

# fizikai szemle



2007/6



Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat  
havonta megjelenő folyóirata.  
Támogatók: A Magyar Tudományos  
Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya,  
az Oktatási Minisztérium,  
a Magyar Biofizikai Társaság,  
a Magyar Nukleáris Társaság  
és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:

Németh Judit

Szerkesztőbizottság:

Beke Dezső, Bencze Gyula,  
Czitrovsky Aladár, Faigel Gyula,  
Gyulai József, Horváth Dezső,  
Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Lendvai János,  
Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter,  
Sükösd Csaba, Szabados László,  
Szabó Gábor, Tóth Kálmán,  
Trócsányi Zoltán, Turiné Frank Zsuzsa,  
Ujvári Sándor

Szerkesztő:

Tóth Kálmán

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:

szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A folyóirat honlapja:

<http://www.fizikaiszemle.hu>

A címlapon:

Az MTA 2007. évi Aranyérmé  
Keszthelyi Lajos munkásságát,  
benne a Mössbauer-jelenségen alapuló  
mérési eljárás meghonosítását,  
jutalmazta. „Aranyérmes” címképünk  
a legismertebb magyar  
Mössbauer-csoportokat mutatja.

## TARTALOM

<i>Hraskó Péter</i> : A GP-B kísérlet	181
<i>Jubász Zoltán</i> : Népzenei összehasonlító elemzések mesterséges intelligenciákkal	183
<i>Rajta István</i> : Protonnyalábos mikromegmunkálás: egy új, direkt írásos, 3-dimenziós litográfias eljárás	187
<i>Balogh Éva, Angeli István</i> : A fizikus szerepe a daganatos betegek gyógyításában	191
Tisza László, 1907–... (T. K.)	195
<i>Fülöp Zolt</i> : Magreakciók és a nukleáris asztrofizika	196
<i>Abonyi Iván</i> : Emlékezés az ELTE TTK Elméleti Fizikai Tanszékének egykori tanáaira	197
<b>ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG</b>	
<i>Czirók András</i> : Sejtek önszerveződésének fizikája	201
<b>A FIZIKA TANÍTÁSA</b>	
<i>Szakmány Tibor, Papp Katalin</i> : Digitális fényképezőgép alkalmazása a fizika tanításában	205
<b>KÖNYVESPOLC</b>	208
<b>HÍREK – ESEMÉNYEK</b>	210
<b>MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN</b>	
Hálózatok mindenütt ( <i>Farkas Illés</i> )	216
<i>P. Hraskó</i> : The Gravity-Probe-B experiment	
<i>Z. Jubász</i> : Comparative analysis of folk music using artificial intelligence method	
<i>I. Rajta</i> : Microforming with proton beams – a new direct, 3D lithographic procedure	
<i>É. Balogh, I. Angeli</i> : The tasks of the physicist in oncological therapy	
László Tisza 1907–... (K. T.)	
<i>Zs. Fülöp</i> : Nuclear reactions and astrophysics	
<i>I. Abonyi</i> : Four late Professors of the Department of Theoretical Physics at Eötvös University, Budapest	
<b>FROM ATOMS TO STARS</b>	
<i>A. Czirók</i> : The physics of cellular self-organization	
<b>TEACHING PHYSICS</b>	
<i>T. Szakmány, K. Papp</i> : The use of digital cameras in the teaching of physics	
<b>BOOKS, EVENTS</b>	
<b>SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL</b>	
Networks everywhere ( <i>I. Farkas</i> )	
<i>P. Hraskó</i> : Das Schwerekraft-Sonden-B-Experiment	
<i>Z. Jubász</i> : Vergleichende Analyse von Volksweisen mit Methoden der künstlichen Intelligenz	
<i>I. Rajta</i> : Mikrobearbeitung mit Protonenstrahlen: ein neues, direktes, dreidimensionales lithografisches Verfahren	
<i>É. Balogh, I. Angeli</i> : Die Rolle des Physikers in der onkologischen Therapie	
László Tisza 1907–... (K. T.)	
<i>Zs. Fülöp</i> : Kernreaktionen und Kern-Astrophysik	
<i>I. Abonyi</i> : Vier Professoren des Lehrstuhls für Theoretische Physik an der Eötvös-Universität, Budapest	
<b>VON DEN ATOMEN BIS ZU DEN STERNEN</b>	
<i>A. Czirók</i> : Die Physik der Selbst-Organisation von Zellen	
<b>PHYSIKUNTERRICHT</b>	
<i>T. Szakmány, K. Papp</i> : Digitale Fotoapparate im Physikunterricht	
<b>BÜCHER, EREIGNISSE</b>	
<b>WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE</b>	
Netze überall ( <i>I. Farkas</i> )	
<i>П. Храшко</i> : Эксперимент GP-B по тяготению и инерции	
<i>З. Югас</i> : Сравнительный анализ народной музыки методами искусственного интеллекта	
<i>И. Райта</i> : Микро-обработка протонными пучками: новый, непосредственный, трехмерный вариант литографии	
<i>Э. Балог, И. Анжели</i> : Задачи физика в процедурах лечения рака	
Ласло Тиса, 1907–... (K. T.)	
<i>Ж. Фюльен</i> : Ядерные реакции и ядерная астрофизика	
<i>И. Абони</i> : Памяти четырех профессоров кафедры теоретической физики на Будапештском Университете им. Этвеша	
<b>OT ATOMOV DO ZVEZD</b>	
<i>A. Цирок</i> : Физика самоорганизации клеток	
<b>ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ</b>	
<i>T. Sakmány, K. Papp</i> : Применение цифровых фотокамер в обучении физике	
<b>КНИГИ, ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ</b>	
<b>НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ</b>	
Повсеместно – сети ( <i>И. Фаркаш</i> )	

Szerkesztőség: 1027 Budapest, II. Fő utca 68. Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

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

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Németh Judit főszerkesztő.

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

Nyomdai előkészítés: Kármán Tamás, 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 egyzámlán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 750.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

LVII. évfolyam

6. szám

2007. június

### A GP-B KÍSÉRLET

Hraskó Péter  
PTE Elméleti Fizika Tanszék

A NASA 1958-ben jött létre, és 1964 óta finanszírozza a *Gravity-Probe-B (GP-B)* kísérletet. Ha ettől az időponttól számítjuk a kísérlet előkészítő fázisát, akkor ez éppen 40 évig tartott, mert a kísérleti berendezést szállító űrhajó 2004 áprilisában emelkedett a magasba. Az előkészületek azért húzódtak el ennyire, mert rendkívüli technikai nehézségekkel kellett megküzdeni. Megérte-e? Arányban áll-e a kísérletben vizsgált probléma jelentősége a ráfordított szellemi és anyagi erőfeszítéssel? Az alábbiakból remélhetően kiderül, hogy igen, mert a vizsgálat célkeresztjében a fizika egyik legfontosabb fogalmi eszköze, az *inerciarendszer* állt.

Amikor az  $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$  Newton-egyenlet segítségével meg akarunk oldani egy mechanikai feladatot, előzetesen pontosan tisztáznunk kell, inerciarendszer-e az, amihez a gyorsulást viszonyítjuk, vagy sem. Ha ugyanis nem az, akkor a jobb oldalon az erők közé a valódi erőkön kívül a tehetetlenségi erőket – vagy más néven inerciaerőket – is oda kell írni. Azt gondolná az ember, hogy mindig az inerciarendszer választása a legcélszerűbb, mert az egyenlet jobb oldala az inerciaerők hiánya miatt ekkor a legegyszerűbb. De a gyakorlatban ez szinte soha sincs így, ugyanis a koordináta-rendszer megválasztásában sokkal nagyobb súllyal esik latba az a szempont, hogy a koordináta-rendszer nyugodjon azokhoz az objektumokhoz (például a laboratórium falaihoz) képest, amelyekhez a mozgást ténylegesen viszonyítjuk. Ezért szinte mindig a Földhöz képest nyugvó koordinátákat választunk, és ha pontosan akarunk számolni, figyelembe kell vennünk azokat az inerciaerőket, amelyek abból származnak, hogy a koordináta-rendszerünk együtt forog a Földdel.

A newtoni fizika azonban nem korlátozódik a Földön lejátszódó jelenségek körére. Egy merész általánosítással a Naprendszer tárgyalására is illetékesnek nyilvánítja magát azzal a feltevésével, hogy az  $m\mathbf{a} = \mathbf{F}$  egyenletet a bolygók mozgására is alkalmazhatjuk, ha a jobb oldalra beírjuk a Naprendszer égitestei között

ható  $\gamma M_1 M_2 / r^2$  gravitációs erőt. A Naprendszert nem kell viszonyítanunk semmilyen eleve adott objektumhoz, ezért ebben az esetben olyan koordináta-rendszer célszerű választani, amely inerciarendszert határoz meg. A mozgásegyenlet jobb oldalán ekkor csak a gravitációs erő jelenik meg, inerciaerők szóba sem jöhetnek. A csillagászati megfigyelések nagy pontossággal igazolják ezen számítások helyességét.

Az általános relativitáselmélet majdnem pontosan ugyanolyan bolygópályákat jósol, mint a newtoni fizika, de ettől tökéletesen eltérő alapokon. *Einstein* elméletében a bolygópályák kiszámításánál nem kell foglalkozni azzal, hogy a koordináta-rendszerünk inerciarendszer-e vagy sem. Ez valószínűleg elég hihetetlenül hangzik azoknak, akik általános relativitáselmélettel még nem foglalkoztak, és hozzászórtak, hogy a newtoni fizikában egyáltalán nem mindegy, melyik eset áll fenn. Az általános relativitáselméletben azonban valójában egyáltalán nincs hely kozmikus méretű (más néven *globális*) inerciarendszerek számára, noha a *lokális inerciarendszerek* ebben az elméletben is fontos szerepet játszanak. Egy szabadon, forgásmentesen keringő űrhajó ilyen rendszer, mert az elengedett tárgyak az űrhajó falaihoz képest megtartják egyenletes, egyenesvonalú mozgásukat vagy nyugalmi állapotukat (súlytalanság), és inerciarendszernek éppen az ilyen tulajdonságú vonatkoztatási rendszereket nevezünk. A globális inerciarendszer azonban az elmélet szerint üres fogalom, pusztán fikció, amelynek nincs semmiféle realitása.

Tényleg így van-e? A bolygómozgás alapján nem könnyű döntenet, mert a bolygópályákat mindkét elmélet nagy pontossággal megjósolja (igaz, az általános relativitáselmélet pontosabban), és az egyik elmélet kiinduló lépése a globális inerciarendszer megválasztása, míg a másik azon a feltételezésen nyugszik, hogy ilyen inerciarendszerek egyáltalán nincsenek. Ahhoz, hogy döntenet tudjunk, mindenekelőtt le kell szögez-nünk, hogy a tapasztalattal egyező számítási eredmény



önmagában még kevés ahhoz, hogy visszamenőleg igazoljon minden feltevést, amit a számítás közben használtunk. A fizika történetéből sok ilyen példát ismerünk. A hidrogénatom Bohr-modellje például pontosan elvezetett a tapasztalatilag ismert Balmer-formulához, mégsem bizonyult igaznak. Felváltotta a kvantumelmélet, amelyből szintén levezethető a Balmer-formula anélkül, hogy szó esne a Bohr-modell alapvető fogalmáról, a Bohr-pályákról. A kvantumelmélet lényegéhez tartozik, hogy ilyen klasszikus pályák egyáltalán nincsenek is, hanem csupán fikciók.

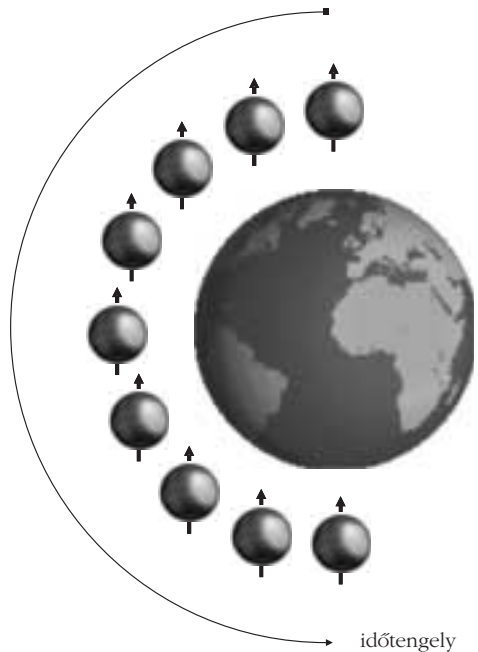
A globális inerciarendszerekkel eléggé hasonló a helyzet, de van egy fontos különbség. Ki lehetett találni olyan kísérletet (ez a GP-B kísérlet), amely a globális inerciarendszer fogalma és a tapasztalat közötti közvetlen ellentmondásra világít rá anélkül, hogy eközben el kellene döntenünk, melyik gravitációelmélet igaz, *Newtoné* vagy *Einsteiné*.

Képzeljünk el egy forgó gömböt, amely a Föld körül kering. Az 1. ábra a gömb időben egymást követő pozícióit ábrázolja. A pálya a földrajzi pólusok fölött áthaladó kör, ahogy ez a GP-B kísérletben volt. Ha a kezdőpillanatban a gömb forgástengelye párhuzamos a Föld forgástengelyével, akkor a keringés során ennek végig így is kell maradnia. Ez akkor látszik a legvilágosabban, ha a mozgást inerciarendszerhez viszonyítjuk. Inerciarendszerben minden olyan test megtartja perdületének irányát és nagyságát, amelyre nem hat forgatónyomaték. Egy keringő testre csak a Föld gravitációs vonzása gyakorolhatna forgatónyomatékot, de ha a test pontosan gömb alakú, ilyen forgatónyomaték nem jön létre. Ezért mind a keringő gömb, mind a Föld forgástengelye megtartja az irányát az inerciarendszerhez és – ennek következtében – egymáshoz képest.

De mi van akkor, ha azt tapasztaljuk, hogy a gömb forgástengelye nem marad párhuzamos a Föld forgástengelyével? Ha minden kísérleti hibát sikerül megnyugtatóan kizárni, csak egy következtetés marad: Nem volt jogos inerciarendszerhez viszonyítva elképzelni a mozgást, mert a kísérlet ellentmond annak, hogy ilyen rendszer létezik.

A GP-B kísérlet, amely az első és mindeddig az egyetlen ilyen kísérlet volt,<sup>1</sup> arra az eredményre vezetett, hogy a forgó gömb forgástengelye nem marad állandó irányú, hanem körülbelül  $6''/\text{év}$  szögsebességgel forog a körpálya síkjában. Ez rendkívül lassú forgás, de ahhoz elég, hogy döntsön a globális inerciarendszerek kérdésében: Ennek a fogalomnak a természetben nem felel meg semmi.

Hangsúlyozni kell, hogy ez a következtetés csupán az inerciarendszer fogalmán és a kísérlet eredményén alapul, nem kell hozzá hivatkozni se Newton, se Einstein elméletére. De ha figyelembe vesszük, hogy az általános relativitáselmélet alapján a  $6''/\text{év}$  szögelfor-



1. ábra. A Föld körül keringő forgó gömb

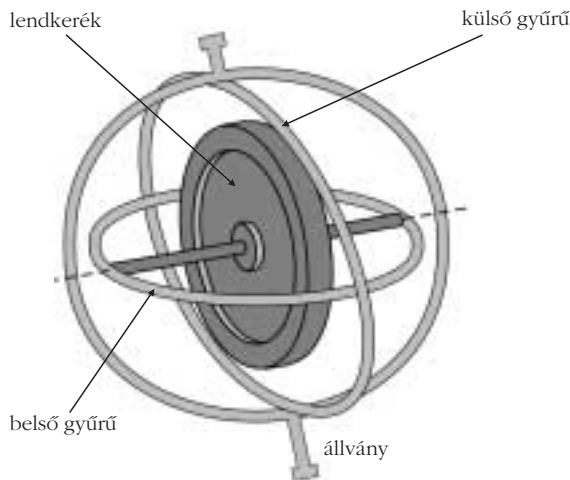
dulást *geodetikus precesszió* néven már évtizedekkel ezelőtt megjósolták, a GP-B kísérlet fontos új bizonyítékkal szolgál az általános relativitáselmélet mellett. A kísérletnek többnyire csak ezt a következményét szokták hangsúlyozni, de ha előzőleg nem tesszük világossá, hogy a geodetikus precesszió a newtoni fizika alapjainak mond ellent, nem méltányolhatjuk kellően a kísérlet jelentőségét. Összehasonlításképp gondoljunk csak a Merkúr perihéliumának eltolódására, ahol a probléma nem minőségi, hanem mennyiségi jellegű volt: A megfigyelt  $575''/\text{év-század}$  eltolódásból a newtoni gravitációelmélet csak  $534''/\text{évszázad}$  eltolódást tudott megmagyarázni. Az általános relativitáselmélet minden külön feltevés nélkül pontosan kiadja a  $41''/\text{évszázad}$  hiányt. Történetileg ez volt az első bizonyíték az elmélet mellett, amelynek jelentőségét nehéz lenne túlbecsülni. Perihéliumeltolódás azonban a newtoni és az einsteini elméletben egyaránt van, csak egy kicsit más mértékben, ezért ez a jelenség nem világít rá élesen a két elmélet közötti gyökeres különbözősége. A geodetikus precesszió ezt inkább megteszi, mert minőségileg új jelenség a newtoni fizikához képest.

Az általános relativitáselmélet szerint azonban a poláris pályán keringő gömb forgástengelye csak akkor precesszálna pontosan a keringés síkjában, ha a Föld nem forogna. A Föld forgása miatt a gömb forgástengelye valójában kimozdul ebből a síkból, de ennek a *dregnek*<sup>2</sup> nevezett precesszióknak a szögsebessége körülbelül 170-szer kisebb a geodetikus precesszió szögsebességénél. A GP-B kísérletben azért választottak poláris pályát, hogy a kétfajta precessziót könnyebben elkülöníthessék egymástól.<sup>3</sup> A kísérlet pontossága azonban körülbelül 1%-os lett, és ez nem elegendő a dreg megfigyeléséhez.

<sup>1</sup> Az ESA (European Space Agency, Európai Űrügynökség) 2020-ra tervezi a Hyper elnevezésű szonda felbocsátását, amely egyéb feladatok mellett a GP-B kísérlethez hasonló programot is végrehajt majd.

<sup>2</sup> A *drag* (húzás, vonzás) angol elnevezés magyar adaptációja.

<sup>3</sup> Egyenlítői pályán mindkét precesszió a pályasíkjában történik.



2. ábra. A giroszkóp szerkezeti elemei

A geodetikus precesszió olyan lassú mozgás, hogy kimutatása egészen különleges eszközöket igényelt, melyek kifejlesztése évtizedekig tartott. A csúcstechnológiát felhasználó műszerek ismertetéséhez nem vagyok eléggé felkészült, de egy kérdést semmiképpen sem kerülhetek meg: Hogyan lehetett körpályán tartani egy forgó gömböt úgy, hogy közben észlelni lehessen a forgástengely parányi elfordulását?

Ezt egy űrhajóhoz rögzített giroszkóp segítségével lehetett megvalósítani. A giroszkóp vázlatos rajzát a 2. ábra mutatja. A kardántengelyes felfüggesztés lehetővé teszi, hogy a lendkerék tengelye beállhasson minden irányban, pontosan úgy, mintha a lendkerék szabadon lebegne. A giroszkóp állványa azonban az űrhajóhoz van rögzítve, ezért a lendkerék centruma az űrhajóval együtt kering anélkül, hogy ez bármilyen mértékben korlátozná a lendkerék orientációját.

A GP-B űrhajó négy giroszkópot vitt magával, amelyeknek az orientációja egymástól függetlenül változhatott. A „lendkerék” valójában nem kerék, hanem egy majdnem tökéletes gömb volt, nehogy valamilyen fizikai eredetű forgatónyomaték hathasson rá. A felület egyenetlenségei olyan minimálisak voltak, hogy ha a Föld ugyanilyen arányban térne el az ideális gömbalaktól, a legmagasabb hegycsúcsok és a legmélyebb óceáni árkok két és fél méter magasak, illetve mélyek lennének. Mind a négy giroszkóp elfordulása megfelelt a várt  $6''/\text{év}$  szögsebességnek.

Még egy kérdés van hátra: Milyen *gyakorlati* következtetést kell levonnunk abból, hogy globális inerciarendszerek nincsenek? A következtetés biztosan nem az, hogy ezt a fogalmat örökre száműznünk kell a fizikából. A kérdést azzal összefüggésben kell megválaszolnunk, hogy milyen viszonyban van egymással Newton és Einstein gravitációelmélete. Mindkét elmélet ugyanazt a jelenségekört fedi le (Naprendszer, kettős csillagok), de az általános relativitáselmélet fogalmilag egységesebb (nem enged meg két különböző fajtájú – súlyos és tehetetlen – tömeget), és tapasztalatilag pontosabb. Newton tömegvonzás-elmélete azonban nagyon széles körben igen pontos közelítése az általános relativitáselméletnek, amelyből jól meghatározott közelítő eljárással le is származtatható. Még az űrszondák pályaszámításához is többnyire teljesen elegendő pontosságú a newtoni elmélet, ezért pedáns szószálhasogatás lenne, ha ilyen esetekben nem ezt az elméletet használnánk – a globális inerciarendszereivel együtt. Természetesen a középiskolában is ezt az elméletet tanítjuk. Legfeljebb arról lehet szó, hogy nagyobb hangsúlyt kellene helyezni a Newton-elmélet azon feltevéseire (globális inerciarendszerek léte, a súlyos és a tehetetlen tömeg kettőssége), amelyek az általános relativitáselmélet kiindulópontját képezik.

## NÉPZENEI ÖSSZEHASONLÍTÓ ELEMZÉSEK MESTERSÉGES INTELLIGENCIÁKKAL

Juhász Zoltán

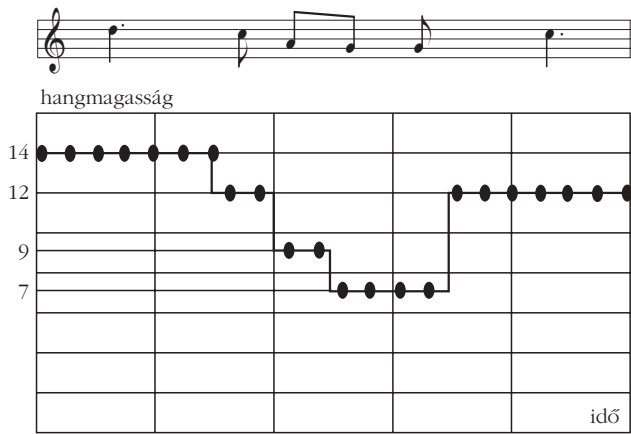
Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

Kilenc eurázsiai népzene reprezentatív dallamgyűjteményeit elemeztük az úgynevezett Kohonen-féle önszervező térképek segítségével. A mesterséges intelligenciák megtanulták a különböző népzeneik jellegzetes dallamvonal típusait, mintegy modellezve a zenei nyelveket. A nemzeti zenei nyelvek egymás közti kapcsolatai felvetették egy valaha létezett közös zenei ősnyelv lehetőségét. Ennek rekonstrukciója arra a következtetésre vezetett, hogy a zenei ősnyelv legtöbb elemét éppen a mai magyar népzene őrzi, így a Kárpát-medence igazolhatóan központi helyet foglal el Eurázsia zenei térképén.

*Kodály* Páva-variációit hallgatva elgondolkodhatunk azon, hogy micsoda szövevényes kapcsolatrendszer fűzheti össze a népzene sok ezer dallamát, ha

egyetlen dallamtípus is ilyen csillogóan gazdag változatosságban mutatja meg különböző arcait. Ez a gazdagság elsősorban a szájhagyományos műveltség legfőbb alkotó módszerének, a variálásnak köszönhető. A népzene életéhez éppúgy hozzátartozik a változatok folytonos születése és a kevésbé sikeres változatok eltűnése, mint a mutációké az élővilághoz. A variánsok képződése és elhalása eredményeként kikristályosodó rend kutatása azonban, már csak a dallamok óriási száma miatt is, igen nehéz, hiszen például a *Zenatudományi Intézet* archívumában 200 000-nél is több egyedi dallamváltozat található.

Az elemző munkát nyilván megkönnyíthetjük olyan számítógépes algoritmusokkal, amelyek mintegy „maguktól” megkeresik a dallamsokaságokban rejtőző



$$\mathbf{x} = [14 \quad \dots \quad 14, 12, 12, 9, 9, 7 \quad \dots \quad 7, 12 \quad \dots \quad 12]$$

1. ábra. A dallamvonalat leíró vektor származtatása. A hangmagasság-idő függvényből az ábrán pontokkal jelölt diszkrét időpontokban veszünk mintát, és ezeket az  $\mathbf{x}$  vektorban tároljuk. A vektor dimenziószáma a minták számával egyenlő.

legfontosabb alapformákat, és ezzel megmutatják a vég nélküli variálás kiindulópontjait, azokat az elvont, a valóságban pontosan tán soha el sem hangzó formákat, melyek éppen a belőlük fakadó változatok segítségével őrződnek meg évezredekig egy-egy szájhagyományos műveltség emlékezetében.

