fizikai szemle

2018/1

FIZIKUS

Az innovatív műszaki megoldások területén több mint 90 éves múlttal rendelkező Gamma Zrt. új munkatársat keres profi csapatába, nukleárisműszer-fejlesztői és nukleárisműszerfejlesztés-vezetői pozíciók betöltésére.

Feladatok

- nukleáris méréstechnikai alkalmazások fejlesztése
- nukleáris mérések tervezése, kivitelezése
- kísérletek végrehajtása
- új technológiák, algoritmusok kidolgozása
- kalibrációs tevékenységek

Elvárások

- szakmailag megalapozott, önálló munkavégzés
- szakmai angol szövegértés
- számítógépes ismeretek
- kreatív, innovatív gondolkodásmód és szakmai tájékozottság

Végzettség

- fizikus, mérnök-fizikus, fizikatanár, vagy
- környezetkutató fizika szakirányon, vagy
- metrológus szakember

Előny

- bővített sugárvédelmi képzettség

Amit kínálunk

- stabil munkahely
- versenyképes jövedelem
- innovatív, szakmailag professzionális környezet
- egyedi műszaki megoldások és széles szakmai látókör
- új, változatos projektek és kihívások
- nagy múltú, családias cég
- cafeteriajuttatási csomag

Amennyiben ez a hirdetés felkeltette érdeklődését, kérjük, küldje el fényképes önéletrajzát – amelyben feltünteti bruttó bérigényét is – a **gamma@gammatech.hu** e-mailcímre.

GAMMA Műszaki Zártkörű Részvénytársaság
1097 Budapest, Illatos út 9.
Telefon: +36 1 205 5771 • Fax: +36 1 205 5778
www.gammatech.hu • gamma@gammatech.hu

Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2018. évi tagdíjairól

Tisztelt Társulati Tagjaink!

Mindenekelőtt szeretném tolmácsolni a Társulat Elnökségének üdvözletét és újévi jókívánságait a Társulat tagjainak, a fizika barátainak és a *Fizikai Szemle* valamennyi olvasójának. A Társulat és a *Fizikai Szemle* az idén is változatlan erővel kívánja megvalósítani mindazokat a feladatokat, amelyek betöltésére Alapszabályában vállalkozott.

Kérem, hogy a 2018. évi tagdíjukat, amelynek összege a 2017. évhez képest nem változott, az alábbiak figyelembevételével szíveskedjenek befizetni.

Ha Ön a **Társulatunk rendes tagja** és
- **a *Fizikai Szemle* számait elektronikus formában kéri,** akkor a 2018. évi tagdíja **8400 Ft.**
- **a *Fizikai Szemle* számait papíralapú terjesztéssel kéri,** akkor a 2018. évi tagdíja **8800 Ft.**

Ha Ön a Társulat tagjaként **általános vagy középiskolai tanár** és
- **a *Fizikai Szemle* számait elektronikus formában kéri,** akkor 2018. évi tagdíja **800 Ft** alaptagdíj + **4600 Ft** kiegészítő tagdíj, azaz összesen **5400 Ft.**
- **a *Fizikai Szemle* számait papíralapú terjesztéssel kéri,** akkor 2018. évi tagdíja **800 Ft** alaptagdíj + **5000 Ft** kiegészítő tagdíj, azaz összesen **5800 Ft.**

Az alap- és kiegészítő tagdíjat együtt kérjük befizetni.

Ha Ön **nyugdíjasként** tagja a Társulatnak és
- **a *Fizikai Szemle* számait elektronikus formában kéri,** akkor 2018. évi tagdíja **3400 Ft.**
- **a *Fizikai Szemle* számait papíralapú terjesztéssel kéri,** akkor 2018. évi tagdíja **3800 Ft.**

Ezúttal is tisztelettel kérem azokat a nyugdíjas korú tagjainkat, akik nyugdíjuk mellett teljes munkaviszonnyal vagy közalkalmazotti jogviszonnyal rendelkeznek, hogy a tagdíjfizetés szempontjából ne tekintsék magukat nyugdíjasnak.

Ha Ön **tanulmányait végzi** (felsőoktatási intézmény hallgatója és munkaviszonnyal nem rendelkezik vagy középiskolai tanuló) vagy **30 évnél fiatalabb** (azaz, aki 1987. december 31-e után született) és
- **a *Fizikai Szemle* számait elektronikus formában kéri,** akkor kedvezményes tagdíja **3400 Ft.**
- **a *Fizikai Szemle* számait papíralapú terjesztéssel kéri,** akkor kedvezményes tagdíja **3800 Ft.**

Kérem, hogy aki a fiataloknak szóló kedvezménnyel élni kíván és még nem adta meg születési adatait a tagnyilvántartáshoz, írja meg a társulat titkárság ***elft@elft.hu*** e-mailcímére.

Kérem, hogy bármilyen adatváltoztatást (például e-mailcím megváltozása) e-mailben legyenek szívesek megírni az ***elft@elft.hu*** címre.

Kérem, hogy tagdíjukat mielőbb szíveskedjenek rendezni. A tagjainknak tagsági jogon járó *Fizikai Szemle* folyamatos küldését csak azok számára tudjuk biztosítani, akik 2018. évi tagdíjukat rendezték. Felhívom ugyanakkor szíves figyelmüket arra a lehetőségre, hogy tagdíjuk megfizetését esetleg munkahelyük is átvállalhatja. Továbbá felhívom szíves figyelmüket az **önkéntes többletfizetés lehetőségére.** Kérem, hogy a leírtakra – különösen az utóbbira – külföldön élő ismerőseiknek is hívják fel a figyelmét. Nekik a *Fizikai Szemlét* elektronikus formában, e-mailen küldjük el; ha nyomtatott Szemlét kérnének, akkor kérjük, a lényegesen magasabb postázási költséget vegyék figyelembe.

Az újonnan belépni kívánók a Társulat honlapján jelentkezhetnek társulati tagnak: ***http://elft.hu/jelentkezes-a-tarsulatba/***.

Amennyiben lehetőségük van rá, kérem, hogy a **tagdíj befizetését átutalással** szíveskedjenek rendezni a **K&H Banknál vezetett 10200830-32310274-00000000** számú folyószámlánkra. A közlemény rovatba a befizető nevét, városát kérjük feltüntetni. A Titkárságon (1092 Budapest, Ráday utca 18. fsz./3.) lehetőség van készpénzes befizetésre is, illetve csekk is kérhető.

Az EPS-be a továbbiakban csak egyéni tagként lehet belépni. **Kérem a kollégákat, hogy a hazai fizika megfelelő képviselete érdekében az EPS-be minél nagyobb számban lépjenek be.** Az EPS-be annak weblapján, a ***www.eps.org*** címen lehet belépni; ugyanott fizetheti be az EPS-tagdíjat is. Mivel az ELFT az EPS tagegyesülete, az ELFT tagjai az EPS legkedvezőbb egyéni tagdíját fizetik.

Felhívás tagjainkhoz és a fizika minden barátjához

Tájékoztatom a Társulat tagjait és a *Fizikai Szemle* olvasóit, hogy a 2016. évről szóló személyi jövedelemadó-bevalláshoz kapcsolódó felajánlások révén a Társulat 2017-ben **758 531 Ft** bevételhez jutott, amit a korábbi évekhez hasonlóan teljes egészében a *Fizikai Szemle* megjelentetési költségeinek részbeni fedezeteként használtunk fel. Ez a támogatás tette lehetővé többek között azt is, hogy tagjaink folyamatosan megkaphatták társulatunk folyóiratát, amiért köszönetünket fejezzük ki a Társulat javára rendelkezőknek. Kérem a fizika minden barátját, hogy ha teheti, az idén is rendelkezzen **személyi jövedelemadója 1%**-ának a Társulat céljaira való felajánlásáról és buzdítsa erre barátait, ismerőseit is. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak a nyilatkozaton feltüntetendő adószáma **19815644-2-43.**

Tisztelettel:
Groma István
az ELFT főtitkára

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Mathematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Mathematikai és Physikai 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

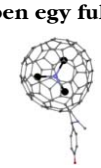
Műszaki szerkesztő:
Kármán Tamás

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 világ legkisebb (Guinness rekordok könyve, 2005) kémcsövének elektronmikroszkópos képe (Andrei Khlobystov, Nottinghami Egyetem). A 4 nm^3 (4×10^{-24} liter) térfogatú, 1,2 nm átmérőjű egyfalú, egyik végén zárt szén nanocsőben egy fullerénmolekula:



látható. Kamarás Katalin írásához.

TARTALOM

Tájékoztató az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2018. évi tagdíjairól 1

Gyulai József: Ionsugaras technikáktól a nanoszerkezetekig 3
Egy kiemelkedően sikeres életpálya tanulságai

Kamarás Katalin: Nanotartályok és nanoállványok 8
Szén nanoszerkezeteken alapuló hibrid anyagok előállítása és alkalmazási lehetőségei

Pekker Sándor, Földes Dávid, Kováts Éva, Bortel Gábor, Jakab Emma: Új szerves-fémkoordinációs vázszerkezetek 11
Miért váltak ezek az anyagok az anyagtudomány egyik legintenzívebben kutatott anyagcsaládjává

Radnóti Katalin: Látogatás a csernobili atomerőműben – 1. rész 16
Atomerőművi balesetek áttekintése és a csernobili baleset részletei

VÉLEMÉNYEK

Patkós András: Megjegyzések a fizika szakterületi „Shanghaj-rangsorról” 22
Milyen tényezők alapján rangsorolják a világ egyetemeinek fizika szakterületeit?

A FIZIKA TANÍTÁSA

Zátonyi Sándor: Színes kísérletek egyszerűen 25
Az emberi színlátással, az additív és szubtraktív színkeveréssel és a testek színével kapcsolatos, iskolai körülmények közt is elvégezhető kísérletek

Kilián Balázsné Raics Katalin, Sánta Imre, Knoch Júlia, Kovács Bence Tamás, Lovász Boglárka, Mester Ádám, Póla Márton, Szabó Dániel, Weisz Pál, Wensofszky Balázs: Fényutasok – Kvantumelektronika-szakkör, „lézerbarlang”-építés a gimnázium pincéjében 30
Tanulók által épített lézeres élménypince és optikai jelenségeket bemutató hely a gimnáziumban

HÍREK – ESEMÉNYEK

Gábor Dénes-díj 2017 36

Solvay-konferencia, Brüsszel 2017 (*Márk Géza*) 36

Az Eötvös Társulat kitüntetései és díjai – felhívás javaslattételre 36

J. Gyulai: From ion beam techniques to nanostructures
K. Kamarás: Nanocontainers and nanoscaffolds
S. Pekker, D. Földes, É. Kováts, G. Bortel, E. Jakab: New metal organic frameworks
K. Radnóti: Excursion to the Chernobyl power plant – part I

OPINIONS
A. Patkós: Some remarks to the “Shanghai Ranking” in physics

TEACHING PHYSICS
S. Zátonyi: Simple experiments with colours
K. Kilián-Raics, I. Sánta, J. Knoch, B. T. Kovács, B. Lovász, Á. Mester, M. Póla, D. Szabó, P. Weisz, B. Wensofszky: Quantum electronics study group – construction of a laser cave

EVENTS

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:

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

IONSUGARAS TECHNIKÁKTÓL A NANOSZERKEZETEKIG

Gyulai József
MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet
és BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Elektronikus Eszközök Tanszéke

Bevezető mentegetőzés

A jelen írást a *Szemle* főszerkesztőjének kérésére írtam, csatlakozva az Academia Europaea idei kitüntetettjeinek hasonló cikkeihez. A felkérés az ottani „Introitus"-om magyar megírásáról szólt. A hazai közösség könnyen kiszámolhatja, hogy hány éves koromban ért ez a nagy tisztesség, és rájöhet, hogy a beszámolóm inkább szakmai életrajz [1], azaz a kései beválasztás indoklása lehet, semmint friss eredményeim büszke bemutatása. A tisztesség is azé csapaté, amelyet szervezhettem és irányíthattam évtizedekig, bevezethettem a nemzetközi közösségbe, majd átadhattam hasonlóan sikeres utódaimnak. Nagy ajándék az Élettől, hogy az indító csapat, nyugdíjasokként rendszeresen találkozik ma is. Hallgatóimnak szoktam mondani, hogy a tudományos karrierhez három attribútum juttathat el: tehetség, szorgalom, szerencse. Bármelyik „kettős" már jelentős sikerre viheti az embert. Ha a tisztelt Olvasó, kedves Kollegina, Kolléga megtisztel azzal, hogy elolvassa az alábbi írást, megfejtheti, hogy az én életemet melyik attribútum, vagy netán melyik „páros" dominálta. Vagy rejtőzik egy negyedik attribútum is?

Bevezetés

Amint *Gordon Moore* konstatálta és a világ „törvénynyé" emelte, a hatvanas évek végén elindult az áramkörök bonyolultságának exponenciális növekedése.

Gyulai József akadémikus, az MTA EK MFA nyugalmazott igazgatója, az MFA és a BME emeritus professzora. Az Academia Europaea tagja. Éveket töltött amerikai, francia, német és japán egyetemeken. Vezetőségi tagja volt az Európai Anyagtudományi Társaságnak, elnökhelyettese a Nemzetközi Fizikai Uniónak (IUPAP) és az Európai Fizikai Társaságnak (EPS). Elnöke, majd tiszteletbeli elnöke az Eötvös Társulatnak. Kitüntetései: Akadémiai Díj, Munka Érdemrend, Széchenyi- és Príma Díj, Eötvös Érem.

Ebben a felszálló fejlődési ágban – az akadémiai (egyetemi) kutatások szerencséjére – nyitott volt a terep a szilárdtest-fizikai és -kémiai elvek, preparatív eljárások, illetve gyártásba is vihető ötletek alkalmazására.

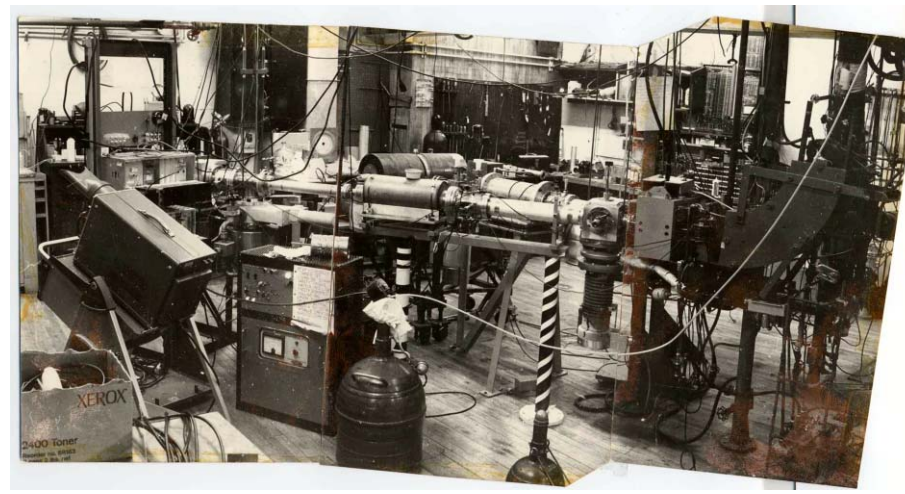
A következő fejlődési szakaszban, a nyolcvanas, kilencvenes évektől, a súlypont az ötletelésről áthelyeződött a már bevált eljárásoknak az iparban korábban ismeretlen precizitású alkalmazására, *atomi pontosságú* szerkezetek előállítására, mindez a technológiai higiéné korábban ismeretlen körülményeinek létrehozását is követelte – a tranzisztor már kisebb, mint egy porszem. Azaz ez már inkább mérnöki fejlesztés volt és szűkebb terep maradt az intuitív „felfedezőből alkalmazott" kutatásnak. A Dennard-skálázás – az arányos kicsinyítés azonos elemparamétereket (kivéve a Joule-hő fejlődését) eredményez –, mint fejlesztési elv azonban évtizedekre az emberiség segítségére jött. Most kezdi „túlkicsinyíteni" magát.

Emiatt talán ismét feltűnik a fizikai kutatás terepe, de már a kvantumfizika, az atomi mágnesség stb. szintjén, amelyekből kifejlődő technológiák a gyártási eljárásoktól megkövetelt megbízhatósági értékeket jó, ha egy-két évtized múlva képes lesznek teljesíteni.

Találkozásom az ionos technikákkal

Szegeden, *Budó Ágoston* munkatársaként a *Gombay Lajos* vezette félvezetős csapatban dolgoztam. Budó professzor által ért a szerencse, hogy egy egyéves ösztöndíjat kapjak az Egyesült Államokba 1969-ben. Az, hogy ez „a legjobbkor, a legjobb helyen" létet tette számomra lehetővé, csak később derült ki. Akkor csak örvendeztem, hogy *Jim Mayer* professzor a California Institute of Technology (Caltech) Villamosmérnöki karának fiatal professzora „bevállalta" a keleti blokkból érkezett ismeretlent postdoc-nak. Ebben, mint később megtudtam, *Harold Brown,* a president, azaz az akkori rektor – később az USA védelmi minisztere – támogatta (*1. ábra*).

Mayert[1] csak irodalomból ismertem, mint a félvezetős részecskedetektorok és a 3-5-típusú félvezetők kutatóját (ez utóbbi témába tartozott a kandidátusi értekezésem), aki nem sokkal korábban került a Caltechre a Hughes Aircraft kutatóintézetéből – szóval, *va banque* írtam neki, befogadást kérve. A kapcsolat 1974-ben, már itthonról kapott igazán lendületet, mint talán a legelső, National Science Foundation által finanszírozott USA (Caltech) – magyar (KFKI) kutatócsere-egyezmény létrejöttével. A jó két évtizedes szoros kapcsolat bele tudott szólni a világ fejlődésébe, mind az idelátogató amerikaiak, mind a munkatársaim tehetségét is bevonó eredményes kinti munka révén.



1. ábra. Caltech Kellogg laborja 1970-ben, ahol a „büszke” eredményeink születtek…

De ne szaladjunk előre: az 1969-es odaérkezésemkor kezdett a Mayer-csoport az ionimplantáció iránt érdeklődni és a Caltech híres 3 MV-os Van de Graaff-gyorsítója mellett a Rutherford-visszaszórásos és channeling (RBS+C) analitikai technikát megvalósítani. Ott tartottak, hogy elkészültek az első Si-SiO_2, Si-Si_3N_4 vékonyrétegeken felvett regisztrátumok (*2. ábra*).

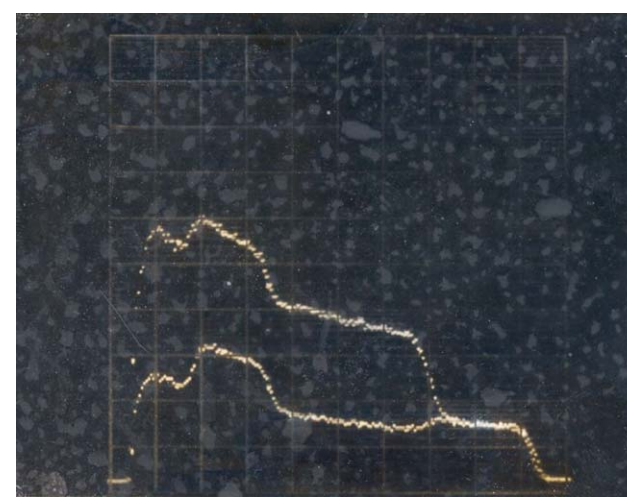
Az világos volt, hogy ezek a görbék tartalmazzák a kémiai összetételt, sőt: mélységi függésben is. Szerencsémre, Jim és *O. Meier* német vendégkutató nem jöttek rá, hogy miként kell ezt kvantitatívan kiolvasni, kiszámolni. Én, akinek magfizikusi, gyorsítós ismereteire a nulla jelző is eufemizmus volt akkoriban, egyik délután leültem a spektrumok mellé, elképzeltem, mit csinál egy, a vizsgálandó anyagba belőtt He-ion, mivel ütközik, hogyan veszíti energiája egy-egy részét mire visszafelé kilép az anyagból és eléri a detektort – és rájöttem a számításmód lényegére. Ez lett a belépőjegyem a Mayer-csapatba, sőt pár hónap múlva már meglett az első, sőt, elsőszerzős cikkem [2] – ami Mayer hihetetlen tisztességét is mutatta.

Mindez hogyan folytatódott akkor?

Val Rodriguez, a Fairchild Development akkori munkatársa,[2] korábbi Caltech PhD, 1969 őszén eljött az Alma matert meglátogatni. Jim engem bízott meg, hogy megismertessem Valt a témáinkkal. Hogy mit tudunk az RBS+C-vel mérni és mit gondolunk az akkor ígéretesként újra felfedezett ionimplantációról, *W. Shockley* tizenhét évvel korábbi, azaz a védettségből éppen kifutó találmányáról. Val – nagyszerű kutatóként – rögtön megértette az RBS lehetőségeit és attól kezdve sorban szállította nekem a mintasorozatokat érdekesnél érdekesebb témákkal. Így lett a családomtól távol töltött év végére tizenegy cikkem, ami megalapozta, hogy hazatérve elindíthassam a témát KFKI-ban – ma azt mondanók: mint egy „Lendület” programos.

Érdekesség, hogy azokban az években – mint egy személyes vitám is tanúsította 1970-ben – az Intel semmire sem tartotta az ionimplantációt, mert az általuk kitalált, az önállóságukat megalapozó megoldás-

2. ábra. Kristályos szilíciumon porlasztással előállított SiO_2 réteg – talán legelső – RBS+C spektruma, polaroid képen. Az abszcisszán a detektorba érkező He-ionok energiáját, az ordinátán az azzal az energiával beütköző, visszaszórt ionok számát ábrázoltuk, adott ionfluxus esetén. Az alsó görbe felvételéhez (111) irányban orientáltuk a becsapódó ionokat (csatornahatás), ami kiemeli az analizálandó vékonyréteg koordinátáit. A jobb szélen van a legkisebb energiát vesztett, azaz felületi Si-atomok koncentrációját mutató beütések száma, balra haladunk az anyag belseje felé; a kis tömegű O-atomokon több energiát veszítenek a He-ionok, ezért az oxigénprofil ráül a Si-atomok görbéjére.



[1] 1970-ben még tényleg lehetett – igaz, jó, azaz teljesen *tájékozott* helyen – beleszólni a nagyvilág dolgaiba… Ehhez Jim Mayer (tudományszociológiai?) zsenije is kellett. Már több helyen leírtam, hogy Jim alig olvasott szakirodalmat, de fél életét a telefonon töltötte, „fontos” emberekkel beszélgetve. Meggyőződése volt, hogy aki az irodalomból veszi témáját, legalább fél évvel el van maradva… Ezért buzdítom fiataljainkat, hogy konferenciákra járjanak, de nem az előadások meghallgatása kedvéért, hanem azokért a sörözésekért, amit fontos emberekkel harcolnak ki.

[2] Mindez egy jó évvel volt azután, hogy az Intel önállósodott, kivált a Fairchild anyacégből – és a Fairchild még nem tudta, hogy félvezető-üzletága rövidesen padlóra kerül. Az én első Caltech-évemben még teljes gőzzel folytak a fejlesztések, például az MNOS technológiáé, a Gunn-diódáé stb.

3. ábra. A Kurcsatov Intézet tömegszeparátor típusú, azaz nagyáramú 40 kV-os gépe.

sal e nélkül is tudtak egymás mellett komplementer tranzisztorokat párrá kapcsolva gyártani. Nehéz volt, de lehetséges.[3]

Életem újra a családommal – már Budapesten

Már írtam arról, hogy itthon a KFKI-ba kaptam meghívást, aminek elfogadását Budó Ágoston korai és váratlan halála, valamint utódjának témaváltási ajánlata tette lehetővé. Ezzel elindult a csapatépítés a KFKI-ban, ami néhány nagyszerű fiatal felvételét (elsőkként *Csepregi László, Keresztes Péter, Kótai Endre, Erős Magda*), valamint több KFKI-s csatlakozását jelentette (*Lohner Tivadar, Mezei Gábor,* időlegesen *Keszthelyi Lajos* csapata és mások). Vitálisan fontos lett az Egyesült Izzó vezetésének hozzájárulása több kitűnő mérnök (elsőkként *Gyimesi Jenő, Mohácsi Tibor, Schiller Róbertné,* később *Vázsonyi Éva* és *Andrási Andorné*) delegálásával, átadásával – szomorú, de többen már eltávoztak közülük. Az itthoni felkészültségünket mutatja a Kurcsatov Intézettel kötött szerződés révén kapott (*3. ábra*), valamint saját erőből épített MOS eszközök céljára fejlesztett implanterünk (*Pásztor Endre*) képe (*4. ábra*).

Következzék végre annak összegzése, hogy melyek lettek azok az eredmények, amelyek a Gyulai-csapattal megerősített Mayer-csoport, illetve – talán mondhatjuk – a Mayer–Gyulai-csapat ért el. Mielőtt a tisztelt Olvasó rákérdez, be kell vallanom, hogy a legfontosabb eredmények a Caltech-beli tartózkodásaink idején keletkeztek, mert a Mayer-tanszéken, mint „karavánszeráj"-ban, naponta megfordultak a vezető ipari és akadémiai intézetek munkatársai, és nem csak a korszerű, de a világot itt-ott leelőző tudásunk is fenntartható volt. Itthon? Itt is sok, elismert cikk született, főleg az RBS technikája terén, mind a magunk, mind az itt dolgozó amerikaiak részvételével, a nemzetközi közösség befogadott bennünket, de feladatunk főleg az áramkörök reprodukciója volt. Sajnos, még az egyszerűbb eredményeinket sem tudta az Egyesült Izzó átvenni, alkalmazni. A Mikroelektronikai Vállalat leégése okán később se tudtunk a hazai félvezetőipar sikerre vitelén bábáskodni. Átálltunk a szenzorikai kutatásokra, ami a KFKI-beli infrastruktúrával mindmáig sikerrel végezhető. A KFKI-nak a nyolcvanas években volt egy kitérője a buborékmemória felé (*Zimmer György* vezetésével), de az a világban lecsengő ötletnek bizonyult. Sok technika, például a fotolitográfiás eredményeik azonban mindmáig szerepelnek az arzenálunkban.

A Moore-törvényre is kiható eredményeink

1974. nyári ott-tartózkodásomkor küszködtünk azzal, hogy bizonyos implantált minták hőkezeléssel jó kristállyá kristályosodtak vissza, mások meg ellenálltak. Kiderült, hogy a különbség az alapkristály orientációjában volt: az akkortájt standard (111) orientációjú min-

4. ábra. A saját fejlesztésű 150 kV-os, a bal oldalon lévő tiszta laborba „szolgáló", precíz adalékolásra alkalmas implanter, SAFI.

[3] Az Intel koncepcióváltását már itthon tudtam meg, amikor a nekem első Caltech PhD-sunkat, *Richard D. Pashley*-t az Intel 1975-ben alkalmazta. Dick rászolgált erre a flash memory későbbi feltalálásával, ami vice-CEO-vá tette. Ma egy processzor gyártásában több, mint húsz implantációs lépés van az Intelnél is.

ták nem, de az (100) orientációban növesztett, illetve vágott szilíciumba implantált adalékok kiválóan beépültek. Azaz az implantációs technika „kedveli” ezt az orientációjú alapanyagot. Ez időben összeesett azzal a párhuzamos tapasztalattal, hogy a SiO_2 is jobb minőségben nő az (100) felületen. E két eredmény együtt paradigmaváltást okozott a világ szilíciumkristály-iparában: standarddá vált az (100) orientációjú alapanyag. Az implantáció – általunk is generált – presztízsnövekedésében ez lett az első lépés [3]. Elindult az eljárás a „fizikusi játék”-ból „ipari technológiá”-vá válás felé.

