX. kerületi Ráday utcában van. A Tehetségpont vállalta, hogy ingyenes tehetséggondozó programokat szervez az érdeklődő kerületi iskolások és itt lakó gyermekek számára. Az összejöveteleket tanévenként 6 alkalommal, a kezdetektől fogva e cikk írói önkéntes munkával szervezik és vezetik az általános iskolások, kiemelten a fizikát még nem tanuló kisiskolások, első sorban 9–12 éves tanulók számára. A szombat délelőtti programok váltakozva logikai fejlesztő játékok, fizikai kísérletek, vagy fizikai játékkészítő összejövetelek. Ezúttal köszönjük a kollégáknak az Anketokon tőlük ellesett ötleteket, amelyekkel a sajátjainkat kiegészítjük!

A vízzel, levegővel, mágnessel stb. való kísérletezéshez a Társulat néhány kereskedelemben kapható eszközkészlet beszerzését is lehetővé tette. Készültek már „műhelyünkben” kaleidoszkópok, szívószáldudák, papírsípok, pillepalackban közlekedő alufólia-bűvárok, sőt madzag-fagolyó ördöglakatok is. A szakkör-vezetők háztartásából kikertülő, kellően olcsó alapanyagokból készült eszközöket haza is vihetik a gyerekek – a részvétel ingyenes. Sikere van a logikai társasjátékoknak is, ezekre – tapasztalataink szerint – családi körben kevés lehetősége van a gyerekeknek.

A résztvevők száma és összetétele is változó. Az egyszer felbukkant érdeklődők szüleit a következő alkalom időpontjáról és programjáról e-mailben értesítjük. Ez hatékonyabb, mint az iskolákon vagy a tanterületen keresztül való értesítés, amelyről mindemellett nem mondunk le.

A kerületi iskolákban működő tehetségpontokkal együttműködési lehetőségeket keresünk. A Kőrösiben tartott rendezvényünkötől is azt reméljük, hogy a kerületnek a központtól távolabb eső iskolájában tartott vetélkedő újabb területekre is elviszi a Tehetségpont híret, újabb érdeklődőket, tudóspalántákat vonz, növelve a Társulat ismertségét és a fizika iránti érdeklődést.

Vantsó Erzsébet és Zubonyainé Pelka Zsuzsanna



ARANYÉRMESEK A MAGYAR DIÁKOK SZINGAPÚRBAN, AZ IFJÚ FIZIKUSOK NEMZETKÖZI VERSENYÉN

A magyar középiskolásokból álló fizikaválogatott húsz év után ismét aranyérmet nyert az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenyén (IYPT). Az idei verseny Szingapúrban került megrendezésre, ahol harminc ország képviseltette magát ötfős csapatokkal. A magyar csapat tagjai: *Bánóczki Tímea* és *Nagy Balázs Norbert* (Német Nemzetiségi Gimn., Budapest), *Svattits Áron* (Piarista Gimn., Budapest), *Szakály Marcell* (Budapesti Fazekas Mihály Gimn.) és *Varga-Umbrich Eszter* (Pápai Református Koll.). A versenyzők felkészítését *Asbóth János* (MTA–Wigner), *Boross Péter*, *Hörmöstrei Mihály*, *Ispánovity Péter Dusan*, *Jenei Péter*, *Széchenyi Gábor* (valamennyien ELTE Anyagfizikai Tanszék) végezték, munkájukat ELTE fizika tanárszakos hallgatók és korábbi versenyzők is segítették. Az egy éves felkészülés során a kísérleti és elméleti kutatómunka mellett, a verseny jellegéből adódóan, nagy hangsúlyt kapott a prezentációs és vitakészség fejlesztése, valamint a csapatszellem megteremtése, amely az idei siker zálogának bizonyult.



SIKERES SZEREPLÉS A 48. NEMZETKÖZI FIZIKAI DIÁKOLIMPIÁN

– Yogyakarta, Indonézia, 2017. július 16–24.

A magyar csapat 1 arany- és 4 ezüstérmet szerzett az indonéziai Yogyakarta-ban rendezett versenyen.

Aranyérmet nyert *Tompa Tamás Lajos*, (Földes Ferenc Gimnázium, 12. oszt., felkészítő tanára: *Zám-borszky Ferenc*).

Ezüstérmet érdemelt *Kovács Péter Tamás* (Zalaegerszegi Zrínyi Miklós Gimnázium, 12. oszt., felkészítő tanárai: *Juhász Tibor*, *Pálovics Róbert*), *Marozsák Tóbiás* (Óbudai Árpád Gimnázium, 11. oszt., felkészítő tanára: *Gärtner István*), *Nagy Botond* (Zalaegerszegi Zrínyi Miklós Gimnázium, 12. oszt., felkészítő tanára: *Pálovics Róbert*) és *Németh Balázs* (Fazekas Mihály Fővárosi Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium, 11. oszt., felkészítő tanárai: *Dvorák Cecília*, *Csefkő Zoltán*).

Az olimpiára való készülés szokás szerint a budapesti (*Szász Krisztián*, *Tasnádi Tamás*, *Vankó Péter*, *Vigh Máté*), a miskolci (*Zám-borszky Ferenc*), pécsi (*Kotek László*), a szegedi (*Hilbert Margit*, *Sarlós Ferenc*) és a székesfehérvári (*Orosz Tamás*, *Ujvári Sándor*) olimpiai szakkörökön, valamint a BME Fizika Tanszékén szervezett mérési foglalkozásokon kezdődött. A csapatot a szakkörök résztvevői és az országos versenyeken kimagasló eredményeket elért tanulók közül az áprilisban megrendezett kétfordulós Kunfalvi Rezső versenyen válogatták ki.

A csapatot Vankó Péter és Tasnádi Tamás csapatvezetők, valamint Szász Krisztián megfigyelő kísérték a versenyen.



ISSN 0015325-7



9 770015 325009 17007