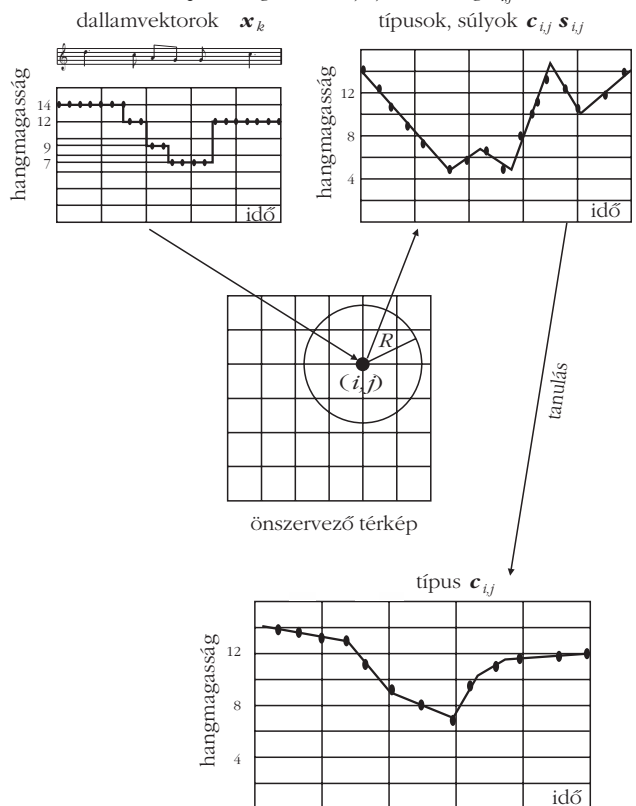
Első lépésként keresnünk kell egy olyan módszert, mely a dallamokat matematikailag is értelmezhető módon – az időben egymást követő hangmagasságértékeket tartalmazó számsor formájában – írja le. A számsor származtatását az 1. ábrán éppen a Kodály művének címet adó magyar népdal, a *Felszállott a páva* első sora illusztrálja. A kotta alapján először megalkotjuk a hangmagasság-idő függvényt. Az 1. ábrán a vastag lépcsős vonal mutatja, hogy a hangmagasság-idő függvényben a félhangugrásnak egységnyi, a nagyszekundlépésnek két egységnyi stb. változás felel meg. A függvényben a hangok időtartama is megjelenik, így az a ritmus lényeges jellemzőit is leképezi. A folytonos hangmagasság-idő függvényt alkalmasan megválasztott  $D$  darab egyenlő szakaszra bontjuk, és minden szakaszon mintát veszünk a hangmagasságból. A dallamsorokat leíró hangmagasság-minták sorozata így egy  $D$ -dimenziós vektorban jelenik meg.

A tapasztalat azt mutatja, hogy  $D = 32$  minta kielégítő pontossággal írja le népdalaink egy-egy sorát. A módszer egyaránt alkalmazható teljes dallamok, dallamsorok, vagy sorpárok (pl. az első és második sorok alkotta dallamrészecskék) leképezésére. Itt jegyzem meg, hogy a dallamok a népzeneudományban szokásos módon mind közös  $G$  záróhangra transzponálva értendők. Minden dallamsorból, annak szótagszámától, ritmusától, tempójától, tehát tényleges időtartamától függetlenül mindig 32 hangmintát veszünk, így valóban minden dallamsornak egy 32-dimenziós vektor felel meg. Sorpárok és egész dallamok vizsgálatára értelemszerűen legalább 64 hangmintát veszünk, tehát a nagyobb zenei egységeket magasabb dimenziójú térbe képezzük le.

A  $D$ -dimenziós dallamvonalvektorok a fentiek szerint egy  $D$ -dimenziós tér egy-egy pontjába mutatnak – a teret kifeszítő bázis első koordinátája a dallamvonal első mintájának hangértékét adja, második koordinátája a második mintáét stb. Belátható, hogy az így definiált „dallamtér”-ben két pont euklideszi távolsága éppen a dallamvonalak eltérését jellemzi, így zenei értelemben is alkalmas mértéket jelent. A dallamsokaságban rejlő zenei rendezettséget tehát egy sokdimenziós pontrendszer térbeli rendeztségébe képeztük le. A pontrendszer sűrűbb tartományai az adott műveltség által kedvelt, sokat variált zenei formákra utalnak, így e sűrűsödések gócpontjai éppen a fent említett zenei alapformáknak feleltethetők meg.

A gócpontokat – a népzene alapszerkezetét meghatározó tipikus dallamvonalakat – a mesterséges intelligenciák egyik közkedvelt típusa, az úgynevezett Kohonen-féle önszervező térkép segítségével kereshetjük meg [1]. Az önszervező térkép a 2. ábrán lévő síkbeli rácson alakul ki, egy lassú tanulási folyamat eredményeképpen. Minden egyes rácsponthoz egy  $D$ -dimenziós dallamvonalvektor tartozik – az  $(i, j)$  koordinátájú rácsponthoz például  $\mathbf{c}_{i,j}$ . Ezek a vektorok alakulnak majd a tanulás során úgy, hogy lassan egy-egy tipikus dallamvonalat írjanak le. Kezdetben a vektorokat véletlen számokkal töltjük fel, vagyis a tanulás elején csupa értelmetlen dallamvonal tölti be a leendő típusok helyét.

2. ábra. A dallamvonalak típusait tanuló önszervező térkép. A kottából származtatott dallamvonal ( $\mathbf{x}_k$ ) a négyzetrács  $(i, j)$  koordinátájú rácspontjához tartozó dallamvonal típust ( $\mathbf{c}_{i,j}$ -t) találja leghasonlóbbnak. Az  $(i, j)$  rácspont  $R$  sugarú környezetében minden dallamvonal típust kissé a maga képére formál. A tanulás végén egy jellegzetes dallamvonal típus átlagolt formája jelenik meg  $\mathbf{c}_{i,j}$ -ben.



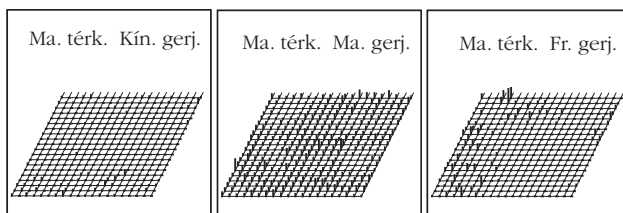
A tanítás során először találomra kiválasztunk az adatbázisból egy dallamot – az ábra szerint a  $k$ -adikat. Ebből az 1. ábrán ismertetett módon megalkotjuk az  $\mathbf{x}_k$  dallamvonal vektort, és megkeressük a térképen azt a  $\mathbf{c}_{i,j}$  típusvektort, amelytől legkisebb a távolsága. (Kezdetben persze a hasonlóság még igencsak gyenge, hiszen a  $\mathbf{c}_{i,j}$  „típusok” még véletlen hangsorok, nem igazi dallamvonalak.) Tartozzon ez a típusvektor a rács  $(i,j)$  rácspontjához (lásd 2. ábra).

Miután megtaláltuk a leginkább hasonló  $\mathbf{c}_{i,j}$  típusvektort, azt úgy módosítjuk, hogy egy kicsit jobban hasonlítson a kiválasztott igazi dallamvonalvektorra,  $\mathbf{x}_k$ -ra – vagyis, a dallamtérben a  $\mathbf{c}_{i,j}$  vektort kissé elmozdítjuk az  $\mathbf{x}_k$  vektor felé. Ezt a módosítást azonban nem csak  $\mathbf{c}_{i,j}$ -vel végezzük el, hanem az  $(i,j)$  rácspont bizonyos környezetében minden rácsponttal tartozó típusvektorral. Az  $(i,j)$  rácspont környezetén a 2. ábra értelmében annak egy adott  $R$  sugarú körön belüli szomszédságát értjük.  $R$ -et szokás a rácsméret feleként megadni a tanítás elején, majd a tanulás során értékét folyamatosan egy rács távolságnyi alá csökkentjük.

Ez után újabb dallamot választunk adatbázisunkból, és most annak helyét keressük meg a rácson. Ha ez történetesen megint az  $(i,j)$  rácsponton lévő dallamvonalhoz hasonlít a legjobban, akkor a  $\mathbf{c}_{i,j}$  típusvektort (és  $R$  sugarú környezetét) most kicsit  $e$  felé a dallamvonal felé módosítjuk, így abban most már két dallamvonal tulajdonságai átlagolódnak. Így az  $(i,j)$  rácspont a továbbiakban egyre inkább vonzza az elsőnek talált dallam rokonait. A  $\mathbf{c}_{i,j}$  típusvektor ennek megfelelően a dallamok egy bizonyos csoportjának – rokonsági körének – átlagolt dallamvonalához közelít a tanulás során. A továbbiakban ezeket az átlagolt, tipikus dallamvonalakat nevezzük típusoknak.

Persze sokkal valószínűbb, hogy a másodikkal kiválasztott dallamnak új helyet találunk a rácson, így ott egy másik dallamvonal típus kezd el fejlődni. Így idővel minden rácsponton megindul valamilyen dallamvonal típus „tanulása”. A tanulási ciklust nagyon sokszor megismételve a térkép rácspontjaihoz rendelt vektorokban lassan kialakulnak a legfontosabb dallamvonal típusok, hasonló valódi dallamvonalak csoportjainak átlagaként. Mivel pedig a típusok módosítása a tanulás során a szomszédságra is kihat, a térképen a hasonló típusok egymás közelében fejlődnek ki. A térkép tehát valóban térkép – az adott zenekultúra tulajdonságait tükrözi, csak hogy immár nem a sokdimenziós dallamtérben, hanem két dimenzióban.

Ha az önszervező térképet valamely kultúra zenei hagyományát jól reprezentáló dallamgyűjteménnyel tanítjuk, a térképen az adott kultúra összes jellemző alapformája kialakul – a térkép tehát az adott „zenei nyelv” modelljének tekinthető. A magyar népzene esetében például az adatbázisban szereplő 2500 dallam 80%-a jól osztályozható egy 400 rácspontot (dallamvonal típus) tartalmazó térképen. Az eredmények igen jó összhangban vannak a zenetudomány által felderített dallamtípusokkal, így feltételezhetjük, hogy a módszer más, általunk kevésbé ismert népzene esetében is jól határozza meg a jellemző formákat. A jelenleg rendelkezésre álló

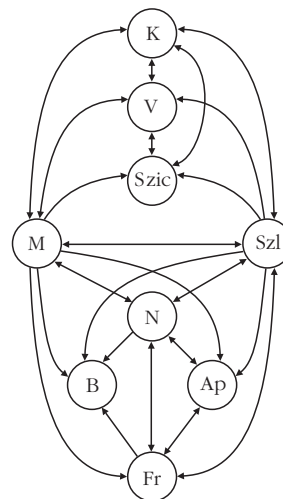


3. ábra. A magyar önszervező térkép gerjesztése kínai, magyar és francia dallamokkal. A különböző kultúrák különböző mintázatokat hívnak elő a magyar népzene térképén.

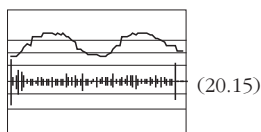
adatbázisok segítségével a következő „zenei nyelvek” modelljeit határoztuk meg: magyar, szlovák, volga-vidéki (cseremis, csuvas, tatár, votják), kínai (han), szicíliai, német, francia, bolgár és appalache-i (főleg skót és ír telepések hagyomány). Ha mármint az A nemzet (régio) térképén egy másik nemzet (B) dallamait osztályozzuk – vagyis az A nemzet térképén megkeressük azokat a típusokat, melyekhez hasonló dallam megtalálható a B nemzet dallamai között – akkor A önszervező térképén előhívhatjuk azokat a területeket, melyek a B nemzet zenéjével kapcsolatban állnak. Például a magyar térkép aktiválását kínai, magyar és francia dallamok hatására a 3. ábrán tekinthetjük át. A saját dallamok gyakorlatilag teljes területükön gerjesztik a térképet – kevés kivétellel minden rácspontra jut dallam, ha a magyar térképet magyar dallamokkal gerjesztjük. A magyar térképet ellenben világosan elkülönülő foltokon gerjesztik a kínai és francia dallamok.

Jellemezzük az A és B kultúra kapcsolatának erősségét az A térképén B dallamai által aktivált rácspontok (típusok) összes rácsponttal mért arányával! Ekkor kiválaszthatjuk például a magyar térképet legerősebben aktiváló 2 (3, 4 stb.) idegen kultúrát, majd ugyanígy járhatunk el a többi nyolccal is. Az eredményeket a 4. ábra gráfja foglalja össze. A gráfon a nemzeti kultúrákat jelképező csomópontokat akkor köti össze él, ha azok egymás legerősebb négy aktiválója között szerepelnek. A nyilak az aktiválás irányát jelzik. (Például a francia kultúrát a magyar erősen aktiválja, de fordítva ez már nem igaz. A magyar és a szlovák kultúrák vi-

4. ábra. Kilenc eurázsiai népzene kapcsolatai – kínai (K), volga-vidéki (V), szicíliai (Szi), magyar (M), szlovák (Szl), német (N), bolgár (B), appalache-i (Ap), francia (Fr).

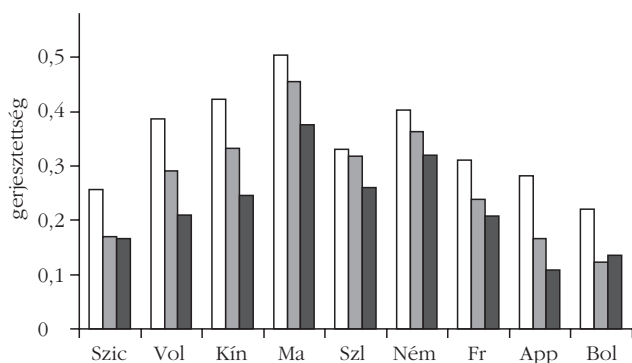






Magyar 18-231-00-01x.ps 1. Francia 10002800.ps 2.

5. ábra. A feltételezett zenei ősnyelv egy sorpárjának rekonstruált típusa, magyar és francia változattal. Az ősnyelvi típus a fenti diagramban látható.



6. ábra. A feltételezett közös zenei ősnyelv aktiválása (gerjesztése) 9 eurázsiai nép dallamtípusaival. Az oszlopok az első sorok, első sorpárok és teljes dallamok térképein mért eredményeket mutatják.

szont kölcsönösen erősen aktiválják egymást.) Az ábra igen világos és tanulságos viszonyrendszert tár elénk. A magyar és a szlovák csomópont nélkül a gráf két önálló rendszerre esne szét: a kínai, volga-vidéki, szicíliai, illetve a német, francia, appalache-i, bolgár rendszerekre. A két alrendszer – melyeket bizvást nevezhetünk „keletinek”, illetve „nyugatinak”, csak a két kárpát-medencei csomópont kapcsolja össze. Ugyanakkor bármely másik két csomópontot távolítanánk is el, azaz nem törnénk meg a gráf egységét. A Kárpát-medence tehát központi helyet foglal el a vizsgált kilenc eurázsiai népzene kapcsolatrendszerében. Az itt élő dallamtípusok kapcsolják össze Kelet és Nyugat zenei hagyományát egyetlen nagy rendszerre.

## KÉK MARS

Az Európai Űrügynökség Rosetta nevű űrszondája, útban a 67/P jelű Csurumov–Geraszinov üstökös felé, 250 kilométerre megközelítette a Mars bolygó felszínét, és több közeli felvételt készített arról. A Rosetta OSIRIS (Optical, Spectroscopic, and Infrared Remote Imaging

Ha feltesszük, hogy ez az egység egy réges-régen létezett közös zenei ősnyelv továbbélésének következménye, akkor felismerhetjük: ez az ősnyelv elég biztonságosan rekonstruálható az önszervező térkép segítségével. Ehhez a nemzeti térképeken meghatározott típusokat kell egyesítenünk egyetlen adatbázissá, és ezzel kell tanítanunk az „ősnyelv” önszervező térképét. Ekkor a több helyen is előforduló hasonló típusok nagyobb eséllyel alakítanak ki közös típust, mint azok, amelyek csak egy nemzeti kultúrában fordulnak elő. Az is belátható, hogy a viszonylag későn elterjedt, kevésbé meggyökeresedett zenei formákat már a nemzeti önszervező térképek tanításakor jelentősen kiszűrtük, így az ősnyelv térképén nagyobb valószínűséggel alakulnak ki régről közös őstípusok, mint

újabb korok elterjedt divatjelenségei. Meglehető, hogy ezek az őstípusok nem a ma élő legrimitívabb formákra hasonlítanak. A nagy hangterjedelmű, összetett dallamozgású típusok ugyanolyan gyakoriak közöttük, mint a mai népzeneekben – erre láthatunk magyar és francia példát az 5. ábrán. Mindkét dallam első két sora az ötödik fok (d) és az oktáv (g) közötti kupolás ívet futja be. Ez a két egyforma ív jelenik meg a diagramon látható ősnyelvi sorpártípusban is. A két dallam a közös első sorpáron túlmenően is mutat kapcsolatokat. A francia dallam 3. sora még az előzőket ismétli, 4. sora pedig a magyar dallam 3. sorában jelenik meg, megkettőzve. Az utolsó sorok szintén nagyon hasonlóak.

Az ősnyelv térképét eltérő területein és eltérő mértékben aktiválják a mai nemzeti zenei nyelvek attól függően, hogy melyik mennyit őriz mai állapotában a közös örökségből. A 6. ábra szerint megállapítható, hogy a legerősebben éppen a magyar népzene aktiválja az ősnyelv térképét, tehát a mi népzeneünk áll a legközelebb a közös forráshoz [2]. Ez az eredmény kiválóan megmagyarázza a 4. ábra kapcsolati gráfjáról leszárt tapasztalatokat – a Kárpát-medence éppen azért van központi helyzetben Eurázsia zenei térképén, mert itt élnek legnagyobb számban egy közös zenei ősnyelv formái.

### Irodalom

1. Kohonen, T., *Self-organising Maps*. Springer-Verlag, Berlin, 1995.
2. Juhász Z., *A zene ősnyelve*. Fríg Kiadó, Pílisvörösvár, 2006.



# PROTONNYALÁBOS MIKROMEGBUNKÁLÁS: EGY ÚJ, DIREKT ÍRÁSOS, 3-DIMENZIÓS LITOGRÁFIÁS ELJÁRÁS

Rajta István  
MTA Atommagkutató Intézete, Debrecen

Az ATOMKI 5 MV-os Van de Graaff-gyorsítójának nyalábjára telepítve 1994 óta működik egy pásztázó ionmikroszkop [1]. Az OTKA Műszerközpont pályázatán elnyert támogatással felépített nyalábcsonna a gyorsító ionnyalábját  $\sim 1 \mu\text{m}$  átmérőjűre fókuszálja, és pásztázó rendszerét alkalmassá teszi a vizsgálandó minták ilyen felbontással történő vizsgálatára. A berendezés első tíz évében különböző ionnyaláb-analitikai módszerekkel, különböző tudományos területek művelőivel kialakított együttműködések keretében interdiszciplináris alap- és alkalmazott kutatásokat végeztünk (geológiai, archeológiai, biológiai és anyagtudományi alkalmazások, légköri aeroszolok egyedi szemcseanalízise).

Az ionnyaláb-analitikai módszerek közül először a PIXE (proton-indukált röntgenemisszió) módszert valósítottuk meg. Később az RBS (Rutherford-visszaszórás), PIGE (proton-indukált gamma-emisszió), DIGE (deuteron-indukált gamma-emisszió), STIM (pásztázó transzmissziós ionmikroszkópia), IBIC (ionnyalábbal indukált töltésmikroszkópia) módszereket is bevezettük, hogy közülük mindig az adott feladatnak legjobban megfelelő kombinációt alkalmazhassuk.

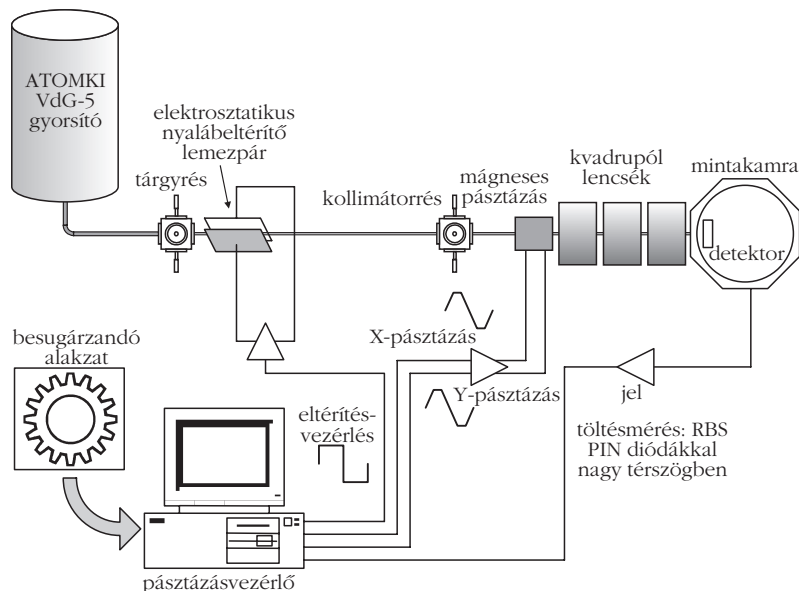
2002 óta egy új alkalmazási lehetőséggel bővült a paletta: meghonosítottuk a protonnyalábos mikromegebunkálást [2], amely egy új, direkt írásos, 3-dimenziós litográfias eljárás. Az angol nyelvű szakirodalomban jelenleg elterjedt elnevezése a Proton Beam Micromachining (PBM), illetve a P-beam Writing (PBW). Míg az

analitikai feladatoknál a gyűjtött jelekből nyerhetünk a mintára jellemző információt (általában képszerű formában: elemösszetétel, mélységi profil, sűrűségterkép stb.), a PBW esetében a kép szolgál bemenő adatként: ennek megfelelő pálya mentén mozgatjuk az ionnyalábot a minta felületén, és így alakítunk ki szelektív módosítást az anyagban. A pásztázó ionmikroszkop felépítését és a protonnyalábos mikromegebunkáláshoz való alkalmazását az 1. ábra mutatja.

A protonnyalábos mikromegebunkálás módszerét röviden a következőképpen foglalhatjuk össze: fókuszált  $\sim\text{MeV}$  energiájú ionnyalábot egy alkalmas anyagra (ezt a litográfias *reziszt*nek nevezik) pásztázunk, majd az ionok által létrehozott primer roncsolási képet kémiai eljárással előhívjuk. Ez az anyag alapvetően kétféle lehet, az ionoknak az anyaggal való kölcsönhatása alapján pozitív és negatív reziszt anyagokat különböztetünk meg. Pozitív polimer rezisztben láncaprózódás történik, az előhívás során a besugárzott területről eltávolítjuk az anyagot. Negatív polimer rezisztben is felszakadnak a polimerláncok, és egy utólagos hőkezeléssel térhálósodást hozunk létre. Ezután az előhíváskor a besugárzott területek megmaradnak, a besugárzatlan területről pedig eltávolítódik a rezisztanyag. A folyamat a 2. ábrán látható.

Pozitív reziszt alkalmazható vastag (tömbi) anyagként, vagy egy alkalmas hordozón vékonyréteggént is. Negatív reziszt esetében biztosítani kell a hordozót, valamint a reziszt és a hordozó közötti jó tapadást, ellenkező esetben az előhívás során az oldószerben úszó mikrostrukturákat kapunk. További lehetőség az ábrán jelölt galvanizálás. Ezzel a módszerrel a polimerben előállított forma negatívját fémből is el tudjuk készíteni. Az így előállított bélyegző pedig sorozatgyártásra használható. Bizonyos pozitív rezisztkeknél (mint például az ábrán mutatott PMMA (polimetil-metakrilát) esetén) a besugárzás hatására a mintában törésmutató-változás jön létre. Ha az előhívást nem végezzük el, akkor ezt a megváltozott törésmutatót kihasználva hullámvezetők kialakítása is lehetővé válik, ami integrált optikai eszközöknek lehet az egyik legfontosabb építőeleme. A „reziszt” kifejezést a fotolakknál általánosabb értelemben használjuk: egyrészt nemcsak vékonyréteg „lakk” formája lehet, hanem akár vastag tömbi anyag is. Másrészt a különböző összetételű poli-

1. ábra. A protonnyalábos mikromegebunkáláshoz szükséges pásztázó ionmikroszkop felépítése



mereken kívül bizonyos típusú üvegek (pl. Foturan™) vagy szilícium is megmunkálható.

A mintázatok létrehozására alkalmas módszereket két nagy csoportra oszthatjuk: a maszkot használó módszerek tömegtermelésre alkalmasak, a direkt írásos módszerek pedig nem igényelnek maszkot ezért leginkább prototípusok készítésére használják őket.

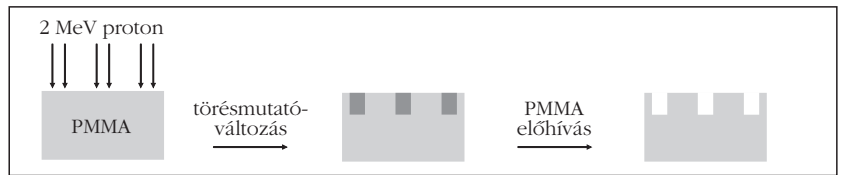
Az iparban jelenleg legelterjedtebben használt módszer a fotolitográfia, az előállítható vonalszélesség folyamatos csökkentése érdekében a felhasznált hullámhossz csökkentése szükséges (optikai, UV, EUV, röntgen). Nagy probléma a besugárzandó mintázatot tartalmazó megfelelő maszk előállítása, illetve a röntgentartomány esetén a megfelelő forrás biztosítása (szinkrotron).

Direkt írásos módszerek esetében elektronokat (Electron Beam Lithography – EBL), kis energiájú nehéz ionokat (Focused Ion Beam – FIB) vagy MeV energiájú könnyű ionokat használhatunk (PBW). Létezik maszkos ionnyalábos módszer is, ezt ionleképezéses litográfiának nevezik (Ion Projection Lithography – IPL). Ennek az a jelentősége, hogy ki tudja használni az ionok és az anyag közötti kölcsönhatás jellegéből adódó előnyöket, míg a maszkos levilágítás lehetővé teszi az olcsó tömegtermelés megvalósítását.

Természetesen nem szabad elfeledkezni a lézeres mikromegmunkálásról sem. A módszer egyik érdekessége az, hogy direkt írásos módszerként vagy maszkos módszerként is alkalmazható. Direkt írás esetén a fókuszált lézernyaláb rögzített helyen áll, ekkor a megmunkálandó mintát kell megfelelő pontossággal ( $\leq 1 \mu\text{m}$ ) mozgatni. A maszkos módszer esetén pedig egy maszkot képezünk le a megmunkálandó felületre, ilyenkor speciális maszkra és lencserendszerre van szükség.