De még kellett egy lépés… Ennek professzionális kidolgozására a korán elhunyt első postdoc-unk, Csepregi László Caltech-beli szorgalmára volt szükség.

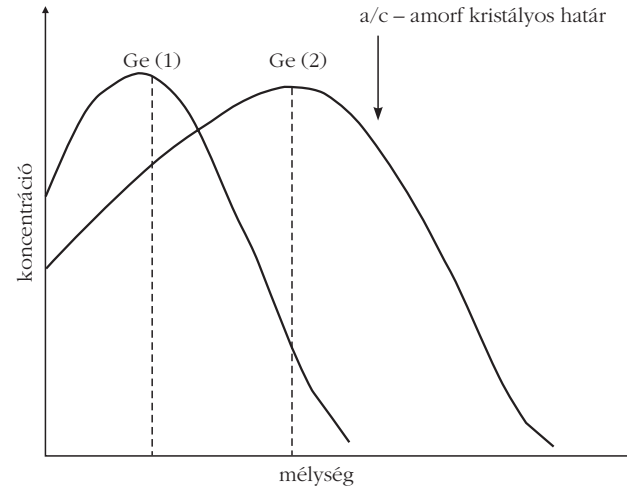
Az implantált ionok fékeződése az alapanyag atomjaival való kölcsönhatás révén jön létre, azaz az energiát a rács veszi fel, ionkaszkádok keletkeznek. Ennek magfizikai elméletét a Bohr-iskola tagjai dolgozták ki – de amorf anyagra. A megállt ionok ilyen anyagban Gauss-eloszlást mutatnak. Igenám, de áramköreinket kristályos szilíciumban alakítjuk. Itt az atomi sorok csatornákat alkotva reprodukálhatatlan mélységbe kormányozhatják az ionokat, azaz a pn-átmenet helye indefinit (ahol a belőtt p-adalék koncentrációja eléri az alapanyag n-adalék koncentrációját). Ezt korábban úgy enyhítették, hogy 7°-kal elorientálták az alaplemezt – ekkor a rács az ion számára közelítőleg amorf. Ez azonban csak részmegoldásnak bizonyult. Itt lépett be csapatunk egy ötlettel [4], amely preamorfizáció (PreAmorphization Implant) néven vált ismertté: „saját”, azaz Si-ionokkal amorffá bombázzuk az alaplemez felszíni rétegét. Az adalékot ebbe az amorf rétegbe lőjük. Ezt követően elegendő egy alacsonyabb hőfokú hőkezelés a rácshibák eltüntetésére és az adalék aktiválására (rácspontba juttatására). Ez a Moore-törvény későbbi méretkövetelményei miatt lett fontos: a diffúzió mára káros hatás, az a cél, hogy oda és annyi iont juttassunk, amennyit a feladat megkövetel.

Ezt trükköt alkalmaztuk a sugárzásálló áramkörök egyik első, sikeres változata, a zafíron növesztett szilíciumréteg kristályminőségének javítására. Ez az eljárás évtizedre standarddá vált az USA iparában (egy Hughes-munkatárs visszajelzése, 1984) [5].

A National Science Foundation által finanszírozott Caltech–KFKI együttműködés zárójelentése 32 közös cikket tartalmazott.

Európai kapcsolatok, Párizs és Erlangen

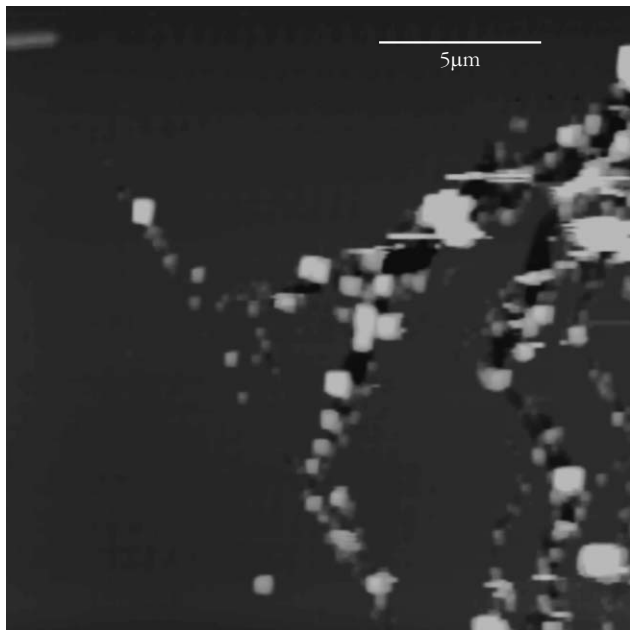
A nyolcvanas évek közepén – a KFKI-beli feladataim miatt – már nehézséget okoztak az amerikai tartózkodásaim, ezért örömmel fogadtam el a Physique des Solides CNRS (Université Paris VII) csoport magyar származású, Jim révén megismert vezetője, *Georges Amsel* hívását. Gyuri az ionsugaras analízis egyik világtekintélye volt. Két egymás utáni évben ott töltött hónapok visszakormányoztak az integrált áramköri világból az ionsugaras analízis művelői közé, főleg a néhány MeV energiájú ionokkal kelthető magátalakulások világába és – munkatársaim (elsősorban *Battistig Gábor,* Vázsonyi Éva, *Szilágyi Edit, Manuaba Ashrama*) révén ismét évtizedes cserekapcsolattá bővültek. A csapat európai presztízsét munkálta tovább *Pászti Ferenc* barátom, aki zseniális technikai ötleteivel az Ibériai-félsziget országaiban vált az ionsugaras laboratóriumok egyik fő szervezőjévé – akkor, amikor ezek az országok lettek az EU strukturális alapjai fő kedvezményezettjei (a spanyol és a portugál tervek szakmai tanácsadói közé jómagam is bekerülhettem – ez volt az első EU-tapasztalatom).



5. ábra. Kettős sajátionokkal való implantációval elérhető, hogy olyan területeket hozzunk létre, ahol a vakanciadús réteget intersticiálisokban dús réteg fedi át – erősítve a hibamentes visszanövés feltételeit.

1988-ban azonban az én vendégkutatói életem más irányt vett. *Heiner Ryssel* professzor – KFKI-beli első nyugati vendégeim egyike még a hetvenes évekből –, aki akkorra az erlangeni Friedrich-Alexander Egyetem Mérnökkarán az Elektronikus Eszközök Tanszék vezetője és – perszonálunióban – az ott induló és erősödő „Integrierte Schaltungen” Fraunhofer-Intézet (IIS-B) vezetője lett, egy „open” meghívást ajánlott: ahogy azt a KFKI-s munkám engedi, vendégprofesszorként szinte korlátlan időt tölthetek náluk. Ez a meghívás dominálta következő két évtizedemet és a KFKI-s csapatom máig tartó kapcsolatait. A szakmai kapcsolatot mára a KKFI-ban Lohner Tivadar kezdeményezésére, majd *Fried Miklós* és *Petrik Péter* munkája nyomán felfejlődött optikai módszer, az ellipszometria alkalmazása teljes Si-szeletek felületi rétegeinek analízisére dominálja. Én abban a személyes szerencsében részesültem, hogy az évtizedek alatt hét erlangeni fiatal doktori munkájának érdemi témavezetője, pontosabban „Zweitgutachtere” lehettem, zömük ma fontos beosztásban dolgozik a német iparban.

Az implantációnál maradva, erlangeni életemből egy eredményt említenék, amely *Christine Dehm* témájaként vezetett a doktori fokozatához. „Defect engineering” lett összefoglaló neve azon évtizedes programnak, amely az ionimplantáció megmaradt, illetve fellépő problémáit igyekezett megoldani, csökkenteni. A kifejezés azt jelenti, hogy ezen téma keretében a defektek rekombinációját úgy is javították, hogy tudatosan



6. ábra. Szilícium oldallapját 200 MeV energiájú Kr-ionokkal besugározva, a kaszkád vége, azaz az utolsó kiütött atomok láthatóvá válnak a valódi felületen. Ez az ábra felkerült az IBM honlapjára, mint az ionbehatolás szimulációjának, az SRIM-nek kísérletes bizonyítéka (J. F. Ziegler).

hoztak létre olyan defekteket az anyagban, amelyek a „kellemetlen" defektek fajtáival olyan reakcióba lépnek, amely (jobb) rekombinációhoz vezet. Kiderült ugyanis, hogy a preamorfizáció sem panácea: az implantáció által meglökött atomok ugyanis beljebb hatolnak. Emiatt a felszínhez közel vakanciajellegű, beljebb viszont intersticiális jellegű hibák dominálnak. Azaz a felület közelében hiányoznak atomok, beljebb meg feleslegben vannak. Az volt Christine Dehm (Siemens) témája, hogy két eltérő energiájú Si-ionokkal amorfizálva, ott is lehet többlet atomokat létrehozni, ahol az első implantáció révén vakanciák domináltak (a két szaggatott vonal közötti részben; *5. ábra*) [6].

Itthon, a műegyetemi oktatás mellett Csillebérc maradt a „hazám"

Azok a témák, amelyekhez közöm volt vagy lett, szakmailag vagy „csak" szervezetileg, először a KFKI szétesésekor váltak önálló intézetté. Később, az MFKI-val Csillebércen összeolvadva, gazdagodva, szélesedve lettünk sikeres intézet. Mára igazgató utódaim, *Bársony István,* majd *Pécz Béla* vezetésével az Energiatudományi Kutatóközpontban landoltunk Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetként (MFA). A mai eredményeket az Évkönyvekből lehet legjobban követni.

De egy témát, a nanotudományt már a választott cím, a „Nanoszerkezetek" miatt is befoglalok, mint az életemre kiható, fontos lépést. A kilencvenes években sikerült elnyernünk egy hazai pályázatot, amellyel extrém nagy energiájú ionokat, azaz besugárzást „vásárolhattunk" a dubnai Egyesült Atomkutató Intézetben (IIYaI-JINR). Ezen a ponton *Havancsák Károly* (ELTE), aki bejáratos volt Dubnába, lett a mediátorunk. Előbb szép kísérleteket végeztünk, mint például amikor a Si-kristály oldallapját sugározva be többszáz MeV-es Kr-ionokkal, a valódi felületen az ionkaszkád végső pillanatait tudtuk láthatóvá tenni atomerő mikroszkóppal (*6. ábra*) [7].

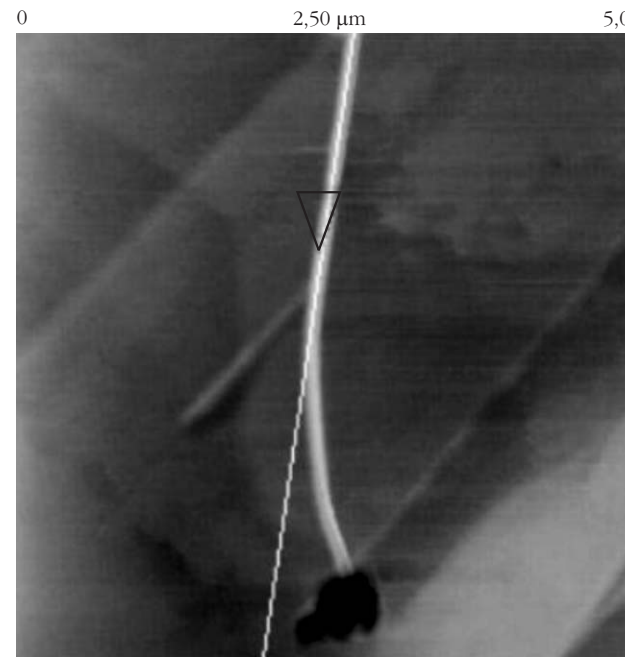
A következő azonban több, mint „szép" eredmény lett: teljesen új irányba kormányozta a – ma Biró-csapatként ismertté vált – csoportunk munkáját.

Az a szerencsés véletlen csatlakozott hozzánk, hogy jól orientált grafitot (Highly Oriented Graphite, HOPG) is választottunk ezen extrém gyors ionok hatásának tanulmányozására – a pásztázó szondás módszer ugyanis nagyon alkalmas ezen anyag vizsgálatára. Az történt, hogy a besugárzott minták felszínén, a kilépő kráterből kiindulva mikron méretű „szálakat" találtunk (*7. ábra*). 1993-at írtunk, ami a szén nanocsövek *Iijima* általi felfedezésének éve volt. Biró Lászlóban merült fel a gyanú, hogy mi is nanocsöveket állítottunk elő. A bizonyításhoz azonban meg kellett várnunk az erlangeni pásztázó szonda üzembe állítását, amellyel kiderítettük, hogy a kráter atomjai valóban nanocsövekké kondenzálódtak. Az is kiderült, hogy Xe-ionok egyfalú („sűrű" kaszkád, gyors lehűlés, „quench"), a Ne (kevésbé sűrű kaszkád) pedig többfalú nanocsövekké kondenzál [8].

Befejezés

Ha volt türelme, netán érdeklődése a tisztelt Olvasónak, Kolleginának, Kollégának végigolvasni ezt a beszámolót, megérti a bevezető mentegetőzésem mondatait. Bárhogy is alakult, nagyon köszönöm azt a

7. ábra. Orientált grafit (HOPG) besugárzása 210 MeV energiájú Ne-ionokkal. A kilökött szénatomok kráteréből kilépő „gőz" szén nanocsövekké kondenzálódik.



munkát, amelyet ajánlóim a sikeres javaslatomra fordítottak. Igyekeztem bemutatni, hogy egy baráti-szakmai kollektíva milyen széles tematikai kört képes felölelni, és amely egy-egy szerencsés egyén kiemelkedését hozhatja, ami viszont kötelezettségeket is vonz, mert a kitüntetés az egész csapaté.

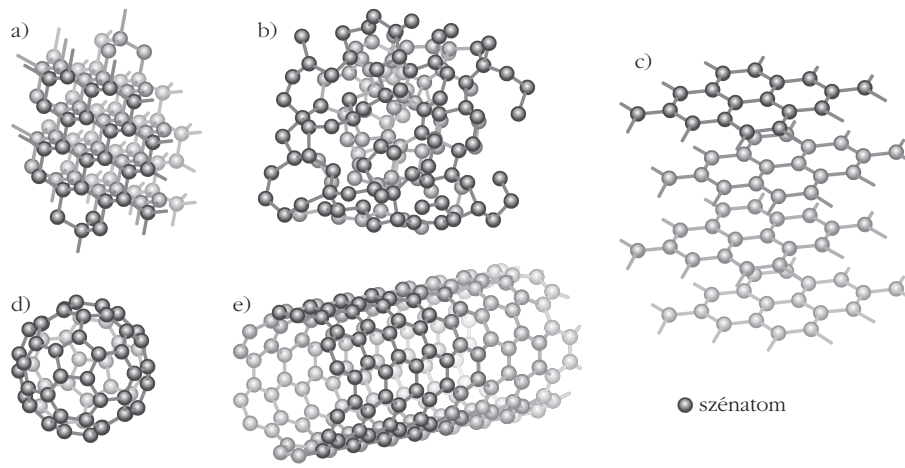
Irodalom

1. http://mek.oszk.hu/11600/11676
2. J. Gyulai, O. Meyer, J. W. Mayer, V. Rodriguez, *Appl. Phys. Lett. 16* (1970) 232.
3. H. Müller, W. K. Chu, J. Gyulai, J. W. Mayer, T. W. Sigmon, T. R. Cass, *Appl. Phys. Lett. 26* (1975) 292.
4. J. W. Mayer, L. Csepregi, J. Gyulai, T. Nagy, G. Mezey, P. Revesz, E. Kotai, *Thin Solid Films 32* (1976) 303; L. Csepregi, E. F. Kennedy, T. J. Gallagher, J. W. Mayer, T. W. Sigmon, *J. Appl. Phys. 48* (1977) 4234.
5. S. S. Lau, S. Matteson, J. W. Mayer, P. Revesz, J. Gyulai, J. Roth, T. W. Sigmon, *Appl. Phys. Lett. 34* (1979) 76.
6. C. Dehm, J. Gyulai, H. Ryssel, *Appl. Phys. Lett. 60* (1992) 1214.
7. L. P. Biró, J. Gyulai, K. Havancsák, A. Yu. Didyk, S. Bogen, L. Frey, *Phys. Rev. B 54* (1996) 11853–11856.
8. L. P. Biró, J. Gyulai, K. Havancsák, *Phys. Rev. B 52* (1995) 2047–2053.

NANOTARTÁLYOK ÉS NANOÁLLVÁNYOK

Kamarás Katalin
MTA Wigner FK SZFI

A szén az egyik legsokoldalúbb elem. Számos vegyület – amelyeket szerves anyagok, polimerek néven ismerünk, és amelyekből az élővilág felépül – fő összetevője. Ugyanakkor az elemi szén maga is több változatban fordul elő, a grafit, a gyémánt, a korom, az „orvosi szén” mind ugyanazon elem valamelyik változata.



1. ábra. Az elemi szén módosulatai: a) gyémánt, b) amorf szén – a grafit és gyémánt polikristálya, c) grafit, d) fullerén, e) nanocső (Jojko Sivek, Wikimedia).

Szén nanoszerkezetek

Kutatócsoportomban hosszú évek óta foglalkozunk elemi szénre épült nanoszerkezetekkel. Ezek alapja a szén valamelyik nanoméretű formája, amelyek mindegyikét az elmúlt évtizedekben fedezték fel. A sort a fullerének nyitották 1985-ben, ezek szénből felépülő gömbhéjak, legismertebb közülük a futball-labda alakú C_{60} [1–3]. Felfedezésükért *Harold Kroto, Robert Curl* és *Richard Smalley* 1996-ban Nobel-díjat kaptak. A sorban következő szerkezetek a szén nanocsövek voltak, amelyeket egy grafitsík feltekerésével keletkező hengerként tudunk elképzelni (*1. ábra*), ezeket *Sumio Iijima* fedezte fel 1991-ben [4]. A grafitsík, azaz a grafén sem sokáig maradt elméleti absztrakció: újabb bő évtized múlva *Andre Geim* és *Konstantin Novoselov* figyelte meg az első egyatomos szénréteget, amiért 2010-ben őket is Nobel-díjjal jutalmazták [5].

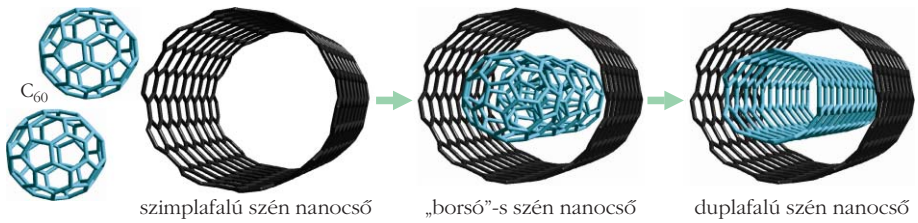
Szén nanoszerkezetekből készült hibrid anyagok

A fent bemutatott szerkezetek egymással és egyéb szerves vagy szervetlen molekulákkal tovább kombinálhatók, és ily módon igen változatos tulajdonságokkal rendelkező anyagokat lehet létrehozni. A „hibrid anyag” elnevezés egy szerves és egy szervetlen alkotórész kombinációját jelenti, itt a szén a szervetlen összetevő.

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

A szerző köszönetet mond kutatócsoportja jelenlegi és volt tagjainak: *Botka Beának, Datz Dánielnek, Horváth Juditnak, Németh Gergelynek, Pekker Áronnak, Pergerné Klupp Gyöngyinek, Tőháti Hajnalkának*, a Wigner kutatóközpontban együttműködő kollégáknak: *Kováts Évának, Pekker Sándornak* és *Veres Miklósnak*, valamint hazai és külföldi partnereknek: *Székely Editnek* (BME Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék), *Rudi Hacklnak* (Bajor Tudományos Akadémia Walther Meissner Intézet), *Forró Lászlónak* és *Horváth Endrének* (Lausanne-i Szövetségi Műszaki Egyetem) és *Andrei Khlobystovnak* (Nottinghami Egyetem). A munkát az OTKA és az Európai Unió támogatta.

Kamarás Katalin (1953) okleveles vegyészként végzett az ELTE-n. Tudományos munkáját az MTA KFKI Szilárdtestkutató Intézetében kezdte és itt, illetve jogutódjaiban folytatta. Jelenleg az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének kutatóprofesszora, az MTA rendes tagja. Kutatási területe új anyagok spektroszkópiai tulajdonságainak vizsgálata. Az ELFT Díjbizottságának elnöke.



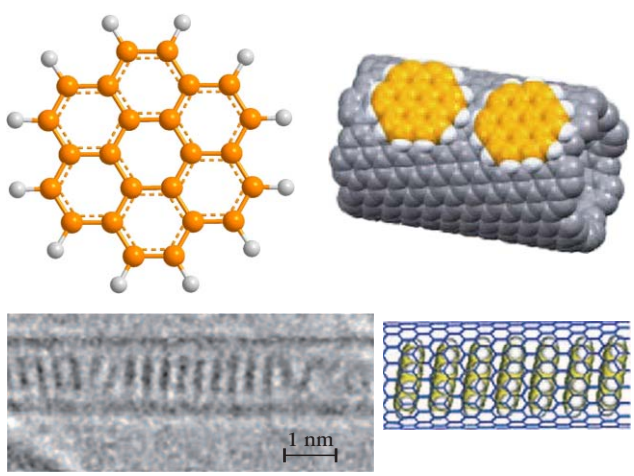
2. ábra. Fullerénmolekulákkal töltött szén nanocső („borsó”) és az abból hőkezeléssel keletkezett duplafalú nanocső [7].

Kétféle hibridet különböztetünk meg: a felülethez „horgonyzott”, illetve az üreges anyagok (fullerének, nanocsövek) belsejébe zárt kis molekulákat. Előbbi esetben „nanoállványokról”, utóbbiban „nanotartályokról” beszélünk. A hibrid szerkezetek a szénváz mechanikai és kémiai stabilitását a molekulák speciális funkcióival egyesítik. Egyedi kémiai reakciók játszódhatnak le a nanotartályok belsejében, hiszen a speciális geometria csak bizonyos irányokban engedi kötések létrejöttét. A nanotartályok másik fontos felhasználási területe a bezárt molekulák (például gyógyszerek) szállítása lehet. A nanoállványokhoz rögzített funkciós csoportok – mintegy molekuláris ragasztóként – alkalmasak más nanorészecskék felülethez való rögzítésére.

Szén nanocsövek töltése: nanotartályok

A töltés módszere többféle lehet. Könnyen párolgó vagy szublimáló anyagokat nanocsövekkel együtt vákuumba vagy inert atmoszférába helyezve, a gázfázisba kerülő vendégmolekulák a csövek nyitott végein bediffundálnak a belső térbe. Vajon miért maradnak ott? Mert a csövek falához és egymáshoz is másodlagos, van der Waals-kötésekkel kapcsolódnak. Hőre érzékeny anyagokra ez az eljárás nem alkalmazható, ilyenkor oldatból kell kiindulni. Az oldatból való töltés feltétele, hogy a vendégmolekula és a nanocső közti kölcsönhatás erősebb legyen, mint az oldószeré akár a molekulával, akár a nanocsővel. Még így is nagy a valószínűsége, hogy a nagy feleslegben levő oldószer-molekulák nem maradéktalanul távoznak el a hibrid anyagból. Azonban van egy olyan oldószer, amivel e probléma megkerülhető, ez a szuperkritikus állapotú szén-dioxid. A szuperkritikus állapot nem sokkal szobahőmérséklet fölött, 100 bar nyomás körül következik be, és a gázok és folyadékok számos előnyös tulajdonságát kombinálja: gázként tud áthatolni porózus anyagokon, és oldószerként viselkedik molekulákkal szemben, így ebben a közegben nagyon hatásosan lehet megoldani a vendégmolekulák transzportját, a reakció végeztével pedig a szén-dioxid visszaalakul gázzá és nem marad szennyezőként a termékben. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszékének szuperkritikus folyadékokra szakosodott laboratóriumával [6] való együttműködésünk több hibrid anyag vizsgálatát tette lehetővé. Ezek közül a leglátványosabb a C_{60}-molekulákkal képzett „borsó”. A borsók hevítéskor belső nanocsővé alakulnak (*2. ábra*).

3. ábra. Koronén kölcsönhatása nanocsövekkel: felül balra a koronénmolekula, jobbra a felületre (nanoállvány) adszorbeált koronénmolekulák, alul nanotartályba töltött koronénmolekulák TEM-képe és modellje [7].



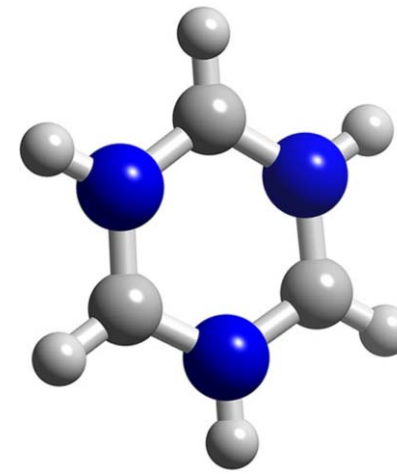
Szén nanocsövek felületi módosítása

A sík szerkezetű koronénmolekula arra példa, hogy a körülmények változtatásával a nanocsöveket miként lehet nanotartálynak és nanoállványnak is használni. A *3. ábra* középső része egy szorosan illeszkedő, nanotartályba töltött koronénoszlopot mutat, ami akkor keletkezik, ha a nanotartály átmérője éppen a vendégmolekuláénak felel meg. Ha annál lényegesen kisebb, akkor az alsó képen bemutatott eset valósul meg, és a molekulák a felülethez kötődnek. Természetesen mind a két eset egyszerre is megvalósulhat, de ilyenkor a felületre adszorbeált molekulák megfelelő oldószerrel lemoshatók, míg a tartályban levők nem oldódnak fel. A külső molekulák észlelhetők, mivel lumineszcenciát mutatnak, a belsőket viszont csak elektronmikroszkóppal lehet kimutatni. Elektronmikroszkóppal követhetők a cső belsejében lezajló reakciók is, amelyek végül itt is egy belső nanocső képződéséhez vezetnek, de valószínűleg egy érdekes köztiterméken, az úgynevezett grafén nanoszalagon keresztül. Ezek a szalagok grafénből való igen pontos kivágással is előállíthatók (ezzel *Tapasztó Levente* kutatócsoportja foglalkozik az MTA EK MFA-ban), az ilyen „alulról felfelé” építkezés ezeket a módszereket egészíti ki, ezzel is hozzájárulva a szén alapú nanoelektronikához.

Egy másik, nemrégiben az érdeklődés középpontjába került anyagcsoport is hatásosan kombinálható szén nanocsövekkel. A perovszkit-típusú, ólom- vagy ónhalogenidekre épülő fotovoltaikus anyagokról van szó, amelyek az eddigieket sokszorosan meghaladó hatásfokkal alkalmazhatók napelemekben. A réteges szerkezetű napelemekben az egyes rétegek szerepe

és kölcsönhatásuk meghatározó. *Forró László* lausanne-i csoportjában a hatásfokot azzal növelték, hogy nanoszerkezetű perovszkit tűkristályokat, nanodrótokat növesztettek. Ha ezeket nanocsövek felületére visszük fel, természetesen kombináljuk a hordozó mechanikai stabilitását a fényérzékeny perovszkit funkciójával, de azt is meg tudtuk mutatni, hogy az alkotórészek között elektromos kölcsönhatás is fellép: a perovszkitban fény hatására megjelenő töltéshordozók a nanocsőben, mint vezető rétegben tudnak továbbterjedni. Az ezirányú erőfeszítések remélhetőleg új, különleges napelemek kifejlesztéséhez járulnak majd hozzá (*4. ábra*).

4. ábra. Ólomjodid alapú perovszkit nanodrótok szén nanocső hordozón. Optikai mikroszkópos felvétel.



5. ábra. A bórazin – $B_3N_3H_6$ – molekula.