A FIB-módszerrel szinte bármilyen anyag megmunkálható, mert a megmunkálandó anyag atomjait porlasztással távolítja el. Azonban célszerű, ha a megmunkálandó anyag elektromos vezető, ellenkező esetben töltődési problémák jelentkeznek, a nyaláb

Pozitív reziszt: PMMA (polimer-metakrilát, plexiüveg)



Negatív reziszt: SU-8 (biszfenol-A-glicid-éter)



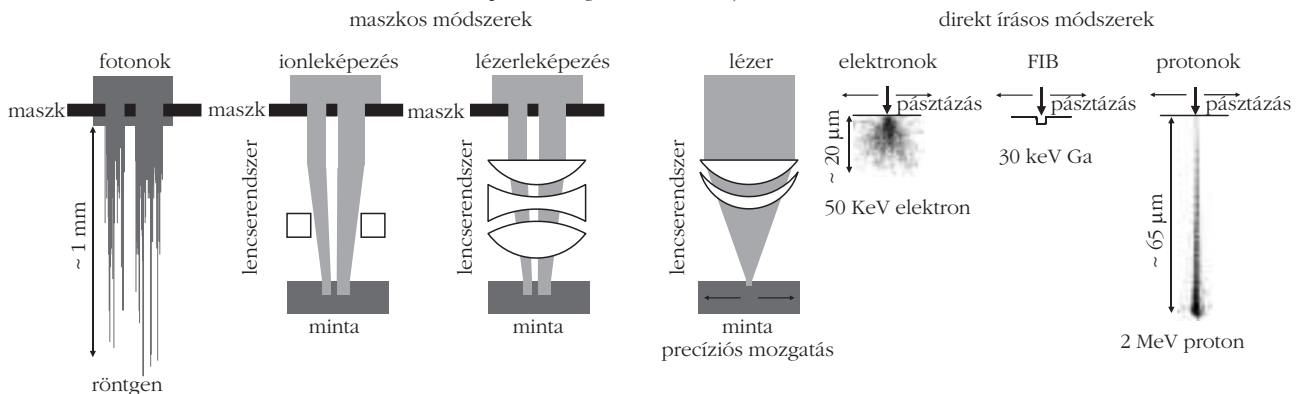
2. ábra. A mikromegmunkálás folyamata

defókuszálódhat. Háromdimenziós struktúrák kialakítása úgy lehetséges, hogy a nyalábot egy adott helyen hosszabb ideig tartjuk, így egy adott pont folyamatos eróziója biztosítja a kívánt mélységet. Ez azonban meglehetősen lassúvá teszi az eljárást. A módszer hatékonysága, a porlasztás sebessége javítható bizonyos reaktív gázok (pl. klór) bevezetésével. Más gáz bevezetésével porlasztás helyett irányított lerakódás is megvalósítható (FIB kémiai gőzfázisú leválasztás).

A különböző litográfiai módszereket összehasonlítva, az adott módszereknél szerepet játszó fizikai folyamatokat elemezve megállapíthatók a PBW-módszer jellemzői (ld. 3. ábra). Gyors (MeV energiájú) ionoknak az anyaggal való kölcsönhatása néhány különleges tulajdonsággal rendelkezik:

- Az ionnyaláb egyenes úton halad, kivéve a pálya végén megjelenő kiszélesedést. Ez lehetővé teszi, hogy ionokkal nagy oldalarányú 3-dimenziós struktúrákat állítsunk elő. Elektronnyalábos litográfiával ez nem lehetséges, mert a jól fókuszált elektronnyaláb nagymértékben szóródik az anyagba való belépéskor, így alakul ki a tipikus körte alakú besugárzott térfogat.
- Az ionnyaláb által leadott energia a mélységgel lassan változik, bizonyos esetekben szinte állandónak tekinthető, kivéve egy jelentős csúcsot (Bragg-csúcs) az ionok hatótávolságának végénél. Ez a tulajdonság biztosítja, hogy a mélység mentén egyenletes roncsoló hatás jöjjön létre. Optikai litográfiai módszereknél (UV, röntgen stb.) ezzel szemben a leadott energia a

3. ábra. Különböző típusú besugárzások fizikai jellemzőinek összehasonlítása



mélységgel exponenciálisan csökken. Vastag rezisztanyagok esetén felmerül az a probléma, hogy a felületi réteg már túlexponált lesz, míg a mélyebben lévő anyag még nem kapott elegendő besugárzást.

- Az ionnyalábok jól meghatározott behatolási mélységig jutnak el az anyagban, és ez a mélység hangolható az ionok energiájával. Ez az egyedülálló jellemző lehetővé teszi többrétegű (azaz 3-dimenziós) struktúrák kialakítását egyetlen reziszttrétegben.

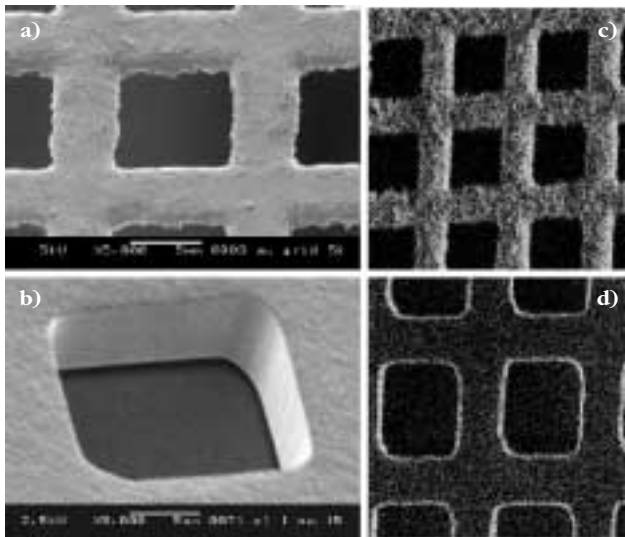
- Könnyű ionok használata esetén elhanyagolhatóan kevés nagy energiájú szekunder elektron keletkezik, amelyek jelenléte a reziszt nem kívánt exponálását eredményezné. Ez az EBL-módszer esetén úgynevezett közelhatást okoz.

## Jelenlegi világszínvonalú eredmények

A PBW-módszert a szingapúri egyetemen fejlesztették ki *F. Watt* és munkatársai, és ebben a munkában a jelen cikk szerzője is részt vett [3, 4]. Ennek a fejlesztő munkának a során többször is „nyalábméret-világrekordot” sikerült elérni. A „nagyáramú” mikronyalábméretű (μ-PIXE, μ-RBS stb.) esetén 290×450 nm<sup>2</sup>-es nyalábméretet, (50 pA bombázó nyalábbáram mellett [5]), „kis áramú” technikák (STIM, ionlumineszcencia, szekunder elektronemisszió stb.) esetén 35×75 nm<sup>2</sup>-es nyalábméretet (5000 Hz protonbeütésszám mellett [6]).

Ezen világrekorder nyalábméretetek eléréséhez szinte minden területen fejlesztésekre volt szükség. A szingapúri egyetemen telepített új gyorsító, a *Singletron* stabil nyalábot szolgáltat. Az új generációs oxfordi kvadrupól triplett lencserendszer mágnesével a

4. ábra. PBW-módszerrel készült rács szubmikronos ionnyalábok méretének meghatározásához. (a) a kereskedelmi forgalomban kapható „2000 mesh” aranyrács elektronmikroszkópos képe, (b) a PBW-rács elektronmikroszkópos képe azonos nagyítás esetén, (c) az aranyrács képe protonnyalábbal, (d) a PBW-rács képe protonnyalábbal azonos paraméterek esetén. Látható, hogy a PBW-rács sokkal jobb minőségű, ezen a mintán mért vízszintes és függőleges nyalábprofilokon végzett pontos kiértékelésekkel határoztuk meg a világrekord nyalábméreteteket.



korábbiakhoz képest jelentős javulást értünk el. A nyaláb alakját meghatározó rések (tárgyrés, kollimátorrés) tisztítása, illetve új réspofák használata is elengedhetetlen. Közvetlenül a tisztítások után minden alkalommal reprodukálható volt a 30–50 nm-es nagyságrendű nyalábméret. Egy hónapos használat után a résekkel még 100–200 nm feloldás rutinszerűen elérhető. Természetesen rezgésmentes környezetre van szükség. A mechanikai rezgéseken túl nagyon fontos az elektromos és mágneses zajok kiküszöbölése is. Tiszta nagyvákuum szükséges, amelynek eléréséhez mágneses felfüggesztésű turbószivattyúkat használtunk. Új kamrát is terveztünk: erre az erős kicsinyítéshez tartozó kisebb munkatávolság miatt volt szükség, továbbá ebbe a szabványos „6-inch wafer” is belefért. Ezek a követelmények mind egyre szigorúbbakká váltak a nyalábméret csökkentésével.

## Alkalmazások

A fentebb említett litográfiai módszerek néhány jellemzőjükben annyira különböznek egymástól, hogy ezáltal egy adott feladat megvalósítása szempontjából mindig megválasztható az ahhoz legmegfelelőbb módszer. Bizonyos esetekben néhány módszer együttes alkalmazása is szükséges lehet, ilyenkor a módszerek egymást kiegészítő jellegét kell hangsúlyozni.

Az ionnyalábokat alkalmazó módszerek közül a FIB rendelkezik a leghosszabb múlttal, és mostanra már a kereskedelmi forgalomba is bekerült. Ezek miatt mindeddig éppen a FIB-módszer talált legtöbb alkalmazási területre. Az egyik legfontosabb alkalmazási terület a félvezetőiparban a minőségellenőrzés és hibaanalízis. Egy másik pedig a sérült (foto)maszkok javítása.

Mivel az ion-leképezéses litográfia (IPL) maszkos módszer, így tömegtermelésben használható felületi mintázat kialakítására. A PBW-hez hasonlóan az IPL is a módszer kifejlesztésének viszonylag korai szakaszában van, így az alkalmazási területeinek jelentős részét a prototípus-készítés és a módszer képességeinek vizsgálata, demonstrációja jelenti.

A PBW-módszer a számottevő, jól definiált behatolási mélységnek és a mintában keletkező egyenes iontrajektóriáknak köszönhetően kifejezetten alkalmas pontos, nagy oldalarányú 3-dimenziós struktúrák készítésére. Jelenleg még nem kapható kereskedelmi forgalomban PBW-célberendezés, ezért ezt a módszert világszerte a pásztázó ionmikroszkop laboratóriumokban használják: a litográfiai alkalmazások a mikroszkop analitikai alkalmazásai mellett egyre jelentősebbé válnak. Direkt írásos jellege miatt maszkvagy prototípus-készítés esetén ideális módszer.

A PBW-módszer egy konkrét alkalmazásaként nyalábméret mérésére használható rácsot készítettünk (4. ábra), amely sokkal jobb minőségű a jelenleg kereskedelmi forgalomban kapható egyéb rácsoknál. Pásztázó ionmikroszkopon a nyalábméretet hagyományosan a „2000 mesh” (12,7 μm) rácsállandójú arany

vagy réz rácson szokásos mérni. Ezeknek a rácsoknak azonban nem megfelelő minőségű a felülete, ezért a ténylegesnél rosszabb nyalábméretet határozunk meg velük. Ahhoz, hogy a szubmikronos nyaláb méretét meg tudjuk mérni, jobb minőségű feloldásmérésre van szükség. Szilícium hátlapra felvitt vékony rétegű SU-8 rezisztanyagba négyzetes oszlopstruktúrákat készítettünk, majd a mintát nikkellel galvanizáltuk, és a megkötött SU-8 eltávolítása után a szilícium felületén fémrácsot kaptunk. A rácsot a szilícium hátlapról leválasztottuk, így öntartó, átlátszó rácsot kaptunk, amely a kívánt feloldásmérésre kiválóan alkalmas volt. Ez volt a PBW-módszer első olyan alkalmazása [5], amelynek eredményeképpen a szingapúri csoport ezt a rácsot azóta már megrendelésre is készíti, és jelenleg kereskedelmi forgalomban is árulja.

## Jövőbeli lehetőségek

Gordon E. Moore 1965-ben fogalmazta meg híressé vált és még évtizedekkel később is helytálló jóslatát, miszerint az integrált áramkörök összetettsége körülbelül másfél évenként meg fog duplázódni. Ennek az az egyik következménye, hogy a számítógépek ára egyre csökken, így többet adnak el belőlük a világpiacra, és ebből finanszírozzák a szükséges technológiai fejlesztéseket. A félvezetőiparban történő fejlesztések eredményeként (az alkatrész méretek csökkentésével) egyre több tranzisztort zsúfolnak egy adott felületű szilícium lapkára. A fellépő diffrakciós problémákat az optikai litográfiában az alkalmazott hullámhossz csökkentésével lehetett egy ideig orvosolni. A diffrakciós jelenségeket már a tervezésnél figyelembe véve ma már a hullámhossznál kisebb alkatrész méretek is megvalósíthatóak. A Moore-törvény következménye az is, hogy a technológiai fejlesztésekhez szükséges pénzösszeg is exponenciálisan nő az évek során. A múltban már sokszor gondolták azt, hogy ez az exponenciális fejlődés meg fog állni, de újabb és újabb technológiák bevezetésével eddig mégis mindig megtörtént a „csoda”. (2005-ben Moore kijelentette egy interjúban, hogy a törvény már nem lesz érvényes sokáig, mivel szerinte az atomi méretekhez érve a tranzisztorok el fogják érni miniaturizálásuk határait.)

Bár a Moore-törvény először egy megfigyelést és előrejelzést írt le, minél szélesebb körben lett ismert, annál inkább célként jelent meg az egész ipar számára. A félvezetőgyártók marketing- és kutató részlegei hatalmas energiákat fordítottak arra, hogy teljesítsék a meghatározott növekedési szinteket, amelyet a versenytársaik vélhetően el fognak érni. Az évente megjelenő ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*) számítástechnikai technológiai ütemterv szerint a Moore-törvény még jónéhány integráltáramkör-generációra érvényes lesz. Nemcsak a chipgyártásban használt optikai litográfia, hanem más területek (MEMS – mikro-elektromechanikai rendszerek, nanofotonika, molekuláris nanotechnológia, lab-on-a-chip rendszerek stb.) is profitálhatnak abból, hogy a szokásos módszerektől eltérő, új eljárásokat is használni fognak az iparban. A direkt írásos módszereket sokáig túlságosan lassúnak tekintették a tömegtermelés igényeihez képest, azonban ezeknek a módszereknek sok előnyös tulajdonságát lehet kihasználni az úgynevezett nanoimprinting litográfiai technológiával kombinálva. Az utóbbi módszer lényege az, hogy az eredeti mintázatot átviszi egy másik felületre, és ezt sorozatban is képes megtenni 100 nm alatti méretek esetén is.

## Köszönetnyilvánítás

A kutatás megvalósulását az OTKA A080, M041939, M36324 és F42474 számú, a TÉT GR-3/03 számú pályázati támogatások, valamint a szerző Bolyai János Kutatási Ösztöndíja (2002–2005 között) segítették.

## Irodalom

1. Rajta I., *A pásztázó proton mikroszkop telepítése és tudományos alkalmazásai*. PhD disszertáció. Debrecen, Atomki (1996)
2. Rajta I., Gómez-Morilla I., Abraham M.H., Kiss Á.Z., Proton beam micromachining on PMMA, Foturan and CR-39 materials. *Nucl. Instr. and Meth. B210* (2003) 260
3. van Kan J.A., Rajta I., Ansari K., Bettiol A.A., Watt F., Nickel and copper electroplating of proton beam micromachined SU-8 resist. *Microsystem Technologies* 8 (2002) 383
4. Sum T.C., Bettiol A.A., Seng H.L., Rajta I., van Kan J.A., Watt F., Proton beam writing of passive waveguides in PMMA. *Nucl. Instr. and Meth. B210* (2003) 266
5. Watt F., Rajta I., van Kan J.A., Bettiol A.A., Osipowicz T., Proton beam micromachined resolution standards for nuclear microprobes. *Nucl. Instr. and Meth. B190* (2002) 306
6. Watt F., van Kan J.A., Rajta I., Bettiol A.A., Choo T.F., Breese M.B.H., Osipowicz T., The National University of Singapore high energy ion nano-probe facility: Performance tests. *Nucl. Instr. and Meth. B210* (2003) 14

## ÚJ SZERKEZETI ANYAGOK LÍTIUM AKKUMULÁTOROK SZÁMÁRA

Az Argonne Nemzeti Laboratórium kutatói új módszert fejlesztettek ki az újra tölthető lítiumion-akkumulátorok kapacitásának és stabilitásának a növelésére. A technológia alapja egy új anyag – egy különleges nanokristályos szerkezetű, réteges kompozit – amelyből a pozitív elektróda készül. A kétkomponensű kompozitszerkezet aktív része, amely a töltést tárolja, egy inaktív komponensbe van építve, amely a szerkezetet stabilizálja. Az új találmányt először az

Amerikai Elektrokémiai Társaság május 6–10. között, Chicagóban rendezett ülésén mutatták be. A vizsgálatok szerint az új anyagnak kivételesen magas a tárolókapacitása, 250 mAh/g, a hagyományos anyagokénak több mint a kétszerese. Ezek az anyagok magas mangántartalmúak, ezért lényegesen olcsóbbak a belőlük készített akkumulátorok, mint a széles körben használt kobalt–nikkel tartalmú változatok.

(www.anl.gov)



# A FIZIKUS SZEREPE A DAGANATOS BETEGEK GYÓGYÍTÁSÁBAN

Balogh Éva  
Jósa András Megyei Kórház,  
Onkoradiológiai Osztály, Nyíregyháza  
Angeli István  
Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizika Tanszék

A civilizációs ártalmaknak, a megváltozott életvitelnek tulajdonítható, hogy egyre nő a daganatos megbetegedések száma. A rosszindulatú daganatos betegségek hazánkban a második helyet foglalják el a halálozási okok között. Az egyre szélesebb körű felvilágosítás, a szűrővizsgálatok fontosságának hangsúlyozása az oka annak, hogy az onkológiai centrumokban egyre többen jelentkeznek még a betegség kezdeti stádiumában. Ennek és az orvostudomány, valamint a technika fejlődésének köszönhető, hogy egyre javul a betegek gyógyulásának esélye.

A röntgensugárzást már az 1900-as évek elejétől használják gyógyítási célokra. A sugárterápiában sejtpusztító hatását hasznosítják, amelyet a DNS közvetlen, illetve közvetett károsító hatása révén ér el. Az ép és daganatos sejtek között sugárérzékenység szempontjából ugyan van különbség, a kezelés során azonban az ép szövetek is károsodhatnak, ezért a sugárterápia célját így fogalmazhatjuk meg: minél nagyobb, homogén eloszlású dózist (sugárterhelést) leadni a céltérfogatra, ugyanakkor elérni, hogy a környező szövet sugárterhelése a lehetséges legalacsonyabb legyen, mert a daganatos sejteket oly módon kívánjuk elpusztítani, hogy az ép szövetek sejtjei még képesek legyenek regenerálódni, „újraépülni”.

Sugárterápiás gyógyításban a daganatos betegek körülbelül 60%-a részesül. A sugárterápiás kezelések két nagy csoportra oszthatók: a teleterápiára (a sugárforrás a besugárzandó területen kívül helyezkedik el) és az üregi kezelésre (brachyterápia, ahol a sugárforrás a besugárzandó területen belül helyezkedik el). Talán kevesek gondolnák, hogy a kezelésben résztvevő egészségügyi végzettségű személyzetten kívül a fizikusnak is aktív szerepe van az onkoradiológiai osztályok betegének gyógyításában.

A fizikus feladatai:

- a sugárterápiás készülékek dozimetriai paramétereinek bemérése és folyamatos ellenőrzése,
- a besugárzási terv elkészítése,
- a sugárkezelés minőségbiztosítási eljárásának összeállítása.

Ezek közül a minőség szabályozás a sugárterápia belül az alábbi területekre osztható:

- teleterápiás egységek (gyorsítók, szimulátor) mechanikai, geometriai és dozimetriai vizsgálata, rendszeres ellenőrzése,
- brachyterápiás rendszer,
- besugárzástervező rendszer ellenőrzése, valamint

---

Jelen cikk alapját az egyik szerző (B. É.) *Besugárzás-tervezés és kiértékelés* című szakdolgozata képezi (Debreceni Egyetem, Természettudományi Kar, Kísérleti Fizikai Tanszék, 2006), amelynek teljes anyaga megtalálható a Tanszék honlapján: <http://fizika.ttk.unideb.hu/kisfiz/harsanyi/Public/diplomamunkak.htm>.

- sugárvédelmi feladatok (a betegre és a személyzetre vonatkozóan).

Ezen feladatok mindegyikének részletes bemutatása meghaladná egy ilyen rövid cikk kereteit, ezért csak a teleterápiás kezelésre kerülő betegekkel kapcsolatos fontosabb fizikusi feladatokkal foglalkozunk.

## A beteg útja az onkoradiológiai osztályokon

A sugárkezelés komplex folyamat, amelyet röviden így választhatunk: miután diagnosztizálták a daganatos megbetegedést, az orvoscsoport a rendelkezésére álló információk birtokában mérlegel és dönt, hogy a lehetséges kezelések közül melyiket alkalmazzák. Ezek lehetnek:

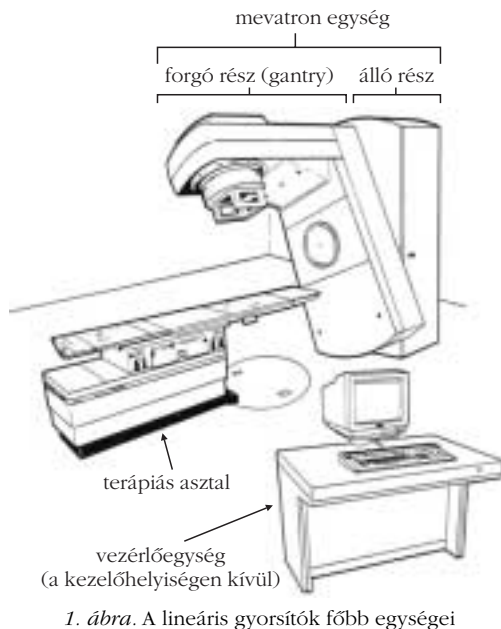
- műtét,
- kemoterápia (daganatgátló, daganatpusztító gyógyszerek),
- sugárkezelés,
- ezek megfelelő kombinációja.

A fizikusnak akkor van szerepe a gyógyításban, ha a beteg sugárkezelésben részesül. Ilyenkor az orvos elsődleges feladata a daganat helyének pontos meghatározása, amelyet az igénybe vehető képalkotó eljárások segítségével határoz meg. A legtöbb esetben a komputertomográfiát (CT) alkalmazzák. Az elkészült felvételek alapján meghatározza és berajzolja – akár több síkban – a célterületet, valamint a kezelés folyamán védeni kívánt érzékeny területeket. A terapeuta dönt, hogy milyen nagyságú legyen a besugárzási mező, a kezelés során milyen energiát javasol alkalmazni, milyen napi dózisban, hány alkalommal (frakcióban). Az orvos (ha a terv szerint szükséges) blokkot, takarást javasolhat a védendő területek sugárterhelésének csökkentésére. A megadott adatok alapján a fizikus elkészíti a kezelési tervet. Az orvos a kész terv alapján szimulációval ellenőrzi annak helyességét (erre átvilágító röntgenberendezést használ a besugárzási geometriával azonos elrendezésben) és jóváhagyja, vagy dönt az esetleges változásokról. Ha a terv megfelelő, akkor ezt a betegre megfelelő jelölésekkel „felrajzolja”, és ezt követően kezdődik a beteg sugárterápiás kezelése.

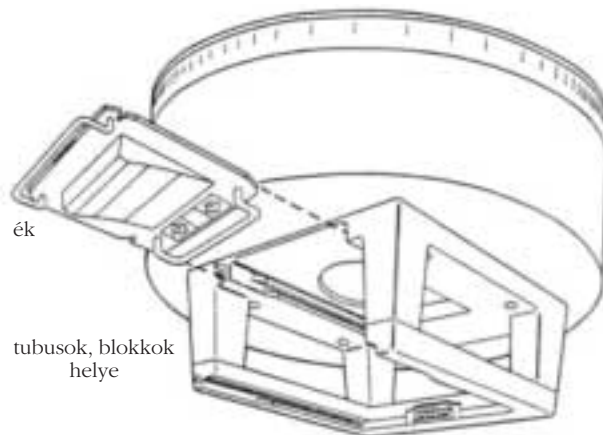
## A teleterápiás kezeléshez rendelkezésünkre álló eszközök

### Lineáris gyorsító

Teleterápiás kezelésre az onkoradiológia osztályokon jelenleg (a kobaltágyúkat szinte már teljesen kiszorító) lineáris gyorsítókat alkalmaznak. Ezek a készülékek elektron- és foton-sugárzás (fékezési röntgensugárzás) előállítására képesek. (A nyíregyházi Jósa



1. ábra. A lineáris gyorsítók főbb egységei



2. ábra. A besugárzófej

András Oktató Kórház Onkoradiológiai Osztályán két Siemens lineáris gyorsító működik.)

Az elektronagyúból kilépő elektronokat egy vákuumba leszívott gyorsítócsőben nagyfrekvenciás elektromágneses hullámok gyorsítják fel. Ahhoz, hogy egy lineáris gyorsító a sugárterápiás követelményeknek megfelelő, kellően stabil és ellenőrzött elektron- vagy foton-sugárzást szolgáltatson, a gyorsítót különféle kiegészítő és vezérlő elemekkel látják el. Az 1. ábrán a nyíregyházi onkoradiológiai osztályon működő egyik gyorsítóberendezés vázlatos ábrája látható.

A berendezés saját dozimetriai rendszerrel van ellátva, amely folyamatosan ellenőrzi a besugárzási mező dózisallandóságát, homogenitását és hiba esetén megszakítja a kezelést. A gyorsítócső a 360°-os szögtartományban elforgatható gantry-ben foglal helyet. A berendezés alkalmas állandó fókuszbőr távolságú (FBT) álló, izocentrikus álló- és mozgómezős besugárzásra. A felgyorsított elektronokat a gyorsítócső végénél elhelyezett eltérítő elektromágnes 270°-kal eltéríti, így a sugárnyaláb a cső tengelyére merőlegesen lép ki a gyorsítóból.