Bórnitrid nanocsövek

Látómezőnket a szén periódusos rendszerbeli két szomszédjára, a bórra és a nitrogénre kiszélesítve olyan vegyület, a bórnitrid található, amely elektronszerkezete hasonlít a szénéhez. Ez a szerkezet úgy épül fel, hogy a nitrogénatom a külső elektronhéjáról egy elektront átad a bórnak. Mivel a két atom elektronvonzó képessége (elektronegativitása) különböző, az átadott elektronok nem alkotnak delokalizált kovalens rendszert, hanem az atomtörzsekhez kötve maradnak, amit a köztük fellépő Coulomb-kölcsönhatás tovább stabilizál. A bórnitrid alapú nanoszerkezetek alapegysége a benzollal analóg bórazin (*5. ábra*).

A bórazinból a szénanalóghoz igen hasonló nanocsöveket lehet felépíteni, azzal a különbséggel, hogy míg a szén nanocsövek jó elektromos vezetők és a látható fény nagy részét elnyelik, a bórnitridból készültek átlátszók és szigetelők. Bár a bórnitrid nanocsövek átmérője nagyobb, és általában többfalúak, ezek is alkalmasak töltésre. A *2. ábrán* bemutatott módszerrel olyan duplafalú nanocsövet sikerült létrehoznunk, amelyben egy vezető belső csövet vesz körül egy szigetelő réteg, azaz egy nanoméretű árnyékolt vezetéket (*6. ábra*). Ehhez hasonló hibrid szerkezetek nagy jövő előtt állnak a nanoelektronikában.

Összefoglalás

Őszintén remélem, hogy e rövid áttekintésben ízelítőt tudtam adni a modern anyagtudomány egy olyan területéről, ahol fizikusok, vegyészek és műszaki szakemberek együttműködve tudnak hozzájárulni új, az életünket egyre könnyebbé tevő technológiák fejlődéséhez. Szeretnénk, ha a nem túl távoli jövőben ezt a munkát az élettudományok felé is ki tudnánk bővíteni.

Irodalom

1. Braun T.: *A káprázatos C_{60} molekula*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996.
2. Faigel Gy.: Fullerének. *Fizikai Szemle 44* (1994) 349–351.
3. Kamarás K. A természet futball-labdái. *Természet Világa 123* (1992) 99–101.
4. Kónya Z., Biró L. P., Hernádi K., B. Nagy J., Kiricsi I.: Szén nanocsövek előállítása, tulajdonságai és alkalmazási lehetőségei. *A kémia újabb eredményei 90,* 121–299, Akadémiai Kiadó, Budapest, 2001.
5. Márk G. I., Vancsó P., Biró L. P.: Lehet-e tökéletes nanoelektronikai eszközöket készíteni tökéletlen grafénből? *Fizikai Szemle 63* (2013) 381–385.
6. Székely E., Simándi B.: A szuperkritikus szén-dioxid alkalmazásai. *Magyar Kémiai Folyóirat – Kémiai Közlemények 120* (2014) 23–25.
7. Botka B., Ph.D. disszertáció. BME, 2016.

6. ábra. Belső szén nanocsőből és külső bórnitrid köpenyből álló „árnyékolt nanokábel", a *Small Methods* folyóiratban megjelent cikkünk ihlette annak címképét.

ÚJ SZERVES-FÉMKOORDINÁCIÓS VÁZSZERKEZETEK

Pekker Sándor,[1,2] Földes Dávid,[1,3] Kováts Éva,[1] Bortel Gábor,[1] Jakab Emma[4]
[1]MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai Intézet
[2]Óbudai Egyetem, Rejtő Sándor Környezetmérnöki Kar
[3]Óbudai Egyetem, Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola
[4]MTA Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet

A szerves-fémkoordinációs vázszerkezetek (Metal Organic Frameworks), közismert angol rövidítéssel MOF-ok, nagy porozitású, kristályos anyagok, kémiai összetételük alapján az átmeneti- és ritkaföldfémek koordinációs polimerjei közé sorolhatók. Különleges tulajdonságaiknak köszönhetően kutatásuk egyre intenzívebb, az elmúlt másfél évtizedben a kémiai anyagtudomány legtöbbet vizsgált anyagcsaládjává váltak [1], amit jól mutat a témában megjelent több mint húszezer tudományos közlemény. Először röviden áttekintjük azokat a jellegzetességeket, amelyeknek az anyagcsalád iránti kitüntetett figyelem köszönhető. Ezt követően összehasonlítjuk az irodalomban leggyakrabban vizsgált, egyszerű köbös topológiájú (pcu) bázisos cink-karboxilát család szerkezeti sajátosságait az általunk a közelmúltban szintetizált, ezekkel analóg kubán-1,4-dikarboxilát származékával. Ismertetjük az új vázszerkezet előállítását és hőstabilitását, végül bemutatjuk a szupramolekuláris kölcsönhatások kristályszerkezetre gyakorolt hatását.

A MOF-ok hibrid anyagok, amelyek két fő szerkezeti egységből épülnek fel: a rácspontokat fémtartalmú szervetlen klaszterek alkotják, ezeket szerves molekularészekből álló élek kötik össze. Felépítési elvük moduláris, a mintegy százötven különféle csomópont [2] szinte szabadon kombinálható a több ezer lehetséges éllel, óriási számú, finoman hangolható rácsot alkotva.

Legfontosabb tulajdonságuk az, hogy a kristályrácsban a szintézis végén bennmaradó oldószer a szerkezet összeomlása nélkül eltávolítható, így szokatlanul kis térkitöltésű, ugyanakkor nagy stabilitású vázszerkezet alakítható ki, amely alkalmas kisebb molekulák, például H_2 vagy CH_4 tárolására. Belső felületük igen nagy, a Brunnauer–Emmett–Teller-izoterma alapján számolt 2000–7000 m^2/g értékek meghaladják a hasonló szerkezeti sajátosságokkal rendelkező zeolitokét és pórusos szenekét [1]. A kristályos szerkezet következtében létrejött azonos méretű és alakú pórusokat atomi vastagságú falak választják el egymástól, a pórusok közötti nyílások mérete nagy, ami gázok és kis molekulájú oldott anyagok zeolitokhoz képest 2-3 nagyságrenddel gyorsabb diffúzióját eredményezi [3]. A pórusokba beépült vendégmolekulák a szervetlen csomópontokkal és a szerves élekkel eltérő szupramolekuláris kölcsönhatásokat hoznak létre, ami erősen szelektív abszorpciót, azaz anyagkeverékek MOF-okkal történő szétválasztását teszi lehetővé. Kis pó-

A cikk az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szegedi Vándorgyűlésén, 2016. augusztus 25-én elhangzott előadás [17] írott változata.

Pekker Sándor, az MTA doktora 1978-ban végzett az ELTE TTK vegyész szakán. Az MTA Wigner FK SZFI tudományos tanácsadója, valamint az Óbudai Egyetem Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskolájának törzstagja. Fő szakmai érdeklődése a molekulakristályok és polimerek szilárdtestkémiája, ezen belül fullerének és szén-nanocsövek tanulmányozása. Jelenlegi kutatási tevékenysége új szerves-fémkoordinációs vázszerkezetek tervezése és szerkezetvizsgálata.

Földes Dávid 2015-ben végzett az ELTE TTK vegyész MSc szakán, jelenleg az MTA Wigner FK SZFI Szerkezetkutató Laboratóriumának munkatársa és az Óbudai Egyetem Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola PhD hallgatója. Szintetikus vegyészként szerves-fémkoordinációs vázszerkezetek előállításával foglalkozik.

Kováts Éva az ELTE TTK-n szerzett vegyész végzettséget, majd PhD-fokozatot is 2007-ben. 2002 óta az MTA SZFKI, majd az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont munkatársa. Szilárdtestkémia és kémiai krisztallográfia a fő érdeklődési köre.

Bortel Gábor 1993-ban végzett az ELTE TTK fizikus szakán, 1998 óta a fizikai tudomány kandidátusa. Az amerikai APS szinkrotronnál töltött kétéves időszakot leszámítva, az MTA SZFKI, jelenleg az MTA Wigner FK Szerkezetkutató Laboratóriumának munkatársa. A klasszikus diffrakció alkalmazásán túl kutatási tevékenységét az anyag és röntgensugárzás kölcsönhatásán alapuló új szerkezetvizsgálati módszerek fejlesztése és kísérleti megvalósítása jellemzi.

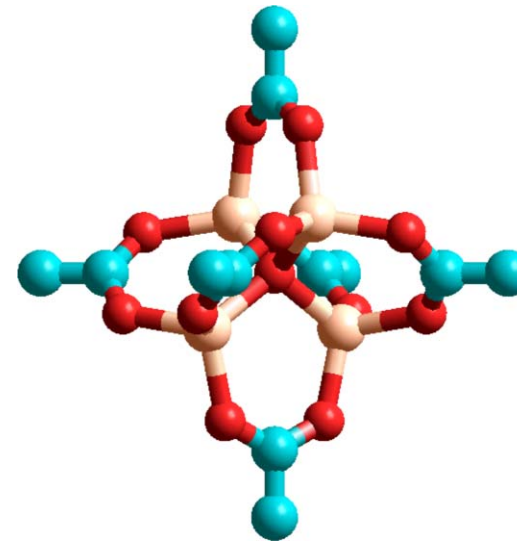
Jakab Emma 1978-ban végzett az ELTE TTK vegyész szakán. 1996-ban kapta meg a kémiai tudomány kandidátusa címet. Két évet dolgozott az Amerikai Egyesült Államokban a Utahi Egyetemen, először posztdoktori ösztöndíjasként, majd vendégkutatóként. Jelenleg tudományos főmunkatárs az MTA TTK Anyag- és Környezetkémiai Intézetében. Kutatási területe különböző szerves anyagok, elsősorban természetes és szintetikus polimerek hőbomlási reakcióinak vizsgálata.

rusméretű vázakban még H_2/D_2 keverékek is szétválaszthatók [4]. A szelektív szétválasztás egyik leglátványosabb demonstrációja történt a közelmúltban: egy körülbelül 1 mm hosszú MOF-kristályon áthaladó színes anyagkeverék komponensei szín szerint elkülönültek [5]. Ez a jelenség, mikrofluidikával kombinálva, forradalmasíthatja a kromatográfiás módszereket. Reaktív vendégmolekulák elreagálhatnak az éleken lévő szerves csoportokkal, így az eredeti vázak utólagosan módosíthatók [6] (posztszintetikus átalakítás). A csomópontok fématomjainak *d*-pályái, valamint az élek többségében előforduló π-elektronok egyaránt kémiai reakciókat katalizálhatnak [7].

A fenti gazda-vendég típusú kölcsönhatások mellett vendég-vendég típusú reakciók is végbe mehetnek. Ez utóbbiak jelentőségét a vázak topokémiai hatása adja: a méret és irány szerint korlátolt belső térben a rendezett módon beépülő molekulák csak meghatározott irányokból támadhatók, ami esetenként jelentősen lecsökkenti a reakció során képződő izomer termékek számát [9]. Polimerizációs reakcióknál két figyelemre méltó topokémiai hatást sikerült kimutatni: i) oldatban térhálót képző többfunkciós monomerből MOF-kristály üregeiben lineáris polimer képződött, ii) inhibítor segítségével elérték, hogy a reakció csak az üregekben folyjon, így a képződő termék polimerizációfoka a MOF-kristályok méretétől függött [8].

A vázszerkezet építőelemei különleges optikai (például lumineszcens) vagy mágneses fragmenseket tartalmazhatnak, amelyek tulajdonságai a vendégmolekulákkal történő kölcsönhatás miatt tovább szélesednek [10, 11]. Krisztallográfiai szempontból rendkívül ígéretes alkalmazási lehetőségnek tűnik, hogy egyes nem kristályosítható molekulák szerkezete MOF-okban történő rendezett abszorpció révén röntgendiffrakcióval meghatározható [12].

A Wigner FK SZFI-ben pár éve foglalkozunk új szerves-fémkoordinációs vázszerkezetek előállításával, szerkezetmeghatározásával, valamint szupramolekuláris és optikai tulajdonságaik tanulmányozásával. Elsődleges célkitűzésünk az volt, hogy az egyik legismertebb vázszerkezetben, a MOF-5 néven ismert bázisos cink-tereftalátban a tereftalát éleket a korábban nem vizsgált kubán-1,4-dikarboxiláttal helyettesítve, hasonló geometriájú, de eltérő kémiai tulajdonságú módosulatot állítsuk elő. A két váz geometriai hasonlóságát a tereftalát és a kubán-dikarboxilát-ionok hasonló mérete alapján várhatjuk: ezek mindössze 1 pm-rel térnek el egymástól (*2. ábra*). A kémiai különbségek pedig abból adódnak, hogy míg a tereftalát-ion delokalizált π-elektronrendszerű aromás szerkezet, addig a kubán-dikarboxilát lokalizált σ-elektronokból felépülő aliciklusos molekula. Kísérleteink egyrészt igazolták eredeti elképzeléseinket, másrészt azokon túlmutatnak: legfontosabb eredményünk az, hogy a MOF-5-tel analóg köbös vázszerkezetet sikerült előállítanunk. Ugyanakkor ez az anyag jelentős mértékű szerkezeti rendezetlenséget mutat. A kubánszármazékok polimorfiára való erős hajlama egyrészt rontotta a reprodukálhatóságot, másrészt – jelenleg

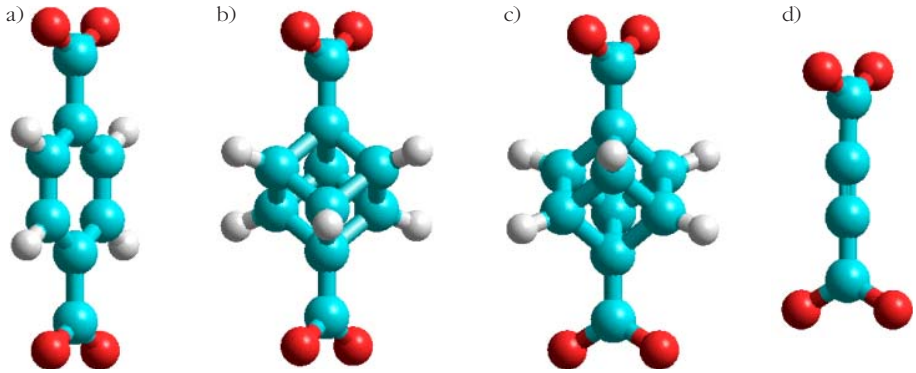


1. ábra. A bázisos cink-acetát szerkezete H-atomok nélkül. Ez az egység megegyezik a kapcsolódási irányokkal kiegészített, oktaéderes csatlakozású bázisos cink-karboxilát összetett csomópontokkal (SBU).

hat különböző szerkezetű anyagból álló – család kifejlesztését eredményezte. Az új anyagok között a MOF-5-tel analóg nagypórusú vázszerkezet mellett a legérdekesebb egy újszerű topológiájú kettősréteg és egy három, egymáson kölcsönösen áthatoló (interpenetrált) gyémánttopológiájú rács. A továbbiakban a szakirodalomból ismert IRMOF-család példáján bemutatjuk a MOF-ok fontosabb szerkezeti jellemzőit és ezeket összevetjük az általunk szintetizált köbös kubán-dikarboxilát származék tulajdonságaival.

A MOF-szerkezetek kutatásában bekövetkezett ugrásszerű növekedést *Omar Yaghi* és munkatársai indították el, miután 1999-ben szintetizálták az általuk MOF-5 névvel illetett bázisos cink-tereftalátot [13], majd a rokon szerkezetű anyagok tervezésére és előállítására kidolgozták a retikuláris kémia (hálózatok kémiája) koncepcióját [14]. A MOF elnevezés is tőlük származik: vele az új anyagok néhány sajátosságát, mint például a nagy termodinamikai stabilitást, az ezzel járó merev vázszerkezetet, a nagy pórusméretet és a többnyire összetett klaszterszerkezetű csomópontokat próbálták kihangsúlyozni. A hagyományos koordinációs polimerektől való ilyen megkülönböztetést sokan indokolatlannak tartják, ennek ellenére az elnevezés átment a köztudatba [15]. A magyar szóhasználatban további nehézséget jelent, hogy a nyilvánvalónak tűnő „fémorganikus hálózat” kifejezés nem használható, mert a fémorganikus szó fém-szén kötést tartalmazó vegyületcsaládot jelent, ami a MOF-okban, mint koordinációs vegyületekben, definíció szerint kizárt. Az ellentmondás feloldására mi a szerves-fémkoordinációs vázszerkezet/hálózat kifejezést használjuk, a nemzetközileg elterjedt MOF rövidítés megtartásával.

Az anyagcsalád archetípusának tekinthető MOF-5 pcu rácstopológiájú váz, amelynek csomópontjait oktaéderes kapcsolódású, négymagvú, bázisos cink-karboxilát klaszterek alkotják (*1. ábra*). Az ehhez hason-



2. ábra. Merev dikarboxilát-ionok konformációi: koplanáris tereftalát (a); kubán-1,4-dikarboxilát koplanáris (b) és merőleges (c) karboxilátokkal; acetilén-dikarboxilát merőleges karboxilátokkal (d).

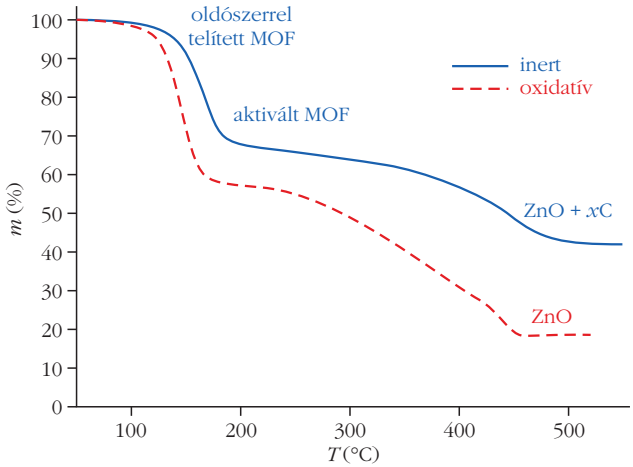
ló többmagvú (több fématomot tartalmazó) összetett csomópontokat a szakirodalomban másodlagos építőelemeknek (secondary building block, SBU) is nevezik. Ez az elnevezés megkülönbözteti őket az egyszerű koordinációs vegyületektől, amelyek primer építőelemekből, azaz fémionokból és hozzájuk kapcsolódó ligandumokból épülnek fel. A bázisos cink-karboxilát SBU-monomerekben is előfordul, alaptípusa a bázisos cink-acetát (*1. ábra*). A szerkezet egy központi O-ion köré épül fel. Ehhez tetraéderesen négy Zn-ion kapcsolódik. A karboxilát-ionok mindkét oxigénjükkel egy-egy cinkhez koordinálódnak (kétszer egyfogú kapcsolódás), ezáltal a Zn-ionok is energetikailag kedvező tetraéderes koordinációjúak lesznek. A klasztert kívülről a karboxilátok C-atomjai zárják. Ez utóbbiak a tetraéder éleinek felezőpontjai irányában egy oktaédert határoznak meg. Ezekhez az úgynevezett csatlakozási pontokhoz kapcsolódnak axiális irányokban a szerves építőelemek. Az SBU töltéssemleges, és a monomer módosulatok a koordinációs kötések ionos jellege ellenére zárt molekulákat képeznek, az acetát és a benzoát például toluolban jól oldódik.

Vázszerkezeteket úgy kaphatunk, hogy az egyszeres kapcsolódású monokarboxilát egységek helyett dikarboxilátokat építünk be. Az alaptípus MOF-5-ben a szerves komponens a tereftalát (*2.a ábra*). Mivel a tereftalát – és hasonlóképpen más dikarboxilátok – két csomópontot kötnek össze a rács topológiájának megváltoztatása nélkül, ezeket a szerkezeti elemeket éleknek nevezik. Az SBU-k és az élek nem képeznek diszjunkt rendszert, a COO-egységek mindkettőhöz hozzátartoznak. Emiatt néha az él helyett a karboxilátokhoz kapcsolódó diszjunkt molekulafragmenst tekintik önálló építőelemnek és ezt távtartó egységnek (spacer) nevezik. A tereftalát esetében a parafenilén egység a távtartó elem.

A bázisos cink-karboxilát SBU oktaéderes csatlakozási irányai egyszerű köbös topológiájú rácsot határoznak meg. Ez a topológia nem csak a MOF-5 esetében valósul meg, ez várható valamennyi olyan dikarboxilát-származéknál, amelyekben a COO-egységek a molekula ellentétes végein helyezkednek el. A kristályos váz kialakulásának további fontos előfeltétele, hogy a távtartó molekulafragmens merev legyen. Ez a feltétel leggyakrabban aromás dikarbonsavak esetében valósul meg. A MOF-5 sikeres előállítását követően Yaghi csoportja kifejlesztett egy kezdetben 16 tagból álló, később tovább bővített családot, amelynek csomópontjai bázisos cink-karboxilát, élei pedig aromás dikarboxilát egységekből állnak [16]. Az azonos rácstopológiájú, úgynevezett izoretikuláris sorozat (IRMOF) cellamérete tág határok között változik, látványosan bizonyítva az anyagcsalád moduláris építési elvét. A sorozat legkisebb rácsállandójú tagja az acetilén-dikarboxilát (*2.d ábra*) éleket tartalmazó IRMOF-0.

Merev távtartó egységeket nem csak konjugált π-kötésű, hanem feszített gyűrűs aliciklusos molekulákból is létre lehet hozni. Elsősorban ez motivált bennünket abban, hogy az intenzív kutatások ellenére elhanyagolt kubán-1,4-dikarboxilátot (*2.b* és *c ábra*) beépítsük a bázisos cink-karboxilát alapú vázszerkezetbe. A merev kubán-dikarboxilát és a tereftalátionok hasonló mérete és eltérő kémiai tulajdonságai alapján a MOF-5-höz hasonló pórusméretű, de újszerű szupramolekuláris sajátságokkal rendelkező kristályos váz képződését vártuk. Az új anyagokat a szakirodalomból ismert szolvotermális módszerrel állítottuk elő, zárt reaktoredényben, a légkörinél valamivel nagyobb nyomáson, az oldószer forráspontjához közeli hőmérsékleten. A kristályos vázszerkezetek a dikarbonsav és cink-nitrát kémiai reakciója során képződtek bázisos oldószerben, mint például az N-metilpirrolidon (NMP), vagy az N,N-dimetilformamid (DMF). A kiindulási anyagok maradékát és az esetleges melléktermékeket oldószeres mosással távolítottuk el a kristályok belsejéből, majd inert atmoszférában történő szárítás után megkaptuk a primer termékeket, amelyeken a további vizsgálatokat végeztük.

A kémiai összetételt és a hőstabilitást termogravimetriás módszerrel határoztuk meg. A néhány mgnyi mintát termomérlegben fűtöttük, miközben a tömegét mértük. A *3. ábra* a nagy pórustérfogatú vázszerkezet inert és oxidatív atmoszférában felvett termogravimetriás görbéit mutatja. A kiindulási anyag mindkét esetben oldószerrel telített MOF, mivel a kis illékonyságú oldószer (NMP) szobahőmérsékleten nem párolog el. A bomlás két jellegzetes lépésben történik. Inert atmoszférában először kvantitatív módon az NMP a 120–200 °C tartományban távozik a pórusokból, majd ettől jól elkülönülve, a 350–500 °C tartományban elbomlik az anyag, cink-oxid és szén keverékére. A 200 °C körüli plató az oldószermentes, más szóval aktivált MOF-nak felel meg. Oxidatív körülmények között az oldószer eltávozásakor már a váz bomlása is megkezdődik, ezért az első plató nem alkalmas az oldószer mennyiségének meghatározására. Ugyanakkor a minta széntartalma fokozatosan eloxidálódik, így 500 °C-on a végtermék tiszta cink-



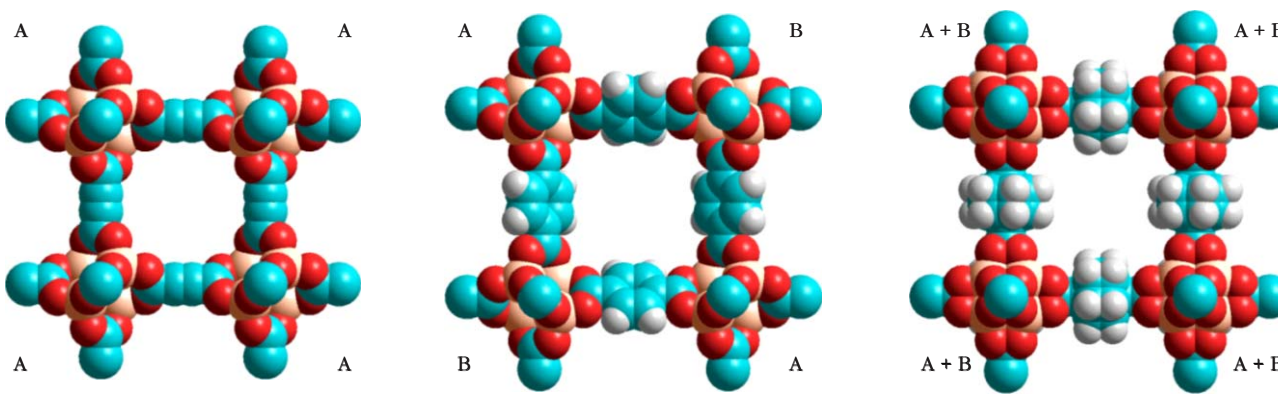
3. ábra. A bázisos cink-kubán-1,4-dikarboxilát oldószer-mentesítése (aktiválás), és kémiai összetételének meghatározása reduktív és oxidatív termogravimetriával. Az aktivált váz csak reduktív, a stabil ZnO bomlástermék pedig csak oxidatív körülmények között képződik.

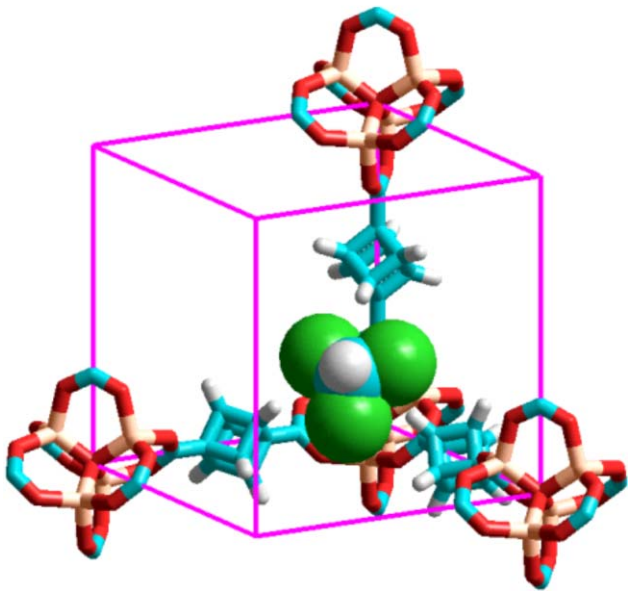
oxid. A két együttes mérésből a beépült oldószer mennyisége és a tiszta anyag sztöchiometriája megkapható. Esetünkben ez $Zn_4O[C_8H_6(CO_2)_2]_3(NMP)_6$-nak adódott.

Jó minőségű egykristályokat sikerült előállítani, amelyek szerkezetét röntgendiffrakcióval határoztuk meg. A méréseket Agilent Supernova egykristály-diffraktométerrel végeztük, a szerkezet megoldásához és finomításához a SHELX programcsomagot használtunk. A továbbiakban az egyes szerkezetek felépítési elveit elemezzük. A közös pcu rácstopológia csak annyit jelent, hogy az IRMOF-*n* sorozat, beleértve az általunk szintetizált kubánszármazékot is, köbös rácsot alkot. Ezen belül a tércsoport függ a csomópontok és az élek szimmetriatulajdonságaitól és azok orientációjától. Az oktaéderes kapcsolódású csomópontok (*1. ábra*) akkor képeznek köbös rácsot, ha a három egymásra merőleges kapcsolódási irány valamennyi csomópont esetében párhuzamos az elemi cella éleivel. Mivel az összetett csomópont tetraéderes szimmetriájú, ez a feltétel két orientáció, A és B (*4. ábra*) esetén valósulhat meg, amelyek a tengelyek körüli 90°-os elforgatással egymásba vihetők. Ha az éleknek nincs orientáló hatása, akkor a szomszédos csomópontok egymáshoz legközelebb eső karboxilcsoportjai, azaz az élek két végcsoportja között fellépő elektrosztatikus taszítás határozza meg az orientációt. Energiaminimum a két COO^--ion merőleges konformációja esetén valósul meg, mert az oxigének közti távolság ekkor a legnagyobb. Ennek felel meg az acetilén-dikarboxilát-ion szerkezete (*2.d ábra*). A töltéssemlegesség miatt a karboxilátok dipól-dipól jellegű kölcsönhatása gyenge, erősebb kompetitív kölcsönhatások könnyen túlkompenzálják. Ez történik a tereftalát-ionban (*2.a ábra*) és általában az aromás dikarboxilátokban: a konjugált π-elektronok kölcsönhatása síkalkatú molekulák esetében a leghatékonyabb. A konjugáció a karboxil-csoportokra is kiterjed, azokat is a molekula síkjába kényszeríti, mivel az ebből származó energianyereség mellett a COO^--egységek kissé erősebb taszítása elhanyagolható. A σ-kötésű kubán-dikarboxilát energiaminimuma az acetilén-dikarboxiláthoz hasonlóan a merőleges COO^--konformációnál valósul meg (*2.c ábra*), de az azonos töltésű ionok nagyobb távolsága és az ellenionok semlegesítő hatása miatt a taszítás annyira gyenge, hogy a tereftaláthoz hasonló párhuzamos konformációk is létrejöhetnek (*2.b ábra*). További rendezetlenséget okoz a molekula közepén elhelyezkedő kubánegység változó orientációja, ez feltehetően szabadon forogható a molekula tengelye, a kubán kitüntetett testátlója körül.

A karboxil-csoportok fenti konformációi meghatározzák a csomópontok orientációját, egyben a kialakult kristályrács tércsoportját. Az egyes szerkezetek – a krisztallográfiai ***a*** irányra merőleges síkban – a *4. ábrán* láthatók. Az acetilén-dikarboxilát merőleges karboxil-konformációja akkor valósul meg, ha az összes csomópont orientációja azonos. Ez $P\bar{4}3m$ tércsoportot eredményez (*4. ábra* bal oldala). Ezzel szemben a koplanáris tereftalát megköveteli a hozzá csatlakozó csomópontok alternáló orientációját, ami a cella mindhárom irányban történő duplázódását és $Fm\bar{3}m$ tércsoport kialakulását eredményezi (*4. ábra* középső része). A csomópontok a lapcentrált köbös rács tetraéderes pozícióiban találhatók. A rácspontokban és az oktaéderes pozíciókban lévő üregek kissé különböznek egymástól, mivel a p-fenilén egységek egyik eset-

4. ábra. Csomópontok és élek elhelyezkedése bázisos cink-karboxilát vázszerkezetekben. Balról jobbra acetilén-dikarboxilát, tereftalát és kubán-1,4-dikarboxilát származékok.





5. ábra. Kloroform rendezett beépülése a kubán-1,4-dikarboxilát származék elemi cellájába.

ben az élükkel, a másikban pedig a lapjukkal határolják az üreget. A kubán-dikarboxilátszármazékban a többféle rendezetlenség miatt röntgendiffrakcióval a *4. ábra* jobb oldalán látható, $Pm\bar{3}m$ tércsoportú átlagos vázszerkezetet lehet megfigyelni. A csomópontokban a tetraéderes szimmetriájú SBU-k két orientációjának szuperpozíciója nagyobb szimmetriájú, oktaéderes alakzatot eredményez. A rendezetlen kubánegységeket két, 180°-kal elforgatott molekula szuperpozíciójával szemléltetjük. Az eddigi kísérletekből sem a kubánok valódi orientációja, sem pedig a rendezetlenség statikus vagy dinamikus jellege nem határozható meg. A csomópontok és az élek rendezetlensége a szerkezet alapvető sajátossága. Ez a további alkalmazhatóságot nem befolyásolja, ugyanakkor megnehezíti a szerkezet meghatározását.

A kristályrács üregeiben lévő hat NMP-molekula orientációja szintén rendezetlen, ezért ezek eltávolítása nem csak a további alkalmazhatóság, hanem a szerkezet pontosabb meghatározása szempontjából is fontos. Az oldószer eltávolításának, azaz a MOF aktiválásának egyik módja a hőkezelés, ami a *3. ábrán* látható. Inert atmoszférában 200 °C-on az összes NMP eltávozik az üregekből. A 200 °C feletti tartományban megfigyelhető enyhe tömegcsökkenés arra utal, hogy ezen a hőmérsékleten már a vázszerkezet kis mértékű bomlása is megkezdődik. Ezt elkerülendő inkább oldószercserét végeztünk. Kloroformban történő áztatás hatására az NMP vagy a DMF kioldódik, helyettük az illékony kloroform molekulái épülnek az üregekbe. Ez utóbbiak – alacsonyabb forráspontjuk miatt – a későbbi felhasználás során könnyen lecserélhetők a kívánt vendégmolekulákra, vagy vákuumban eltávolíthatók. A kloroformmal telített kristályok szerkezetvizsgálatánál – meglepő módon – a diffrakciós csúcsok jelentős élesedését tapasztaltuk. Ezt a jelenséget a kloroform molekuláinak az *5. ábrán* látható rendezett beépülésével értelmeztük. A C_{3v} szimmetriájú $CHCl_3$ molekulák a csomópontok közelében helyezkednek el oly módon, hogy háromfogású tengelyük egybeesik a csomóponton átmenő térátlóval. Ez az orientáció azonban a klóratomok nagy mérete miatt csak úgy tud megvalósulni, hogy közben a kubánegységek is rendeződnek, ezáltal biztosítva a maximális helyet a klóratomok számára. A rendezett kubánegységek egy-egy hidrogénje szorosan illeszkedik két klórhoz (*5. ábra*). Ez a rendeződés erősen emlékeztet a *Fujita* és munkatársai által leírt „molekuláris szivacsokra" [12], és talán később alkalmas lehet kis vendégmolekulák szerkezetmeghatározására. A kialakult szerkezet természetesen nem lesz teljesen rendezett, mert egyrészt megmarad a csomópontok két véletlen orientációja, másrészt a nagy méretű üregek közepében rendezetlen kloroform-molekulák is lehetnek.

Irodalom

1. H. Furukawa, K. E. Cordova, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Science 341* (2013) 1230.444 1–12.
2. D. J. Tranchemontagne, J. L. Mendoza-Cortés, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Chem. Soc. Rev. 38* (2009) 1257–1283.
3. U. Mueller, M. Schubert, F. Teich, H. Puetter, K. Schierle-Arndt, J. Pastre, *J. Mater. Chem. 16* (2006) 626–636.
4. J.-R. Li, R. J. Kuppler, H.-C. Zhou, *Chem. Soc. Rev. 38* (2009) 1477–1504.
5. S. Han, Y. Wei, C. Valente, I. Lagzi, J. J. Gassensmith, A. Coskun, J. Fraser Stoddart, B. A. Grzybowski, *J. Am. Chem. Soc. 132* (2010) 16358–16361.
6. Z. Wang, S. M. Cohen, *Chem. Soc. Rev. 38* (2009) 1315–1329.
7. J. Y. Lee, O. K. Farha, J. Roberts, K. A. Scheidt, S. B. T. Nguyen, J. T. Hupp, *Chem. Soc. Rev. 38* (2009) 1450–1459.
8. T. Uemura, N. Yanaia, S. Kitagawa, *Chem. Soc. Rev. 38* (2009) 1228–1236.
9. Y. Inokuma, M. Kawano, M. Fujita, *Nature Chem. 3* (2011) 349–358.
10. M. D. Allendorf, C. A. Bauer, R. K. Bhakta, R. J. T. Houk, *Chem. Soc. Rev. 38* (2009) 1330–1352.
11. M. Kurmoo, *Chem. Soc. Rev. 38* (2009) 1353–1379.
12. Y. Inokuma, S. Yoshioka, J. Ariyoshi, T. Arai, Y. Hitora, K. Takada, S. Matsunaga, K. Rissanen, M. Fujita, *Nature 495* (2013) 461–467.
13. H. Li, M. Eddaoudi, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Nature 402* (2013) 276–279.
14. O. M. Yaghi, M. O'Keeffe, N. W. Ockwig, H. K. Chae, M. Eddaoudi, J. Kim, *Nature 423* (2003) 705–714.
15. S. R. Batten, N. R. Champness, X.-M. Chen, J. Garcia-Martinez, S. Kitagawa, L. Öhrström, M. O'Keeffe, M. P. Suh, J. Reedijk, *CrystEngComm 14* (2012) 3001–3004.
16. M. Eddaoudi, J. N. Rosi, D. Vodak, J. Wachter, M. O'Keeffe, O. M. Yaghi, *Science 295* (2002) 469–472.
17. http://titan.physx.u-szeged.hu/fizikus_vandorgyules_2016

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 főtitkár, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.
Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.
Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.
Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.
Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 900.- Ft (duplaszámé 1800.- Ft) + postaköltség.
HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és **HU ISSN 1588–0540** (online)

LÁTOGATÁS A CSERNOBILI ATOMERŐMŰBEN

1. rész: az RBMK reaktor – a legnagyobb atomerőmű-baleset

Radnóti Katalin
ELTE TTK Fizikai Intézet

1986. április 26-án történt minden idők legnagyobb nukleáris katasztrófája, a csernobili atomerőmű balesete. 31 évvel a tragédia után a Magyar Nukleáris Társaság (MNT) Fiatalok a Nukleáris Energiáért (FINE) szakcsoportja 2017 júniusában tanulmányutat szervezett a csernobili atomerőműbe és a körülötte kialakított lezárt zóna megtekintésére. Két részes írásom első felében áttekintem a nukleáris baleseteket, a Csernobilban üzemelt RBMK reaktorok főbb jellemzőit, a baleset okait és körülményeit, majd a második részben a látogatás tapasztalatait.

Nukleáris balesetek besorolása

Egy nemzetközi szakembergárda – a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség felkérésére – az eddig megtörtént nukleáris baleseteket tanulmányozva kidolgozta a Nemzetközi Nukleáris Eseményskálát (International Nuclear Event Scale, INES). Ezt olyan eszköznek szánták, amely segítségével egy – esetleges – nukleáris baleset súlyosságáról gyorsan lehet informálni a közvéleményt. A skálát – hasonlóan a földrengések jellemzéséhez – 7 fokozatúra, a súlyosság mértékével növekvő számokkal, tervezték.

Az alsó három szint üzemzavarnak felel meg, a felsőbb szinteket már balesetnek nevezik. A bekövetkezett eseményt három fő kritérium szerint szokás vizsgálni. Az első arra vonatkozik, hogy történt-e a környezetbe radioaktív kibocsátás. A közvéleményt érthetően ez izgatja leginkább. A második az erőmű belsejére vonatkozik: ott az esemény hatására hogyan változott a sugárzási szint. A harmadik pedig a beépített többszintű védelmi rendszerek állapotára vonatkozik.

Ez a skála a gyors tájékoztatást hivatott szolgálni, így természetesen előfordulhat, hogy egy eseményt később, a vizsgálatok befejeztével átminősítenek. Az *1. táblázatban* néhány példát mutatunk be.

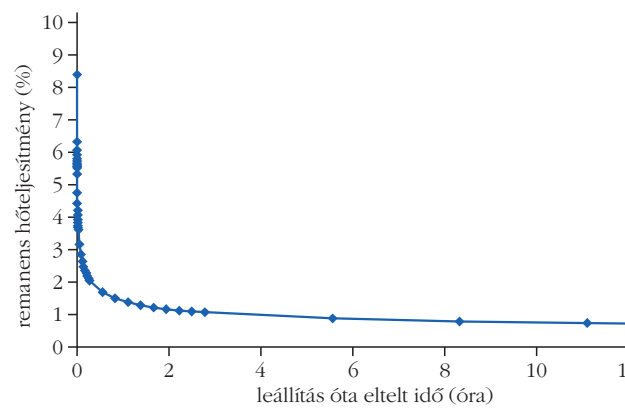
A táblázatban jelzett első nukleáris baleset 1957-ben történt az angliai Windscale-ben. A reaktor grafitmoderátoros és léghűtéses volt, katonai célokat szolgált, vagyis fő feladatként az atombombához szükséges plutóniumot termelt. A hirtelen felmelegedés hatására a grafit meggyulladt, amelyet *Wigner Jenő* előre „megjósolt”, ezt a jelenséget azóta Wigner-effektusnak is nevezik. Radioaktív termékek kerültek a levegőbe, így a környezeti hatások miatt sorolják az 5 szintű események közé. Két 7-es szintű eseményt tartanak nyilván, amelyek közül az első a Csernobili Atomerőmű 4. blokkjában bekövetkezett baleset, ez írásunk tárgya, a második pedig a 2011-ben a földrengés és az azt követő cunami hatására bekövetkezett esemény a Fukushimai Atomerőmű 4. blokkjában.

Mikor tekinthető biztonságosnak egy atomerőmű?

1. Ha a láncreakció minden körülmények között stabil és bármikor leállítható [3].
2. A reaktor minden pontja lehűthető és a hűtés folyamatosan biztosítható.
3. Radioaktív anyagok még üzemzavar esetében sem kerülnek ki a környezetbe.

A második pont azért lényeges, mert az atomreaktorok üzemanyagában a leállás után sem szűnik meg a hőtermelés, hiszen a hasadás során keletkező hasadási termékek bomlása is energiafelszabadulással jár (béta-, majd az azt követő gamma-sugárzás). A reaktor leállítása pillanatában a hőteljesítmény a névleges érték 7-8%-a, ami közel 4 óra elteltével 1% alá, 2 nap után pedig 0,5% alá csökken. Ezt remanens hőnek nevezzük (*1. ábra*), amelynek elvonása csak úgy lehetséges, ha az üzemzavari hűtőrendszerek vizet juttatnak a reaktorba és hőcserélőkön keresztül elszállítják a hőt a hermetikus védőépületből.

1. ábra. Atomreaktorok remanens hőteljesítményének változása a leállítás után eltelt idő függvényében.



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

1. táblázat

A Nemzetközi Nukleáris Eseményskála

fokozat/név	zavar/baleset jellemzői	példa
7 nagyon súlyos baleset	nagy környezeti és egészségi károsodás	1986. Csernobil, Ukrajna, 2011. Fukushima, Japán
6 súlyos baleset	jelentős környezeti kibocsátás	
5 baleset	korlátozott kibocsátás, reaktor komoly károsodása	1957. Windscale, Anglia, 1979. Three Mile Island, USA
4 baleset	kis környezeti kibocsátás, reaktor részleges károsodása	1980. Saint-Laurrent, Franciao., 1999. Tokai Mura, Japán [1]
3 súlyos üzemzavar	kis környezeti kibocsátás, majdnem baleset	1989. Vandellos, Spanyolo., 2003. Paks [2]
2 üzemzavar	technikai zavar	
1 rendellenesség	kis eltérés az engedélyezett üzemi állapottól, amely működésbe hozta a védelmi rendszert	
0 a skála alja	nincs biztonsági jelentősége	

A csernobili atomerőmű felépítése

Korábbi cikkünkben írtunk a Csernobilban üzemelt, de azóta leállított RBMK reaktortípus fő működési elveiről [4]. Azt kiegészítendő, a baleset szempontjából lényeges kérdés a *reaktor stabilitása,* azaz a reaktor *alulmoderált* vagy *túlmoderált* (a felülmoderált kifejezés is használatos).

Az alulmoderált rendszer szerkezetileg stabil, azaz a lassító közeg részleges vagy teljes elvesztése a sokszorozási tényezőt csökkentve leállítja láncreakciót. Vízzel moderált reaktorok esetében a víz felforr, eltávozik a rendszerből, nincs további moderálás, ezért megszűnik a láncreakció, és a reaktor leáll.

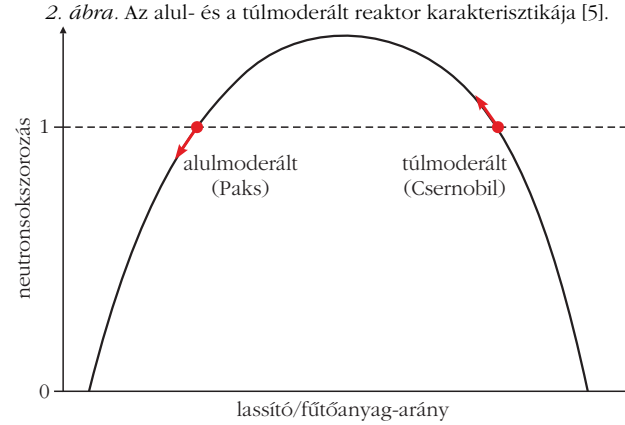
De mi a helyzet túlmoderált reaktor esetében? Nézzük meg az urán-grafit rendszert, amelynek csak a hűtőközege víz. Ha a reaktor kritikus állapotú, akkor a sokszorozási tényező 1, és ha bármilyen ok miatt túlhevül a rendszer, a hűtővíz felforrhat és eltávozik. Ez azonban nemcsak kevesebb lassítást jelent, hanem kevesebb „reaktormérget” is, mivel – mint azt már említettük – a könnyűvíz protonjai kis mértékben ugyan, de befognak neutronokat. A szilárd halmazállapotú grafitmoderátor viszont nem távozik el, a neutronsokszorozódás fokozódik, a láncreakció „megszalad” (*2. ábra*). A túlmoderált reaktor tehát *szerkezetileg instabil.*

Instabilitásuk okán az ilyen típusú reaktorokat az 1950-es években – *Teller Ede* javaslatára – Amerikában leállították. Egyetlen országban – a hidegháború okán –, a Szovjetunióban, többek közt Csernobilban építettek ilyen atomerőműveket, ugyanis e típus rendkívül alkalmas nukleáris robbanófejben használatos plutónium termelésére.

Az RBMK (Реактор Большой Мощностьи Канальный, átírásban: Reaktor Bolsoj Mosnosztyi Kanalnij, fordításban: Csatorna-típusú, nagy energiakimenetű reaktor) gazdaságos megoldásnak látszott. Ezt a reaktortípust különálló egységekből lehetett összerakni. A csupán 1,8%-osra (Pakson átlagosan 4,2%-ban dúsított urán-dioxid van a reaktorban) dúsított uránt, a moderátor grafitot és a vízvezetékcsöveket tartalmazó oszlopokat kellett egymás mellé helyezni és a vízvezetéket bekötni. A reaktor teljesítményét további ilyen oszlopok hozzáadásával lehetett növelni. Nincs szükség külön reaktortartályra, amelyre a vízmoderátor esetében igen, így semmi sem szab határt a méret növelésének (*3. ábra*). További nagy előnye, hogy a fűtőelemeket üzem közben is lehet cserélni, így nem kellett évente leállni karbantartás és a kiégett fűtőelemek kicserélése céljából, mint a nyomottvizes típus esetében. (A kiégett, tehát a sok hasadási termék miatt kezelhetetlenül magas sugárzású fűtőelemekkel ellentétben, a reaktorban kevesebbet tartózkodó, de az urán 238-as izotópból keletkező plutóniumban már gazdag fűtőelemek kifejezetten alkalmasak atombomba előállítására. A csernobili erőművet ilyen katonai célra nem használták, de bármikor alkalmas lehetett volna.) Csernobilban négy ilyen típusú reaktor üzemelt (egy-egy blokk hasznos – elektromos – teljesítménye 1000 MW, szokásos jelöléssel: 1000 MWe), az ötödik blokk már majdnem kész volt, a hatodik építését is elkezdték, amikor 1986-ban bekövetkezett a baleset. Egy-egy reaktorban 190 tonna üzemanyagot helyeztek el, amelyhez 200 szabályozórúd tartozott. Ezek összehangolt mozgatása már önmagában is bonyolult műszaki feladat volt.

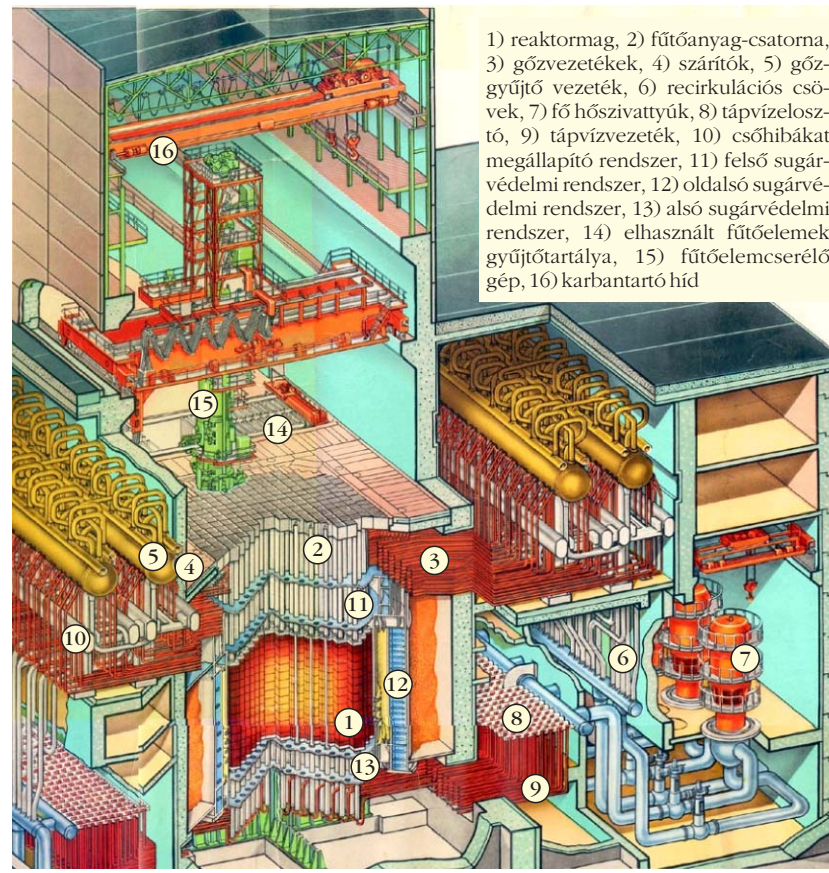
Az RBMK reaktorban a víz egyetlen körben kering. A turbinára a reaktoron is keresztüláramló víz gőze kerül. A víz nyomása 70-80 bar körüli. (Több helyen csupán 6,5 bar olvasható, de a víz fázisdiagramja alapján az kevés lenne ahhoz, hogy 280 °C-on is folyékony maradjon!) Egy-egy vízcsőben kettő, az 1661 csőben összesen 3322 darab üzemanyagköteg található. Egy kö-

2. ábra. Az alul- és a túlmoderált reaktor karakterisztikája [5].



teg 18 darab 7 m hosszúságú uránoxidrúdból áll. A víz mennyisége nem elegendő az urán hasításához szükséges neutronok lassítására, így ezek a csövek grafittömbökben helyezkednek el. A közel 1700 tonna grafitot kis túlnyomásra méretezett acélköpeny veszi körül.

Ha az urán-grafit + vízvezeték-oszlopokból kis méretű rácsot készítünk, a neutronok nagy része megszökik a felületen. Azonban, minél több ilyen rácsot rakunk össze, annál kevesebb neutron szökik ki a rendszerből, az üzemeltetés egyre gazdaságosabb lesz. A grafit a neutronreflektor szerepét is betöltötte, ezért a zóna aljára is raktak. Így a Csernobilban épült reaktorok túlmoderáltakká váltak. A szerkezeti instabilitást járulékos biztonsági rendszerekkel próbálták ellensúlyozni, amelyek a neutronsokszorozódás vagy a hőmérséklet gyors emelkedése esetében neutronelnyelő rudak betolásával, illetve szintén neutronelnyelő bóros vízzel történő elárasztással leállíthatják a reaktort. *Ha az operátorok ezeket az üzemképes biztonsági rendszereket szándékosan nem kapcsolták volna ki, a baleset nem következett volna be!*



3. ábra. Az RBMK erőmű felépítése.

A csernobili atomerőmű balesete

A csernobili atomerőmű 4-es blokkját, amelyben a baleset bekövetkezett, 1983 decemberében helyezték üzembe. A baleset idejéig nem is kellett leállítani. Éppen 1986. április 25-ére tűzték ki az első tervszerű karbantartást. Ezért a fűtőelemek többsége (közel 75%-a) még az első töltetből származott, így azokban tetemes mennyiségű radioaktív hasadási termék halmozódott fel. A leállítás előtt egy *tesztet* (amelyet korábban *kísérletnek* neveztek, de látogatásunk során több esetben is hangsúlyozták, hogy az teszt volt) kívántak végrehajtani, amelynek célja röviden a következő volt: ha az erőmű bármilyen okból leszakad a hálózatról, akkor az erőműhöz tartozó dízelgenerátorok azonnal indulnak, hogy árammal lássák el az irányítórendszert és a kiégett radioaktív fűtőelemeket hűtő üzemzavari szivattyúkat. (A hasadványok hűtésének fontosságára a bevezető részben utaltunk.) A generátorok viszont körülbelül 2 perc alatt pörögnek csak fel, így ezt az időszakot valahogy át kell hidalni. Az erőmű tervei szerint a turbógenerátoroknak ez idő alatt még forogniuk kell, de az ellenőrzések szerint a gyakorlatban ez még sincs így. E hiányosság megszüntetésére egy speciális fordulatszám-szabályozó eszközt fejlesztettek ki, ezt akarták kipróbálni. A kísérletet 700-1000 MW hőteljesítmény mellett kellett volna elvégezni. (A reaktor egy hőgép, amelynek hőteljesítménye a hasznos teljesítmény körülbelül 3-szorosa.) A teszthez ki kellett kapcsolni a reaktor számítógépes szabályozó rendszerét.

A baleset leírása során néhány esetben összehasonlítást teszünk a Fukushimában történtekkel, hogy a kétféle esemény közötti különbségek egyértelműek legyenek.

Az 1986-ban, Csernobilban bekövetkezett eseményt utólagosan a következőképp rekonstruálták [4–8]:

1986. április 25., péntek, 1:00 óra

Csökkenteni kezdik a reaktor teljesítményét.

13:05

A hőteljesítmény 1,6 GW, a két turbina közül az egyiket lekapcsolják.

14:00

Lekapcsolják a vészleállító rendszert, amely bóros vízzel árasztaná el a reaktort, hogy a neutronok elnyelése által megszakítsa a láncreakciót. Az operátorok kizárólagosan akarják irányítani a reaktort.

14:05

Az energiafelügyelet váratlanul további elektromos teljesítményt kér a hálózatba. Megszüntetik a teljesítmény további csökkentését és 0,5 GW-ot juttatnak a hálózatba. (A reaktor üzemi teljesítménye 1 GW.)

23:10

Az operátor engedélyt kap a reaktor leállítására, újból csökkenteni kezdi a teljesítményt.

1986. április 26., szombat 0:28

Lekapcsolják a neutronsűrűség lokális ellenőrzését, így a biztonsági automatika csak globális szabályozást szolgáltat. (Az ilyen típusú reaktorokban a neutronsűrűség elég nagy eltéréseket mutathat a hely függvényében.) Továbbá *szabályellenesen a megengedett maximális érték fölé fokozzák a vízáramlás sebességét,* így annak nincs ideje lehűlni és hőmérséklete megközelíti a forráspontot. A reaktor az instabilitás jeleit mutatja, teljesítménye hirtelen 0,03 GW-ra esik.