A 270°-os eltérés révén 2–3%-on belül monoenergetikus, körülbelül 1,5 mm átmérőjű elektronnyalábot kapunk. A besugárzófej (2. ábra) főbb részei a motorikusan mozgatható wolfram céltárgy (target), az előkollimátor, a szűrőváltó, a dózisonmonitor (a leadott dózis mérésére és szabályozására), a tükör és a főkollimátor.

Fotonsugárzás alkalmazása esetén a céltárgyat az elektronnyaláb útjába, annak fókuszpontjába helyezük, így 6, illetve 15 MeV-os fotonokkal, céltárgy nélkül pedig elektronsugárzással (5, 7, 9, 10, 12, 14 MeV) végezhetjük a kezelést. A sugármezőn belüli dózishomogenitás megfelelően kialakított szűrőkkel érhető el. A szűrők alakja és mérete energiánként változó, ezért a szűrőváltó mindig a választott energiához tartozó szűrőt állítja a sugárnyaláb útjába. A tükör és a fényforrás segítségével a sugármezővel azonos méretű és helyű fénymezőt vetíthető a beteg bőrére, amely

segíti a sugármező beállítását a kezelés előtt. A főkollimátort két pár motorikusan mozgatható, ólom blende alkotja, amellyel a fókusztól mért 1 m távolságra 0–40 cm közötti oldalhosszúságú, mindkét irányba 90°-os szögtartományban elforgatható téglalap alakú mezőt lehet előállítani.

A gyorsítóhoz tartozó kiegészítő elemek: tubusok, ékszűrők, blokkok (lásd később).

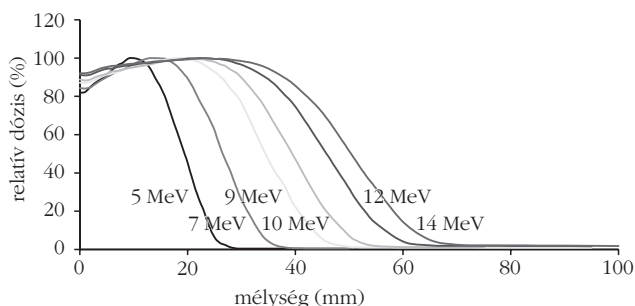
### Kezelés elektronsugárzással

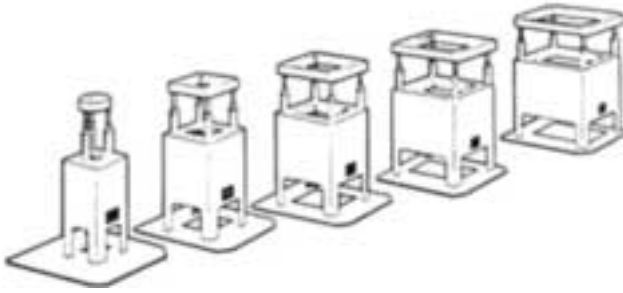
Az elektronsugárzást általában 5 cm-nél nem mélyebben elhelyezkedő felszíni daganatok kezelésére alkalmazzák. A sugárterápiában alkalmazott különböző energiájú elektronok vízben mért mélydózisát a 3. ábra szemlélteti.

A mélydózisgörbe három szakaszból tevődik össze. A dózismaximumot egy „build up” (felépülési) szakasz előzi meg, melynek mélysége (és így a felépülési szakasz hossza is) függ az alkalmazott energiától. Ezt követi egy meredeken csökkenő dózisesési szakasz, amely az elektronszorbció következménye. Végül pedig egy, a mélységgel csak lassan csökkenő rész következik, melynek oka a testszövetben keletkező fékezési sugárzás (1–6%, jelentősége csak nagy besugárzási mezők esetén van).

Az elektronnal való kezelés során az orvos az elvárt nagyságától függően dönt a besugárzási mező méretéről. A gyorsító fejéhez különböző nagyságú négyzet és kör alakú mezőt adó tubus (4. ábra) csatlakoztatható.

3. ábra. 5, 7, 9, 10, 12 és 14 MeV-os elektronsugárzás vízben mért mélydózisgörbéi 15×15 cm-es mezőnél, 100 cm-es FBT esetén.





4. ábra. Tubusok

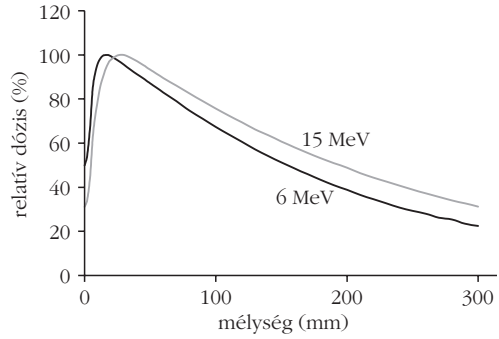
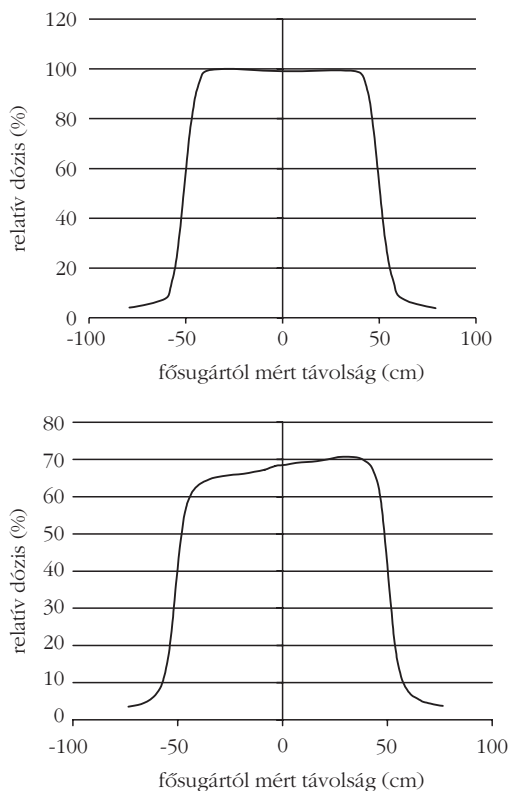
Mivel az elektronok a levegőben szóródnak, ezért kezeléskor a tubus a beteg testére „rásimul”, bőréhez hozzáér. Ha a mező alakja jelentősen eltér a tubus méretétől és alakjától, akkor az orvos ólomlemezről különféle takarásokat készíttet a beteg számára. Szintén a kezelőorvos feladata a célterület mélysége alapján a sugárkezeléshez használt elektron energiájának nagyságáról dönteni.

### Kezelés fotonsugárással

A nagyenergiájú fotonsugárzás felgyorsított elektronok megfelelő céltárgyba történő ütközésével keletkezik.

A fotonsugárzást a nagyobb áthatoló képessége és a bőrvédelem szempontjai miatt a mélyebben elhelyezkedő daganatos elváltozások kezelésére használjuk. A fotonsugárzást is a mélydózisgörbék segítségével jellemezhetjük (5. ábra).

6. ábra. 6 MeV-os fotonsugárzás dózismaximumban mért mezőprofilja 10×10 cm-es mezőnél ék nélkül, majd ékkel.



5. ábra. 6 és 15 MeV-os fotonsugárzás vízben mért mélydózisgörbéi 15×15cm-es mezőnél, 100 cm-es FBT esetén.

A dózis a felszínen igen kicsi, innen a „build up” szakaszban növekszik, majd a maximum után exponenciálisan csökken. A maximum tehát nem a felszínen alakul ki (6 MeV-nél 15 mm, míg 15 MeV esetén 28 mm), és a hozzá tartozó mélység az energia növelésével nő. A relatív dózis a dózismaximumtól távolodva csökken a mélységgel. Ugyanakkor a relatív dózis függ a mezőmérettől is, mert annak növekedésével a sugárnyalábnak lévő szórt fotonok aránya is nő.

A besugárzástervezéshez alapvetően szükségesek a mélydózisgörbék mellett az *izodózisgörbék* is. Az izodózisgörbe a sugárnyalábon belül egy megadott viszonyítási ponthoz képest azonos dózist tartalmazó vonal. Az izodózisgörbéket vízfantomban (mivel az emberi test nagy része víz) történő méréssel lehet meghatározni.

Ha például a sugármező a testfelszínre ferdén esik be, vagy a testen belül nagy szöveti (sűrűségbeli) különbségek vannak, akkor a homogén eloszlás eléréséhez szokás úgynevezett ékszűrőt (lásd 2. ábra) használni. Ez egy olyan ólomból készült, közel ék keresztmetszetű lap, melyet a sugárforrás és a testfelszín közé, a sugárforrás közelébe helyeznek el, a főszugárra merőlegesen a test felszínétől olyan távolságra, hogy az ebből kilépő másodlagos sugárzás ne érje a bőrfelületet. Az ékszűrő a sugárnyalábon belül fokozatosan csökkenti a dózisteljesítményt, ezért az izodózisgörbék az ék vékony vége felé elhajlanak (6. ábra). Leggyakrabban 15, 30, 45, vagy 60 fokos éket alkalmaznak. (Az ék szögén a 10 cm mélyen mért izodózisgörbének a vízszintessel bezárt szögét értjük.)

Természetesen az lenne az ideális, ha minden beteg esetén a daganatos sejtek egységesen és homogénean megkapták az előírt dózist, míg a körülötte elhelyezkedő ép szövetet egyáltalán nem érné sugárterhelés. Ennek megvalósítása gyakorlatban lehetetlen, de minél nagyobb mértékben való megközelítése érdekében van szükség a körültekintő és pontos besugárzástervezésre. Ez az orvos és a fizikus közös feladata.

### A besugárzástervezés menete

Ha az orvos – a beteg beleegyezésével – a sugárterápiás kezelés mellett dönt, akkor egy igen összetett folyamat veszi kezdetét, amely a célterület megjelölés-

sétől a sugárminőség és a kezelés pontos geometriai adatainak meghatározásáig tart.

A beteg először a lokalizálóba kerül, ahol a szimulátor (egy speciális diagnosztikus röntgenkészülék) segítségével meghatározzák a célterület elhelyezkedését, és ennek megfelelően a céltérfogat magasságában készítetik el a tervezéshez szükséges CT axiális szeleteit. Nagyon fontos, hogy a beteg a felvételek elkészítése közben a leendő sugárkezelési körülményeknek megfelelően (jól reprodukálható, stabil és lehetőleg kényelmes pozícióban) helyezkedjen el. A beteg fektetésének mindenkor reprodukálását a lokalizálóban és a gyorsítóknál elhelyezett, beállítást ellenőrző lézerek biztosítják.

A CT-felvételek online módon jutnak át a tervezőrendszerbe, a hozzá tartozó adatokkal együtt. A beteg adatainak beadása után az orvos a CT-felvételek alapján megadja, kitölti a tervezés alapjául szolgáló sugárfizikai adatokat (a sugármező hosszát, besugárzási energiát, az egyszeri, heti és az összdózist). A besugárzási térkép elkészítéséhez ismerni kell az egyes besugárzásimező-nagyságokhoz tartozó izodózis-eloszlásokat; ezeket vízfantomban határozzuk meg. Az izodózisok ismeretében kezdetben ezek kézi grafikus összeadásával határoztuk meg az eredő dóziseloszlást. Jelenleg a besugárzástervezésre az ország onkológiai centrumaiban különböző besugárzástervezőrendszereket alkalmaznak. A besugárzástervezőrendszerbe a tervezéshez szükséges alapvető dozimetriai adatokat méréssel határozzuk meg és a mérések alapján adjuk be. A rendszer online-összeköttetésben van a CT-vel. Az elváltozásról és környékéről készített CT-képek hálózaton keresztül jutnak a munkaállomásra. A felvételek a tervezéshez szükséges információkat tartalmazzák: méretarány, a metszetek egymástól való távolsága, valamint a sugárelnyelésre jellemző Hounsfield-szám ( $H = 1000(\mu - \mu_w) / (\mu_w - \mu_a)$ , ahol  $\mu$ ,  $\mu_w$  és  $\mu_a$  a lineáris elnyelési együttható a vizsgált szövetre, vízre (water), illetve levegőre (air). Levegőre tehát  $H = -1000$ , vízre 0, csontra pedig +3095-ig). A tervezőrendszer a CT-felvételekkel kapott adatok alapján kiszámolja a felvételeken lévő szövetek sűrűségét, az elektronsűrűséget, majd a fizikus által beadott információk (a kezeléshez alkalmazott fotonenergia, az alkalmazott mezőméret, beadott sugárzási irányok, az esetlegesen használt ékek, és mezősúlyozások alapján, figyelembe véve a CT-képek által meghatározott szöveti inhomogenitást) felhasználásával elkészíti a dóziseloszlás térképét, ahol figyelembe veszi a szomszédos területekről érkező szórt sugárzást is.

A tervek 3 dimenzióban is készülhetnek, ami annyival jelent többet a különböző síkokban készült kétdimenziós terveknél, hogy a szomszédos területek szöveti inhomogenitási viszonyait, a szórt sugárzást is képes figyelembe venni. Többnyire – a homogenitás és a bőr kímélése érdekében – általában nem egy, hanem több besugárzási mezőt alkalmazunk, és a bejelölt tumort oly módon célozzuk meg, hogy a különböző irányból érkező sugárnyalábok a berajzolt célterületben találkozzanak. A tervezőrendszerek általában alkalmasak SSD (állandó fókuszbőr távolságú) álló,

izocentrikus álló és mozgó mezős besugárzási technikák tervezésére és számítására.

Izocentrikus besugárzás esetén egy rögzített pont (izocentrum), mint geometriai tengely körül a kilépő nyaláb fősugara mindig átmegy. A forgatás különböző hosszúságú körívek mentén lehetséges. A gyorsítócső forgatásához tartozó forgástengely a fősugarat az izocentrumban metszi. Ennek a módszernek az a hátránya, hogy a lokalizálóban nehézkes az izocentrum beállítása, viszont könnyebbséget jelent, hogy csak egyszer kell megkeresni azt, mert a kezelés során végig állandó. Ezt a technikát igen gyakran alkalmazzuk, például: medence sugárkezelésénél.

Mozgó besugárzás esetén a besugárzófej a besugárzandó céltérfogat egy pontja, mint forgáspont (tengely) körül fordul el, tehát ez is izocentrikus. Ennek egyik fajtája az, amikor a sugárforrás a körnek csak egy adott ívszakaszán mozdul el (ingabesugárzás). Ezen technika esetén lehetőség van arra, hogy a besugárzott körív után egy ideig ne bocsásson ki sugárnyalábot, majd egy újabb szakaszon ismét (skip-scan technika) és így tovább.... Lehetséges a mozgóbesugárzást folyamatosan, 360°-on keresztül alkalmazni, ekkor a céltérfogaton belül igen homogén dózis érhető el, azon kívül pedig rendkívül meredek dózisesés. A mozgó besugárzási technikát általában akkor választjuk, ha a célterület megközelítőleg ellipszis alakú, például: tüdőtumor esetén.

Az SSD-technikát akkor célszerű használni, ha nehézkes és valószínűleg pontatlan lenne az izocentrum meghatározása a terv alapján. Hátránya ennek a módszernek, hogy minden egyes mezőnél külön be kell állítania az asszisztensnek az adott távolságot. Leggyakrabban emlődaganat kezelése esetén alkalmazzák.

A célterületen belül, annak határán és rajta kívül is a dóziseloszlás az alkalmazott módszertől függ. Azt, hogy az említett technikák közül melyikkel készül egy adott terv, többek között a célterület formájától, elhelyezkedésétől, illetve az esetleges közelben lévő kritikus szervek elhelyezkedésétől függ. Minden mezőhöz külön kell kiválasztani a használni kívánt energia nagyságát, így egy tervben akár többféle sugárminőség is előfordulhat az adott szituációtól függően.

Az egyes mezők mérete lehet eltérő: 1×1 cm-től 40×40 cm-ig változhat 1 mm-es léptékben. A gantry és a kollimátor szöge tetszőlegesen 1°-onként elforgatható mindkét irányba. Az utóbbi segítségével állítható be a sugármező alakja és nagysága is. Különböző energia-, tehát dózismódosító eszközök használhatók, ugyanakkor bármelyik mező esetén lehet éket és blokkot is alkalmazni. Az ékek a különböző szöveti inhomogenitások (sűrűség, energiaelnyelés), illetve a testkontúr változásainak kompenzálásában van szerepe. Általában mindig a keskenyebb végével fordítjuk oda, ahol növelni szeretnénk a dózist a többi területéhez képest. Használhatók általában 15, 30, 45 és 60°-os ékek egymáshoz képest 180°-kal elforgatott állásban. *Blokkokat* akkor alkalmazunk, ha a sugármező egy részének kitakarása szükséges. Ezek a blokkok úgynevezett Newton-fém-ből (50% bizmutot, 31,25%



ólmot és 18,25% ónt tartalmaz) készülnek és lehetőség van a fizikus által kiválasztott tetszőleges alakúra önteni (ez a technikus feladata).

A tervezés fontos fázisa a *besugárzási terv optimalizációja*. A célterületet magába foglaló izodózisgörbét (amely legrosszabb esetben is 85%-os görbe) 100%-nak véve normalizáljuk az eloszlást. Ennek megfelelően adjuk meg a napi dózis nagyságát és számolja ki a rendszer az egyes mezőkhöz tartozó monitoregységet (a gyorsító úgy van kalibrálva, hogy normál körülmények között, az adott energiánál, 100 cm-es FBT és 10×10 cm-es mező esetén a vízben mért dózismaximumban 100 MU (1 MU (monitoregység) = 1 gray).

Ha az elkészült terv és a számítógép által kiszámolt és berajzolt izodózisgörbék megfelelnek a kívánalmaknak, akkor az adott szint CT-metszetére készült terv (esetleg más síkok is) kinyomtatásra kerül a gyorsító beállításához, a kezeléshez szükséges adatokat tartalmazó protokollal együtt. Ennek alapján kezdődhet meg a sugárkezelés.

A daganatos megbetegedések a leggyakoribb, vezető halálokok között, a második helyen állnak, és a halálozások számán belüli arányuk fokozatos emelkedést mutat. A gyógyítás egyik eszköze az ionizáló sugárzások (pl. elektron- vagy ftonsugárzás) alkalmazása. Ennek során az orvossal együttműködő fizikusnak is fontos szerepe van.

#### Irodalom

- Gyenes Gy., Németh Gy., *Sugárterápia*. Medicina Könyvkiadó Rt., Budapest, 1997.  
Horváth F., *Az orvosi radiológia aktuális kérdései*. 8918806 MTA Soksorozító, Budapest, 1989.  
Rodé I., *Klinikai Onkoradiológia*. Medicina Könyvkiadó Rt., Budapest, 1984.  
*Helax-TMS System Reference Manual 4.0*. Helax AB, 1997.  
Horváth F., *A radiológia alapfogalmai*. Medicina Könyvkiadó Rt., Budapest, 1994.  
Kásler M., *Az onkoterápia irányelvei*. B+V Lap- és Könyvkiadó Kft., 2001.  
Köteles Gy., *Sugáregészségtan*. Medicina Könyvkiadó Rt., Budapest, 2002.  
Németh Gy., *Sugárterápia*. Springer Tudományos Kiadó Kft., 2001.

A témához kapcsolódik egy – fizikus körökben sokak által ismert – történet *Szilárd Leóról*, mint a sugárterápia önkéntes úttörőjéről: 1960-ban megállapították, hogy húgyhólyag rákja van. Az akkoriban lehetséges gyógymódok tanulmányozása után sugárterápiát kért orvosaitól. (A híres New York Memorial Hospitalban kezelték.) A terápiát maga tervezte meg, az általa meghatározott dózissal megfelelő, sugárzó

ezüstöt operáltatott magába. Ezt két év múlva, 1962-ben megismételték.

Nem ismert, hogy milyen egyéb kezelést kapott, ezért nehezen értékelhető a „sugárterápia” sikeressége. (Szilárd 1964-ben halt meg, szívinfarktusból.) A történetben az azt ismertető források egy része inkább Szilárd kissé excentrikus természetének illusztrációját látja.

## TISZA LÁSZLÓ, 1907–...

Mire ez az írás a *Fizikai Szemle* olvasóihoz eljut, a naptár túlmegy a július 7-i dátumon, *Tisza László* születésnapján, a 100-ikon. Tisza László az egyetlen, még élő tagja a 20. század elején született különleges képességű és különleges életpályát bejárt, Magyarországról útnak indult tudósok „nagy generációjának” (*Szilárd, Teller, Wigner* stb.). Kutatási területeit a *Fizikai Szemle* „régii” olvasóinak nem kell itt részletesen bemutatni, hiszen saját írásait olvashatták munkásságának, hatását tekintve talán legfontosabb, két területről – érdemei a modern termodinamika kidolgozásában és a hélium szuperfolyékonyságát magyarázó kétfolyadékos elmélet megalkotásában múlhatatlanok – a Lap 1992/8. számában. Más, főleg a kvantummechanika, például molekulafizikai, alkalmazásai területeire eső munkáiról érdekes életrajzi vonatkozásokkal kiegészítve ad képet egy „beszélgetős” cikk *Marx Györggyel* (2002/8).<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Az érdeklődő olvasónak figyelmébe ajánljuk a Tisza életét leg részletesebben bemutató, a *Természet Világában* ez év tavaszán megjelent több részes „beszélgetős” sorozatot (beszélgető partner *Frenkel Andor*).

Az „új” olvasók miatt talán mégsem felesleges pályájának a legfontosabb tényekre szorító ismertetése.

Budapesten született, apja könyvkereskedő volt. Elemi és középiskolába is itt járt, két évig a Pázmány Péter Tudományegyetem matematikus hallgatója volt. Kiváló matematikai képességeinek kézzelfogható bizonyítéka, hogy 1925-ben az (akkor még matematikából rendezett) Eötvös-verseny egyik nyertese (Teller Edével és *Fuchs Rudolf*val holtversenyben). 1928-tól a göttingeni egyetem hallgatója, itt akkoriban a kor legnagyobb matematikusai tanítottak. Göttingen mégis egészen más okból játszott döntő fontosságú szerepet az életében. *Max Born* kvantummechanika kurzusát hallgatva megragadta a fizika és a modern matematika közötti kapcsolat, itt dőlt el, hogy elméleti fizikus lesz. Pályája innen Lipcsébe vezetett, a nagy „mester”, *Heisenberg* környezetébe. Itt írta első cikkét Tellerrel közösen, molekulaszpektroszkópiái tárgyú probléma megoldásáról. (Ez a munka lett később a budapesti egyetemen megszerzett PhD fokozathoz vezető út kiindulópontja.) Rövid budapesti tartózkodás után – az első „Ortvay-kollok-

vium” előadója – tudományos karrierje Harkovban, *Landau* mellett folytatódott. Az itt eltöltött három év volt a megalapozása annak a munkásságnak, amelyet Tisza a termodinamikának a modern fizikába való beintegrálása és a termodinamika modern egyetemi oktatása területén végzett. Útja Harkovból Párizsba vezetett, ahol *Fritz London*nal került kapcsolatba. London elméletét – amely a Bose–Einstein-statisztika jelentőségét tette világossá a folyékony hélium tulajdonságainak megértésében – továbbfejlesztve Tisza kidolgozta kétfolyadék-modelljét, amely magyarázatát adta a hélium 1938-ban felfedezett szuperfolyékony viselkedésének. 1941-ben elhagyta Európát, az Amerikai Egyesült Államokba emigrált, ahol a híres műszaki egyetem, a Massachusetts Institute of Technology (MIT) fizikaprofesszora lett. Itteni munkásságának középpontjába a termodinamika és a kvantummechanika megalapozásának kérdései, a termodinamika és a statisztikus fizika szigorú, de intuíciót mégsem nélkülöző megfogalmazása került. 1966-ban jelent meg nevezetesen könyve, a *Generalized Thermodynamics* (Általánosított termodinamika). 1973-ban történt nyugdíjba vonulása óta az MIT tiszteletbeli professzora. Töretlenül megőrzött szellemi erejét ezt követően főleg a kvantummechanikai elvek és az algebrai fogalmak közötti mélyebb kapcsolat tisztázásának problémája köti le.

Tisza László életének eddig megélt száz éve történelmi léptékű időtartam, amelynek hosszúsága marandó „üzenet” keresésére, az életpálya „titkának” megfejtésére csábít. Ez a száz év lényegében a 20. századdal esik egybe. Azzal a századdal, amelyik az emberiség számára eddigi történetében talán a legtöbb lelki és fizikai pusztulást hozta. A 20. század démonai nem tűntek el a századdal együtt, nyitott kérdés, hogy legyőznek-e bennünket. Hogy igen vagy nem, talán attól függ, hogy két – lehet, hogy megengedhetetlenül leegyszerűsített – verzió közül melyiket fogadjuk el inkább Tisza pályájának jellemzőeként. Azt-e, hogy e démonok megakadályozták, hogy a budai, Fő utcai könyvkereskedést továbbvigye, vagy azt, hogy e démonok nem tudták megakadályozni, hogy tehetsége, küzdeni tudása és szívós munkája a Fő utcából az MIT professzori székéig röpítse.



A választást mindenki, a következő generációk tagjai is, csak maga végezheti el. Az utóbbiakkal szemben elháríthatatlan felelősségünk, hogy a választásra képessé tegyük őket. Erre gondolhattak a kollégák a Szegei Egyetemen és a Társulat Csongrád megyei Csoportjában egy versenyfelhívásuk megfogalmazásakor. Tisza előtti tisztelgésül álljanak itt e felhívás kezdősorai:

*A Szegei Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszéke és az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Csongrád megyei Csoportja három fordulos versenyt hirdet a Délmagyarország és a Délvilág napilapokban fizikai kísérletekből, Tisza László tiszteletére, általános és középiskolás diákok számára.*

*Immár hagyományként, nyolcadik alkalommal hirdetünk kísérletes versenyt a Délmagyarország és a Délvilág napilapokban. Idei versenyünket Tisza László tiszteletére hirdetjük meg, aki a 20. század első fele híres magyar fizikusainak utolsó köztünk élő képviselője. A világhírű fizikus, az MIT nyugalmazott professzora 2007. július 7-én tölti be 100. életévét és ma is jó egészségnek örvend. 1941-ben emigrált az Egyesült Államokba, élményekben gazdag, olykor kalandos élete során megőrizte kapcsolatait szülőföldjéhez. Történelmi kérdéseink az ő munkásságával, életével kapcsolatosak.*

További, jó egészségben eltöltött, tartalmas éveket kívánunk Tisza Lászlónak.