1:07

A reaktor 0,7 GW hőteljesítményen stabilizálódik, mérsékelik a hűtővíz áramoltatását.

1:22

A neutronelnyelő rudak szabályellenesen magasra vannak kihúzva. Az üzemszerű működéskor, az urán hasadásakor a hasadványok további bomlása során elég sok, neutronokat elnyelő – ezért reaktorméregnek is nevezett – ^{135}Xe-izotóp keletkezik. A xenon nagyrészt a maghasadás során keletkező ^{135}I béta-bomlásából jön létre:

$$^{135}\mathrm{I} \rightarrow {}^{135}\mathrm{Xe} \rightarrow {}^{135}\mathrm{Cs} \rightarrow {}^{135}\mathrm{Ba}.$$

A ^{135}Xe, bár elenyésző mennyiségben, de a maghasadás direkt termékeként is létrejöhet. Ez az izotóp instabil (9,1 órás felezési idővel céziummá alakul), így a reaktor beindítása után beáll az egyensúlyi helyzet. A reaktor leállítása után egy ideig még termelődik a xenon (a fennmaradt jódból), de pár nap elteltével elbomlik, és újra lehet indítani a reaktort. A neutronelnyelés során keletkező ^{136}Xe gyakorlatilag stabil (a természetes előfordulás 8,9%-a).

A ^{135}Xe-izotóp – annak dacára, hogy atommagja az egyensúlyi aránynál jóval több, 81 neutront tartalmaz – azért fog be, ráadásul nagy hatáskeresztmetszettel, újabb neutront, mert így a mag 82, mágikus számnyi neutronnal rendelkezhet. A jelenség a halogénatomok nagy reakciókészségéhez hasonlítható, ahol mindössze egyetlen elektron hiányzik a stabil nemesgázszerkezet eléréséhez.

A ^{135}Xe-izotóp mennyiségének alakulását a következő differenciálegyenlet írja le:

$$\frac{\mathrm{d}N_{\mathrm{Xe}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\ln 2}{T_{\mathrm{I}}} N_{\mathrm{I}} - \frac{\ln 2}{T_{\mathrm{Xe}}} - \sigma I N_{\mathrm{Xe}},$$

ahol az indexek a ^{135}Xe- és ^{135}I-izotópra utalnak, N az adott izotópmagok száma, T pedig felezési ideje, σ a ^{135}Xe neutronbefogási hatáskeresztmetszete és I a neutronáram nagysága.

Az egyenletből látható, hogy az állandó üzemmód nagy neutronáram-sűrűsége esetén alacsony és állandó (az egyenlet mindkét oldala nulla) ^{135}Xe reaktorméreg-sűrűség adódik. Ha csökkentjük a teljesítményt, akkor a korábbi, nagy teljesítményhez tartozó ^{135}I-izotóp magas mennyisége – ez csak lassan, 6,6 óra felezési idővel csökken – magas ^{135}Xe-keltési képesség mellett alacsonyabb I neutronáram szerepel, a ^{135}Xe fogyása kisebb, az egyenlet jobb oldala pozitívvá válik, azaz ^{135}Xe-izotóp felgyülemlik a reaktorban.

Az erősen xenonmérgezett reaktor instabil állapotú, ha a neutronsűrűség hirtelen megugrik, akkor eltünteti a mérget, a neutronsokszorozás megnő, ez pozitív visszacsatolást jelent. Ha a neutronelnyelő rudak magasan vannak kihúzva, akkor leesésükhöz hosszabb idő szükséges, mint a reaktor pozitív visszacsatolással szembeni reakcióideje, ezért *xenonmérgezett reaktorban tilos bármiféle kísérletet végezni!* A jelenséget először *John Archibald Wheeler* és Wigner Jenő – az 1940-es években, a Hanfordban működő, az atombomba előállításához szükséges plutóniumot előállító reaktorban – vette észre.

1:23:04

Elkezdik a kísérletet és *kikapcsolják a vészleállító automatikát.*

1:23:20

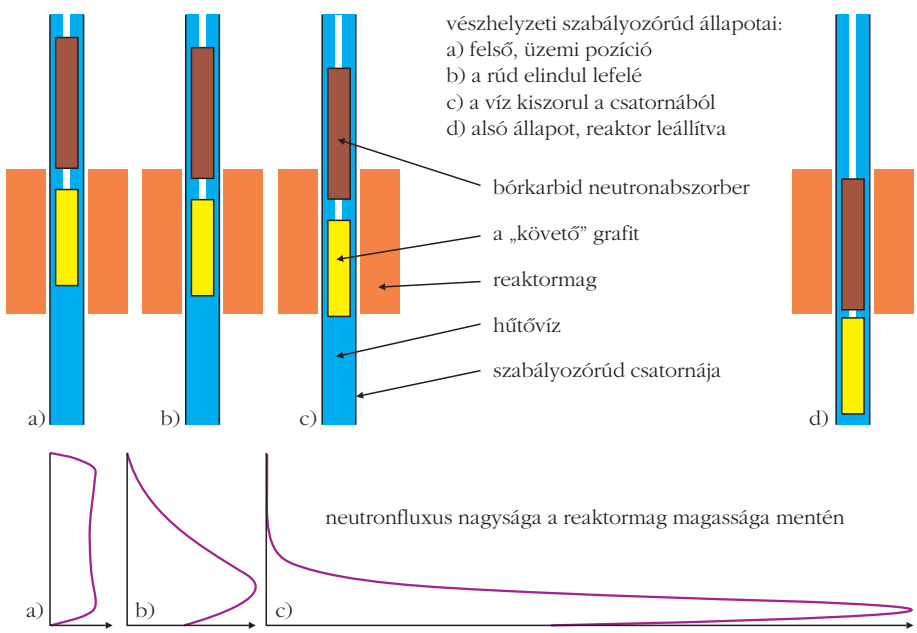
Emelkedik a hőmérséklet. A vészleállító automatika a szabályozórudak beejtésével leállítaná a reaktort, de azt már előbb kikapcsolták.

1:23:21

A szabályozórudakat kézi vezérléssel lefelé mozgatják, de lassan. A *szabályozórudak alsó része ráadásul grafitból készült* és amint az behatol a reaktorba, a sokszorozási tényező emelkedik! Pozitív visszacsatolás.

Nézzük meg részleteseben (*4. ábra*) a reaktorban alkalmazott szabályozórudak szerkezetét és az egyes részek

4. ábra. A szabályozórudak szerkezete, működése az RBMK reaktorokban [9].



funkcióját! A szabályozórudak nem közvetlenül a grafitba ágyazva, hanem a vízhűtésű csatornákban vannak. Felépítésük a paksi követő kazettához hasonlítható. Pakson üzem közben a szabályozórudak kint vannak a zónából (kivétel az alsó 55 cm-es rész) és gyakorlatilag üzemanyagként viselkednek, mert a végükön egy úgynevezett követő kazetta van. Az RBMK reaktor esetében is hasonló volt a terv: üzem közben a szabályozórúd kint van, a helyén sem üres teret, sem vizet, hanem grafitot hagytak. E „követő" grafit rövidebb a zóna magasságánál, fölötte és alatta még 1-1,5 méternyi víz van. Tehát üzem közben a zóna közepén helyezkedik el a 4,5 méteres grafit rész, ami fölött és alatt – még mindig a zónán belül – 1,5 m-nyi vízoszlop, és közvetlenül a zóna fölött kezdődött a rúd bórkarbidos szabályozó, neutronelnyelő része. Tehát, ha a rúd elindul lefelé, akkor az első 1,5 méteren negatív reaktivitást visz a zóna tetejére, viszont pozitív reaktivitást ad az aljára!

11:23:31

A neutronsűrűség lokálisan gyorsan növekszik, azonban a lokális ellenőrző rendszert már előzőleg kikapcsolták, így nem észlelik.

1:23:40

Fél perc alatt hatalmasat növekszik a hőteljesítmény, ezért az operátor a vészleállítás mellett dönt. Az operátor az összes szabályozórudat egyszerre indítja lefelé, és a beesés első 2 másodpercében mindegyik pozitív reaktivitást ad a zóna alsó részébe. Ezt nem tudja kiegyensúlyozni, hogy a reaktor teteje eközben leáll. A körülbelül 7 méter magas zóna alsó fele szinte külön reaktorként viselkedik, és ez az alsó rész megszalad.

1:23:43

A hőteljesítmény 1,4 GW és másodpercenként duplázódik. A reaktor lokálisan kritikussá válik. A hirtelen felmelegedés miatt a szabályozórudak elgörbülnek, így nem esnek le a reaktor aljára.

1:23:45

A hőteljesítmény 3 GW, a reaktor most már globálisan megszalad.

1:23:46

A hűtővíz – amely több neutront nyel el, mint amennyit moderál – elforr, a neutronsokszorozás tovább fokozódik.

1:23:47

Az urán fűtőelemek a magas hőmérséklet miatt felrepednek, a láncreakció leáll.

1:23:48

A vízvezetékcsövek is felrepednek.

1:23:49

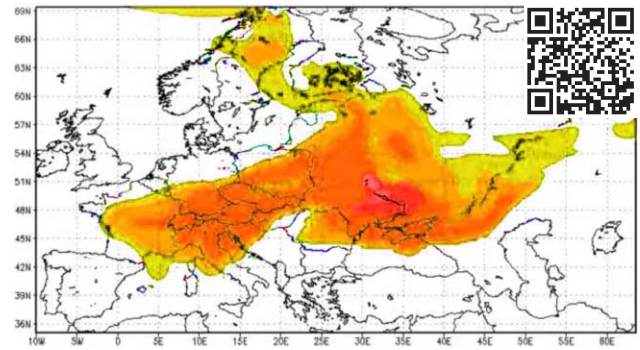
A reaktor belseje kinyílik, a víz forrása termikus robbanást okoz.

1:24

Különböző kémiai reakciók indulnak be. A felszabaduló forró vízgőz reakciója a grafittal:

$$C + H_2O = CO + H_2.$$

(Ez a reakció Japánban nem lépett fel, hiszen az erőműben könnyűvíz-moderátort alkalmaztak, grafitot nem tartalmazott.)



5. ábra. A csernobili radioaktív felhő, szennyeződés 1986. május 1-jén. Az 1986. április 26. és május 10. közötti terjedés megtekinthető a Youtube-on [10], illetve a QR-kód segítségével.

Magas hőmérsékleten a cirkónium is reakcióba lép a vízzel:

$$Zr + 2H_2O = ZrO_2 + 2H_2.$$

Mindkét kémiai reakció során hidrogén keletkezik, ami a külső levegő oxigénjével hevesen egyesül, vagyis *kémiai robbanás* megy végbe:

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O.$$

A keletkező szén-monoxid tovább oxidálódik:

$$2CO + O_2 = 2CO_2.$$

(Ilyen reakció sem volt Japánban.)

A reaktor nem volt biztonsági épületbe zárva, ezért a robbanás következtében beomlik a tetőszerkezet, radioaktív anyagok kerülnek a levegőbe.

Nem történt nukleáris robbanás, de a robbanás és a tűz a radioaktív anyagokat nagy távolságra szórta ki a környezetbe. (A japán reaktor biztonsági épületben volt, a földrengés hatására beestek a szabályozórudak, az aktív zónában leállt a láncreakció. A japán operátorok nem kapcsolták ki a biztonsági berendezéseket.)

1986. április 26. – május 5.

Az épületben keletkező tüzet hamar eloltják, de a felnyílt reaktorban a grafit mind nagyobb részére terjed ki a tűz. A füst a légkörbe juttatja az illékony hasadási termékeket, a szél pedig messze hordja azokat (*5. ábra*). A baleset következtében főleg a következő hasadási termékek kerülnek ki: számos rövid felezési idejű izotóp, mint ^{132}Te, ^{132}I, ^{131}I, ^{140}Ba, ^{140}La és ^{136}Cs, amelyek azóta már gyakorlatilag lebomlottak. Ma már csak a ^{137}Cs-izotóp mennyisége – felezési ideje csaknem 30 év – jelentős, de ezen izotóp gamma-sugárzásának energiája szerencsére csekély.

1986. május 5.

Elfojtják a tüzet, a reaktort homokkal, ólommal takarják le. A radioaktivitás kiáramlása gyakorlatilag megszűnik.

A baleset után

A baleset hétvégén, hajnalban történt, és nem adtak ki megfelelő tájékoztatást. A balesetet épülettűzként értelmezték. A lakosság, körülbelül 350 ezer ember kitelepítése is későn indult meg.

2. táblázat

A csernobili és a fukushimai baleset összehasonlítása

Csernobil	Fukushima
A reaktor *belsejéből* induló robbanás szétvetette a reaktort és az épületet is.	Főleg a reaktorépület teteje sérült meg, a reaktorteret nem érintette a robbanás.
A robbanások pillanatában az erőmű *üzemelt*.	A robbanások pillanatában a reaktorok már napok óta *nem üzemeltek,* álltak.
A reaktor nem volt vasbeton konténmentben.	A reaktorok vasbeton konténmentben voltak, amely épen maradt, illetve csak mérsékelten sérült.
A robbanás a hasadóanyag körül történt.	A robbanás a hasadóanyagtól távol történt.
10 napig égett grafit, emiatt a szennyezés magasra jutott.	*Nem volt grafit a rendszerben.*
Ok: emberi hibák sorozata.	Ok: extrém méretű természeti katasztrófa.
A lakosság előtti titkolózás volt a jellemző.	Azonnali tájékoztatás és kitelepítés.

Az első, a reaktorblokkot beborító szarkofágot 4 hónap alatt, igen mostoha körülmények között, 90 ezer ember áldozatos és gyors munkájával húzták fel (*6. ábra*).

A szarkofág állapota később rohamosan romlott, repedések jelentek meg, ezért 2005-ben elkezdték a ma látható második szarkofág építését, amelyet az elsőre, mintegy ráhúztak.

Következmények

A radioaktív anyagok két nagyobb hullámban jutottak ki a reaktorból.

1. Az első nagyobb kibocsátás közvetlenül a robbanás után volt, ebben a szétszóródott üzemanyag és a nemesgázok domináltak.

2. A második hullámot a baleset utáni 7–10. napokon tapasztalták, amelynek a reaktorbeli grafittűz magas hőmérséklete volt az oka.

6. ábra. Az első szarkofág.

3. táblázat

Jelenleg is működő RBMK reaktorok

telephely / blokk		üzembe helyezés éve	teljesítmény (MWe)	tervezett üzemeltetés
Kursk	1	1976	925	2021
	2	1979	925	2024
	3	1984	925	2029
	4	1986	925	2030
Leningrád	1	1973	925	2019
	2	1975	925	2021
	3	1979	925	2025
	4	1981	925	2026
Smolensk	1	1983	925	2028
	2	1985	925	2030
	3	1990	925	2034

A Leningrád, mint telephelynév ne lepjen meg senkit, csak a várost nevezték át Szentpétervárra.

A légkörbe került radioaktív anyagok vagy egyszerűen lesüllyedve, vagy a lehulló csapadékkal együtt kerültek a földfelszínre. A talaj szennyezettségét általában a ^{137}Cs négyzetméterenkénti aktivitásával adják meg, ez az izotóp ugyanis könnyen mérhető és a közel 30 éves felezési ideje miatt még ma is mérhető mennyiségben van jelen a talajban [11, 12]. Ezek alapján a legszennyezettebb területek: az oroszországi Bryansk, a fehérorosz Gomel és Mogilev régiók.

- Közvetlen haláleset: az első napokban, az elhárításban részt vett emberek közül 50 fő.
- Várható halálesetek becslése: 30 év alatt 4000 fő. Sokan, különböző statisztikai módszerekkel próbálták megbecsülni az áldozatok várható számát. E becslésekben annyi mindenképpen közös, hogy egyik sem számol néhány ezernél több járulékos halálesettel a volt Szovjetunió területén. További közös elem, hogy mindegyik becslés azt is hangoztatja, hogy ezek statisztikailag nem lesznek kimutathatók. Kivétel a pajzsmirigyrák és a leukémia, amely egyértelműen az erőműből kikerült anyagok hatásának tulajdonítható. A pajzsmirigy-megbetegedések száma eddig 4000 fő volt, közülük 9 ember halt meg.
- Hány embert érintett a baleset? 7 millió főt, amelybe beletartoznak a kitelepítettek, a szennyezett területen élők és a likvidátorok.

Az egész eset végső tanulságaként levonható az a következtetés, hogy a kísérlet során *nem következett volna be a baleset, ha az akkor meglévő és üzemképes biztonsági rendszereket nem helyezik üzemen kívül!*

A közvélemény sok esetben összemossa a Csernobilban és a Fukushimában történt baleseteket, ezért a *2. táblázatban* összefoglaljuk ezek fő jellemzőit, kiemelve a hasonlóságokat és a különbségeket.

Napjainkban működnek még RBMK reaktorok?

RBMK reaktorblokkok már csak Oroszországban (11) működnek (*3. táblázat*), a Litvániában (2) és Ukrajnában (3) használtakat fokozatosan leállították [13].

Irodalom
1. Aszódi Attila, Sükösd Csaba, Szatmáry Zoltán: Nukleáris baleset Tokai Murában. *Fizikai Szemle 49/11* (1999) 402. http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz9911/aszodi.html
2. Szatmáry Zoltán: Súlyos üzemzavar a Paksi Atomerőműben. *Fizikai Szemle 53/8* (2003) 266. http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0308/szatmary0308.html
3. Jarosievitz Beáta: A radioaktivitás alapja; A Radioaktivitás feldolgozása; Radioaktív bomlási sorok tanítása; Láncreakció tanítása; Exponenciális bomlástörvény tanítása. In: Burgetti M., Demjén S., Farkas B., Holczer J., Farkas Cs. Horváth Zs., Jarosievitz B., Lakó F. P., Márton A., Mura-Mészáros Cs., Pethő B., Szabó M., Szabó V., Szalayné Tahy Zs., Takács A., Telek A., Merényi Á. (szerk.): *101 ötlet innovatív tanároknak = 101 ideas for innovative teachers*. Jedlik Oktatási Stúdió, Budapest, 2005, 54–59.
4. Király Márton, Radnóti Katalin (2016): Az atomerőművek működéséről egyszerűen, típusaik és jövőjük – 1–3. rész. *Fizikai Szemle 66/10–12* (2016) 331–336., 372–378., 403–408.
5. Radnóti Katalin: Csernobil: hat évvel a baleset után. *Természet Világa 123/7* (1992) 311–315.
6. Szatmáry Zoltán, Aszódi Attila: *Csernobil. Tények, okok, hiedelmek*. Typotex, Budapest, 2005.
7. Aszódi Attila: Csernobil 20 éve. *Fizikai Szemle 56/4* (2006) 114. http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0604/aszodi0604.html
8. Marx György: *Atommag-közelben*. MOZAIK Oktatási Stúdió, Szeged, 1996.
9. http://accidont.ru/ENG/rodes.html
10. https://www.youtube.com/watch?v=AohOLOlcNgg
11. Jarosievitz Beáta, Sükösd Csaba: *Radioactivity*. (2004) http://www.sukjaro.eu/cikkek/radioactivity/home/index.htm
12. Jarosievitz Beáta, Sükösd Csaba: Radioactive chains; Bomlási sorok. (2004) http://www.sukjaro.eu/cikkek/decay_chain/home/index.htm http://www.sukjaro.eu/cikkek/bomlasi_sor/home/index.htm
13. http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/appendices/rbmk-reactors.aspx

VÉLEMÉNYEK

MEGJEGYZÉSEK A FIZIKA SZAKTERÜLETI »SHANGHAJ-RANGSORRÓL«

Patkós András
ELTE Fizikai Intézet

A háromnapos szenzációk között rendszeresen visszatér a különféle nemzetközi oktatási rangsorok megjelenése és abban a magyar egyetemek hátracsúszása. Az egyetemi szervezetek belső minőségi heterogenitásának ismeretében az ELTE (vagy más egyetemek) egészének besorolására lehetetlennek tartom tudományosan hiteles kritériumok megalkotását. Így a sajtó fellángolását az Academic Ranking of World Universities (ARWU) lista 2017-es verziójának nyilvánosságra hozatalát követően vállrándítással elintézhetőnek gondoltam.

Azonban a shanghaji egyetemhez kapcsolódó rangsor 2010 óta tudományterületi listákat is közzétesz. Kezdetben csak az alapvető reáltudományokban (matematika, fizika, kémia), továbbá számítástudományban és az üzleti tudományok/közgazdaságtanban készült rangsor, 2017-ben viszont már 52 szakterületen rangsorolták az egyetemeket. A fizikai intézetek tevékenységét a tudományos aktivitás területén általánosan elfogadott mérőszámokkal lehet jellemezni, így egy szakterületi rangsor teljesítménymutatóinak és a súlyozott összegzésükkel kialakuló rangsornak van értelmezhető üzenete. Éppen ezért több, mint tíz éve követem az ELTE Fizikai Intézet helyének alakulását a nemzetközi egyetemi rangsorokban.

Patkós András (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektrogyenge anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)-szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.

Az ELTE Fizikai intézete 2012-ben került fel a rangsorolt intézetek körébe az ARWU-listán és azóta 2015-ig évente ugyanabban az előkelő csoportban, a 101–150. helyen rangsorolt fizikai intézetek csoportjában szerepelt. Megrökönyödésemre az idei listán két csoporttal hátrébb csúszva a 201–300. helyen rangsorolt intézetek között jelent meg az ELTE logója. Ez annál is fájóbb, mert a prágai Károly Egyetem fizikai intézete, amely kezdetben a 151–200. helyen soroltak csoportjában tűnt fel, ez évben a 76–100. csoport tagja lett. Továbbá, számos régióbeli egyetem fizikai intézete (lásd alább!), amelyek eddig nem is voltak rangsorolva, hirtelen előttünk, a 151–200. csoportban bukkant fel. Nem vigasztaló, de említést érdemel, hogy nagy hagyományú partnerintézetünk a Bécsi Tudományegyetem (korábban az 51–75. csoportban is voltak!) fizikusai velünk azonos csoportba csúsztak le.

A változás okára az ARWU-módszertan megváltozása magyarázatot kínál, egyben rávilágít az ELTE Fizikai Intézetben folyó kutatás némely érzékeny pontjára, amelyből talán nemcsak az ELTE Fizikai Intézet tagjai, hanem a hazai fizikus-közvélemény is tanulságokat vonhat le.

ARWU-mutatók fizikában

A rangsor kialakításához használt 5 mutató mindegyike a kutatási eredményesség számszerűsíthető ismérveit használja. Tehát az ARWU-rangsor kizárólag az intéz-

mény kutatási erősségét jelzi. A sajtó automatikusan feltételezi, hogy a kutatási erősség az oktatási, szakemberképzési tevékenység színvonalával pozitívan és erősen korrelál, amit ma már a felsőoktatási intézmények egy nagy csoportjában nem fogadnak el. Minthogy az ELTE fizikus szakán továbbra is a kutatóképzés igényeit követi az oktatási program és stílus, ezért – tekintet nélkül az ellenérvekre – a kutatási teljesítménymutatók releváns minősítői az intézet munkája egészének.

A rangsorolásba azokat az egyetemeket vonták be, amelyek a 2011–2015 időtartományban legalább 200 „article" jellegű közleményt tettek közzé. A fizika rangsorának megalkotásakor a tudományterülethez sorolt részterületek folyóiratait vették figyelembe. E részterületek a következők: akusztika; csillagászat és asztrofizika; optika; alkalmazott fizika; atom-, molekula- és kémiai fizika; kondenzált anyagok fizikája; matematikai fizika; multidiszciplináris fizika; magfizika; részecskék és kvantummezők fizikája. A Thomson ISI (a Web of Science működtetője) által gondozott *InCites* adatbázisban e részterületekhez sorolt folyóiratokban megjelent közlemények egyszerű statisztikai jellemzését végezték el. Az ELTE Fizikai Intézete szempontjából figyelemre méltó, hogy a biofizika a biológia tudományterületének része, a környezettudomány és az anyagtudomány önálló (inkább mérnöki) tudományterületként szerepelt. Az e területekhez sorolt folyóiratokban publikált cikkeket nem veszik figyelembe a fizikai intézetek teljesítménymutatóinak kiszámítása során, függetlenül attól, hogy esetleg fizikai intézetek munkatársai publikálták azokat.

A *PUB-mutató* az adott intézetnek a legnagyobb számú publikációt közzétevő intézethez viszonyított arányszáma a fenti időszakra. Ez nem fajlagos (nem egységnyi FTE-re vonatkoztatott) publikációszámon, hanem a létszámtól függetlenül, az intézménnyel legalább egy társszerző révén összekapcsolható publikációk számán alapuló mutató. Tehát a teljes munkaidős alkalmazásban lévőkön túl a részfoglalkozásúak, a diplomamunkás és PhD-hallgatók és az emerituszok közleményei egyaránt beszámításra kerülnek, ha a megfelelő intézményi affiliációt feltüntetik.

A *CNCI-mutató* (Category Normalized Citation Impact) alapja a közleményekre a Web of Science szerint kapott idézetek számának a fizika tudományterületén számított világátlaghoz viszonyított értéke. Ez az indikátor tehát 1-nél nagyobb értéket is felvehet. A rangsoroláshoz használt mutatót az intézmény indikátorának értékével és a legnagyobb elért értékkel képezett arányszám adja. Ennek értéke már nem haladhatja meg az egységet.

Az *IC-mutató* (International Collaboration) azon cikkek arányát jelenti a saját közlemények halmazában, amelyeket legalább két különböző országbeli intézetben dolgozó fizikus jegyez.

A *TOP-mutató* azon cikkeket veszi számításba, amelyek a fizika tudományterületén TOP-Journal besorolású újságban jelentek meg. Ezt viszonyítja a legtöbb TOP-Journalban publikált cikket felvonultató intézet ilyen közleményeinek számához. A TOP-Journal besorolású folyóiratokat a korábbi ARWU-rangsorok első száz helyére sorolt intézetekből felkért szakértők szavazatai alapján választják ki. A fizika tudományterületén egyetlen folyóiratnak szavaztak meg ilyen besorolást, a *Physical Review Letters*-nek (matematika: 2, kémia: 4, földtudományok: 5).

Az *AWARD-mutató* a tudományterületen az adott időszakban az intézet teljes munkaidőben foglalkoztatott kutatója által elnyert kiemelt tudományos kitüntetések számát arányítja a legnagyobb számú ilyen kitüntetést felvonultató intézetet jellemző számhoz. A fizika tudományterületén egyetlen ilyen kiemelt kitüntetést fogadtak el a szakértők, a fizikai Nobel-díjat (matematika: 2, kémia: 3, földtudományok: 2).

Az összesített eredmény a fenti mutatók összegzésével adódik, amelyben az IC-mutató kivételével a többi egységnyi súlyt kapott. Az IC-mutató súlya 0,2.

Eredmények

Az *1. táblázatban* a régióból rangsorolt intézmények mutatóit, súlyozott összteljesítményét és besorolását tüntetjük fel. Szerepeltetjük még a fizikarangsort vezető MIT és két, az ELTE-hez közelálló, nagy hagyományú intézet (Bécs és Heidelberg) jellemzését.

A PUB-mutatóban a Tokiói Egyetem vezeti a fizikarangsort. Az ELTE PUB-mutatója jelentősen alatta marad a hagyományosan vetélytársnak tekintett intézetekének (Varsó, Krakkó, Bécs, Prága, Moszkva). Leginkább a feltörekvő kisebb egyetemek (Ljubljana, Debrecen, Brno) mutatójával hasonlítható össze. A normalizált mutatóban ez 0,1 hátrányt jelent a magasabb besorolású intézetekhez képest. „Ledolgozása" önmagában egy osztállyal feljebb sorolná az intézetet.