T. K.

## MAGREAKCIÓK ÉS A NUKLEÁRIS ASZTROFIZIKA

*Somorjai Endre* tudományos tanácsadó 70. születésnapja tiszteletére 2007. április 2-án egynapos minikonferenciát rendezett az MTA Atommagkutató Intézete *Nuclear reactions in nuclear astrophysics* (Magreakciók a nukleáris asztrofizikában) címmel. Az Atommagkutató Intézetben Somorjai Endre honosította meg a nukleáris asztrofizikai kutatásokat. Az általa létrehozott kutatócsoport kiemelkedő eredményeket ért el e tudományágban, és számos nemzet-

közi együttműködésben is részt vesz. Ennek is köszönhető, hogy az egynapos rendezvényre több neves külföldi szakember fogadta el meghívásunkat. A konferencia első felében a nukleáris asztrofizika vezető európai kutatói számoltak be a tudományág új eredményeiről, a második részben pedig fiatal magyar kutatók előadásait hallhattuk.

A megnyitót *Lovas Rezső*, az ATOMKI igazgatója tartotta, méltatva Somorjai Endre és az ATOMKI aszt-

rofizikai csoportjának tevékenységét. *Franz Käppeler* a karlsruhei nukleáris asztrofizika csoport vezetője az asztrofizikai *s*- és *p*-folyamat kapcsolatáról tartott előadást. *Claus Rolfs*, a bochumi egyetem professzora a csillagfejlődést meghatározó egyik magreakció, a  $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$  fúzió vizsgálatának új eredményeiről számolt be. *Claudio Spitaleri* Cataniából egy olyan mérés eredményeit mutatta be, amelyet olasz kutatók az ATOMKI ciklotron gyorsítóján végeztek el. *Hanns-Peter Trautvetter* pedig a LUNA föld alatti laboratóriumban végzett új mérésekről beszélt, melyek érdekessége, hogy ezek technikai feltételeit az ATOMKI biztosította.

A délutáni szekció során *Kiss Ádám* az MTA Magfizikai Bizottsága nevében köszöntötte Somorjai Endrét. Két előadás az ELTE kutatóitól a nukleáris asztrofizika elméleti és kísérleti eredményeit mutatta be: *Csótó Attila* a fizikai állandók kismértékű változásának hatásairól beszélt, *Horváth Ákos* pedig a neutrondetektálás modern lehetőségeit tekintette át. Az előadás-sorozatot *Kiss Gábor* előadása zárta, bemu-



Franz Käppeler (Karlsruhe) és az ünnepelt Somorjai Endre

tatva az asztrofizikai *p*-folyamat kísérleti vizsgálatának ATOMKI-ban kifejlesztett módszereit.

Boldog Születésnapot, Bandi!

*Fülöp Zsolt*

MTA ATOMKI, Debrecen

## EMLÉKEZÉS AZ ELTE TTK ELMÉLETI FIZIKAI TANSZÉKÉNEK EGYKORI TANÁRAIRA

Abonyi Iván

ELTE TTK Elméleti Fizikai Tanszék

Tragikus véletlen folytán a Tanszék négy egykor volt nagyszerű tagja születésének/halálának kerek számú évfordulója van. Ez inspirált, hogy visszaemlékezzem a Tanszék, illetve a fizikus társadalom életében betöltött szerepükre.

*Novobátczy Károly*, *Neugebauer Tibor*, *Fényes Imre* és *Marx György* tanáraink voltak. Pályám indulásakor döntő hatással voltak rám. Lenyűgöző szakmai tudásuk, emberi méltóságuk és az a sajátosan egyéni mód, ahogyan tanítványukat, majd fiatal kollégájukat kezelték. Nem csak szakmai szempontból volt jelentősége annak, ahogy tanítottak. Hosszú időn át emberi viselkedésük is sajátos példaként lebegett szemem előtt.

Novobátczy Károly és Neugebauer Tibor mindvégig megmaradt a szeretve tisztelt „Professzor Úr” példamutató szintjén. Abban a szerencsében volt részem, hogy az idők folyamán előbb Marx György, később – és rövidebb ideig – Fényes Imre volt rám rendkívüli hatással. Eleinte mint képzésemet irányító „fiatalabb tanárok”, később pedig olyan mesterek, akik beavatkozás nélkül segítettek a fiatalabb kolléga fejlődését, miközben beavattak kutató és pedagógiai hitvallásukba, részt adtak társadalmi jellegű munkájukból. Ezért érzem most nagy megtiszteltetésnek, hogy e különleges alkalommal, amikor egy naptári évben emlékezhetünk mindegyikőjük valamilyen jeles évfordulójára, éppen engem kértek meg e sorok megfogalmazására.

Novobátczy Károly

1884. március 3. – 1967. december 20.

Temesváron született, egyetemi tanulmányait Budapesten végezte matematika-fizika szakos tanárjelöltként. Többek között *Eötvös Loránd* is tanította. Ifjú tanárként Máramaroszigeten kezdte működését. Az I. világháborúban tüzerbiztos volt a Monarchia hadseregében. A katonaság éveit tartásában kitörölhetetlen nyomot hagyott. A háború utáni években Budapestre került, a Kölcsey Gimnáziumban tanított negyed évszázadnyi ideig, itt lett szakfelügyelő is.

Tudományos tevékenységét három irányban kötelezték el fiatalkori benyomásai. Mindvégig lelkes híve volt *Maxwell* elektrodinamikájának. A szeméi előtt játszódtak le *Max Planck* erőfeszítései a termodinamika és a statisztikus mechanika területén. Úgyszólván tanúja lehetett a relativitáselmélet megszületésének és gyors kifejlődésének. Ezekben a területeken kezdte meg az idők folyamán saját kutatómunkáját is.

Középiskolai tanárkodása mellett szerepet kapott az Eötvös Kollégium előadói között is. Ebben az időben kutatásai az általános relativitáselmélet területére estek, az elektromágneses erőter és a gravitációs erőter egységbe foglalásával kapcsolatos eredményeit publikálta. De a harmincas évek nagyszerű próbálkozásából – az erőterek kvantumelméletéből – is kivette részét. A kvantummechanikát és az elektromágneses

erőter fizikáját összekapcsoló kvantum-elektrodinamikában elért eredménye – az, hogy a kvantálás a Lorentz-feltétel nélkül is elvégezhető (*Zeitschrift für Physik* 111 (1938) 292) – még a modern kézikönyvekben is hivatkozott állítás, megőrizte aktualitását.

Amikor a II. világháború végén *Ortvay Rudolf* sajnálatos halálával a Pázmány Péter Tudományegyetemen (az ELTE jogelődjén) az Elméleti Fizikai Tanszék vezetőjének állása megüresedett, az akkor 61 éves Novobátczy Károlyt hívták meg egyetemi tanárnak. Mások ebben az életkorban már nyugdíjas éveikre gondolnak. Novobátczy azonban fiatalos, „katonás” lendülettel vette kezébe az elméleti fizika oktatásának újjászervezését. A már Ortvay által is modernizált tananyagot átformálta a 20. század közepének megfelelő alakra. A mechanika terén ez azt jelentette, hogy részei lettek a tananyagnak a mechanika elvei, a kanonikus formalizmus. Az elektrodinamikában a Maxwell-elmélet felépítése kapott fő szerepet. (Az anyagszerkezeti modellekre épülő alkalmazások hamarosan egy elkülönült félév Neugebauer Tibor elképzelései szerinti programjába kerültek az optikával együtt.) A fő irány a kvantummechanika új hangszerelése, majd a termodinamika Planck nyomán történő összefoglalása és a statisztikus mechanika átdolgozása volt. Speciális előadása a relativitáselmélet volt, ennek első kézírata 1947-ben a Mérnöki Továbbképző Intézetnél meg is jelent, majd egy átdolgozott, bővített kiadás készült, 1957-ben az egyik első „egyetemi tankönyv” köteteként.

Az elméleti fizika tanításában Novobátczy Károly új hangja, előadási stílusa fogalom lett. Kristálytisza logikájú előadásait még ebben az életkorban is mindig fejből tartotta, csak nagy ritkán vette elő tárcájából az apró papírra vetett emlékeztetőjét, hogy a feladatok, számítások végeredményét ellenőrizze. Az előadás mindig makulátlan tisztaságú, nyomdakész megfogalmazású, mégis egyszerű, igazán ékes, szabályos magyar nyelvű szöveg volt. Az előadások után hosszú ideig tartó „álló kollokvium” részesei lehettek azok a munkatársak, akiknek éppen nem volt órájuk. Amikor vége lett a tudományos beszélgetésnek, bizony alig tudtuk „elmacskásodni” lábainkat megmozdítani – Rajta nem látszott fáradtság.

A fiatal tanszemélyzet, mely az egyetemen körülötte kialakult, lényegében az általa nevelt ifjak közül verbuválódott. Kezdetben néhányan a matematika felé orientálódtak (*Freud Géza*), néhányan az első évtized során külföldre mentek (*Baróthy Jenő*, *Forró Magdolna*). 1956-ban is többen távoztak (*Szamosi Géza*, *Román Pál*, *Muray Gyula*). Igazán kedves „szellemi gyermekei” Marx György, *Nagy Károly*, *Károlybázy Frigyes* és *Szabó János* együtt dolgoztak vele az oktatásban.

Szinte hihetetlen energiájából ebben az életkorban még érdemi kutatásra is futotta. Érdekes volt a szigetelők (dielektrikumok) relativisztikus elektrodinamikájáról bizonyára már korábban elért eredménye, melynek publikálására a II. világháború éveitől valami miatt nem kerülhetett sor. Ezt az 1949-ben indult *Acta Physica Hungarica* oldalain publikálta. Ez olyan témát



Az Elméleti Fizikai Tanszéknek egykoron otthont adó „D” épület a Trefort-kertben.

vetett fel, melynek továbbfejlesztésében az akkori fiatal munkatársak csaknem valamennyien nagyot alkothattak. Ez az a kérdés volt, hogy a relativisztikus elektrodinamikát dielektrikumokban *Max Abraham* vagy *Hermann Minkowski* felfogásából kiindulva kell-e felépíteni. Novobátczy megmutatta, hogy az Abraham-féle felépítésből jó megoldás következik, míg Minkowskiéből nem. A fiatalok ezt az eredményt például a mágnesekre (Marx), a kísérleti bizonyítékok esélyeire (*id. Györgyi Géza*) általánosították, Nagy Károly pedig a sugárzáselméletet dolgozta ki dielektrikumokra. Novobátczy kései éveinek a kvantummechanikára vonatkozó érdekes eredményei jelentek meg például a statisztikus sokaságról, illetve a Schrödinger–Gordon-egyenletről szóló dolgozataiban (1952).

Számos dolgozata jelent meg az elméleti fizika módszertani eszközeiről (tenzorkalkulusról és variációs számításról) is. Fizikatörténeti vonatkozású tanulmányai (*Max Planck*, *Frédéric Joliot-Curie*, *Galilei* stb.) kötetben is napvilágot láttak.

Legutolsó munkája, a *Strahlungs- und Gasstatistik* (A sugárzás és a gázok statisztikája), 1958-ban jelent meg a *Max Planck Festschrift* emlékkötet oldalain. A tanulmányban azt mutatta meg, hogy a sugárzás (a fotongáz) statisztikus mechanikája kidolgozható anélkül is, hogy a fotonokat részecskéknek tekintenénk. Sőt, a He-atomokat sem kell részecskéknek tekinteni, a Tisza-féle egyenletek a szuperfolyékonyságra így is levezethetők.

Novobátczy Károly munkásságát sok kitüntetés ismerte el. Kossuth-díj 1949-ben, 1953-ban; Oktatásügy Kiváló Dolgozója 1952-ben, polgári kitüntetések, majd az MTA levelező tagja (1947), rendes tagja (1949), Akadémiai Aranyérem (1962), az ELTE díszdoktora (1954). Nem zárkozhatott el a közéleti szerepléstől sem: az ELFT elnöke (1949), majd tiszteletbeli elnöke volt. A MTA alelnöke tisztséget is viselte (1958).

Társulatunk az Ő emlékének ápolására „Novobátczy Károly Díj”-at alapított az elméleti fizika terén jelentős eredményeket elért tagjai számára.



Sok fizikus- és tanárgeneráció őrzi hosszú életű, kiváló professzora emberi, kutatói és tanári példájának emlékét. Talán nem túlzunk, ha azt hisszük, Neki a Tanszék dolgozóinak és a tanítványoknak a szeretete és megbecsülése számított igazán.

Halálának negyvenedik évfordulóján emlékezünk Rá. 1967. december 20-án hunyt el.

## Neugebauer Tibor

1904. május 30. – 1977. január 8.

Budapesten született, tanulmányait is itt végezte. 1935-ben a budapesti egyetemen magántanári címet szerzett. Tudományos működését 1930-ban kezdte, a nemrég kialakult kvantummechanika atomfizikai alkalmazásával. 1936-ig 16 dolgozata jelent meg, ebből 13 a *Zeitschrift für Physik* oldalain. Ezek tárgya: a NO molekulaspektroszkópiája, a Kerr-effektus, a kettőtörés kvantummechanikája, a KCl rácsállandója, a HCl-molekula tulajdonságainak kvantummechanikai magyarázata, a polarizációs energia számítása kristályokban stb.

A fiatal magántanár a BME Könyvtárában kapott állást – ami tulajdonképpen nagy szó volt abban az időben, amikor nehéz volt álláshoz jutni egy magántanárnak is. Itt születtek további dolgozatai (szám szerint még 34) a kvantummechanika gyakorlati alkalmazásairól (az alkáli halogenidek ultrabolya abszorpciófrekvenciáiról, egyes kristályszerkezetek molekula- és ionrácsainak stabilitásáról, az elektrolitekről, a nehéz atommagok mágneses nyomatékairól stb.). Ugyancsak ebben az időben kezdődik Neugebauer Tibor két nagy vonzalma: egyrészt a gömbvillám problémaköre iránt, másrészt bizonyos biológiai kérdések fizikai értelmezése iránt. A gömbvillám szerkezetében is lényeges szerepet tulajdonított a kvantummechanikai effektusoknak. Elképzelése szerint ezek csökkentik le a teljesen ionizált plazmagömbben a rekombinációt és teszik lehetővé a plazmagömb pár másodperces fennmaradását. A biológiában a vírusok szaporodására próbálta a kvantummechanika eredményeit alkalmazni.

A II. világháború után, amikor Novobátczy Károly átszervezte az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékét, 1950-ben meghívta Neugebauert a tanszékre. Neugebauer Tibor egyetemi tanár lett, sőt 1950-ben Kossuth-díjjal is jutalmazták addigi munkásságát. Csak egy valami nem járt sikerrel: nem sikerült a rendkívül termékeny Neugebauer Tibornak az akadémikusi címet megszerezni.

Az ELTE-n Neugebauer Tibor természetesen főleg az elektrodinamika és az optika azon fejezeteinek a tanításáért lett felelős, amelyek közvetlenül kapcsolódtak közel két évtizeden át folytatott kutatásaihoz. Ennek a tanári munkának lett az eredménye az új elektrodinamika tankönyv, melyben Novobátczy írta az általános Maxwell-elméletek részt, Neugebauer pedig az anyagszerkezeti és optikai fejezeteket. Ez a mű több kiadást is megért, 1957-ben németül is megjelent a Deutscher Verlag der Wissenschaften kiadásában.

Sajátos emberi természete, a zárkózott magatartás mögé rejtett mély emberi érzésekre derült fény, amikor

a tanszék fiataljait meghívta egy állatkerti sétára. Ekkor derült ki legtöbbször számára, hogy a rövidnadrágos, tornacipős, „mezítlábas professzor” a biológiának, az állattannak is elhívatott ismerője. Kiderült, hogy szenvedélyes lepkegyűjtő, aki a lepkéket sajátos interferenciaszínűk miatt tanulmányozza. A biológia iránti érdeklődése a *Bűvár* olvasói körében már a 30-as évek során feltűnhetett, de igazában csak a *Fizikai Szemle*ben megjelent tanulmányai mutatták meg, hogy milyen egységben látta Neugebauer a természetet (Repülőbiofizika – Az állatok repülésének aerodinamikai alapjai. *Fizikai Szemle* 18 (1968) 193 – Az élő természet színei. *Fizikai Szemle* 21 (1971) 33 – A gumi termodinamikai rugalmassága, *Fizikai Szemle* 23 (1973) 167).

Beteg édesanyjával élt hosszú évtizedeken keresztül, lehet, hogy zárkózottságát ez is magyarázta. Halála egy váratlan baleset következménye volt. Amikor kinyitották lakása ajtaját kiderült, hogy milyen gazdag is volt ennek az agglegény-tudósnak az élete. Hatalmas könyvtára volt, a fizikai, biológiai, kémiai szakirodalom utolsó évtizedeinek úgyszólván minden elismert kötete ott volt a szekrényekben.

Halálának harmincadik évfordulóján emlékezünk Rá!

## Fényes Imre

1917. július 29. – 1977. november 13.

Fényes Imre a Békés megyei Kötegyánban született. Egyetemi tanulmányait a közeli Kolozsváron végezte matematika-fizika tanári szakon, és egyetemi doktorátust is szerzett. A kolozsvári egyetemen kezdett dolgozni, ahol egy ideig *Gombás Pál* volt a tanszék vezető egyetemi tanár. A II. világháború után Fényes Kolozsváron maradt, egyetemi tanár, tanszékvezető lett. 1950-ben települt át Magyarországra, a debreceni egyetem Elméleti Fizikai Tanszékének vezetését bízták rá, docensi minőségben (a román professzori státusát nem fogadták el). 1953-ban Budapestre költözött, az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékén docens, majd 1960-ban professzor lett.

Fényes Imrét már tanulmányai vége óta foglalkoztatták a kvantummechanika mintegy negyed évszázada megoldatlan alapkérdései. (Akkori tanszékvezetője, Gombás Pál nem igazán kedvelte, ha munkatársai túlzottan önálló úton jártak, mert neki a kvantummechanikai többszörös probléma és az atom statisztikus elmélete kutatásában minél több társ kellett.) Fényes hamarosan megmutatta, hogy képes komoly elvi problémák megoldására. A kvantummechanika tanulmányozása során rámutatott arra, hogy itt a „klasszikus” szemlélettől idegen, valószínűségi folyamatokról van szó. Kidolgozta a kvantummechanika valószínűségelméleti megalapozását és interpretálását (*Zeitschrift für Physik* 132 (1952) 81). Figyelmet keltett *Werner Heisenberg*ben is, aki később részletesen kitért erre a munkára.

Fényes Imre legmélyebb tudományos ambíciója a termodinamika elméleti megalapozásának következetes véghezvitele volt. Kutatásai és próbálkozásai ebben az irányban már az első időben elkezdődtek. Eredmé-

nyek vezettek el ahhoz a felfogásához, hogy az állapot-határozókból (és nem az áramokból) mint alampennyiségekből kiindulva kell a termodinamikát megalapozni. Ennek első átfogó jellegű kifejtése *A termodinamika alapjai* című könyvében készült el 1952-re. A könyv az Akadémiai Kiadónál jelent meg nem kisebb tekintélyek, mint *Rényi Alfréd* és *Kónya Albert* pozitív lektori véleménye alapján. Az elkészült kötet azonban a Gombás Pál vezette műegyetemi fizikai intézetben lezajlott vita eredményeként nem került nyilvános forgalomba.

Fényes töretlen ambícióval folytatta kutatásait. 1968-ban megjelent a Műszaki Könyvkiadónál a *Termosztatika és termodinamika* című monográfiája, melyben eddigi eredményeit és akadémiai doktori értekezését összefoglalva publikálta az új rendszerű termodinamikai elméletet. Ennek lényeges új elemei – többek között – a főtételek megfogalmazása, a Le Chatelier–Brown-elv, az exergia fogalom tárgyalása az irreverzibilis folyamatok termodinamikájában.

Oktatói és fizikusi tevékenységének lényeges tulajdonsága a fogalmi tisztaságra törekvés, melyben sokszor egészen az alapító atyák alkotásaiig visszament. Ennek nevezetes tanúsága a szerkesztésében – és sok fejezetének saját megfogalmazásában – készült *Modern fizikai kisenciklopédia* (Gondolat, 1971), melynek társszerzői közé *Erdélyi Sándort*, *Hargittai Csabát*, *Nagy Tibort*, *Pataki Györgyöt*, *Székely Sándort*, *Szépfausz Pétert*, *Vasvári Bélát* és *Zawadowski Alfrédot* nyerte meg.

Mindig foglalkoztatta, hogyan lehetne a tágabb közönség, a más iránt elkötelezettek számára is közkinccsé tenni a modern fizikai megismerés legáltalánosabb vonásait. Ennek megnyilvánulása a *Fizika és világnézet* című kötet (Kossuth Könyvkiadó, 1966) és tulajdonképpen hatyúdala, *A fizika eredete* című mű (Kossuth Kiadó, 1980). Mint a megjelenés évszáma is mutatja, ennek nem jutott már a végére. 1977. november 13-án szívinfarktuszban meghalt. A művet – fellejegyzései alapján – Erdélyi Sándor fejezte be.

Fényes Imre sajátos előadó volt az egyetemen. Hallgatói szerették, bár előadás közbeni elkalandozásai – amelyek különben mindig érdekes és kapcsolódó történelmi és filozófiai kérdéseket érintettek – nem mindig segítettek a hallgatókat az elmélyült tanulásban. Mélységesen érzékeny emberi magatartása azonban mindig megtalálta útját a partnereihez.

Születésének kilencvenedik, halálának harmincadik évfordulóján emlékezünk Rá.

## Marx György

1927. május 25. – 2002. december 2.

Budapesten született, az Evangélikus Gimnáziumban érettségizett. A Pázmány Péter Tudományegyetemen kezdte meg tanulmányait a matematika-fizika tanárszakon, különös érdeklődése a kémia és a csillagászat iránt is megmutatkozott. Az Elméleti Fizikai Tanszék demonstrátoraként kezdte meg élethosszig tartó kapcsolatát az Egyetemmel, 1948–1970 között az elméleti, 1970–2002 között az atomfizikai tanszéken. Pro-

fesszori kinevezése 1964-ben történt, emeritus professzor 1997-ben lett.

Kutatói pályafutása egyetemi doktori értekezésével kezdődött (*Nemstatikus gravitációs erők*. ELTE 1950). Az Elméleti Fizikai Tanszéken Novobátczy Károly „legidősebb szellemi gyermeke” hamarosan bekapcsolódott a relativisztikus elektrodinamika kutatásba (A mágnesek relativisztikus elektrodinamikája, 1951–52) és a dielektrikumok elektrodinamikájának konzekvens kiépítésébe, ez a Novobátczy által megnyitott úton sok értékes eredményhez vezetett. De csakhamar felerősödtek Marx Györgyben az elemi részek fizikája iránti vonzalmak. Egy összefoglaló jellegű cikk elkészítése kapcsán ismerte fel a leptontöltés megmaradásának elvét (1951), melyet Kossuth-díjjal tüntettek ki.

Egyetemi előadásai rendkívül érdekesek voltak. Olyannyira, hogy számos esetben meglehetősen tematikai átalakítást kellett végeznie, mert az érdeklődő hallgatóság túl fiatalon kívánt megismerkedni a kérdéskörrel. Ez történt a *Klasszikus sugárzáselmélet* című speciális előadásával. A legfontosabb, legnagyobb jelentőségű előadássorozata az 1959-es *Az elemi részek kölcsönhatásának kvantumelmélete* című jegyzetben is megjelent, éveken keresztül téve lehetővé a fiataloknak a legaktuálisabb területre a behatolást.

Szakmai fejlődése igen széles skálán bontakozott ki. Kutatómunkájában a relativitáselmélet fő helyet foglalt el. A kezdeti eredmények során hamar felismerte, hogy a relativisztikus dinamika kifejtése Einstein, Minkowski, Planck kezében mintha elakadt volna, hiszen akkor még az atommagfizika új világa teljesen ismeretlen volt, később pedig úgyszólván minden érdeklődés a kvantumfizika felé fordult. A relativisztikus dinamika körültekintő, részletes kifejtése képezte ezért az akadémiai doktori dolgozata tárgyát (1956). A fizika egyetemi tanításában okvetlenül szükségesnek tartotta a kvantummechanika olyan megfogalmazását, amely az elmélet teljesítőképességének sokoldalú bemutatását szolgálja (3 magyar kiadás 1957–1971, orosz kiadás: 1962). Később sor került *Életrevaló atomok* címen egy olyan hangszerelésű könyvre is, amely az életfontosságú vegyületek szerepében mutatja meg a kvantummechanikai gondolkodás döntő lépéseit (1978) úgy, hogy az elvek nemcsak fizikusok, hanem vegyészek és biológusok számára is hozzáférhetőek legyenek.

Az elemi részek fizikája iránt érzett olthatatlan szeretet a neutrínófizika szerepének feltárásában mutatkozott meg Marx Györgynél. *Menyhárd Nórával* (1960) írt cikke után bekövetkezett kutatásai megnyitották az utat a neutrínófizika kozmikus szerepének tárgyalása és Marx György nemzetközi neutrínó-karrierje előtt. Ehhez fűződött a balatoni neutrínó-konferenciák sora, amelyekre Marxnak sikerült a „vasfüggöny” mögé elhívni a világ élvonalbeli kutatóit.

Alig hinnénk – ha nem lettünk volna szemtanúi –, hogy Marx György érdeklődése milyen széles körű volt. Persze, minden csillagász-szimpatizánst tűzbe hozott az űrutazás gyakorlattá válása (1957). A magyarországi asztronautikai egyesület 1963-ban lett a Nemzetközi Asztronautikai Federáció tagja, ezután

nem sokkal Marx Györgyöt is beválasztották a *Kármán Tódor* alapította Nemzetközi Asztronautikai Akadémia tagjai sorába – egy sor elvi asztronautikai tárgyú cikke megjelenése után.