A CNCI-mutatóban a néhány kiváló kutatóra épülő kis intézetek dominanciája figyelhető meg. A legmagasabb relatív hivatkozottságot az Ír Nemzeti Egyetem, Maynooth mutatja fel. Figyelemre méltó a Debreceni és a Brnói (Palacky) Egyetem mutatójának a rangsort vezető egyetemekét meghaladó értéke. A magasabb átlagos hivatkozottságú közleményekkel rendelkező intézetek sorába illeszkedik az ELTE és a pozsonyi Comenius Egyetem is. Megjegyzendő a moszkvai FIZTECH egyetem nagyon alacsony idézettségi mutatója, amely az egyébként elég magas publikációs intenzitást kísérve, valószínűleg a nyelvi elszigeteltségre vezethető vissza.

Az IC-mutató a FIZTECH és az MIT kivételével nagyon magas az összes szereplő egyetem esetében. Ez nyilván a két intézmény eltérő hátterű, de azonosan kisebb együttműködési hajlandóságával magyarázható. Miután e mutató súlya 0,2 és nem is növelhető lényegesen, a nemzetközi együttműködésű kutatások részarányának további növelése kis hatással lenne a rangsorban elfoglalt helyezésre.

A TOP-mutató (azaz a *PRL*-cikkek relatív aránya a teljes cikktermelésen belül) általában erősen korrelált a PUB-mutatóval, így az ELTE Fizikai Intézet esetében megduplázza a lemaradást. Persze a javulás nem lenne automatikus, amint azt jól mutatja a bécsi és a

krakkói egyetemek alacsony TOP-mutatója az egyébként jó közepesnek tekinthető publikációs intenzitás mellett. Megjegyezhető, hogy a TOP-mutatót a párizsi Pierre és Marie Curie Egyetem vezeti, ami cáfolja a *PRL* észak-amerikai egyetemekkel szembeni elfogultságának elterjedt nézetét.

A korábbi években elért helyezések alapján én is hasonló előrelépést reméltem ahhoz, amit a Károly Egyetem sikeresen abszolvált. Az ő mutatóik eléréséhez az ELTE-nek legalább másfélszeresére kellene emelnie évente publikált közleményeinek számát és jó harmadával növelnie kellene a *PRL*-ben közzétett eredmények számát. (A hazai fizikusok értékrendjének és az ELTE Fizikai Intézet közelmúltbeli vezető publikációi megjelenési helyének ismeretében furcsa az a tapasztalat, hogy bár az összegyetemi rangsor szempontjából a *Nature*- és *Science*-cikkek száma önálló teljesítménymutatóként szerepel, ám a fizikai kutatási erősorrendben még csak top-újságnak sem számítanak.)

1.táblázat

A régióból rangsorolt intézmények (valamint a rangsort vezető MIT) mutatói, súlyozott összteljesítménye és besorolása

rangsor	intézet	PUB	CNCI	IC	TOP	AWARD	súlyozott mutató
1.	MIT	89,8	57,8	77,6	93,5	100	2,566+1
51–75.	Heidelbergi Egyetem	60,1	55,9	89,1	55	0	1,888
76–100.	Károly Egyetem	51,9	53,2	90,6	53,4	0	1,766
151–200.	Varsói Egyetem	47,5	51,4	84,6	43,2	0	1,590
151–200.	Belgrádi Egyetem	49,6	50,6	85,1	41,9	0	1,587
151–200.	Cseh Műszaki Egyetem	42	53,6	88,3	44,9	0	1,582
151–200.	Comenius Egyetem	34	58,4	94,3	43	0	1,543
151–200.	Ljubljanai Egyetem	38,1	53,2	87,3	43,2	0	1,520
201–300.	ELTE	32,2	58,8	88,8	36,3	0	1,451
201–300.	Jagelló Egyetem	43	47,9	85,1	34,9	0	1,428
201–300.	Bécsi Tud. Egyetem	44,2	47,9	90,3	30,9	0	1,411
201–300.	FIZTECH (Moszkva)	47,7	40,9	74	37,2	0	1,406
201–300.	Debreceni Egyetem	25,9	64,7	92,1	29,5	0	1,385
201–300.	Palacky Egyetem (Brno)	29,3	59,2	90	30,7	0	1,372

Meg kellene válaszolni még, hogy miként következhetett be a rangsorbeli visszaesés, amikor az új sorrendet ugyanazokban az években (2011–15) mutatott teljesítményre alapozzák, amelyekben az ELTE folyamatosan a 101–150. csoportban szerepelt.

Teljesítménymutatók változásával indukált hátrasorolás

A teljesítménymutatók definíciója 2012 és 2015 között változatlan volt. Minden évben a megelőző két év publikációs és hivatkozási listái alapján értékelték az intézeteket.

A mutatók között szerepeltették a legjobb intézmények közötti kartársi említések relatív számát (*ALUMNI-mutató*), amely az angolszász vezető intézeteknek nagyban kedvezett. Ezt a mutatót az új rangsorban megszüntették. A hivatkozásokat a magasan hivatkozott cikkek évente kiadott listáján előforduló publikációk relatív számával minősítették (*HiCi-mutató*). Ennek helyére került ez évben az összes hivatkozások relatív száma.

A változatlanul TOP-mutatóként megnevezett indikátor definíciója viszont lényegesen eltért a legutóbb használttól. A korábbi években a fizika területre besorolt folyóiratok legmagasabb impakt tényezővel rendelkező 20%-ában publikált cikkek relatív arányát számolták ki az összes publikációban, majd e számok legnagyobbikához számoltak relatív értéket. A PUB-mutató és az AWARD-mutató definíciói mindmáig változatlanok.

Érdemes megvizsgálni a PUB időbeli alakulását, továbbá a már nem használt HiCi-ben és a más tartalmú TOP-ban nyújtott teljesítmények hatását az összmutatóra. Ezt a Károly Egyetemmel, a Bécsi Egyetemmel és a Varsói Egyetemmel összevetésben tudjuk elvégezni az ELTE Fizikai Intézetére, mivel az ez évben rangsoroltak közül a korábbi fizikarangsorokra csak ez a négy intézmény fért fel a régióból (*2. táblázat*).

Megnyugtató a publikációs intenzitásban az ELTE Fizikai Intézet folyamatos javulása, míg a másik három egyetem mutatója egy jóval magasabb érték körül ugyan, de ingadozó viselkedést mutatott. A megfigyelhető ütem alapján a 40%-os PUB-mutató eléréséhez pusztán a kutatói attitűd javulására alapozva (a kutatás háttérfeltételeinek lényeges javulása nélkül) legalább évtizedes időtávra lenne szükség.

A magasan idézett publikációkról az általános idézettségre való áttérés és a TOP-folyóiratok körének ezzel ellentétes előjelű drámai szűkítése egyaránt negatívan befolyásolta a Bécsi Egyetem és az ELTE teljesítménymutatóit. Mindkét egyetemi intézetben volt/van két-három kiemelkedő sikerű projekt, de az átlagos hivatkozottság tekintetében jóval kisebbnek adódott az előnyük (sőt, a bécsiek kifejezetten rossz mutatót produkáltak). Ugyanakkor a Károly Egyetem megszabadult a kiemelkedő publikációk teljes hiányából fakadó hátrányoktól.

A TOP-publikációk korábbi definíciójában mindegyik intézmény közel azonos, 70% fölötti mutatót produkált. E mutatónak nem volt differenciáló hatása. A mutató *PRL*-publikációk számához kötése széthúzta a kelet-európai mezőnyt, az ELTE hátrányára.

2. táblázat

Egyes régiós egyetemek teljesítményének változásai a különböző mutatók alapján

mutató	intézet	2012	2013	2014	2015
PUB	ELTE	29,8	33,1	33,8	33,9
	Károly Egyetem	46,2	52	51,3	49,1
	Bécsi Tud. Egyetem	44,7	44,4	43,9	43,2
	Varsói Egyetem	48,4	50,1	49,1	50,5
HiCi	ELTE	19,1	19,1	24,7	24,7
	Károly Egyetem	0	0	0	0
	Bécsi Tud. Egyetem	27	27	34,9	34,9
	Varsói Egyetem	0	0	0	0
TOP (régi)	ELTE	84,8	93,6	84,5	86,9
	Károly Egyetem	77,8	86,6	82,1	86,2
	Bécsi Tud. Egyetem	72,1	87	78,5	73,7
	Varsói Egyetem	73	84,1	80,8	78,8

Mit tehetünk? Mit várhatunk?

A teljesítménymutatók közül PUB-mutató a magyar egyetemek esetében jóval alacsonyabb a középmezőnyénél. Bármilyen újabb mutatókombinációt használjanak a jövőben, a kutatási munkaintenzitás erőteljes növelése nélkül nem lehet közelebb kerülni az élmezőnyhöz. Szerencsére a Lendület- és ERC-csoportok között több olyan van, amelyek témája a fizika hagyományos kutatási területére fókuszál, de a multidiszciplinaritás jegyében működőktől is elvárható, hogy publikációik egy részét a fizika tudományához kategorizált folyóiratokban közöljék. A Debreceni Egyetem magas CNCI-mutatója mögött valószínűsíthető a nagy nemzetközi kollaborációkban való aktív részvételük hatása. Ezt a példát a többi fizikai intézet is követheti. Jelentős hatása lehet annak is, ha a diplomamunkás és PhD-diákok, továbbá a részfoglalkozásúak ELTE-affiliációját következetesen feltüntetik az összes közleményükön. (Ez utóbbi következetes megkövetelésének hatása gyanítható a Károly Egyetem részéről e mutatóban egy év alatt elért 6%-os javulása mögött.) A publikációs intenzitás közepes („német") szintre emelését intézeti stratégiai célnak kell tekinteni és 4-5 év alatt el lehet érni.

Ésszerű feltételeznem, hogy a csúcskategóriába sorolt fizikai folyóiratok számának durva leszűkítése sok intézmény tiltakozását kiváltja, ezért a *PRL*-cikkekre koncentrált publikációs stratégia kialakítása felesleges.

A fizikai intézetek kutatási infrastruktúrájának és személyi állománya minőségének fejlesztéséhez adott folyamatos kormányzati támogatás nélkül, pusztán belső intézkedésekkel a felzárkózási folyamat gyorsítása nem indítható be, sőt a hazai fizikai intézetek korábbi saját teljesítményéhez mért abszolút visszaesés sem zárható ki.

A FIZIKA TANÍTÁSA

SZÍNES KÍSÉRLETEK EGYSZERŰEN

Zátonyi Sándor
Békéscsaba

Newton 1666-ban végzett kísérletei óta tudjuk, hogy a Nap fénye összetett, prizmával a szivárvány színeire bontható (*1. ábra*) [1]. Newton részletes kísérletekkel igazolta azt is, hogy az így kapott színek tovább már nem bonthatók, ezért ezeket *elemi színeknek* nevezzük [2, 3]. (Az elemi szín további elnevezései: spektrumszín, egyszínű fény, monokromatikus fény). Newton elvégezte a fordított kísérletet is: a színkép színeit gyűjtőlencsével, illetve prizmával egyesítve újra fehér fényt kapott. Azt is felismerte, hogy ha két vagy több elemi színt egyesít, akkor valamilyen *összetett szín* keletkezik, amely prizmával újra felbontható.

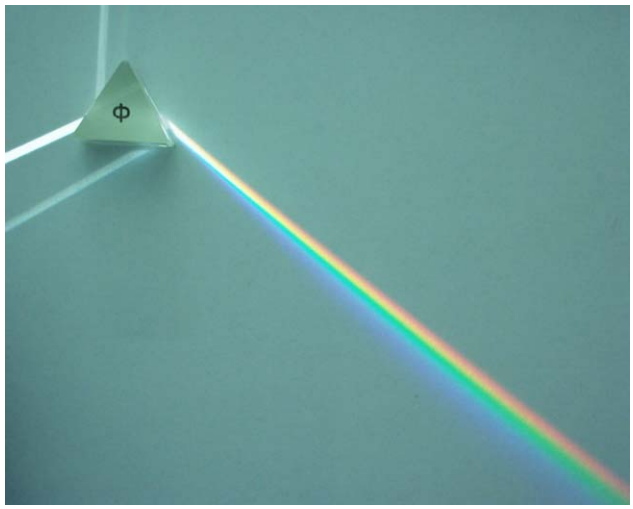
Későbbi kutatások megállapították, hogy a fény elektromágneses hullámként terjed. A monokromatikus fény egy jól meghatározott frekvenciájú elektromágneses hullámként írható le, a fény színe a hullám frekvenciájától függ.

Az ember színlátásáról

Az emberi szem csak az olyan fényt képes érzékelni, amelynek frekvenciája $4{,}3 \cdot 10^{14}$ Hz és $7{,}9 \cdot 10^{14}$ Hz között van. A fénytanban azonban a frekvencia he-

Jelen írás a 2017. évi, gödöllői fizikatanári ankéton első díjat kapott műhelyfoglakozása alapján készült.

Zátonyi Sándor 1977-ben a szegedi József Attila Tudományegyetem matematika-fizika szakán, 1988-ban a debreceni Kossuth Lajos Tudományegyetem számítástechnika szakán szerzett középiskolai tanári oklevelet. Pályája során mindvégig Békéscsabán dolgozott, 2014-től nyugdíjas. Több fizika tankönyv szerzője, társszerzője. Több mint tíz éve üzemelteti a fizika tanításával és tanulásával foglalkozó *FizKapu* honlapot. A fizikatanári ankétok rendszeres résztvevője.



1. ábra. A fehér fény felbontása prizmával.[1]

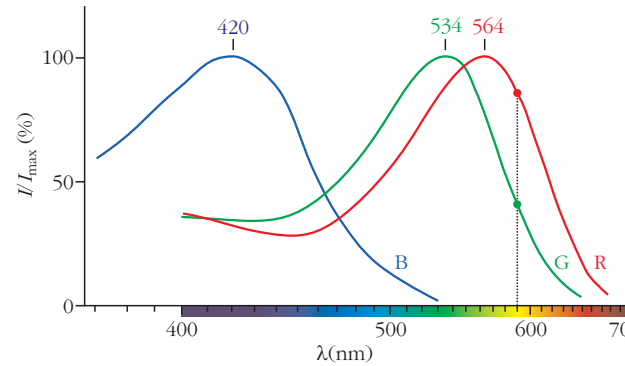
lyett többnyire a vákuumban (≈ levegőben) mérhető hullámhosszal jellemzik a monokromatikus fényt. Az ember tehát csak az olyan fényt látja, amelynek hullámhossza 380 nm és 700 nm között van, számos állatfaj azonban az ennél rövidebb, illetve hosszabb hullámhosszúságú fényt is érzékeli. A továbbiakban csak az emberi látással foglalkozunk.

A szem ideghártyájában (retinájában) található érzékelősejtek két nagy csoportja a *pálcikák* és a *csapok*. A színeket a csapokkal érzékeljük, a pálcikák csak a fény erősségét detektálják. A csapok a pálcikáknál sokkal kevésbé érzékenyek, ezért gyenge megvilágításnál, amikor már csak a pálcikák működnek, nem látjuk a színeket.

A színérzékelést végző csapok háromfélék, és mindhárom fajta csap a látható fény más-más hullámhossztartományát képes elnyelni és ingerületté alakítani. Fontos tény azonban, hogy *a csap által létrehozott ingerületet csak az elnyelt fény erőssége határozza meg, az ingerület nem tartalmaz információt a hullámhosszról.*

A *2. ábra* azt mutatja, hogy a különféle csapok miként nyelik el a különféle hullámhosszúságú fényt. Látható, hogy a háromféle csap rendre a 420 nm, az 534 nm és az 564 nm hullámhosszúságú fényt nyeli el legjobban, ezekre a legérzékenyebbek. A továbbiakban a háromféle csapot az egyszerűbb szóhasználat érdekében vörös, zöld és kék csapnak nevezzük annak megfelelően, hogy a színkép mely tartományára a legérzékenyebbek. Ezekre a színekre utal az angol/német eredetű R-G-B, (red/rot – green/grün – blue/blau) jelölés is.

A *2. ábrán* látható grafikonról leolvasható például, hogy a vörös csapok az 564 nm hullámhosszúságú fényre a legérzékenyebbek, de az 500 nm-es fénynek már csak az 50 százalékát nyelik el. Ilyen fény hatására tehát ugyanolyan, de 50 százalékkal gyengébb ingerület keletkezik a vörös csapokban.



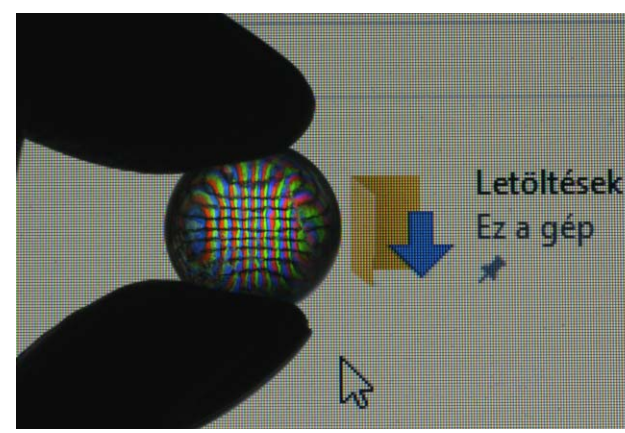
2. ábra. Az emberi szem csapjainak fényelnyelése.

Ha a szembe 590 nm hullámhosszúságú fény jut, akkor a kék csapok nem nyelik el ezt a fényt, ezért nem is küldenek ingerületet az agyba. A fény a vörös és zöld csapokban a *2. ábrán* bejelölt mértékben nyelődik el, és ennek megfelelő ingerületet küld az agyba. Az agy ezen ingerületeknek megfelelően sárgának észleli az 590 nm hullámhosszúságú fényt. Ha azonban egyszínű vörös és zöld fénysugarak olyan keveréke jut a szembe, amelyek a vörös, illetve zöld csapokat az előbbivel azonos mértékben ingerlik (és a kék csapokban nem keltenek ingerületet), akkor agyunk az előbbivel azonos sárga színt észlel.

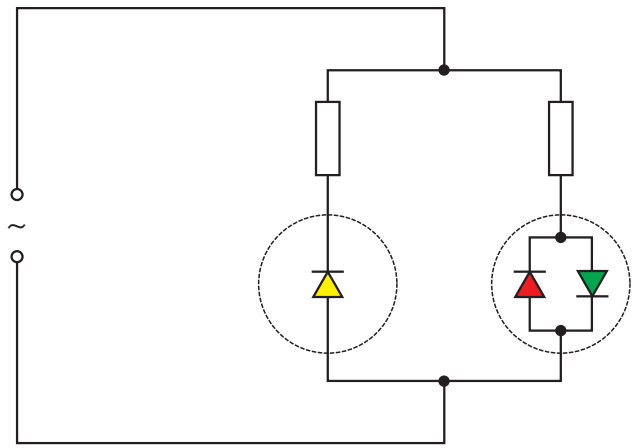
Az additív (összeadó) színkeverés

Az előbbihez hasonló a helyzet, ha több egyszínű fény, illetve a színkép egyes tartományainak keveréke jut a szembe: a színek keverékét az agy egyetlen színként észleli. Ezt a fajta színkeverést, amelynél a különböző színű fényeket egyesítjük, *additív színkeverésnek* (összeadó színkeverésnek) nevezzük. A tapasztalatok szerint monokromatikus vörös, zöld és kék fény megfelelő arányú additív keverésével tetszőleges szín kikeverhető. Additív színkeveréssel működnek a színes tévék, monitorok és a különféle elektronikai eszközök színes kijelzői is.

3. ábra. Egy számítógép képernyőjének vörös, zöld és kék képpontjai egy üveggolyón át nézve.



[1] A cikkben szereplő valamennyi fénykép nagy felbontású, színes változata, valamint a témához kapcsolódó további fényképek elérhetők a FizKapu honlap *FizFotó* rovatában, a *FÉNYTAN* témakörnél [8].

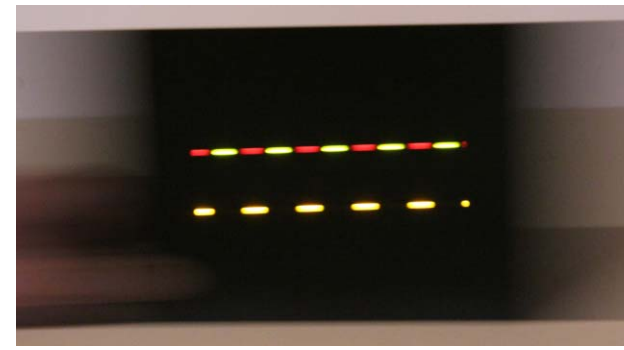


4. ábra. A kísérletben használt sárga, illetve vörös-zöld világítódióda kapcsolása.

A számítógépek színkezelése legegyszerűbben egy rajzolóprogram segítségével szemléltethető. Például a *Windows* operációs rendszer részét képező *Paint* programban a „Színek szerkesztése” ikonra kattintva egy-egy 0–255 közötti értékkel adhatjuk meg a használni kívánt szín vörös-zöld-kék (RGB) összetevőjét. Ennek megfelelően a 255-255-0 a sárga, a 0-255-255 a cián, a 255-0-255 a bíbor, a 255-255-255 a fehér, a 0-0-0 pedig a fekete színt határozzák meg.

A televízió vagy számítógép képernyőjének vörös-zöld-kék képpontjai jól láthatók, ha a képernyőt egy kellően nagy nagyítású gyűjtőlencsén át nézzük. Ehhez egyszerű nagyítóként helyezzünk egy 1-2 cm átmérőjű, színtelen üveggolyót a képernyő felületére (*3. ábra*). Fehér felületnél mindhárom alapszín képpontjai teljes fényerővel világítanak, de például sárga felületnél csak a vörös és a zöld képpontok fénylenek, a kékek teljesen sötétek. A kísérlethez használható üveggolyó hobbi- vagy játékboltokban, illetve internetes áruházakban viszonylag olcsón beszerezhető.

A vörös és zöld fény additív keverése egyszerűen bemutatható két világítódióda (LED) segítségével. Néhány forintért kaphatók sárga, valamint vörös-zöld LED-ek. A vörös-zöld LED valójában egy vörös és egy zöld világítódiódát tartalmaz, amelyek ellentétes irányban, egymással párhuzamosan vannak kapcsolva. A feszültség polaritásától függően vagy a vörös, vagy a zöld dióda világít.



5. ábra. A LED-ek fénye mozgásuk közben.

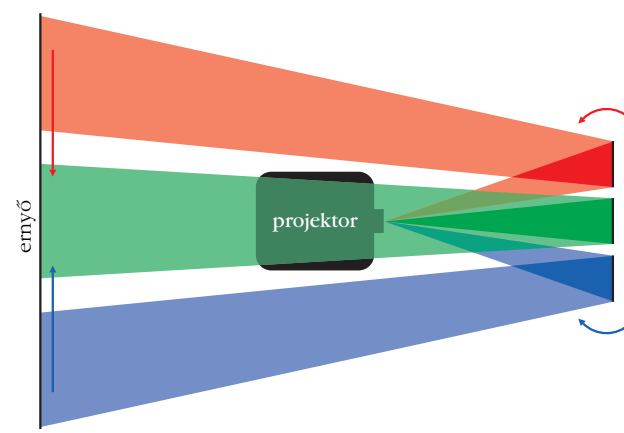
Egy fekete farostlemezbe, egymástól 2-3 cm távolságra fúrjunk két akkora lyukat, mint amekkora a LED-ek átmérője. Az egyikbe egy sárga, a másikba egy vörös-zöld világítódiódát ragasszunk, és a világítódiódákat a *4. ábrának* megfelelően 5 V-os váltakozó feszültségre kapcsoljuk. A kísérletben mindkét LED fényét sárgának látjuk. A vörös-zöld világítódióda ugyanis fél perióduson át vörös, majd fél perióduson át zöld fényt bocsát ki. A LED fénye így a vörös és a zöld csapokat is ingerli, de szemünk nem képes az 50 Hz frekvenciájú villogás észlelésére. Ha a farostlemezt gyorsan mozgatjuk, akkor a sárga LED szaggatott sárga vonalként látszik, a vörös-zöld LED-et viszont szaggatott vörös-zöld vonalként látjuk (*5. ábra*). Ugyanis, amikor a vörös-zöld LED mozog, akkor az ideghártyán a vörös fény máshol ingerli a vörös csapokat, és máshol a zöld csapokat, így szaggatott vörös-zöld vonalat látunk.

Az additív színkeverés látványosan szemléltethető egy projektorral és három tükörrel is. Ehhez egy digitális fénykép vörös-zöld-kék (RGB) összetevőit egyetlen képen egymás mellé illesztjük (*6. ábra*). (Az RGB összetevőkre bontáshoz például az ingyenesen letölthető, magyar nyelvű menüvel is rendelkező *XnView* program használható.)

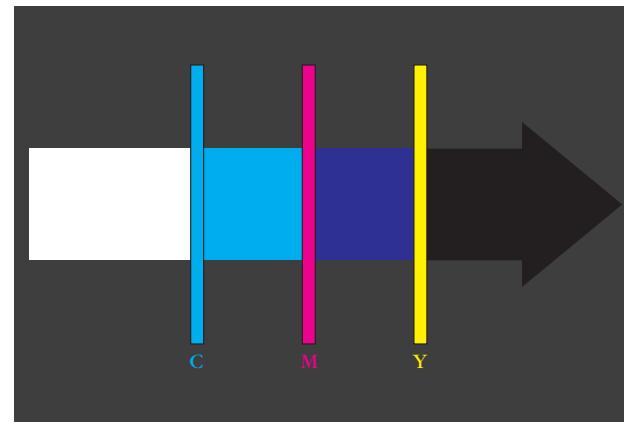
Ezt a képet egy projektorral három síktükörre vetítjük úgy, hogy az egyes összetevők külön-külön tükörre essenek (*7. ábra*). A tükrök megfelelő beállításával a vörös-zöld-kék összetevők az ernyőn egyesíthetők.

6. ábra. Színes kép, valamint vörös, zöld és kék összetevői.

7. ábra. Additív (összeadó) színkeverés projektorral.



8. ábra. Additív (összeadó) színkeverés CD-tokokkal.



9. ábra. A szubtraktív (kivonó) színkeverés elve.

Az összeadó színkeverés eredményeként így újra kialakul az eredeti színes kép. A kísérlet részletes leírása megtalálható a *FizKapu* honlapon [4]. E kísérlet előnye, hogy az egész osztálynak egyszerre bemutatható, de projektorra van szükség hozzá.

Projektor nélkül, akár tanulókísérletként is elvégezhető a következő kísérlet: egy hordozható számítógép (laptop) képernyőjét állítsuk függőleges helyzetbe, és jelenítsünk meg rajta egy olyan képet, mint az előző kísérletben! A vízszintes billentyűzetre fektessünk egy farostlemezt! Bontsunk szét három CD-tokot, és a felső (CD-t nem tartalmazó) részekből távolítsuk el a CD-borítót! Ezeket féligáteresztő tükörként használjuk a kísérletben. (Természetesen üveg- vagy plexilap is használható, de a CD-tok fedőlapja a kiálló nyúlványok miatt egyszerűbben rögzíthető.) A farostlemezre szigetelőszalaggal ragasszuk fel a három fedőlapot úgy, hogy azok síkja függőleges legyen, és 45 fokot zárjon be a képernyő síkjával (*8. ábra*)! A fedőlapok függőleges élei olyan távolságra legyenek egymástól, mint amekkora távolsággal az egyes színösszetevők el vannak tolva egymáshoz képest! Az utolsó fedőlapba, a borító helyére helyezzünk egy fekete kartont! A három féligáteresztő tükör az egyes összetevőkről kiinduló fényt a képernyővel párhuzamos irányba veri vissza. Ebből az irányból, néhány méter távolságból nézve a három kép fedésbe kerül egymással, és az összeadó színkeverés eredményeként most is az eredeti színes képet látjuk. A kísérletről készített videó *Additív színkeverés CD-tokokkal* címen elérhető a FizKapu honlapon [5].