Marx György hihetetlenül tág spektrumú működése – ami még munkatársait is meglepheti, de elég, ha lelkiismeretesen átnézik a *Fizikai Szemle* 53 (2003) első számában kiadott *Marx György publikációi* című gyűjteményt – fő irányát tekintve mégis a hazai köznevelés, szakmai nevelés, modernizálás, a haza előkészítése a jövő feladataira. Mint az ELFT-nek újjáalakulása (1950) óta alapító tagja, a *Fizikai Szemle* 1958 óta főszerkesztője, hihetetlen energiával küzdött azért, hogy a „Lap” és az „Egyesület” be tudja tölteni társadalmilag fontos szerepét: a fizika tanárainak állandó mozgósítását és tájékoztatását. Azután, hogy 1976-ban főtitkárrá választotta a Társulat tagsága, megnőtt, megsokszorozódott a taglétszám, a szakmai tevékenység, a szakcsoportok száma.

Marx György élete utolsó évtizedében egy sor könyvvel tett bennünket gazdagabbá. Az *Atomközelen* (Tóth Eszter és Holics László közreműködésével, 1980), és az *Atommagközelen* (1996) a fizika modern kérdéseinek aránylag egyszerű tárgyalását adja az oktatás számára. *A marslakók érkezése – magyar tudósok, akik Nyugaton alakították a 20. század történelmét* (2000) című tanulmánykötete a határainkon túli kiváló magyar természettudósokat mutatja be.

Marx György az MTA levelező (1970), majd rendes tagja (1982) volt.

Még oldalakat írhatnánk arról a több mint fél évszázadról, melynek során Marx György munkásságának tanúi lehettünk. Nehezen felülmúlható szakember, szinte valószínűtlenül nagy munkabírású egyéniség volt. Megtiszteltetés számomra, hogy egyik mesteremnek tekinthetem.

Születésének nyolcvanadik évfordulóján emlékezünk Rá.

## ATOMOKTÓL A CSILLAGOKIG

# SEJTEK ÖNSZERVEZŐDÉSÉNEK FIZIKÁJA

Czirók András  
ELTE TTK, Biológiai Fizikai Tanszék

## Önszerveződés és kollektív viselkedés

Egy sok alkotóelemből álló rendszert általában legalább két szerveződési szinten vizsgálhatunk. Az alkotóelemek és a köztük fennálló kölcsönhatások alkotják a *mikroszkopikus* szintet. A rendszer egészének viselkedését egy *makroszkopikus* leírással jellemezhetjük, ami a mikroszkopikus leírástól lényegesen különböző fogalmakat használ. Egy klasszikus fizikából vett példával élve, a nemesgázokat a mikroszkopikus szinten jó közelítéssel az atomok között ható van der Waals-kölcsönhatás és a Lennard-Jones-potenciál írja le. Makroszkopikus szinten a gázt termodinamikai állapotjelzőkkel és a köztük fennálló állapot-egyenlettel jellemezzük. A két szint között a statisztikus fizika teremti meg a kapcsolatot. A mikroszkopikus és makroszkopikus leírások együttes alkalmazása – esetleg további szerveződési szintekkel bővítve – számos, nem fizikai rendszer esetén is célravezetőnek bizonyul. Így, különböző fogalmakkal dolgozik a szerves kémia, a biokémia, a sejtbológia és a szövettan. A mikroszkopikus, makroszkopikus jelzőket az alábbiakban ilyen értelemben, két különböző szerveződési szint megkülönböztetésére fogjuk használni.

Általában egy rendszer makroszkopikus viselkedése nem következik egyszerűen az alkotóelemek mikroszkopikus kölcsönhatásainak ismeretéből. A két szerveződési szint kapcsolata, a mikroszkopikus kölcsönhatások következtében megjelenő makroszkopi-

kus viselkedés, az *önszerveződés*, sokszor intenzív kutatás tárgya. *Kollektív viselkedés* alatt általában ennek az általános problémának a következő speciális, egyszerűbb esetét értjük. Ha a rendszert sok hasonló aleggység építi fel, akkor az alkotóelemek kollektív viselkedése a köztük ható kölcsönhatások miatt alakul ki, és lényegesen különbözik attól, amit a kölcsön nem ható elemek mutatnának.

Az autópályán spontán kialakuló sűrűség-hullámok és tranziens forgalmi dugók jó példák a nem fizikai rendszerben fellépő kollektív viselkedésre. A rendszert mikroszkopikus szinten az egymás után haladó autók alkotják. Dinamikájukat részben fizikai törvények, részben a vezetők preferenciái és reakciói határozzák meg. Makroszkopikus szinten a rendszert hidrodinamikai változókkal, azaz sűrűség- és sebesség-térrel írhatjuk le. A spontán forgalmi dugók nagy sűrűség esetén alakulnak ki – egyfajta instabilitásként – az autók közötti kölcsönhatások „melléktermékeként”. Nyilvánvaló, hogy a bedugult állapot lényegesen különbözik a vezetők (mikroszkopikus szintű) preferenciáitól.

A fizikán kívüli önszervező jelenségek tanulmányozása azonban több ponton különbözik a fizikában megjelenő kollektív jelenségek vizsgálatától. A fizikai rendszereknél általában már jól ismerjük a kölcsönható egységeket – a mikroszkopikus szintet – és így elegendő csak a speciális, kollektív makroszkopikus jelenséget vizsgálni. Ezzel szemben a biológiában általában

már a mikroszkopikus egységek (fehérjék, sejtek, organizmusok) is rendkívül összetettek, és viselkedésük kevésbé ismert vagy jól definiálható. Ezért a biológiai önszervező jelenségek vizsgálatánál gyakran az alkotóelemek releváns viselkedésére és kölcsönhatásaira is hipotéziseket kell felállítanunk, majd az egész modellt mérésekkel tesztelnünk. Az élő szervezetben fellépő önszerveződés vizsgálata általában sokkal több feltételezésre épül, mint a kollektív fizikai rendszerek tanulmányozása. Mindenesetre, amint az alábbi példák mutatják, a biológiai rendszerek önszerveződésének vizsgálata számos esetben gyümölcsöző lehet.

## Biokonvekció

Az önszerveződő biológiai viselkedés egy viszonylag egyszerű példája a mikroorganizmusok (algák és baktériumok) nagy sűrűségű tenyészeiben megfigyelhető folyadékáramlási mintázat. Vízben élő mikroorganizmusok gyakran összegyűlnek a vízfelszín közelében. Ezt a folyamatot vagy az oxigéngradiens érzékelése és a magasabb oxigéntartalmú területek irányába történő elmozdulás (*kemotaxis*), vagy a fény felé úszás (*phototaxis*) hajtja. Mivel a mikroorganizmusok sűrűsége nagyobb a víznél, felszíni rétegződésük egy hidrodinamikailag instabil sűrűséginverzió. A sűrűséginverzió Rayleigh–Taylor-instabilitást eredményez, és a nagyobb sűrűségű folyadék különálló oszlopokban lesüllyed (1. ábra). A mikroorganizmusok folyamatos felfelé úszása azonban képes újra létrehozni a sűrűséginverziót, és így a kísérletekben egy fennmaradó áramlási mintázat alakul ki.

A rendszer makroszkopikus viselkedését a folyadék  $v$  sebességtere,  $p$  nyomáseloszlása valamint a mikroorganizmusok térbeli eloszlását leíró  $c$  sűrűség-tér jellemzi. A mikroorganizmusok mozgására tett feltételezések (diffúzió, kemotaxis, fototaxis) megjelennek mint a mikroorganizmusok  $J$  áramát leíró makroszkopikus egyenlet speciális tagjai:

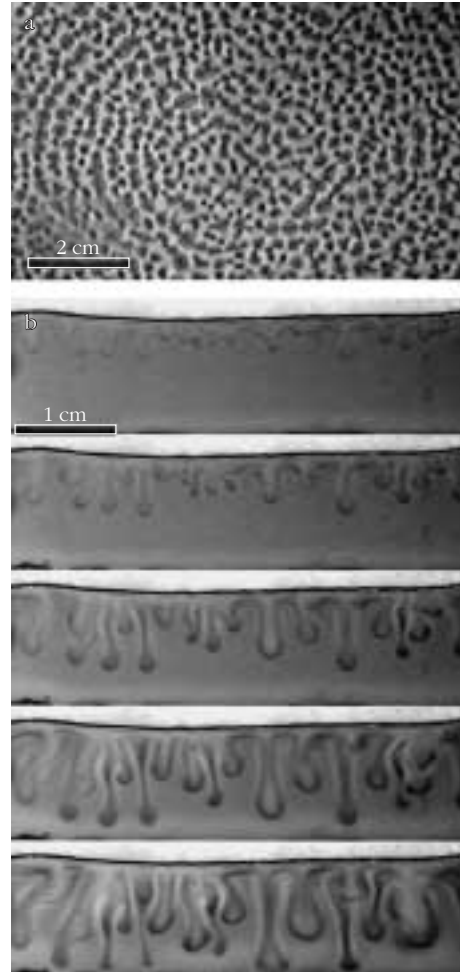
$$\dot{c} = -\nabla J, \quad J = c(\mathbf{v} + \mathbf{V}) + D\nabla c, \quad (1)$$

ahol a mikroorganizmusok véletlenszerű mozgását a  $D$  diffúziós állandó reprezentálja, míg  $\mathbf{V}$  a mozgásukban megjelenő „drift”-komponens. Fototaxis esetében ez függőlegesen felfelé mutat, kemotaxis esetében pedig az oxigéngradiens irányába. A folyadékdinamika és a mikroorganizmusok kölcsönhatása egyrészt az (1) egyenletben szereplő  $c\mathbf{v}$  konvektív tagként, másrészt a Navier–Stokes-egyenletben egy, az egységsűrűség-térrel arányos, térfogati erőként jelenik meg:

$$\rho[\dot{\mathbf{v}} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}] = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + (\rho + \alpha c) \mathbf{g}. \quad (2)$$

A rendszer kollektív viselkedése az így kapott egyenletrendszer numerikus vagy analitikus vizsgálatával tanulmányozható.

Különlegesen nagy mikroorganizmus-sűrűség esetén már nem elegendő csak az egységsűrűség és a fo-

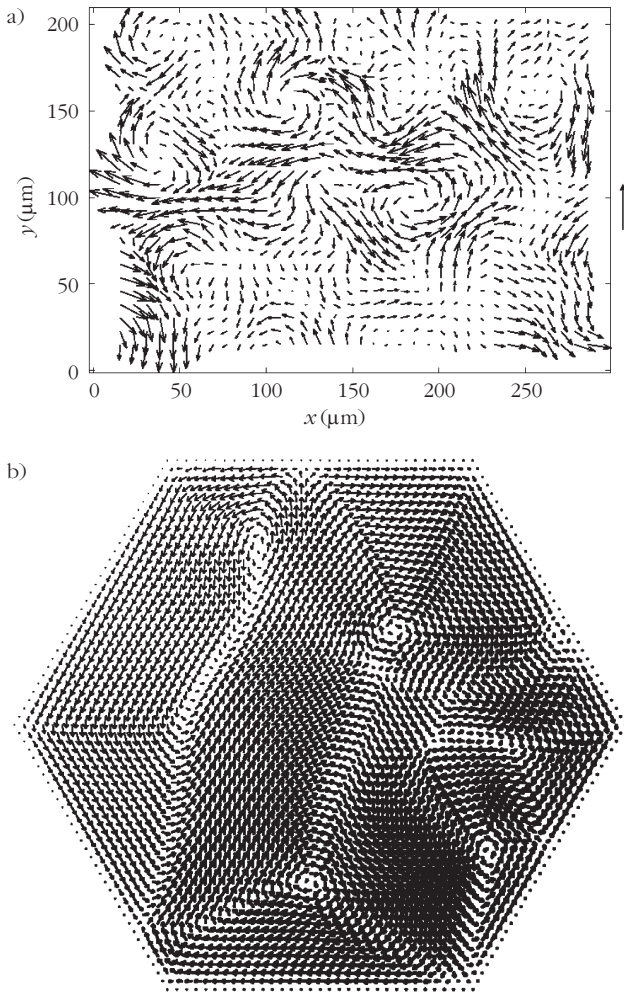


1. ábra. Biokonvekció *Bacillus subtilis* folyadék-kultúrákban. a: Petri-csészében kialakuló mintázat felülnézete. b: Hele-Shaw-cella oldalnézete és az instabilitás időfejlődése fél perces időfelbontással. A sötétebb területeken nagyobb a baktériumok száma. [1] alapján.

lyadék makroszkopikus áramlási terének a kapcsolót vizsgálni. Ilyenkor a mikroorganizmusok már közvetlenül is befolyásolják egymás mozgását: geometriai kényszerek hatására rendeződnek, illetve érzékelhetik a szomszédok által keltett áramlási teret is. A létrejövő különleges, örvénylő áramlási mintázat tulajdonságai ma még kevésbé ismertek (2. ábra). Figyelemre méltó ugyanakkor, hogy hasonló áramlási kép alakulhat ki nagyon különböző biológiai rendszerekben, kétdimenziós felületen mozgó sejtektől kezdve egészen az állatsordák vagy halrajok dinamikájáig. Ez arra utal, hogy a kollektív makroszkopikus viselkedés kialakításában a rendszer mikroszkopikus tulajdonságainak nagy része lényegtelen.

## Embrionális erek és sejt-hálózatok

Az önszerveződés koncepciója a biológiai szövetek kialakulásának megértésében is hasznos lehet. Tudjuk, hogy a genetikai állomány nem egy tervrajzhoz hasonló módon kódolja az organizmus térbeli szerkezetét – forma és funkció valahogy a sejtek kölcsönha-



2. ábra. Önhajtott részecskék kollektív áramlása. a: Nagy sűrűségű *Bacillus subtilis* folyadékkultúrában kísérletileg megfigyelt sebességtér ([2] alapján). b: Önhajtott részecskék hidrodinamikai modelljében megfigyelhető transziens örvények ([3] alapján).

tásai következtében jön létre. A kialakuló szerkezet azonban sokkal jobban meghatározott, mint a mikroorganizmusok telepei, elsősorban a sokrétű, génexpressziós mintázatokat is magukban foglaló visszacsatolások miatt. Az egyedfejlődés során speciális gének expressziója definiálja az embrió különböző részeit és egyben behatárolják az ott található sejtek lehetséges „viselkedését”.

Úgy gondoljuk azonban, hogy léteznek olyan struktúrák is, amelyeket nem közvetlenül a génexpressziós mintázatok határoznak meg. Ilyen kollektív mintázatképződésre lehet jó példa a melegvérű gerincesekben megjelenő korai érhálózat, amit több száz endotél sejt alakít ki az embriófejlődés első szakaszaiban (3. ábra). A sejtek véletlenszerű helyeken differenciálódnak (születnek), gyorsan aggregátumokba csoportosulnak, nyúlványokat növesztenek, majd hálózatot képeznek. A mechanizmus önszervező voltát főleg az támasztja alá, hogy az egyes szegmensek elhelyezkedése nagyfokú egyedi változatoságot mutat, másrészt nem azonosítottak az egyes szegmensek jelenlétével vagy hiányával korreláló genetikai mutációkat.

Munkatársaimmal felállítottunk és számítógépes szimulációkkal alátámasztottunk egy hipotézist, amely szerint a hálózatformálás során az érsejtek mozgása a szomszédos sejtek mechanikai állapotától függ. A modell a mikroszkopikus szinten, kölcsönható sztochasztikus folyamatokként írja le a rendszert: a  $k$ -edik sejtet ebben a közelítésben csak az  $\mathbf{x}_k(t)$  pozíció és a  $\mathbf{v}_k(t)$  sebesség jellemzi. A sejtmozgást egy perzisztens véletlen bolyongással írjuk le,

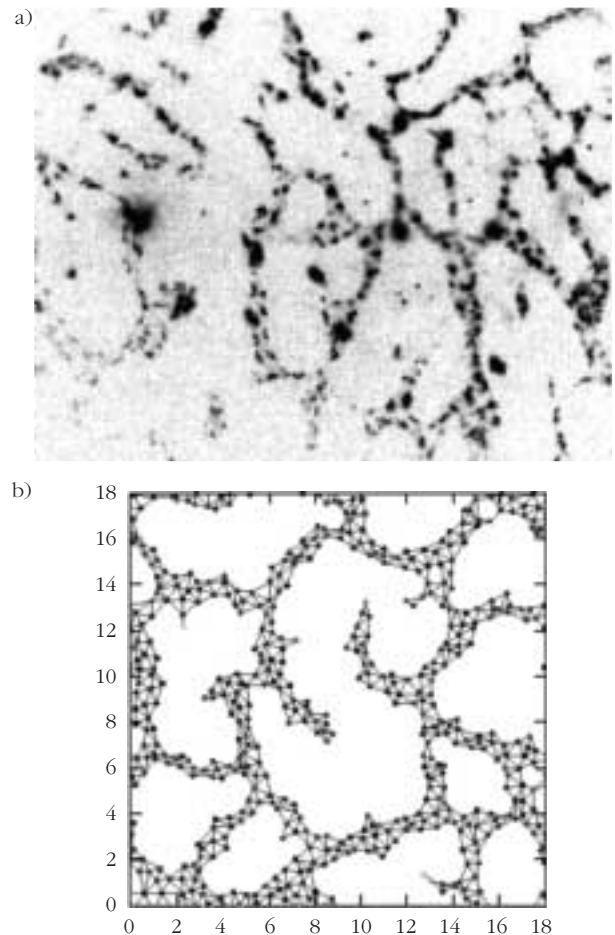
$$\dot{\mathbf{v}}_k = -\frac{\mathbf{v}_k}{\tau} + \sqrt{D} \xi_k + \mathbf{M}_k, \quad (3)$$

ahol  $\xi$  egy korrelálatlan fehér zaj, a sejt–sejt kölcsönhatások pedig az  $\mathbf{M}$  determinisztikus „drift”-tagban jelennek meg. Feltételezzük, hogy a sejt–sejt kölcsönhatások párkölcsönhatások összegére bonthatók, és ezek csak a két sejt távolságától függenek:

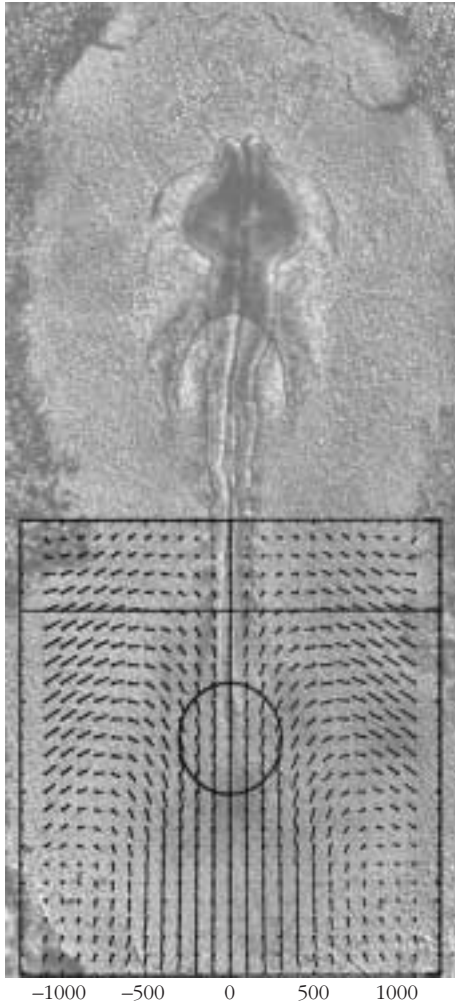
$$\mathbf{M}_k = \sum_j \frac{\mathbf{x}_j - \mathbf{x}_k}{d_{kj}} [f_1(d_{kj}) + w_j f_2(d_{kj})], \quad (4)$$

ahol az összegzés a  $k$ -edik sejt szomszédaira történik, és  $d_{kj} = |\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_j|$ . Az  $f_1$  tasztítás biztosítja, hogy a sejtek ne tudjanak áthaladni egymáson. Az  $f_2$  vonzó kölcsönhatás fejezi ki azt, hogy a sejtek szeretnek összetapadni.

3. ábra. Embriionális érhálózat mikroszkópos képe (a) és modellje (b), [4] alapján.







4. ábra. Korai madárembriók fejlődése során megfigyelhető szövetmozgások sebességtere. A rácspontról kiinduló szakaszok a szövetmozgás irányát és nagyságát mutatják ([5] alapján).

ni. Ez a kölcsönhatás a  $w$  súlyfaktoroknak megfelelően aszimmetrikus, azaz a párkölcsönhatás két résztvevője különböző nagyságú vonzó hatást érezhet. Ez, a fizikai rendszerekkel ellentétben, azért lehetséges, mert itt nem mechanikai erőkről van szó, hanem véletlenszerű aktív mozgást végző részecskék (sejtek) mozgásiránypreferenciáiról. Feltételezzük, hogy a sejtek nagyobb valószínűséggel migrálnak elnyújtott sejtek szomszédságába. Ennek a migrációs preferenciának az lehet az oka, hogy az elnyújtott sejtek mechanikai feszültség alatt vannak, ezért merevebbek. Ez az elképzelés összhangban van számos korábbi kísérleti adattal, amelyek arra utalnak, hogy a merevebb környezet sok sejtípus számára vonzó migrációs célpont.

A (3) és (4) egyenletek numerikus integrálásával megmutatható, hogy a modell valóban képes hálózatok létrehozására, és az időfejlődése sok szempontból tükrözi a kísérletileg tapasztaltakat. Bár a modellt még számos ponton kísérletileg ellenőrizni kell, a mintázatképződés kollektív jelenségként történő értelmezése hasznos koncepciónak bizonyul. Az érfalakat alkotó sejtek önszervező viselkedésének megértése – hasonló vizsgálatokon keresztül – szükséges a mesterséges szövetek előállítására tett kísérletekhez is.

## Szövetmechanika: erők és relaxáció

A még nagyobb skálájú anatómiai struktúrák kialakulását kísérő sejt- és szövetmozgások szisztematikus felderítése az elmúlt évtizedben vált lehetővé, részben a specifikus fluoreszcens jelölő molekulák és a számítógép-vezérelt optikamikroszkópia-technikák elterjedése révén. A sejtek szövetalkotása nemcsak a fejlődésbiológia egyik klasszikus problémája, hanem a mesterséges szövetek létrehozásának (tissue-engineering) egyik alapvető kérdése is.

A fejlődés korai szakaszában a gerinces embriók szerkezete drámai módon átalakul: egy látszólag forgásszimmetrikus felületen először egy tengely, a primitív csík alakul ki. Ezzel egyidőben elkezdődik a gasztruláció, a hólyagsíra képzése. A gasztruláció során sejtek vándorolnak a primitív csíkon keresztül az embrió belsőjébe, és kialakítják a középső (mezodermais) csíralemezt. Bár a gasztruláció különböző szakaszai már régóta ismertek, a szövetformálódás kinetikájáról és dinamikájáról napjainkban kapjuk az első mérési adatokat (4. ábra). Mivel a szövet is egy fizikai test, mozgását és deformációját mechanikai erők okozzák. Ezeket az erőket az embrió sejtjei fejtik ki, tehát itt is egy olyan rendszerünk van, ahol a mikroszkopikus skálán történő sejt-dinamika (mozgás, kontraktilitás) létrehozza a makroszkopikus skálájú szövetmozgásokat. A sejtek által kifejtett erők kapcsolata a szövetet formáló erőkkel és a deformált szövetben felhalmozódó mechanikai feszültséggel azonban még jórészt ismeretlen.

Szilárd testek és folyadékok esetében nyírásakor mechanikai feszültség lép fel, de egy közönséges (newtoni) folyadékban, például vízben, a nyírófeszültség a nyírás megszűnésekor azonnal eltűnik. A folyadék molekuláihoz hasonlóan, mozgásukkal a sejtek is hatékonyan le tudják csökkenteni a kialakuló mechanikai feszültséget úgy, hogy megbontják a sejt-sejt kapcsolatokat. Ehhez az aktív átrendeződéshez azonban több időre van szükségük mint a vízmolekuláknak. Sejtaggregátumokon végzett mérések arra utalnak, hogy ez a relaxációs idő közelítőleg tíz perc, ami nem elhanyagolható a szövetmozgások óras időskálájához képest. Tehát, a sejtaggregátumok és így, feltételezhetően, az egyszerű embrionális szövetek is nem-newtoni folyadéknak tekinthetők – olyanok mint a polimeroldatok. Jelenleg a terület egyik legnagyobb kihívását az jelenti, hogy a fenti megfontolások alapján állítsuk fel az embriogenezis olyan mechanikai modelljét, amelyben a szövetek kísérletileg megfigyelhető mozgásai visszavezethetők különböző sejtcsoportok által kifejtett erőkre.

## Kitekintés

Összefoglalásként megállapíthatjuk, hogy a sejt- és szövetműködés megértése egy rendkívül érdekes probléma, hiszen a sok komponensből álló rendszerek viselkedése még az alkotóelemek részletes ismeretében sem jósolható meg egyszerűen. Mivel a különböző skálájú

folyamatok integrálása gyakran megoldhatatlan valamilyen kvantitatív elemzés nélkül, számos sejtbiológiai probléma vizsgálatában ötvöznek molekuláris biológiai, statisztikai, műszaki vagy fizikai módszereket.

#### Irodalom

1. Jánosi M., Czirók A., Silhavy D., Holczinger A.: Is bioconvection enhancing bacterial growth in quiescent environments? *Environmental Microbiology*, 4 (2002) 525–531.

2. Dombrowski C., Cisneros L., Chatkaew S., Goldstein R.E., Kessler J.O.: Self-Concentration and large-scale coherence in bacterial dynamics. *Physical Review Letters*, 93 (2004) 098103.
3. Csahók Z., Czirók A.: Hydrodynamics of bacterial motion. *Physica A*, 243 (1997) 304.
4. Szabó A., Perryn E.D., Czirók A.: Network formation of tissue cells via preferential attraction to elongated structures. *Physical Review Letters*, 98 (2007) 038102.
5. Czirók A., Rongish B.J., Little C.D.: Extracellular matrix dynamics during vertebrate axis formation. *Developmental Biology*, 268 (2004) 147–157.

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# DIGITÁLIS FÉNYKÉPEZŐGÉP ALKALMAZÁSA A FIZIKA TANÍTÁSÁBAN

Szakmány Tibor<sup>1</sup>, Papp Katalin  
Szegedi Tudományegyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

A digitális fényképezőgép és a számítógép elterjedése mind az iskolában, mind a diákok otthoni környezetében új lehetőségeket teremt a fizikai kísérletezésre, azok részletes elemzésére, igényes mérésekre. A *Fizikai Szemle* MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN rovatá (Ujvári Sándor, 2005/8) már foglalkozott a digitális fényképezőgép működésének fizikai alapjaival. Az alábbiakban az iskolai felhasználásra mutatunk példát, a mechanika tananyagához kapcsolódva.

Manapság a kompakt digitális fényképezőgépek a legelterjedtebbek. Ezek könnyen kezelhetők, és fejlett automatikájuknak köszönhetően szinte mindig jó minőségű fényképek készíthetők velük. Itt mutatkozik meg a digitális fényképezés egyik nagy előnye is, hiszen a kijelzőn rögtön ellenőrizhető az elkészült kép, és amennyiben a minősége nem felel meg az igényeinknek, azonnal újat tudunk készíteni. A legolcsóbb kompakt kategóriától, a drágább kategóriák felé haladva a fényképezőgépek által kínált beállítási lehetőségek száma növekszik, és ezzel párhuzamosan az alkalmazási lehetőségek köre is. A záródő előválasztási lehetőség mind a lassan, mind a gyorsan, mind pedig a véletlenszerűen lejátszódó folyamatok megörökítésére alkalmassá teszi gépünket, a felhasználási módoknak csak a fantáziánk szab határt, mint ahogy például az az 1. ábrán látható.

A mai digitális fényképezőgépek szinte mindegyike alkalmas sorozatfelvételek és videofelvételek készítésére, amivel már a mozgások is megörökíthetők. Sok típus esetén a közvetlenül televízióra csatlakoztatás is megoldható, így az elkészült képek és videók azonnal felhasználhatók a tantermi szemléltetésben. Számítógép és projektor segítségével pedig a digitális képfeldolgozás és szemléltetés széles tárháza nyílik meg előttünk. A következőkben ezekből a lehetőségekből

válogatunk, különös tekintettel a mozgások vizsgálatára, segítséget nyújtva a mechanika tanításához.

## Kvantitatív mérés digitális videofelvétel segítségével

Gyakran fordul elő, hogy a fényképek és a sorozatfelvételek nem tartalmaznak elegendő információt a mozgásos kísérletek nyomon követéséhez. Ebben az esetben rendkívül hasznosnak bizonyulnak a videofelvételek.

A digitális fényképezőgépekkel készült videofelvétel nem más, mint gyorsan egymás után készült digitális állóképek (legtöbbször AVI formátumú) mozgóképpé való összefűzése. Típustól és beállítástól függően a *másodpercenként készült képkockák száma* és a *felbontás* változó lehet. Amennyiben nem ismerjük a használt fényképezőgép esetén ezeket az adatokat, az elkészült videofelvételek számítógépre mentése után a fájl tulajdonságai (*properties*) közt mindig megtalálhatjuk őket. A felvételek felbontását a képpontok (*pixelek*) számával, a másodpercenkénti képek számát pedig a képkockasebességgel (*fps – frame per secundum*) szokták megadni. A mai digitális fényképezőgépek többsége képes a televízióon élvezhető minőségű (640×480) képpontos felbontásra és 15–30 fps-os képkockasebességre.

1. ábra. Monitor képráfrissítése (0,001 s), villámlás (15 s), Tyndall-jelenség (0,6 s)



<sup>1</sup> V. éves hallgató

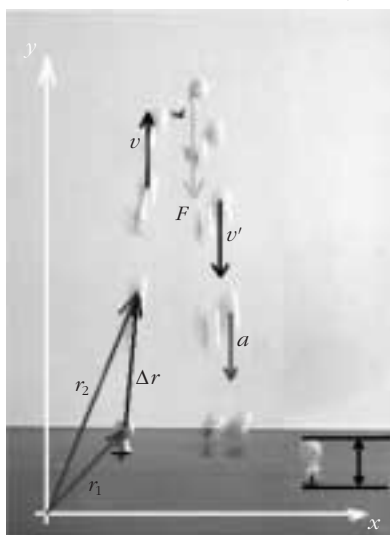
## Az adatok feldolgozása Excellel

$t$ (s)	$x$ (pixel)	$H$ (pixel)	$b'$ (mm)	$b$ (m)	$mgb$	$v = \Delta b/\Delta t$ (m/s)	$1/2 m v^2$
0	370	0	0	0	0	2,287646	0,013083
0,0667	223	147	152,586	0,152586	0,007484	1,338351	0,004478
0,1334	137	233	241,854	0,241854	0,011863	0,793673	0,001575
0,2001	86	284	294,792	0,294792	0,01446	0,326807	0,000267
0,2668	65	305	316,59	0,31659	0,015529	-0,26456	0,000175
0,3335	82	288	298,944	0,298944	0,014663	-0,96486	0,002327
0,4002	144	226	234,588	0,234588	0,011507	-1,43172	0,005125
0,4669	236	134	139,092	0,139092	0,006822	-1,99196	0,00992
0,5336	364	6	6,228	0,006228	0,000305		

A kísérletekről készült digitális videofelvételek számítógépre mentése után a felvétel a különböző szoftverek segítségével lejátszható, akár képkockánkénti léptetéssel is, így a mozgást akár pillanatról-pillanatra is nyomkövethetjük. Egyes programok, mint például a *Windows Movie Maker*, a *Windows XP* egyik alapprogramja, illetve az internetről ingyenesen letölthető *BS Player* lehetővé teszik az egyes képkockák elmentését is.

A *Windows Movie Maker* program a *Kellékek (Accessories)* közt található meg. A fájl importálása után a jobb oldalon található lejátszó részben a kezelőszervek segítségével a filmfelvételt le tudjuk játszani. Lehetőségünk van a képkockánkénti léptetéssel a megfelelő képkockák kikeresésére és elmentésére az általunk kiválasztott mappába (*folder*). A *BS Player* esetén a képkockánkénti léptetést a lejátszás szüneteltetésével (*pause*), majd a jobbra-, balra billentyűk nyomkodásával érhetjük el, illetve a kívánt képkockákat a „P” billentyű megnyomásával menthetjük el a *BS Player* saját mappájába, majd onnan az általunk választott mappába másolhatjuk.

2. ábra. Képkockákból illesztett nyomkép, és rajzolás a képekre



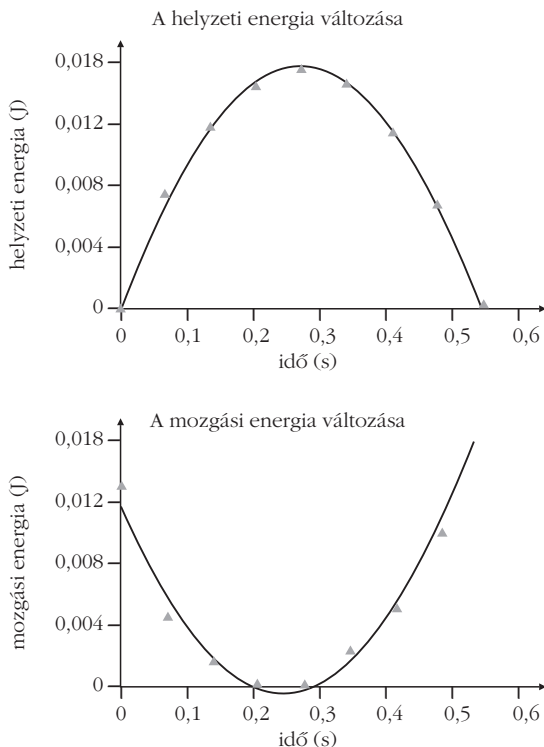
A videofelvételből kinyert állóképekhez időadatokat tudunk rendelni. A *Windows Movie Maker* esetén ezt a képek elmentésekor le tudjuk olvasni az állapotsávban, és akár a képfájl nevében is elmenthetjük, míg a *BS Player* esetén az egymás után elmentett képek közt az eltelt képkockák számából tudjuk kiszámolni a képkockasebesség segítségével.

A képfájlként elmentett képkockákat a különböző szoftverek segítségével be tudjuk mutatni, illetve módosítani is tudjuk azokat. A *Windows XP* egy másik alprogramja, a *Paint* segítségével a képeket szerkeszthetjük is. Mozgások esetén például berajzolhatjuk az adott pillanatban ható erőket, illetve a hely-, elmozdulás-, sebesség-, gyorsulásvektorokat is, valamint lehetőségünk van nyomkép (a test helyének egyenlő időközönkénti megjelölése egy vonatkoztatási testhez viszonyítva) készítésére is. Ebben az esetben az egymást követő képkockákról a mozgó testet az eszköztárban található kivágás funkció (lásd 3. ábra) segítségével ki kell vágunk, majd a háttér nem elmozduló, jellegzetes pontjainak felhasználásával a következő képre illesztünk.

A 2. ábrán látható képrészleten a vázolt módszerrel egy rugós figura ugrásáról készült nyomkép látha-

3. ábra. Kivágás, és koordináták meghatározása





4. ábra. Az adatok ábrázolása grafikonon

tó. A felvétel *Canon Powershot A75* típusú digitális fényképezőgéppel,  $640 \times 480$  képpontos felbontásban, 15 fps képkockasebességgel készült. A háttér jellegzetes, nem elmozduló pontja a képrészleten nem látható asztalsarok volt.

A *Paint* további funkciója, hogy az állapotsorban minden pillanatban látható az egér kép feletti helyzete pixelkoordinátában (lásd 3. ábra). Ezt felhasználva az egyes képkockákon, vagy akár az illesztett nyomképen, a mozgó testhez koordinátaadatok is rendelkezhetők.

A pixelkoordináták valós hosszúsággá alakításához csak egy tárgy, lehetőleg a mozgó tárgy méreteit kell ismernünk mind pixelben a képen, mind pedig cm-ben a valóságban. Az ugró figura esetén ez 55 mm, amiből a képen látható 53 pixeles figuramagasságot figyelembe véve a pixelekre jutó hosszúság  $1,038 \text{ mm/pixel}$ .

Az *Excel* program segítségével a korábban már ismertetett módon nyert idő- és helykoordináta adatokat táblázatba rendezhetjük (lásd 1. táblázat). A kezdőpontokat mindkét adat esetén kedvünk szerint eltolhatjuk. A  $t$  időkoordináta esetén a 15 fps-os képkockasebességet felhasználva két képkocka elkészülte közt  $1/15 \text{ s} = 0,0667 \text{ s}$  idő telik el. Az  $x$  pixelkoordinátákat, a kezdőpillanatbeli 370 pixelt véve nullmagasságnak, a  $370 - x$  képlet segítségével tolhatjuk el. Az így kapott  $H$  pixelkoordinátákat ezután az  $1,038 \text{ mm/pixel}$  váltószámmal szorozva valós  $h'$  magasságkoordinátákká alakíthatjuk. A következő oszlopban a  $h$  magasság

már méterben van megadva, amiből a helyzeti energia a figura tömegének (5 g) ismeretében már könnyen kiszámolható.

A hozzávetőleges  $v$  sebességadatot az egymást követő képkockákhoz tartozó  $h$  magasságkoordináták  $\Delta h$  különbségéből, és a képkockák elkészülte közt eltelt  $\Delta t$  időből ( $1/15 \text{ s}$ ) származtathatjuk, ezekből már a mozgási energia is kiszámolható.

Az adatok ezután az *Excel* segítségével már könnyen ábrázolhatók grafikonon, a kapott pontokra trendvonalat is illeszthetünk. A grafikonok jól szemléltetik az energiaátalakulási folyamatokat (4. ábra).

A módszernek vannak korlátai, hiszen a túl gyors mozgások esetén a test képeinek elmosódása jelent problémát, míg túl lassú mozgások esetén az elmozdulás csak néhány képpontnyi, ezért a diszkrét koordinátaértékek leolvasásában elkövetett 1 pixeles tévedés is már jelentős hibát idézhet elő. Az elmozdulásokból származtatott sebességadatok esetében ezek a pixelkoordináták meghatározásakor elkövetett hibák pedig csak növekednek.

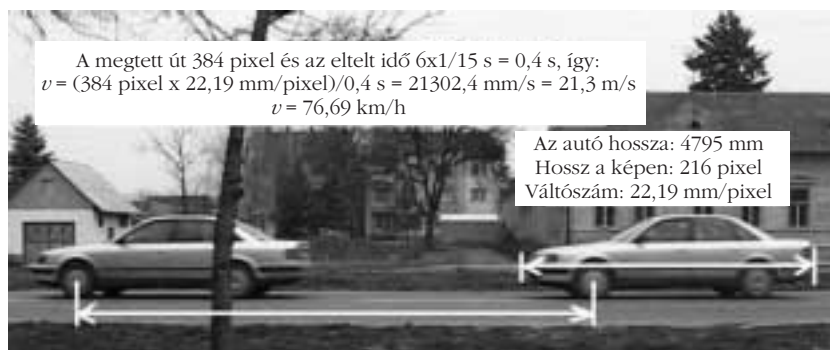
A hibák azonban kiküszöbölhetőek, ha a felvétel készítésekor ügyelünk a mozgó test és a felvevő kamera közötti távolságra. A megfelelő távolság megválasztásával elérhető, hogy a felvételen látható elmozdulás a legmegfelelőbb tartományba (20–100 pixel) essék. Ebben a tartományban a felvételen a test mozgása miatti elmosódás még nem jelentős, ugyanakkor a pixelkoordináták leolvasásában elkövetett  $\pm 1$  pixeles tévedés 5%-nál kisebb hibát jelent.

A módszer tehát ügyes elrendezéssel nagyon sok mozgás esetén használható, segítségével rezgőmozgást, körmozgást, lejtőn gördülést vagy más mozgásokat is nyomon követhetünk, ugyanakkor akár újszerű mérési gyakorlatok bevezetésére is lehetőségünk adódik. Erre lehet példa az autók sebességének mérése digitális fényképezőgép segítségével.

Az autók sebességének méréséhez, csak egy rövid digitális videofelvételt kell készítenünk a forgalomról, 10–20 m távolságra állva az úttesttől. Az 5. ábrán egy így készült videofelvétel két képkockájából összeillesztett kép látható.

A pixelkoordinátákat valós hosszúsággá alakító váltószám meghatározásához szükséges hosszúságadatot ebben az esetben maga az elhaladó autó szolgáltatja, hiszen egy felismert autótípus adatait a különböző

5. ábra. Autók sebességének mérése



autós weboldalakon megtalálhatjuk. Az 5. ábrán látható Audi A6 Quattro hossza 4795 mm, amit összevetve a képének 216 pixeles hosszával 22,19 mm/pixelt kapunk váltószámnak. Ez után az autó sebessége az 5. ábrán látható módon már könnyen kiszámolható, amelyre ebben az esetben az érvényes sebességkorlátozást jelentősen meghaladó 76,69 km/h-nak adódott.

## Módszertani megjegyzések

A fenti példák csak ízelítőt adtak a sokféle lehetőségből, amelyeket a digitális fényképezőgép biztosít a mechanikai kísérletek elemzéséhez, a fogalmak beve-

zetéséhez. A szorosan vett „szakmai” hasznon túl meg kell említenünk a számítógép és a fényképezőgép teremtette modern tanítási-tanulási környezetet, amely a diákok aktivitását és igen kedvező attitűdjét biztosítja. Ez a környezet kihasználja a tanulók számítástechnikai ügyességét, a képsorozatok, felvételek elemzéséhez szükséges szoftverek virtuóz használatát, amely a hagyományos tanítási módszerekkel nehezen elérhető tanulói érdeklődést, kedvező tantárgyi hozzáállást eredményez. A fényképezőgép mobil, iskolán kívüli környezetben való alkalmazása egy újabb előnyt jelent: az „outdoors physics”, mint új didaktikai irányzat természetes megjelenését a fizikatanításban.

## KÖNYVESPOLC

# Szabó Árpád: A FIZIKA TÖRTÉNETE

Akadémiai Kiadó, Budapest, 2007, Harmadik kiadás, 302 o.

Fizikatörténetet írni nem könnyű dolog. Mindenekelőtt magának a fizikának, a fizikai jelenségeknek és törvényeknek alapos ismeretére van szükség, ezen túlmenően azonban tudni kell az előbbieket felfedezésének időrendjét, ismerni a felfedezőket személyi és életrajzi, valamint a mindezeket körülvevő társadalmi valóságot. Ugyanakkor elengedhetetlen egy bizonyos egyensúly kialakítása ezek között. A fizikatörténet ugyanis nem „fizikakönyv”, tehát túlságosan részletességgel nem mehet bele a fizikai jelenségek és törvények tárgyalásába, ugyanakkor el kell kerülnie azt is, hogy a fizikusok élettörténetének részleteibe bonyolódjon bele, vagy túlságosan részletesen mutassa be a korabeli eseményeket, illetve a megfelelő társadalmat.

Szabó Árpád fizikatörténete szerencsésen tesz eleget a fenti követelményeknek, és valóban igényesen megoldva a feladatot kétségtől gazdagítja a hazai szakirodalmat. A harmadik kiadásban érte ezt el igazán a szerző, kiküszöbölve az előző kiadások kisebb-nagyobb hiányosságait, fogyatékosait.

A könyv beosztását tekintve három részből áll, nem tekintve az *Előszót* és a rövid *Bevezetőt*. Az első részben – amelyik a teljes terjedelem körülbelül egy negyede – a fizika történetének rövid áttekintését kapjuk az ókori fizikától a 18. század végéig. (Nehéz lenne megmondani, hogy ez a viszonylag rövid áttekintés miért áll meg itt.)

A második részben (ez a könyv nagyobbik részét képezi) fejezetenként (mechanika, fénytán, hőtan stb.) tekinti át a fizika történetét, beleértve a legújabb fejezeteket is: a kvantummechanikát, a részecskefizikát, az űrhajózást (!).

A harmadik rész *Tudósléxikon* és *Névmutató* címen a könyvben szereplő tudósokat abc-sorrendben sorol-

ja fel, egy-egy mondatban megadva legfontosabb tevékenységüket, illetve felfedezésüket. Ugyanitt megtalálhatók az utalások a könyv megfelelő oldalaira is. Ezt követi a nagyszámú felhasznált irodalom összeállítása. Itt kell megemlítenünk, hogy már az előző részben (második rész!) szerepel egy *Utószó*, amelyben táblázatos, illetve szöveges összeállítást találunk a fizikai Nobel-díjasokról, külön a magyar vagy magyar származású Nobel-díjasokról, valamint különböző országok tudományos teljesítményéről különböző paraméterek felhasználásával.

A szerző külön érdemül kell megemlítenünk, hogy az egyes tudósok képeit (több mint kétszáz) is megtaláljuk a könyvben a kísérleti eszközök bemutatása és más, egyes jelenségek megértését segítő ábrák mellett. Sokszor szinte elcsodálkozok az olvasó, hogy egyik vagy másik képet hol lehetett fellelni. Más kérdés, hogy az egyes tudósoknak nem minden esetben a legjellemzőbb, illetve legszerencsésebb képét sikerült megtalálni, és egyáltalán, hogy a képekhez, fényképekhez nem igazán jó a papír minősége.

Ki kell emelnünk, hogy a szerző mindenütt külön is foglalkozik a magyar vonatkozásokkal, nem egy esetben olyan neveket is említve, amelyekkel például a recenzens – bizonyára saját hibájából – sohasem találkozott. Így például *Czabán Izsák* az eperjesi, majd a nagyszombati főiskola tanára a XVIII. század második felében, aki az atomelmélet híve volt, *Gassendi* követője, az arisztotelészi szemlélettel való leszámolás élharcosa. Ilyen továbbá *Pósházi János* (1628–1686) is, a *Philosophiae Naturalis* szerzője, vagy *Róna Erzsébet*, aki többek között *Hevesy Györggyel* dolgozott együtt. Kétségtelen, hogy néha kissé elfogult a szerző a ma-



gyar tudósok irányában, például mikor azt állítja, hogy „... a nemzetközi technikatörténet a dinamóelv megfogalmazójának *Jedlik Ányost* tekinti”. Viszont, amikor napjaink egyes magyar fizikusait – még élőket vagy nemrégiben elhunytakat – említi, munkásságukat, eredményeiket méltatja, közülük például *Pál Lénárd* nevét hiányolja a recenzió.

Itt említem meg, hogy a könyvben az általában szokásosnál bővebben szerepelnek orosz és szovjet fizikusok, illetve eredményeik. Ez a szerző neveltetésével függ össze, de ez egyáltalán nem negatívum a műben.

Nagyon hasznos, hogy nemcsak a könyv végén, a *Tudóslexikonban*, de a szövegben is mindenütt az egyes tudósok neve után zárójelben fel van tüntetve születésük és haláluk évszáma. Ez nagyban megkönnyíti, hogy az olvasó elhelyezhesse őket az események, felfedezések időrendjében.

Az egyes fizikusokat sok esetben – érthetően – egy-egy felfedezésükről, eredményükről ismerjük elsősorban. A könyv olvasásakor nemegyszer megdöbben az ember, hogy egy-egy neves fizikus mi mindennel foglalkozott, és mennyire különböző területeken ért el eredményeket (amelyek egyébként nem köztudomásúak). *Newton* például jól ismert mechanikai és fénytani kutatásain túlmenően eredményesen foglalkozott a hidrodinamikával, hangtannal és a hőtannal is.

A könyv, kiválósága ellenére, tartalmaz még kijavítandó, kisebb-nagyobb hibákat, pontatlanságokat, nem beszélve a sajtóhibákról (pl. Enriko Fermi – 203. o.). Pontatlan megfogalmazás, amikor „középkori egyházakról” ír (88. o.) vagy az Olasz Akadémiáról (143. o.), hiszen ilyen nevű a mai napig nincs, valószínűleg a Firenzei Akadémiáról van szó. Még félrevezetőbb, hogy a könyv szerint *Descartes* „...a molekulák mozgásával magyarázta a halmazállapotok változásait” (63. o.). Ugyancsak legalábbis félreérthető a következő megállapítás: „...a mesterséges rádióaktivitás során gyakori a neutronok sugárzása ...” (190. o.). Kifejezetten téves viszont, amit máshol ír a neutronokról: „A század első évtizedének végén a radioaktív sugarakat, elsősorban az *alfa*-sugarakat, már kutatóeszközként használták. Ismerték az atomszerkezet alapvető elemeit – elektron, proton, neutron –, sőt létüket is igazolták, de mégis ismételten felvetődött: *végül is milyen az atom szerkezete?*” (180. o.) Azt viszont csak a szlovének sérelmeznék, hogy *Joseph Stefant* osztrák fizikusként mutatja be (156. o.).

Végül megállapítható, hogy a könyv nyereség a magyar tudományosság számára, azt nemcsak fizikusok – egyetemi hallgatók, tanárok és kutatók – forgathatják haszonnal, de annál sokkal szélesebb kör is.

*Berényi Dénes*

## Zsúdel László: BIOFIZIKA

Moduláris tankönyvek sorozat, Egészségügyi Szakképző és Továbbképző Intézet, 2006

Hosszú ideje okoz gondot az egészségügyi szakképzésben a szükséges szinten megírt biofizika-tankönyv hiánya. A biofizikát a különböző szinteken nagyon eltérő óraszámokban tanítják. Vannak kurzusok, ahol kilenc óra alatt kell valami bevezető tudást nyújtani, és van olyan képzési forma is, ahol két félév jut az orvosi ismereteket alátámasztó fizikai tananyag elsajátítására. Olyan könyvet kell tehát a tanulók kezébe adni, amelyben megtalálható a lényeg, de, ha a részletekre van szükség, az olvasó azokat is megtalálhatja. *Zsúdel László* munkája erre a problémára nyújt egy lehetséges megoldást.

A biofizika tanítása során a szerző semmilyen ismeretet nem tekint adottnak, minden információt, ami a megértéshez szükséges, igyekszik megadni. Mivel a moduláris tankönyv terjedelme véges, a mellékelt CD által nyújtott majdnem korlátlan lehetőségeket használja fel erre a célra. A tankönyv 110 oldalán található információkat kiegészíti a CD-n található 580 oldalnyi előismeret és a tananyaghoz fűzött részletes magyarázat. A nyomtatott könyv és a CD együtt alkot egy egészet. Vannak teljes fejezetek, amelyek csak a díszken találhatók meg és vannak olyanok, amelyek egy részre, másik részre ott elérhető.

Zsúdel László évtizedek szakmai és pedagógiai tapasztalatait felhasználva tervezte meg a könyv szer-

kezetét, a fejezetek didaktikai felépítését. Ugyanezket a didaktikai célokat szolgálja az oldalak nyomtatási képeinek kialakítása és a tipográfia is.

Az útmutatóból az olvasó is megismerheti a tankönyv szerkezetét, a jelöléseket, az egyes részeket. Minden fejezetet a benne szereplő tudásanyag elsajátításának célja vezet be. A második pontból megtudhatjuk azt, mire leszünk majd képesek, ha megtanultuk. Ebben segít a fogalomgyűjtemény. Az ellenőrzést és a lényeges tudáselemek felidézését szolgálják a kérdések, feladatok. Ismereteink bővítésében szerepe van a hivatkozásoknak és az irodalomjegyzéknek is, amelyben a szerző további olvasnivalókat ajánl, és a tananyaghoz kapcsolódó további információk elérését segíti.

A biofizika tárgyának meghatározásakor a szerző tisztázza a különbséget a biofizika és az orvosi fizika között.

Az első részben a konkrét ismeretek közlése előtt a természettudományos megismerésről és a modell-módszerről olvashatunk általános tudományelméleti bevezetőt. Az első három bevezető jellegű fejezetet követő negyediket tekinthetjük a fizika átismétlésének. Az *Alapvető fizikai ismeretek a mechanikából és az elektromágnesség-tanból* című részben a rezgések,

a hullámok, az elektrosztatika és az atomfizika szükséges alapjaival ismerkedhet meg az olvasó. Ebben a részben már orvosi fizikai ismeretek is előfordulnak, mint például a hallás fizikája, illetve a radioaktivitás egészségügyi hatásai, a lézerek szerepe a terápiában és a diagnosztikában.