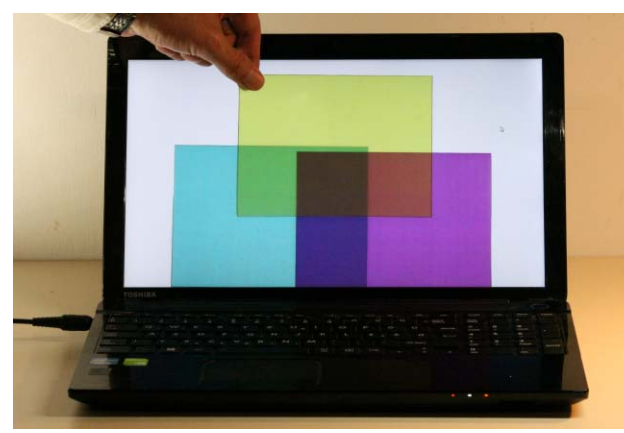
A szubtraktív (kivonó) színkeverés

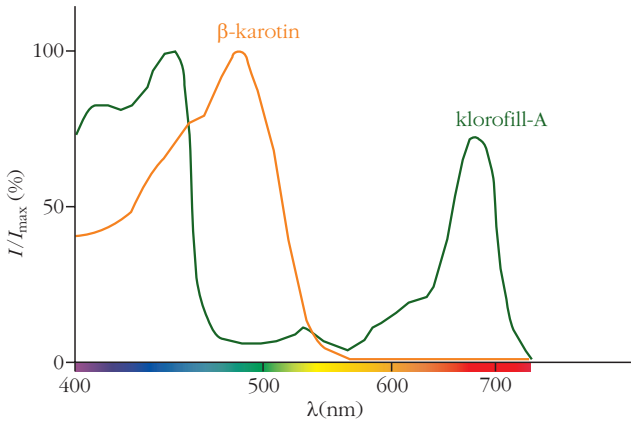
Ha valamilyen összetett (többnyire fehér) fény egy olyan átlátszó anyagon (színszűrőn) halad át, amely egy vagy több elemi színt vagy elemi színek egyes tartományait részben vagy egészben elnyeli, akkor a szűrőre beeső és a szűrőn átjutó fény színe általában eltér egymástól. Ilyenkor a beeső fényből a szűrő bizonyos színeket eltávolít, ezért ezt a fajta színkeverést *szubtraktív színkeverésnek* (kivonó színkeverésnek) nevezzük (*9. ábra*). A tapasztalatok szerint fehér fényből a cián, bíbor és sárga szűrők megfelelő alkalmazásával tetszőleges szín előállítható. Ezt a fajta színkeverést az alapszínek angol elnevezése alapján (cyan-magenta-yellow) CMY színkeverésnek nevezik (cyan-magenta-yellow). Kivonó színkeverést használnak például a hagyományos filmre történő színes fényképezésnél és a színes nyomtatásnál is. (Nyomtatásnál fekete festéket is használnak, e színkeverés jelölése CMYK.)

A szubtraktív színkeverés – megfelelően nagy méretű cián, bíbor és sárga színszűrővel – demonstrációs kísérletként is könnyen bemutatható. Ilyen színszűrőket legegyszerűbben színes lézernyomtatóval készíthetünk. Egy rajzolóprogrammal A4-es lapra cián téglalapot rajzoljunk úgy, hogy a margó a lehető legkisebb legyen! Ezt a „képet” átlátszó írásvetítő fóliára nyomtassuk ki (vagy egy gyorsnyomdában nyomattassuk ki)! (A nyomtatáshoz speciálisan lézernyomtatókhoz gyártott fólia kell, a hagyományos fólia tönkreteheti a nyomtatót.) Az így kapott szűrő kicsit világos, de félbehajtva már megfelelő fedettségű a kísérletekhez. Ugyanígy készíthetjük el a bíbor és sárga szűrőt is.

Fényforrásként a számítógép képernyője használható, ha azon egy fehér „képet” jelenítünk meg. A képernyőre helyezett, és egymást részben fedő szűrőkkel egyszerűen szemléltethető a kivonó keverés: például a cián-bíbor kéket, a cián-sárga zöldet, a bíbor-sárga vöröset, a három szűrő együttesen pedig feketét ad (*10. ábra*).

10. ábra. Szubtraktív (kivonó) színkeverés fóliákkal.





11. ábra A β-karotin és a klorofill-A fényelnyelése.

12. ábra. Sárgarépa, zöld levél és muskátli vörös fényben.

A testek színe

Az, hogy egy testet milyen színűnek látunk, függ a megvilágító fény hullámhossz-összetételétől (spektrumától) és attól is, hogy a test a ráeső fényből milyen színeket nyel el, illetve melyeket ver vissza. Fehér fénnyel történő megvilágításkor a tárgyakat a szokott színűeknek látjuk: például a sárgarépát narancssárgának, a falevelet zöldnek. E színekért elsősorban a sárgarépában található β-*karotin,* illetve a falevélben található *klorofill-A* a felelős. E két anyag elnyelési görbéje a *11. ábrán* látható. (A grafikon a *Wikimedia Commons* egyik ábrája alapján készült [6].)

Megfigyelhető, hogy a karotin nem nyeli el (azaz visszaveri) a vörös-narancs-sárga tartomány nagy részét, a színkép további részét viszont szinte teljesen elnyeli. Emiatt a sárgarépát fehér fényben narancssárgának látjuk. A kék fénnyel megvilágított sárgarépa azonban sötétnek, a vörössel megvilágított viszont világosnak látszik, összhangban a karotin elnyelési görbéjével.

A klorofill elnyelési görbéjéből megállapítható, hogy a klorofill visszaveri a zöld-sárga tartomány nagy részét, viszont elnyeli a látható színkép többi részét. A falevelet ezért fehér fényben a róla visszavert színek keverékeként zöldnek látjuk. Vörös vagy kék fényben azonban a falevél sötétnek, zöld fényben pedig világosnak tűnik.

Mindezek könnyen ellenőrizhetők, akár tanulókísérlettel is. Az okostelefonokra letölthető olyan alkalmazás (applikáció), amellyel a telefon kijelzője tetszőleges színűre állítható. (Például a magyar nyelvű menüvel is rendelkező *Physics Toolbox* alkalmazás *Színgenerátor* funkciója e célra jól használható [7].) Egy teljesen elsötétített helyiségben a mobiltelefon kijelzőjével különféle tárgyakat (sárgarépa, narancs, paradicsom, falevél, különféle színű virágok) világítsunk meg, és figyeljük meg, mely színeket vernek vissza, illetve melyeket nyelnek el! A *12. ábrán* sárgarépa, levél és piros muskátli látható vörös fényben.

Ugyanez a kísérlet projektor segítségével demonstrációs kísérletként is elvégezhető, de csak akkor, ha teljesen elsötétíthető a terem. Az esetleg bejutó kevés fény ugyanis jelentősen megzavarja a kísérletet.

Irodalom

1. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Színszóródás_prizmán1.jpg
2. Simonyi K.: *A fizika kultúrtörténete*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 2011.
3. I. Newton: *Opticks*. Royal Society, London, 1704. Digitalizált változat: https://archive.org/stream/opticksortreatisnewt#page/n95/mode/2up
4. http://www.fizkapu.hu/fiztan/cikkek/c_15_003.pdf
5. http://www.fizkapu.hu/fizfilm/fizfilm6.html
6. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lichtabsorbtion_eines_buchenblattes.svg
7. https://www.vieyrasoftware.net
8. http://www.fizkapu.hu/fizfoto/fizfoto6.html

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY
A FIZIKA BARÁTJA!
Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!
Új adószámunk: 19815644-2-43

FÉNYUTASOK

Kvantumelektronika-szakkör – „lézerbarlang”-építés a gimnázium pincéjében

Kilián Balázsné Raics Katalin – Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziuma, Pécs
Sánta Imre – PTE TTK Fizika Intézet
Knoch Júlia, Kovács Bence Tamás, Lovász Boglárka, Mester Ádám, Póla Márton, Szabó Dániel, Weisz Pál, Wensofszky Balázs – tanulók, Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziuma, Pécs

Magyarországon új lendületet kapott a lézerfizika a szegedi ELI szuperlézer építésével. Városunkban, a Pécsi Tudományegyetem Fizikai Intézetében is komoly fejlesztőmunka folyik: az ELI egyetlen Magyarországon összeállított részegysége készül, a terahertzes másodlagos fényforrás és spektrométer.

A pécsi Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziumában két évvel ezelőtt egy osztálynyi 11. évfolyamos diákkal lézeres akadálypálya építését céloztuk meg fizikaszakkörön – a filmekben látható biztonsági rendszerekhez hasonlót –, a fizika előadóban. Hosszú hónapokon keresztül, délutánonként dolgoztunk a projekten. Eleinte lézerpointerekkel, saját kezűleg vágott fürdőszobatükrökkel, sötétítő függönyökkel, füstölővel próbálkoztunk. A lézerlabirintus kialakításához végül megkaptuk az iskola pincéjét, amely tökéletesen sötét (optikai kísérletekhez kiváló), ráadásul igazán vadregényes helyszín.

A PTE Fizikai Intézet lézeres tükröket és pozicionálható tükörtartókat kölcsönzött nekünk, és egy füstgépet is vettünk. Innentől kezdve felgyorsultak az események. Közel 40 diák több héten át tartó, szorgalmas munkájának köszönhetően az iskola pincéjében kiépítettünk egy ideiglenes akadálypályát. A diákok a gyakorlatban ismerték meg a lézerfény tulajdonságait és a lézerbiztonsági előírásokat. Megtanultak lencsékből teleszkópot építeni, hogy a lézernyaláb párhuzamos legyen. Elsajátították az együttműködést, hiszen ha az egyik nyaláb elmozdult, nem jutott fény a másik tükörhöz, amit csak közösen tudtak orvosolni. Kitartást tanultak, mert nap mint nap újra be kellett állítaniuk a nyalábutakat. A labirintus kiépítése során fejlődött kreativitásuk. Megtanultak takarékoskodni és költségtervet készíteni, hiszen a lézermutatókban levő elemek hamar lemerültek, ezért akkumulátorokat és töltőket vásároltunk. Felelősséget tanultak: szemük védelme érdekében a lézerbiztonsági előírások betartásában szigorúak voltunk (az építkezés során, még szemüvegben is nagyon kellett figyelniük egymásra). Fénydetektorokat is építettünk, amelyek sípoló hanggal jelezték a nyaláb megszakítását. A diákok a pincét csontvázakkal és borzalmas, ijesztő zenével öltöztették fel, hogy kellően maradandó élményt nyújtson a látogatás.

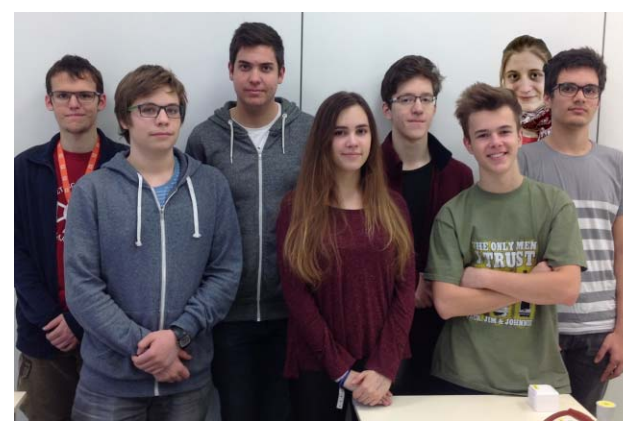
Az elkészült ügyességi akadálypályán már a 2015-ös Lajos napon (a gimnázium diáknapja) több száz diáktársuk ment végig. Évről évre fejlesztettük a pincét: világítás, vészvilágítás és érintésvédelemmel ellátott konnektorok, újabb fényforrások, optikai és elektronikai játékok kerültek bele. Az iskolában mindig akadt legalább egy osztálynyi lelkes és kitartó diák, akik folyamatosan részt vettek az akadálypálya kiépítésének hosszadalmas munkálataiban.

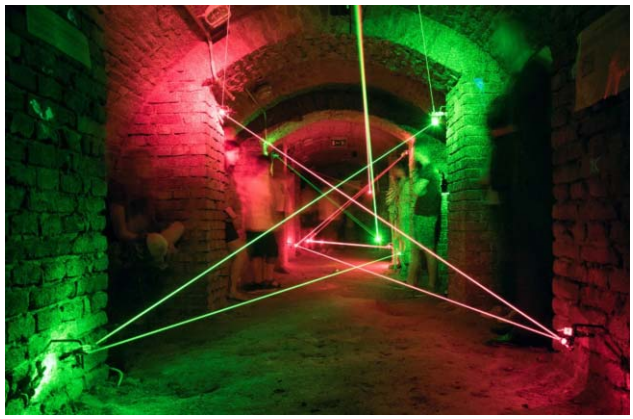
A projektet újragondoltuk a PTE Fizikai Intézet munkatársával, *Sánta Imrével* és az iskola vezetőségével: célul egy véglegesen kiépített lézerbarlang – az optika alapjelenségeit bemutató interaktív installációkkal, számítógép-vezérelte lézeres kép- és hangeffektusokkal, valamint elektronikusan vezérelhető lézerbiztonsági megoldásokkal – berendezését tűztük

Kilián Balázsné Raics Katalin (1984) biológia és fizika-környezettan tanár. A PTE ÁOK Biofizikai Intézetében három éven keresztül kutatott és oktatott. Kutatási témája az ultragyors fehérjedinamika lézerspektroszkópiai monitorozása volt. Három éve a pécsi Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziumában fizikát és biológiát tanít. Az innovatív gondolkodást elősegítő tehetséggondozásban, a fizika tantárgy népszerűsítésében elért eredményeiért 2017-ben a BME Pro Progressio díját vehette át.

Sánta Imre (1953) nyugalmazott, habilitált egyetemi docens, lézerfizikus. 7 évig a szegedi JATE, 33 évig a Pécsi Tudományegyetem Fizikai Intézetének munkatársa volt. 10 évig vezette a pécsi lézeralkalmazási innovációs központot. Fő kutatási területei a femtoszekundumos lézerspektroszkópia, a röntgenlézer, valamint a kvantumtitkosítás. Több tankönyvet írt, lézerekről szóló, 10 részes filmsorozat szerzője, a pécsi Csodák Palotája egyik alkotója.

Az első sorban balról: Póla Márton, Lovász Boglárka és Mester Ádám, hátul balról: Weisz Pál, Szabó Dániel, Kovács Bence Tamás, Knoch Júlia és Wensofszky Balázs.





1. ábra. Lézerlabirintus[1] (a fotót Szabó Zsolt 11.D osztályos tanuló készítette).

ki. A barlang tehát optikai, hangtani és elektronikai kísérletek színtere lesz.

2016 őszén „Kvantumelektronika" névvel szakkört hirdettünk, amelynek feladatköre a lézeres barlang kiépítése tudományos szempontból komoly alapozással, ismeretbővítéssel, mérnöki és kutatói attitűdök kialakításával. A szakkört ketten vezetjük, Sánta Imre és jómagam. Kis kutatócsoportunk feladata és tevékenysége messze túlmutat a középiskolás tananyagon.

Az Emberi Erőforrások Minisztériuma által indított Útravaló Ösztöndíjprogram, Út a tudományhoz alprogram (támogatás kódszáma: UT-2016-0041) 2017. évi pályázatán az iskola e szakkör támogatására 750 000 forintot nyert. Június végére ezen összeget felhasználva rendeztük be a barlangot úgy, hogy az év bármelyik napján üzembe tudjuk helyezni az optikai, illetve elektronikai installációkat.

A lézerlabirintus mellett több más kísérleti elrendezés is helyet kapott és kap a barlangban, ezek a fizika órán tanultakat hivatottak elmélyíteni, illetve túlmutatnak rajtuk. A továbbiakban szakkörös diákjaink mutatják be, magyarázzák el az egyes kísérleteket.

Lézerlabirintus

Weisz Pál, 11.C

Mi ez? – Lézer akadálypálya: a játék célja úgy eljutni a pince egyik végéből a másikba, hogy közben egyik fénysugár útját se szakítsuk meg (*1. ábra*). A lézert – természetesen – a falra szerelt precíziós tükrökkel sok helyen eltérítettük, hogy minél nehezebb legyen végrehajtani a feladatot. A fénysugarakat füstgép segítségével tesszük láthatóvá. Az általunk használt vörös és zöld színű nyalábokat a mennyezetre rögzített pormentesen záródó dobozból indítjuk, és a pálya végéről visszavezetjük a dobozba. Itt egy saját tervezésű és építésű érzékelő áramkör figyeli, hogy a fénysugár megszakadt-e valahol. A doboztól UTP kábelből készített kommunikációs csatorna fut a fal mellett található – szintén saját készítésű – vezérlőpultig, amellyel az egész berendezés működése irányítható.

Miért van erre szükség? – Ez egy biztonsági rendszer. Ezek a lézerek nem kimondottan nagy teljesítményűek, 5 mW-osak. Tehát például egy papírlapot nem gyújtanak fel. Viszont, ha közvetlenül belenéznénk, maradandó károsodás érné szemünket. Ennek oka, hogy szemünk a párhuzamos fénysugarakat a retinára fókuszálja, ahol a teljesítménysűrűség – egységnyi felületre jutó teljesítmény – nagyobb, így már képes lenne roncsolni a szöveteket. Ennek elkerülésére készült a biztonsági áramkör, amely kikapcsolja a fényforrást, ha valamilyen tárgy akadályozza a sugármenetet. Az ember fejének bármelyik része előbb ér a fény útjába, mint a szeme, így a közvetlen belenézés előtt már ki van kapcsolva a fénysugár. De ha mégsem (beállítás közben), akkor ott van rajta a védőszemüveg.

Hogyan működik? – Amikor valami miatt megszakad a lézersugár, az érzékelő fotodióda áramvezetési képessége megváltozik és egy RS flipflopnak nevezett logikai tárolót töröl. (Ez a digitális áramköri elem két állapot „megjegyzésére" képes, attól függően, hogy a legutolsó művelet beállítás vagy törlés volt, a kimeneten logikai 1 vagy 0 érték jelenik meg, tehát bekapcsolja-e a lézert vagy sem). Ennek hatására a lézer kikapcsol, és a vezérlőpanelen található piros színű LED kigyullad. A berendezés újbóli működéséhez először az akadályt kell eltávolítani, majd a vezérlőpanelen újra kell indítani a lézert. A gombot megnyomva a lézer bekapcsol, a szakadást jelző piros LED elalszik és egy zöld színű LED jelzi a „memória" beállítását. Két irányítóegység található a vezérlőpulton, amelyekkel a két különböző színű lézert egymástól függetlenül lehet vezérelni. A vezérlőpulton egy tesztüzemkapcsoló is található, amelyet zárva a lézer akkor sem alszik ki, ha akadály kerül az útjába, a visszajelző zöld LED folyamatosan világít, a piros LED pedig itt is a fénysugár megszakadását jelzi. E funkciónak a nyaláb pontos beállításakor van szerepe. A rendszer működés vagy beállítás közbeni bármilyen rendellenességénél a vészkapcsolóval egy mozdulattal lekapcsolható.

A fény is lehet szétszórt

Fényinterferencia – *Szabó Dániel,* 10.E

Három, különböző színű lézert, vöröset (635 nm, 8 mW), kéket (445 nm, 10 mW) és zöldet (532 nm, 15 mW) helyeztünk egymás mellé. A lézerek elé egy motor által forgatott katedrálüveget raktunk. Ezeket egy műanyag dobozba tettük és a mennyezetre erősítettük, hogy közelről, közvetlenül ne lehessen belenézni. Egy sok eres (UTP) kábel segítségével az irányítópultról működtetjük a ki- és bekapcsolást, valamint innen kapja az áramot is. Amikor a lézerek fénye megtörik a katedrálüvegen, akkor jól látható, hol oltják ki és hol erősítik egymást az átfedő hullámok

[1] Ez az írás szerepel a *Fizikai Szemle* http://fizikaiszemle.hu honlapján ingyen elérhető cikkek között. Ajánljuk, hogy a színes fényképeket ott tekintse meg a tisztelt olvasó (szerkesztő megjegyzése).

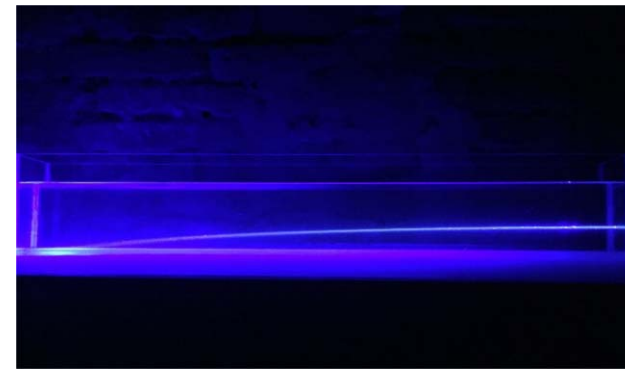
2. ábra. Felül a forgó katedrálüveg, mögötte a lézerekkel, alul a három színben játszó elhajlási mintázat (Szabó Zsolt fényképei).

(*2. ábra*). Látványos háromszínű mintázatot látunk a falon, ami az üveg forgása miatt folyamatosan mozog, változik. Az interferencia-csíkok ugyanúgy a fény hullámtermészetét igazolják, mint amikor egy hajszálat világítottunk meg egy kis teljesítményű (<1 mW) lézermutatóval, és az elhajlás jelenségét (kétoldalt gyengülő sötét-világos csíkok) jól láthattuk a falon.

A fény egyenesen halad (amikor józan)

Fényelhajlítás – *Kovács Bence Tamás,* 10.C

A fény általános iskolai tanulmányaink alapján egyenes vonalban terjed. Ám most a fénytörés jelenségének és egy vízzel töltött, hosszú üvegtartály segítségével garantáltan meginog hitünk eme állítás igazságában! Amint a tartályba nézünk, azt láthatjuk, hogy a benne haladó, teljesen átlagos lézersugár pályája nem a megszokott módon viselkedik. A fénysugár ívesen elgörbülve a tartály aljának csapódik (*3. ábra*), pedig kiindulási pontjában még a tartály alsó lapjával párhuzamosan halad. De nem kell aggódni, nem az oktatási rendszer hibája, és a fizikával sincsen semmi probléma! Eme jelenség magyarázata egyszerű: a tartályban lévő folyadék nem tiszta víz, hanem egy oldat (ebben az esetben cukoroldat), amelynek koncentrációjában gradiens van. (Ez egy igen jól hangzó szó, és azt jelenti, hogy valami a térben helyről-helyre változik, vagyis a tartály felső részében a cukor koncentrációja szinte nulla, az alsó részében a pedig nagyon nagy.) Amennyiben ismerjük a fénytörés jelenségét, tudjuk, hogy a fény közeget váltva egy bizonyos szögben – amelyet az adott anyag törésmutatója határoz meg – megtörik (és egy



3. ábra. A fény útja elgörbül.

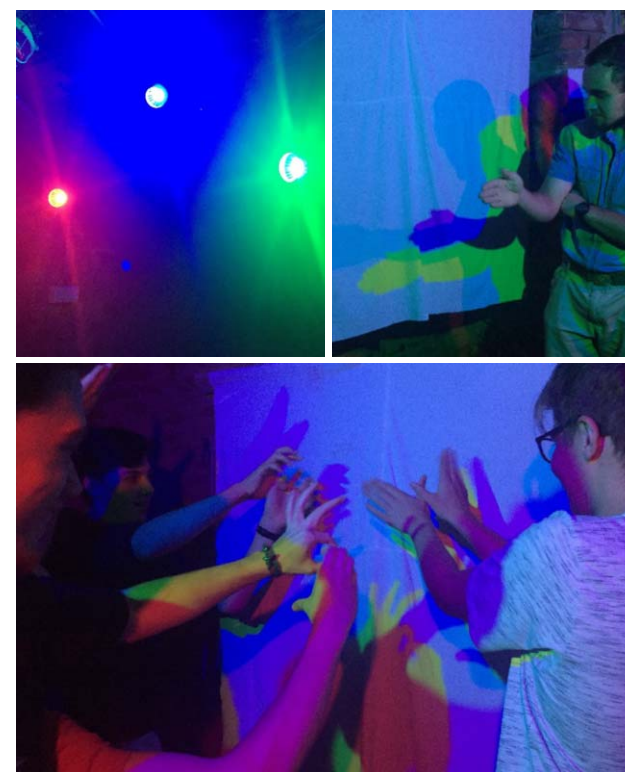
része visszaverődik). Esetünkben ahogy a cukor koncentrációja folyamatosan nő az oldatban, úgy nő folyamatosan az oldat törésmutatója is. Ez a folyamatos változás eredményezi, hogy a fénysugár ívesen elhajlik a cukoroldatban. Úgyhogy, csak ne ijedjünk meg, hanem élvezzük a fizika nyújtotta csodákat!

A kevert mindig jobban üt, mint a tiszta

Színösszeadás és színkeverés – *Lovász Boglárka,* 11.D

Három különböző színű lámpa (kék, zöld és piros) fényét egy lepedőre vetítettük. A lámpákat úgy rögzítettük a falhoz, hogy fényük a lepedőn metssze egymást. Azért kék, zöld és piros színűek, mert ezek az összeadó (additív) színkeverés alapszínei, ilyen színérzékenységű receptorok (csapocskák) vannak szemünkben, a retinán. Minden szín, amelyet szemünk-

4. ábra. Fényforrások és színes árnyékok.



5. ábra. A szivárványmodell.

kel látunk, e három szín különböző arányú kombinációja. Ha az egyik színt kitakarjuk, akkor a másik kettő összegét kapjuk (például zöld kitakarása esetén piros + kék = lila lesz).

Ha a lepedő elé tesszük kezünket, három különböző színű árnyékot láthatunk: egy türkiz, egy lila és egy sárga színűt (*4. ábra*). Azért ilyeneket, mert ahol a kezünk véletlenül kitakarja az egyik színt, ott a másik kettő összeadódik. A türkiz színű árnyék a kék és zöld eredménye, a lila szín a kék és piros keveréke, a sárgát pedig a zöld és piros hozza létre. Mindhárom fényforrást (színt) kitakarva az árnyék fekete. Ahol mind a három folt fedésben van, ott fehérnek látjuk a fényt.

6. ábra. Lissajous-görbék előállítása.

Szivárvány-modell

– Póla Márton, 9.B

„[11]Nézz a szivárványra, s dicsérd alkotóját, káprázatosan szép a pompájában. [12]Átfogja fényével az égboltozatot, a Magasságbeli keze feszítette ki." (*Sirák fia könyve,* 43. fejezet)

A kísérleti elrendezés egy fehér fényű lámpából és egy gömb alakú akváriumból áll. A lámpa fényét az akváriumra irányítjuk. Az akvárium – mint egy vízcsepp – a fehér fényt a szivárvány színeire bontja, ami egy kicsit távolabb lévő fehér vászonra vetül (*5. ábra*). Ha a lámpára lencsét rögzítünk, akkor a szivárványnak csak egy szelete látszik. Ha lencse nélkül világítunk az akváriumra, akkor – bár kicsit halványabban – a szivárvány teljes egészében, kör alakban pompázik.

Lissajous-görbék

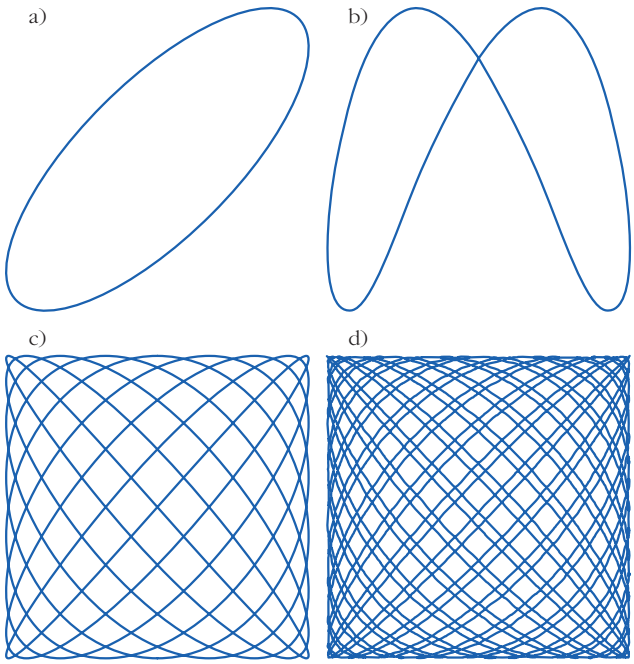
– Knoch Júlia, 12.A

Környezetünkben minden mozog, rezeg. A különböző rezgések hatással vannak egymásra. Ha a rezgések párhuzamosak egymással és azonos frekvenciájúak, akkor erősítik, illetve gyengítik, kioltják egymást; ezt nevezzük interferenciának. Ha viszont a rezgések egymásra merőlegesek, akkor is megfigyelhető egy érdekes jelenség: szuperpozíció speciális, úgynevezett Lissajous-görbéket eredményez. A Lissajous-görbék megjelenése elsősorban a két rezgés frekvenciaarányától függ: ha az arány irracionális, a görbe nem tér vissza önmagába, ha viszont racionális, akkor zárt lesz. Minél kisebb egész számokkal írható fel a két frekvencia aránya, annál egyszerűbb lesz a görbe és annál hamarabb tér vissza önmagába.

A kísérletben a két egymásra merőleges rezgést két egymásra merőlegesen forgó tükör biztosítja, amelyeket szkennermotorok mozgatnak. Ezek egy-egy függvénygenerátorra vannak kötve, így egymástól függetlenül változtathatjuk a tükrök mozgásának frekvenciáját. A két rezgés összeadása úgy történik, hogy az egyik tükröt lézerrel (405 nm-es 15 mW ibolya) világítjuk meg, ami visszaverődve a másik tükörre esik, és onnan is visszaverődik. Innen a lézer fénye egy foszforeszcens ernyőre esik, ami az ibolya fényt elnyeli, és hosszabb hullámhosszú, zöld fényt bocsát ki. E kísérletben láthatjuk a plafonra erősített berendezésből a fejünk felett haladó, eltérített ibolya színű lézerfény útját a levegőben, de a foszforencia – hosszú idejű utánvilágítás – jelenségét is megismerhetjük.

A két egymásra merőleges forgástengelyű eltérítő tükörre egy-egy hanggenerátort kötöttünk. Először kis frekvenciájú szinuszjelekkel mutatjuk be a jelenséget (1–10 Hz). Ezen a nagyságrenden a kivetülő lézerpötty mozgása lassú, a foszforeszcens ernyőn jól követhető a lézerpötty helye, a görbe kirajzolódása (*6. ábra*).

A következő a 80–200 Hz-es tartomány, itt már a lézerpötty mozgása olyan gyors, hogy a kirajzolt görbe összefüggőnek látszik.



7. ábra. Lissajous-görbék a) 1:1, b) 1:2, c) 8:9 frekvenciaarányok és d) hamis hangköz esetén.

Először a kis számok arányára mutatjuk be a jelenséget. Két, egyformán 100 Hz-es jel esetén a kirajzolódó görbe ellipszis (*7.a ábra*) és két egyforma hangot hallunk. Az egyik frekvenciát növelve, 1:2 aránynál (100 Hz, 200 Hz) a görbe a *7.b ábrához* hasonló, és oktávnyi a hangköz. 8:9 (160 Hz, 180 Hz) aránynál már disszonáns hangközt: nagy szekundot, és az előzőeknél jóval összetettebb görbét (*7.c ábra*) kapunk. Ha pedig a hangközünk „hamis", akkor még bonyolultabb görbe az eredmény (*7.d ábra*).

A diákok a függvénygenerátorokat állítva maguk is kipróbálhatják, hogy pontosan miként változik a görbe. (Itt már levesszük a hangot, ami nagyon idegesítő.)

Látni a láthatatlant

Vizsgálatok hőkamerával
– *Wensofszky Balázs* és *Mester Ádám,* 8.A

„[1]Az ég büszkesége a fényes boltozat, az Úr dicsősége ragyog fenn az égen. [2]A Nap, ha felragyog, ezt hirdeti: „Mily csodálatosak a Magasságbeli művei!" [3]Déli magasáról perzseli a földet, ki tudja ilyenkor hevét elviselni? [4]A fűtött kemence égeti az embert, de háromszor jobban a Nap a hegyeket. Izzó sugarakat lövell ki magából, tüze elkápráztatja a szemet. [5]Nagy az Úr, aki teremtette, szava irányítja gyors száguldását." (*Sirák fia könyve,* 43. fejezet)

Feladatunk az volt, hogy megmutassuk különböző testek hőmérsékletét és annak eloszlását. A hőkamera működésének alapja, hogy minden olyan test elektromágneses sugárzást bocsát ki, amely melegebb az abszolút 0 foknál, azaz −273 °C-nál. Ennek jelentős része az emberi szem által nem látható, a −40 °C … +800 °C hőmérsékleteken körülbelül 8–15 μm hullámhosszúságú infravörös tartományba esik. Ez a

8. ábra. Hőkamerával készült felvételek. Balra a kéz, jobbra annak nyoma látható a pince felmelegített falán.

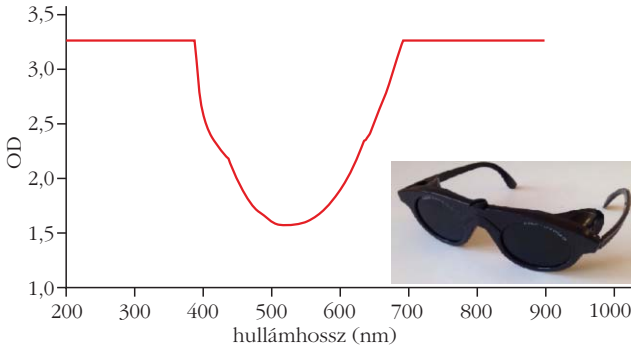
„fény" speciális anyagból készített szűrővel jól elválasztható a láthatótól. Érzékelése piciny (~20 mikron méretű) félvezető hőmérőkből kialakított pixel-detektorral történik (például 512×512). A hőkamera elektronikája és programja a szokásos fényképezőgépekhez hasonlóan regisztrálja az intenzitáseloszlást, amiből a mikroprocesszor kiszámítja a hőmérséklet-eloszlást (a hősugárzás a hőmérséklet negyedik hatványával arányos), és azt kép formájában – az eltérő hőmérsékletű tárgyakat/felületeket – különböző színekkel jeleníti meg. Ezt nevezzük termográfiának. Minél magasabb egy tárgy/felület hőmérséklete, annál több infravörös sugarat bocsát ki az említett tartományban.

A FLIR One típusú, okostelefonhoz csatlakoztatható készülékünkkel demonstrálni tudjuk: ha például a kezünket egy hidegebb felületre (egy felfüggesztett lepedőre vagy egy polcra) helyezzük és pár másodpercig ott tartjuk, akkor ujjaink melegétől a felület egy, a környezetnél magasabb átlaghőmérsékletre áll be. Így a kéz elvétele után annak „hőlenyomata" a felületen kimutatható (*8. ábra*). Továbbá kezünk segítségével bemutatjuk a víz párolgásának hőigényét és megmagyarázzuk, hogy a víz a halmazállapot-váltáshoz a testünkkel való érintkezési pontokról nyer hőt. Vagyis lokálisan a testfelület lehűl. Interaktívabb játékunk az, ha a pince legalsó részében hideg és meleg tárgyakat (forró vízzel töltött palack, alufóliába tekert 1,5 voltos elem, jégakku, jégkockákkal teli tartó) rejtünk el, és az érdeklődőknek a teljes sötétségben hőkamera segítségével kell megkeresniük ezeket, így is mutatva, hogy az eszköz sugárzás alapján mér.

Lézerbiztonság

Külön fejezetben foglalkozunk a lézerek veszélyeivel, különösen azért, mert egyes kísérletekben nagyobb teljesítményű lézereket használunk, mint ami teljességgel veszélytelen lenne.

A 18 év alatti korú tanulók korlátozottan tehetők felelőssé a viselkedésükért, tehát – minden előzetes kitanítás, erről szóló nyilatkozat aláírása mellett is – a tanár felelőssége egy esetleges baleset kizárása.



9. ábra. Az általunk használt védőszemüveg abszorpciós spektruma.

Emiatt azt javasoljuk mindenkinek, hogy a kísérletekben lehetőleg az 1-es, illetve 2-es lézerosztályba sorolt (1 mW-nál nem nagyobb teljesítményű), illetve látható tartományban a szem védekező reflexével, a pislantással kivédhető expozíciót produkáló lézereket használjanak.

A látványpedagógia lényege a látvány, tehát célunk eléréséhez a fény útjának láthatónak kell lennie. Ezt elvileg három módon lehet realizálni: vagy (i) nagyobb teljesítményű nyalábot használunk, vagy (ii) kellően sötét helyen építjük ki a rendszert, illetve (iii) megnöveljük a levegő fényszórási képességét. A mi pincénk szinte teljesen elsötétíthető, így viszonylag kis teljesítményű lézereket használhatunk. Kevéssé sötétíthető helyen, illetve még látványosabb kísérlet érdekében használhatjuk a harmadik megoldást, füst- (köd-) géppel – többnyire glicerin – párát fújunk a levegőbe. Ez utóbbi után célszerű hosszabban szellőztetni, mivel a pára mindenhova lerakódik, így a használt tükrökre, a lézerek kilépő ablakára is, lerontva azok reflexióját, illetve nem kívánt szórást eredményezve, tisztításuk pedig elég körülményes.

Meg kell különböztetnünk a lézerbiztonsági ismeretekkel nem rendelkező látogatókat, illetve a kísérleteket végző, beállító tanulókra vonatkozó szabályokat. Első esetben semmilyen tudatos baleset-megelőző cselekedetet sem feltételezhetünk, tehát a legrosszabb eset feltételezésével kell a beállításokat, hozzáféréseket, teljesítményszinteket beállítani.

A másik esetben – a kísérleteket tervező, megvalósító szakköri tagoknál – a részletes, a veszélyek ismertetése, bemutatása révén megvalósított kitanítással felelős viselkedés várható el, amelynek betartatása a tanár felelőssége. Az összes előírt óvintézkedést továbbra is be kell tartani, így, ha az 1. vagy 2. osztálybeli lézerek teljesítménye nem lenne elegendő, akkor kötelező a védőszemüveg használata.

A mi rendszerünk kiépítése, a tükrök beállítása során – amíg az elektronikus védelem nem léphetett életbe – védőszemüveget használtunk. A probléma az, hogy a teljesen kizáró – egy adott hullámhosszra 3–5 optikai sűrűségű (OD-jű), vagyis 10^{-3}–10^{-5} transzmissziójú – szemüvegben nem látszik a lézerfény útja, helye, így időnként le kell venni, oda a védelem. Ezért olyan szemüvegeket szereztünk be, amelyek széles sávúak (vagyis minden lézerre, a használt 404–635 nm fényhullámhosszon közel azonos, 1 körüli OD-vel rendelkeznek), és az esetlegesen szembe jutó lézer teljesítményét a megengedett (1 mW) szint alá csökkentik, de a nyaláb látható marad.

Az általunk használt szemüveget hegesztéshez gyártották (szabványban rögzített abszorpcióval rendelkezik: 5 SCS 1 DIN 0196 CE, abszorpciós spektrumukat lásd a *9. ábrán*) és nem mellesleg 1 nagyságrenddel olcsóbbak a speciális lézer védőszemüvegnél.

Lézerlabirintusunkban a benne közlekedőket üzemszerűen érheti lézerbesugárzás. A hosszú, több tízméteres fényutak mellett a diffrakciólimitált, körülbelül 1 mm átmérőjű nyalábok 10–30 mm-re szélesednek, a retinán keltett inger (a csökkenő felületi teljesítménysűrűséggel arányosan) fokozatosan csökken. Ezért automatikus biztonsági kikapcsolóval ellátott nagyobb teljesítményű lézert használunk (lásd fent). Az elektronikus védelmi rendszer személyi felügyelet mellett működik, a nyaláb megszakítása után emberi beavatkozás (egy nyomógomb megnyomása) szükséges a lézerek visszakapcsolásához, amit csak akkor tesz meg a kezelő, ha a labirintusban lévő személy visszamegy a kezdő pozícióba, kikerül a fényútból. A felügyelő személy azt is észleli, ha az automatika nem megfelelően működik (megszakítják a lézer útját, mégsem kapcsol le az elektronika) és a vészleállítóra rácsapva kikapcsolja az egész rendszert.

A rendszer meghibásodása – természetesen – soha nem zárható ki, ezért a kapcsoló dobozon külön vészleállító van, ami az egész elektronikát, lézereket áramtalanítja; a bejövő tápfeszültséget kapcsolja le. Ez így együtt – az egészségügyi berendezésekhez hasonlóan – háromszoros védelem a szándékolatlan besugárzás elkerülésére: üzemi főkapcsoló + elektronikus védelmi rendszer + vészleállító.

A további installációinknál használt lézerek teljesítménye is meghaladja az 1 mW-ot, így potenciálisan veszélyesek lehetnek a szemre.

Az interferenciás (katedrálüveges) berendezés a fejek felett, 2,5 m magasan van rögzítve, a 3 lézer nyalábja már 10 cm után oly mértékben kitágul, hogy messze (2-3 nagyságrenddel) alatta marad a szabványban (MSZ EN 60825-1) rögzített, a szaruhártyán megengedett maximális expozíció értékének (MPE), így még vele szemben állva is teljesen veszélytelen.

A Lissajous-görbéket kivetítő 405 nm-es lézer is nagyobb teljesítményű (15 mW), szemünk érzékenysége erre a hullámhosszra több nagyságrenddel van zöld fényé alatt, így csak oldalról látható. A lézert és a fluoreszkáló ernyőt is 2,5 m magasan helyeztük el, és még az ernyő fényes felületéről visszaverődő, mintegy 4 százalék reflexió sem irányul lefelé, noha az már veszélytelen lenne (< 1 mW). A beállítás, felszerelés közben természetesen védőszemüveget kell használni.

A cukros vízben való – görbült – fényterjedés demonstrálásához szintén kék, 445 nm-es lézerdiódát használtunk, 10 mW teljesítménnyel. Itt elvileg bármilyen színű fény jó lenne, de a fényszórás (90°-ban) a hullámhossz negyedik hatványával fordítottan arányos, azaz a kék fény szórt intenzitása a piros (635 nm) fé-

nyének több, mint négyszerese. Beállításkor itt is kötelező a védőszemüveg viselése. Az üvegkádra merőlegesen álló, rögzített lézerből nem lép ki veszélyes szintű lézerfény, a túloldalon esetlegesen kilépő nyalábot a téglafal elnyeli.

Megfelelő óvintézkedésekkel – minden esetben rámutatva a lézerek látásunkra veszélyes voltára – a balesetek, szándékolatlan besugárzás elkerülhetők.

A kísérletek összeállításában részt nem vevő látogatókat is figyelmeztetni kell ezen veszélyekre, és a lézerekre figyelmeztető, a szabványokban előírt táblákat kell elhelyezni a megfelelő helyekre (terem ajtajára, a lézerek kilépő nyílásai mellé).

Összefoglalás

A kis létszámú szakköri csoportban folyó munka pályaorientációs célzatú is. A szükséges alapok, tapasztalatok biztosításával szeretnénk ablakot nyitni diákjainknak a tudományos kutatásra és a műszaki tudományokra.

A lézeres barlang különleges színfolt az iskola életében. Olyan hely diákjainknak, ahová nem léphetnek be bármikor, mert titkos, zegzugos – ami mindig izgalmas – úton kell odajutni. Egy sötét pince, ami mégis tele van fényekkel! Nem egy készen kapott játéktér, hanem a diákokkal közösen kigondolt, megtervezett és kialakított barlang. A megteremtéséhez elvégzett munka öröme és haszna legalább olyan izgalmas és tanulságos, mint a végeredmény használatba vétele. A hely mérete és szelleme természetesen magában hordozza a folyamatos munkálkodás és újabb ötletek megvalósításának lehetőségét.

Az egész projektben pedig mindvégig benne rejlik a játék, ami vonzóvá teszi az amúgy komoly elméleti alapozást és gyakorlati megoldások nehézségét. Remélem, hogy az iskolai lézeres projekt résztvevői közül lesznek olyan fiatalok, akik nem csupán műszaki és természettudományos irányban tanulnak tovább, hanem akár a lézerfizika művelőivé is válnak, az ELI munkatársai lesznek. Legalább ilyen fontos, hogy bárhová is kerüljenek az életben, a természettudományok iránti érdeklődésük megmaradjon.

HÍREK – ESEMÉNYEK

GÁBOR DÉNES-DÍJ 2017

A Kuratórium döntése alapján immár 29. alkalommal odaítélt díjakat 2017. december 14-én, a Parlament Felsőházi termében tartott ünnepségen adták át a tizennégy – közöttük három fizikus – díjazottnak.

A határainkon kívül alkotó szakemberek közül Gábor Dénes-díjban részesült *Bakos Gáspár* fizikus, csillagász, a Princeton University egyetemi tanára a más csillagok körül keringő bolygók és az időtől függő jelenségek kutatásában, az autonóm kistávcsövek kifejlesztésében és nemzetközi hálózatba szervezésében, több földrészen való egyidejű működtetésében, az első teljesen automata, homogén csillagászati távcsőhálózat tervezésében és megvalósításában vállalt meghatározó, alkotó teljesítményéért, több mint száz új exobolygó felfedezéséért, a magyar szakemberek nemzetközi tekintélyének növeléséért.

Gábor Dénes-díjban részesült *Bozóki Zoltán József* fizikus, egyetemi tanár, az Magyar Tudományos Akadémia – Szegedi Tudományegyetem Fotoakusztikus Kutatócsoport tudományos tanácsadója, a lézeres fotoakusztikus spektroszkópián alapuló, a földgáz főbb szennyező komponenseinek (szén-dioxid, kénhidrogén, vízgőz) koncentrációjának ppm pontosságú, folyamatos mérésére, ipari környezetben alkalmas, a világ számos pontján megbízhatóan működő műszer kifejlesztésében nyújtott meghatározó, alkotó tevékenységéért, a gyártásra specializálódott spin-off cég létrehozásában, növekedési pályára állításában és vezetésében vállalt szerepéért.

Gábor Dénes-díjas lett *Koppa Pál Gábor* fizikus, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Atomfizikai Tanszéke tanszékvezető egyetemi tanára, a holografikus adattárolás, a háromdimenziós képmegjelenítés, az optikai méréstechnika és a komplex optikai rendszerek modellezése terén végzett kutatási-fejlesztési eredményeiért, az e körben szabadalmazott találmányok létrehozásában vállalt alkotó közreműködéséért, a műegyetemi fizikus- és mérnökképzésben nyújtott, elismerésre méltó oktatói és témavezetői munkásságáért.

SOLVAY-KONFERENCIA, BRÜSSZEL 2017

A Solvay-konferenciasorozatot *Ernest Solvay* indította el Brüsszelben, 1911-ben. Ezeken a konferenciákon a kezdetektől az adott korszak legnevesebb fizikusai (annak idején például *Mme. Curie, Einstein, Bohr, Rutheford* stb.) vettek részt, és ahogy *Heisenberg* 1932-ben kijelentette: a Solvay-konferenciák lényeges módon járultak hozzá a fizika fejlődéséhez. Elődeink ugyanis ezen „hősi időkben" dolgozták ki a huszadik századi fizika alapjait – a kvantummechanikát és a relativitáselméletet –, amelyek az egész mai természettudomány (fizika, kémia, biológia) és technológia (számítógépek, mobilkommunikáció, nukleáris energetika stb.) fundamentumát adják.

A Solvay-konferenciák nemes tradíciója több, mint 100 éve folytatódik. Az idei évben is több Solvay-konferenciát és workshopot rendeztek, ezek közül az egyiket *From physics of graphene to graphene for physics*[1] címmel 2017 szeptemberében. A cím azt fejezi ki, hogy míg a grafén felfedezése utáni években először annak fizikáját kellett megérteni, most már azon van a sor, hogy a fizikában és az alkalmazásokban milyen hozzájárulást ad a grafén.[2]

Ez a konferencia igen fontos volt a magyar kutatók, az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetének munkatársai számára, ugyanis a grafénnel és más kétdimenziós anyaggal már több, mint egy évtizede foglalkozunk. Kutatócsoportunk az EU egyik kiemelt kutatási programjának – *Graphene Flagship*[3] – is tagja. Magyar részről e projekt vezetője *Biró László Péter,* a hazai nanotechnológia-kutatás egyik megalapítója és *Márk Géza István,* aki részt vett a Solvay-konferencián.

A konferencián három Nobel-díjas is részt vett, egyikük *Konstantin Novoselov,* a grafén egyik felfedezője a kétdimenziós anyagokról tartott előadást. Ezen anyagcsalád első tagja a grafén volt, de mára már több százat ismerünk, amelyek egy, vagy néhány atomi réteg vastagságú lemezek. Különlegességük, hogy hosszúságuk és szélességük makroszkopikus, de a vastagságuk mikro-, sőt nanoszkopikus méretű – ezért nevezzük őket 2D anyagnak. A 2D formájú anyagok gyakran egészen új tulajdonságokkal rendelkeznek, mert egyrészt a 2D anyag teljes felületén érintkezik a környezettel, másrészt az elektronok csak kettő irányban mozoghatnak benne szabadon. További – és szinte végtelen – variációs lehetőségeket ad, ha a 2D anyagból különféle alakú részeket kivágunk, vagy különböző tulajdonságú 2D anyagokat egymásra helyezve szendvicsszerkezeteket készítünk. Így például két szigetelő réteg közé egy vezető vagy félvezető réteget lehet elhelyezni.

Ezen a területen – hogyan lehet nanoméretű alakzatokat kivágni egy grafénlemezből – néhány évvel ezelőtt a mi kutatócsoportunk is ért el világraszóló eredményeket.

Abból, hogy az elektronok csak két irányban mozoghatnak szabadon a grafénben, következik, hogy kvantumos Hall-viselkedés figyelhető meg a grafénen. A Hall-effektus abból adódik, hogy az áramra merőleges irányú erőt gyakorol a mágneses tér. E jelenség kvantumos változatát *Klaus von Klitzing* (Nobel-díj, 1985) fedezte föl. Akkor még nem léteztek 2D anyagok, de határfelületeken már létre tudtak hozni 2D elektrongázt. A grafén, mint valódi 2D anyag új távlatokat nyit ezen a téren. Von Klitzing volt a Solvay-konferencia másik Nobel-díjas résztvevője, előadásában arról beszélt, hogy a grafén segítségével az SI mértékrendszert miként helyezik új alapokra. Az SI mértékrendszerben a kilogramm etalonja egy nagy pontossággal elkészített, szigorúan őrzött tárgy. Az SI megújítása során új, megsemmisíthetetlen, alapokra helyezik a mértékrendszert, minden alapmértékegységet az atomok tulajdonságaira és az univerzális állandókra (mint például az elektron töltése, a Planck-állandó stb.) vezetünk vissza. Ehhez viszont nagyon pontosan kell mérni az atomi tulajdonságokat, amiben a grafénen mérhető kvantum Hall-effektus segít. Így az új SI-ben nincs szükség kilogrammetalonra, a mindenütt jelenlévő és tökéletesen egyforma atomok adják az új etalonokat.

A grafén a spintronika szempontjából is ígéretes anyag. Hagyományos elektronikus eszközeink az áramokon és feszültségeken alapulnak, az áram és a feszültség viszont abból adódik, hogy az elektronnak elektromos töltése van. Azonban az elektron – mint elemi részecske – nem csupán elektromos töltéssel rendelkezik, hanem önálló mágneses momentuma, spinje is van. A technológiában már eddig is felhasználtuk a mágneses tulajdonságokat, például a hard diszkek esetén, ahol mágneses módon történik az adattárolás. A konferencián előadást tartott a Nobel-díjas *Albert Fert,* akinek „óriás mágneses ellenállás" felfedezésén alapul a mai, nagy kapacitású hard diszkek működése. Ezek azonban mozgó alkatrészeket tartalmaznak, sérülékenyek és lassúak. Az elektronikus eszközök viszont csak az elektron töltését használják fel, a spinjét nem. Ahhoz, hogy az elektronikus eszközökben áramokat és feszültségeket mozgassunk, jelentős energiát kell befektetni, amelynek egy része ráadásul hulladékhővé alakul. Ezen változtathatnak a spintronikai eszközök, ahol az információt az elektronok spinje hordozza.

Tapasztó Levente, az MTA „Újszerű 2D Anyagok Nanomegmunkálása" Lendület Kutatócsoport és az MTA EK MFA Nanotechnológiai Osztály vezetője, aki 2015-ben az European Research Council Starting Grant öt éves, 1,5 millió euróra rúgó kutatási támogatását is elnyerte, munkatársaival kimutatta, hogy habár a 3D szén önmagában nem mágneses anyag, a 2D grafénből kivágott nanoszalag bizonyos körülmények között ferromágneses vagy antiferromágneses viselkedést mutat. Ebből, a *Nature* folyóiratban publikált eredményből kiindulva Tapasztó Levente *Hagymási Imrével* és *Vancsó Péterrel* kimutatta, hogy grafén nanoszalagokból új fajta, háromállapotú tranzisztorokat lehet készíteni, amelyek egyszerre, vezérelhető módon mutatnak elektronikus és spintronikus viselkedést.

A 2D nanoelektronikai eszközök működésének megértéséhez, tervezéséhez szükséges az elektron viselkedésének szimulációja. Ezt teszi lehetővé a Márk Géza István és munkatársai által kidolgozott hullámcsomag dinamikai programcsomag, amit be is mutattak a konferencián.

Az imént felsorolt eredmények mellett még sok fontos és érdekes munkáról számoltak be a konferencián. Egyik ilyen az olcsó, grafénalapú infravörös kamerák létrehozása volt. A jelenleg létező infravörös kamerák igen drága eszközök, a konferencián bemutatott egyik kutatás ezen kamerák árának drasztikus csökkentését célozza, így néhány év múlva az IR kamerák akár a mobiltelefonok részeivé válhatnak.

A több mint száz éve, az első Solvay-konferenciákon elvetett magok termőre fordultak – az akkor megalapozott, kezdetben egzotikusnak ható kvantummechanika a mindennapi és a jövőbeni eszközeink működésének alapját képezi.

Márk Géza

---

[1] *A grafén fizikájától a grafén a fizikábanig* – http://www.solvayinstitutes.be/event/workshop/graphene_2017/graphene_2017.html

[2] A grafén a szén egy atomnyi vastagságú (vékonyságú) rétegét jelenti.

[3] *Zászlóshajóprogram* – http://graphene-flagship.eu

Az Eötvös Társulat kitüntetései és díjai – felhívás javaslattételre

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

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

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

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

Társulati kitüntetések

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

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

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

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

Tudományos és felsőoktatási díjak

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

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

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

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

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

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

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

Gombás Pál-díj „a kvantumelmélet atom- és molekulafizikai alkalmazásában, továbbá a statisztikus fizikában végzett elméleti kutatásokkal elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért";

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

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

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

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

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

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

ISSN 0015325-7