Az ötödik fejezet a bioelektronikával, a jelfeldolgozással, erősítéssel, analóg és digitális jelek átalakításának szerepével foglalkozik. Ezeknek a fogalmaknak az orvosi fizikai használatával a könyv későbbi részeiben találkozhatunk.

Az életfolyamatok biofizikai jelenségeiről szól a könyv hatodik egysége. A biomechanikáról, termodinamikáról, a bioelektromosságról, a transzportfolyamatok részleteiről tanulhatunk belőle.

A további fejezetekben a modern műszerek segítségével működő diagnosztikai és terápiás módszerek elméletébe nyerhetünk betekintést. Az elektromos diagnosztikai módszerek, a röntgensugárzás keletkezése, fajtái és használata mellett a modern nukleáris orvosi technikák és a számítógéppel létrehozott tomográfias képalkotás lehetőségeivel is megismerkedhetünk. Nem marad ki a környezeti biofizika és a fizioterápia-fizioterápia témaköre sem.

A stílus szakszerű, tömör és lényegre törő. A terjedelmi okok miatt sok minden kimaradt a nyomtatott

verzióból, de a CD-mellékletből minden hiányzó információt megszerezhetünk. A bevezetőben felvázolt felépítés feszes szerkezetbe foglalja a könyvet.

A szerző nem feledkezik meg a tananyag tudománytörténeti kontextusba helyezéséről sem. Bőséges képanyag, tudósok rövid életrajza színesíti a könyvet, és a CD terjedelmi lehetőségeit kihasználva további színes képekkel és ábrákkal teszi szemléletesebbé.

Néhány apróság, amin javítani kellene a következő kiadásban: a fogalomgyűjtemény lehetne kicsit következetesebb. Néha kicsit esetlegesnek tűnik, hogy mely fogalmak vannak a fejezet elé kiemelve és melyek vannak csak a szövegben definiálva. Néhány ábrán a feliratok összekeveredtek, például a 33. oldalon a színeképek megnevezése felcserélődött.

Zsúdel László egy sokféleképpen használható tanönyvet ad az olvasók kezébe. A kötelező iskolai tananyagon túl a könyv önképzésre is alkalmas, el lehet tenni és később utánanézni részletesebben a dolgoknak. A biofizikát tanító tanár is elegendő ismeretet találhat benne ahhoz, hogy több szinten fel tudjon készülni az órákra, pluszt adhasson az érdeklődő tanulóknak, vagy információkhoz segíthesse a lemaradókat. Középsiskolában biofizikát oktató tanárként kollégának, diáknak, érdeklődőnek egyaránt melegen ajánlom.

*Ujvári Sándor*

## HÍREK – ESEMÉNYEK

# AZ AKADÉMIAI ÉLET HÍREI

## Kitüntetések

A Magyar Tudományos Akadémia májusi közgyűlésén Vizi E. Szilveszter, az MTA elnöke átadta az Akadémiai Aranyérmet és az Akadémiai Díjakat.

A Magyar Tudományos Akadémia Elnöksége a 2007. évi *Akadémiai Aranyérmet* KESZTHELYI LAJOS-nak, az MTA rendes tagjának, a Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézete kutatóprofesszorának, az Akadémiai Díj, a Széchenyi-díj, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat emlékérmé, valamint az Ernst Jenő-emlékérem tulajdonosának adományozta.

Keszthelyi professzor nemzetközi mércével mérve is kiemelkedő eredményeket ért el a kísérleti fizika, biofizika területén. Úttörő szerepe volt a modern



magfizikai módszerek hazai elterjesztésében és széleskörű alkalmazásában a szilárdtestfizikától a biológiáig. A magyarországi biofizika fejlődésében mérföldkövet jelentő eredményeket ért el a biológiai aszimmetria eredetének és a biológiai energiaátalakítás mechanizmusának felderítésében. Sokoldalú iskolateremtő egyénisége több világszínvonalú hazai laboratórium elindítását eredményezte, és döntő befolyása volt a kísérleti kutatások irányára. A tudománypolitikában való aktív részvétele előse-

gítette, hogy a Szegedi Biológiai Központ az MTA egyik legsikeresebb, nemzetközileg is elismert intézetévé váljon.

A Magyar Tudományos Akadémia Elnöksége megosztott *Akadémiai Díj*ban részesítette:

CSORDÁS ANDRÁS-t, PhD, az MTA–ELTE Statisztikus Fizikai Kutatócsoport tudományos főmunkatársát, és

SÜTŐ ANDRÁS-t, a fizikai tudomány doktorát, az MTA SzFKI tudományos tanácsadóját.

Kiemelkedő eredményeket értek el a fázisátalakításokkal kapcsolatos spontán szimmetriasértés és a szimmetriasértő fázis tulajdonságainak elméleti és matematikai tanulmányozásában. Különösen a csapdába

zárt kvantum gázok, ezek közül is a Bose–Einstein-kondenzációval rendelkező, illetve a szuperfolyékony Fermi-rendszerek tulajdonságainak meghatározásában jutottak jelentős eredményekre.

A Fizikai Tudományok Osztályának tudományos díjait 2007-ben a következők kapták:

*Fizikai Fődíj:* GERGELY GYÖRGY (MFA).

*Fizikai Díj:* KRASZNAHORKAY ATTILA (ATOMKI), SZABÓ GYÖRGY (MFA), ZARÁND GERGELY (BME).

## Új akadémikusok

Az MTA közgyűlése új rendes, levelező, külső és tiszteleti tagokat választott tagjai sorába. A Fizikai Tudományok Osztályának új *rendes tagjai:* *Faigel Gyula* (szerkezetkutatás), *Janszky József* (kvantumoptika, kvantuminformatika, kristályfizika), *Kertész János* (statisztikus és számítógépes fizika), *Patkós András* (részeecske- és statisztikus fizika, kozmológia).

Az Osztály új *levelező tagjai:* *Fazekas Patrik* (elméleti szilárdtestfizika), *Trócsányi Zoltán* (részeecskefizika).

Az Osztály új *külső tagjai:* *Forró László* (szilárdtestfizika) Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Svájc; *Grenács László* (atommagfi-

zika, atomfizika) Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium; *Krausz Ferenc* (rövid impulzusú lézerek fizikája, nagy intenzitású fényanyag kölcsönhatás) Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching és Ludwig-Maximilians Universität München, Németország; *Néda Zoltán* (statisztikus fizika) Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár, Románia.

A Fizikai Tudományok Osztálya új *tiszteleti tagja:* *Alekszej Alekszejevics Abrikosov* (Kondenzált anyagok elmélete) Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA.

## A TÁRSULATI ÉLET HÍREI

### „Örökifjú, megújuló fizika!”

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2007. évi Vándorgyűlése elé

A szombathelyi vándorgyűlés után, három év elteltével az Eszterházy Károly Főiskola, Eger városa és Heves megyei szakcsoportunk meghívását örömmel elfogadva Eger ad otthont a Társulat Vándorgyűlésének 2007. augusztus 22–24. között.

A választott mottó kifejezi, hogy a hazai fizika közösségének e legátfogóbb eseménye a tehetséges fiatal kutatók megismerésének fórumává kívánják alakítani a szervezők.

A szakcsoportok javaslatára felkért, az elmúlt három év legjelentősebb irányzatait megjelenítő meghívott előadások mindegyikét egy-egy nemzetközileg elismert neves hazai kutató mutatja be. E témakörökhez lazán-szorosabban csatlakozva témánként 2–4 fiatal bemutatkozása is cél.

A Vándorgyűlés honlapja [www.elft.hu/vandor07](http://www.elft.hu/vandor07), míg a Vándorgyűlés előzetes programja:

2007. augusztus 22., szerda

10.30–11.00 EKF rektora, Eger polgármestere, ELFT elnöke: Megnyitó üdvözlések

11.00–11.35 *Kertész János* (BME): Szociális hálózatok fizikus szemmel (meghívott előadás, ME)

11.35–12.10 *Bor Zsolt* (SzTE): Lézeres szemsebészet (ME)

12.10–12.45 *Csabai István* (ELTE): Az Univerzum szerkezete (ME)

ALKALMAZOTT FIZIKA ÉS OPTIKA

13.45–14.55 *Richter Péter* (BME), *Paál Péter* (IBM Hungary), *Domján László* (Optimal Optik), *Szabó István* (Optika Mérnökiroda): Alkalmazott fizika (alkalmazott optika az ipar és a műszaki élet területén)

15.00–15.20 *Varjú Katalin* (SzTE): Attoszekundumos XUV impulzusok

15.20–15.40 *Vass Csaba* (SzTE): Átlátszó anyagok lézeres szubmikrométeres megmunkálása

SZILÁRDTESTFIZIKA

16.00–16.35 *Mihály György* (BME): A kvantumos és a klasszikus határán (ME)

CSILLAGÁSZAT ÉS ASZTROFIZIKA

16.40–17.15 *Frey Sándor* (FŐMI), *Mosoni László* (MTA CsKI): A csillagászat nagyfelbontású eszközei (ME)

17.15–17.35 *Csizmadia Szilárd* (CsKI): Az Algol optikai és rádióinterferometriás mérései

17.35–17.55 *Gabányi Krisztina* (FŐMI): Kvazárok gyors fényességváltozásai a rádiótartományban

- 17.55–18.15 *Forgácsné Dajka Emese* (ELTE): A tachoklína és szerepe a napaktivitásban  
 18.15–18.35 *Mező György* (CsKI): Szögperc alatti felbontás hagyományos távcsövekkel – Magyarországon

2007. augusztus 23., csütörtök

STATISZTIKUS FIZIKA

- 8.30– 8.50 *Farkas Illés* (ELTE–MTA): Molekuláris biológiai és társszerzőségi hálózatok moduláris szerkezete  
 8.50– 9.10 *Palla Gergely* (ELTE–MTA): Csoportosulásdinamika társas kapcsolat hálózatokban  
 9.10– 9.30 *Unger Tamás* (BME): Nyírási zónák szemcsés anyagban

SZILÁRDTESTFIZIKA

- 9.30– 9.50 *Bordács Sándor* (BME): Mágneses optika d-elektron rendszereken  
 9.50–10.10 *Geresdi Attila* (BME): Szupravezető – normál heterostruktúrák  
 10.10–10.30 *Makk Péter* (BME): Molekuláris nanokontaktusok vezetési jelenségei

NAGYENERGIÁS FIZIKA

- 10.50–11.25 *Siklér Ferenc* (MTA RMKI): A kvarkanyag vizsgálata ultranagy energián (ME)  
 11.25–11.45 *Csanád Máté* (ELTE): Milyen anyag jött létre a RHIC-nél?  
 11.45–12.05 *Barnaföldi Gergely* (RMKI): ALICE Csofdaország – avagy magyar részvétel az LHC ALICE kísérletében  
 12.05–12.25 *Veres Gábor* (ELTE): Skálázási tulajdonságok nehézion ütközésekben  
 12.25–13.00 *Horváth Dezső* (RMKI–ATOMKI): Új fizika keresése p–p ütközésekben a CMS-detektorral (ME)

MAGFIZIKA ÉS ALKALMAZÁSAI

- 14.00–14.35 *Krasznaborkai Attila* (ATOMKI): Egzotikus atommagok (ME)  
 14.35–14.55 *Csige Lóránt* (ATOMKI): Maghasadás egzotikus állapotoknál keresztül  
 14.55–15.15 *Elekes Zoltán* (ATOMKI): Mágikus számok bűvöletében  
 15.15–15.35 *Gyürky György* (ATOMKI): A  $^3\text{He}(\alpha, \gamma)^7\text{Be}$  reakció hatáskeresztmetszetének mérése alacsony energián  
 15.35–15.55 *Fröhlich Georgina* (SE): Emlődaganatok intersticiális brachyterápiás kezelésének dozimetriai értékelése

MAGFIZIKA ALKALMAZÁSAI

- 16.15–16.50 *Pellet Sándor* (OSSKI), *Giczi Ferenc* (ÁNTSZ): Ionizáló sugárzások orvosi haszna és kockázata (ME)  
 16.50–17.25 *Vásárhelyi Balázs* (BME), *Kovács László* (Kútfej Bt.): Mérnöki fizika: a bátaapáti nukleáris hulladékártoló (ME)

NYILVÁNOS PÓDIUMVITA EGER VÁROS KÖZÖNSÉGÉNEK

- 18.45–20.00 *Egyed László* (Csodák Palotája), *Kiss Ádám* (ELTE), *Szabó Mária* (ELTE), *Weiszburg Tamás* (ELTE): Tudomány és áltudomány a környezetvédelemben (ME)

2007. augusztus 24., péntek

ANYAGTUDOMÁNY ÉS SZILÁRDTESTFIZIKA

- 8.30– 9.05 *Bíró László P.* (MTA MFA): Mit tanítanak a lepkék az anyagtudósoknak: fotonikus kristályok (ME)  
 9.10– 9.45 *Bottyán László* (MTA RMKI): Neutron- és Mössbauer-reflektometria a vékonyréteg-mágneségben (ME)  
 9.45–10.05 *Márk Géza* (MFA): Lepkeszárnypiletek optikai tulajdonságainak számítása SEM- és TEM-képeik alapján  
 10.05–10.25 *Kertész Krisztián* (MFA): Lepkeszárnyakon előforduló fotonikus kristályok alkalmazása optikai gáz- és gőzdetektálásra  
 10.25–10.45 *Simon Alíz* (ATOMKI): Vékonyrétegek vizsgálata nagy laterális feloldású Rutherford-vizszaszórásos spektrometriával

ANYAGTUDOMÁNY ÉS SZILÁRDTESTFIZIKA

- 11.00–11.35 *Pusztai László* (MTA SzFKI): Diffrakciós mérések értelmezése RMC-vel (ME)  
 11.35–11.55 *Vankó György* (RMKI): Átmeneti fémek spinállapotának tanulmányozása röntgenspektroszkópiával  
 11.55–12.15 *Len Adél* (SzFKI): Anyagvizsgálat kisszőgű neutronszórással  
 12.15–12.35 *Tóth József* (ATOMKI): Elektron-RBS, nukleáris felületkémia, Auger-elektron diffrakció és holográfia

ANYAGTUDOMÁNY ÉS SZILÁRDTESTFIZIKA

- 12.40–13.00 *Fábián Margit* (SzFKI): Sok-komponensű boroszilikát üvegek szerkezetvizsgálata  
 13.00–13.20 *Tóth Gergely* (ELTE Kémiai Intézet): Párpotenciálok szimulációs meghatározása diffrakciós adatokból  
 13.20–13.40 *Temleitner László* (SzFKI): Pordiffrakcióból származó teljes szórás kép értelmezése kristályos anyagokban a Reverse Monte-Carlo-módszer segítségével

RÉSZECSKEFIZIKA ÉS ASZTROFIZIKA

- 14.30–15.05 *Trócsányi Zoltán* (DE): Higgs-bozonok nyomában az LHC-nél (ME)  
 15.05–15.40 *Márka Szabolcs* (Columbia Egyetem, USA): Gravitációs hullámok észlelése a LIGO-tól a LISA-ig (ME)

ASZTROFIZIKA

- 16.00–16.20 *Kocsis Bence* (ELTE): Feketelyuk-ütközések előrejelzése  
 16.20–16.40 *Raffai Péter* (ELTE): Nem-newtoni gravitációs perturbációk dinamikai mérése interferometrikus gravitációshullám-detektorokkal

A FIZIKA TANÍTÁSA

- 16.40–17.00 *Horváth Árpád* (BMF): Diákműhely-tapasztalatok: Nemzetközi mérések a „CERN sajátkezüleg” honlappal  
 17.00–17.35 *Vida József* (EKF): A fizika vonzó oktatása (ME)

A KONFERENCIA BEZÁRÁSA

- 17.35 *Sólyom Jenő* (ELFT elnök): Zárszó  
*Horváth Ákos*, a szerv. biz. titkára

# Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Közhasznúsági jelentése a 2006. évről

A Fővárosi Bíróság 1999. április hó 26-án kelt 13. Pk. 60451/1989/13. sz. végzésével a 396. sorszám alatt nyilvántartásba vett Eötvös Loránd Fizikai Társulatot közhasznú szervezetnek minősítette. Ennek megfelelően a Társulatnak beszámolási kötelezettsége teljesítése során a közhasznú szervezetekről szóló (módosított) 1997. évi CLVI. törvény, a számvitelről szóló 2000. évi C. törvény, valamint a számviteli beszámolóval kapcsolatban a számviteli törvény szerinti egyéb szervezetek éves beszámoló készítésének és könyvvezetési kötelezettségének sajátosságairól szóló 224/2000 (XII.19) Korm. sz. rendeletben foglaltak szerint kell eljárnia. A jelen közhasznúsági jelentés az említett jogszabályok előírásainak figyelembe vételével készült.

## I. rész – Gazdálkodási és számviteli beszámoló

### Mérleg és eredménykimutatás

A Társulat 2006. évi gazdálkodásáról számot adó mérleget a jelen közhasznúsági jelentés 1. sz. *melléklete* tartalmazza. A 2. sz. *melléklet*ként csatolt eredmény-kimutatás szerint jelentkezett 99 eFt tárgyévi eredmény a mérlegben tőkeváltozásként kerül átvezetésre.

### Költségvetési támogatás és felhasználása

Az állami költségvetésből származó, közvetlen támogatást a Társulat 2006-ban nem kapott, a pályázati úton elnyert támogatásokat a 2. sz. *melléklet*ben foglalt eredmény-kimutatás tartalmazza. A 2005. évi személyi jövedelemadó 1%-ának a Társulat céljaira történt felajánlásából a tárgyévben 795 eFt bevétele származott. Ezt az összeget a Társulat teljes egészében a *Fizikai Szemle* nyomdai költségeinek részleges fedezeteként használta fel.

### Kimutatás a vagyon felhasználásáról

E kimutatás elkészítéséhez tartalmi előírások nem állnak rendelkezésre, így a Társulat vagyonának felhasználását illetően csak a mérleg forrásoldalának elemzésére szorítkozhatunk. A Társulat vagyonát tőkéje testesíti meg, amely a tárgyév eredményének figyelembe vételével 99 eFt értékben növekedett. Így az 1989. évi állapotot tükröző induló tőkéhez (7581 eFt) képest a tárgyév mérlegében mutatkozó, a csökkenés irányába ható halmozott tőkeváltozás (-2010 eFt) ezzel az értékkel kisebbedett, értéke tehát jelenleg -1911 eFt. Így a Társulat saját tőkéjének jelenlegi, a mérleg szerint és a tárgyév eredményének figyelembevételével számított értéke 5670 eFt, szemben a tárgyévet megelőző, 2005. évre vonatkozó, hasonlóképpen számított 5571 eFt tőkeértékkel.

### Cél szerinti juttatások

A Társulat valamennyi tagja – a fennálló tagsági viszony alapján – a tagok számára természetben nyújtott, cél szerinti juttatásként kapta meg a Társulat hivatalos folyóirata, a *Fizikai Szemle* 2006-ban megjelentetett évfolyamának számait.

### Kiemelt támogatások

A Társulat 2006-ban cél szerinti, a Khtv. 26. § c.) pontjának hatálya alá eső feladatainak megoldásához az alábbi támogatásokban részesült (a vonatkozó rendeletben megadott forrásokra szorítkozva, ezer Ft-ban):

- |  |         |
|--|---------|
| • Központi költségvetési szervtől        | 0 eFt   |
| • Elkülönített állami pénzalapoktól      | 0 eFt   |
| • Helyi önkormányzatoktól                | 445 eFt |
| • Kisebbségi területi önkormányzatoktól  | 0 eFt   |
| • Települési önkormányzatok társulásától | 0 eFt   |
| • Egészségbiztosítási önkormányzattól    | 0 eFt   |
| • Egyéb közcélú felajánlásból            | 0 eFt   |

A fenti összesítés magában foglalja a megadott forrás-helyek alsóbb szervei által nyújtott támogatásokat is.

### Vezető tisztségviselőknek nyújtott juttatások

A Társulat vezető tisztségviselői ezen a címen 2006-ban semmilyen külön juttatásban nem részesültek. A tisztségviselők a Társulat tagjaiként, a Társulat valamennyi tagjának a tagsági viszony alapján járó cél szerinti juttatásként kapták meg a *Fizikai Szemle* 2006. évi évfolyamának számait.

## II. rész – Tartalmi beszámoló a közhasznú tevékenységről

A közhasznú szervezetként való elismerésről szóló, a jelentés bevezetésében idézett bírósági végzés indokolásában foglaltak szerint a Társulat cél szerinti tevékenysége keretében a Khtv. 26. § c) pontjában felsoroltak közül az alábbi közhasznú tevékenységeket végzi:

- (3) tudományos tevékenység, kutatás
- (4) nevelés és oktatás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés;
- (5) kulturális tevékenység;
- (6) kulturális örökség megővése;
- (19) az euroatlanti integráció elősegítése.

A *tudományos tevékenység és kutatás* területén a tudományos eredmények közzétételének, azok megvitatásának színteret adó tudományos konferenciák, iskolák, előadói ülések, valamint más tudományos rendezvények szervezését és lebonyolítását emeljük ki.

A társulat szervezésében – az érintett szakcsoportok közreműködésével – az alábbi nemzetközi rendezvényekre került sor:



• *48th IUVSTA workshop on the influence of trace elements in the nucleation and growth of thin films* Budapest, 2006. augusztus 26–31.;

• *Fundamentals of nanoelectronics* című iskola, Keszthely, 2006. augusztus 27. és szeptember 1. között;

• *11th Workshop on multimedia in physics teaching and learning*, Szeged, 2006. szeptember 20–22. (a Csongrád-megyei csoport rendezésében).

A hazai részvétellel megtartott és a Társulat, illetve szakcsoportjai által rendezett tudományos, szakmai továbbképzési célú és egyéb rendezvények közül meg kívánjuk említeni az alábbiakat:

• a Statisztikus Fizikai Szakcsoport *Statisztikus fizikai nap* című rendezvénye, Budapest, 2006. április 19.;

• a Magfizikai Szakcsoport által megrendezett *XIII. Magfizikus Találkozó*, Jávorkút, 2006. május 5–7.;

• a Sugárvédelmi Szakcsoport *31. Sugárvédelmi továbbképző tanfolyama*, Keszthely, 2006. május 9–11.;

• a Diffrakciós és az Anyagtudományi Szakcsoport *Nanofizika és nanotechnológia* címmel rendezett őszi iskolája, Gyöngyöstarján, 2006. szeptember 25–27.;

• a Részecskefizikai Szakcsoport *Mérések és a gravitáció Einstein-féle elmélete* témakörben rendezett elméleti fizikai iskolája, Gyöngyöstarján, 2006. augusztus 28 – szeptember 1.;

• a Vákuumfizikai Szakcsoport rendezésében lezajlott *vákuumtechnikai tanfolyam*, Debrecen, október 9–13.;

• az Ortway Kollégium keretében rendezett *Marx György Emlékülés* 2006. május 25-én;

• a súlyos és tehetetlen tömeg arányosságát bizonyító első kísérlet 100 éves évfordulója alkalmából a MTA Fizikai Tudományok Osztályával közösen, 2006. november 22-én megtartott emlékülés.

A Társulat elnöksége – a rendszeresen megtartott elnökségi ülésekhez csatlakozóan – két alkalommal szervezett nyilvános klubdelutánt, amelyek témái az új egyetemi felvételi rendszer tapasztalatai, illetve az egyetemek fizika doktori iskoláinak helyzete voltak. A két fórum összegezett megállapításait az illetékesek felé továbbítottuk.

A Társulat szakcsoportjainak egyéb tevékenységét érintve ki kell emelnünk a Részecskefizikai, a Termodinamikai, valamint a Vákuumfizikai Szakcsoport szemináriumszervező munkáját, továbbá a Csillagászati Szakcsoport közreműködését az Országos Csillagászati Szeminárium előadásainak szervezésében. E rendszeresen tartott szemináriumok, előadóülések a szakmai közélet értékes fórumai.

A Társulat szakcsoportjai és területi csoportjai a külön említettekén kívül – önállóan, vagy a fizika területén működő kutatóhelyekkel közösen, egyedi jelleggel vagy rendszeres időközönként – számos alkalommal rendeztek szakmai jellegű összejöveteleket, előadóüléseket, tudományos és ismeretterjesztő előadásokat, szervezték tagjaik részvételét külföldi szakmai konferenciákon.

*A nevelés és oktatás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés és a kulturális tevékenység* területein végzett szerteágazó munka zöme a Társulat oktatási szakcso-

portjai, valamint területi csoportjai szervezésében folyt. A fizikatanári közösség számára módszertani segítséget, a tapasztalatsere és szakmai továbbképzés lehetőségét kínálták a két oktatási szakcsoport által 2006-ban is megrendezett, elismert továbbképzésként akkreditált fizikatanári ankétok, így

• a *49. Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszközkiállítás*, Paks, 2006. március 30. – április 3.;

• a *30. Általános Iskolai Fizikatanári Ankét és Eszközkiállítás*, Kaposvár, 2006. június 19–22.

A Társulat szervezésében fizikatanárok 38 fős csoportja vett részt augusztus 20–26. között a CERN-ben magyar nyelven megtartott szakmai továbbképzésen.

A Társulatnak a képességfejlesztés szolgálatában álló versenyszervező tevékenysége az általános iskolai korosztálytól kezdve az egyetemi oktatásban résztvevőig terjedően kínál felmérési lehetőséget a fizika iránt fokozott érdeklődést mutató diákok, hallgatók számára. A területi szervezetek többsége szervez helyi, megyei, adott esetben több megyére is kiterjedő, vagy akár országos részvételű fizikaversenyeket. Ezek részletes felsorolása helyett csak meg kívánjuk említeni, hogy a 2006-ban szervezett és lebonyolított, adott esetben több száz főt is megmozgató versenyek száma változatlanul meghaladja a húszat. Ezek között számos olyan is szerepel, amelyek hosszabb idő óta évente rendszeresen kerülnek megrendezésre.

A Társulat 2006-ban is megrendezte hagyományos, országos jellegű fizikaversenyeit (Eötvös-verseny, Ortway-verseny, Mikola-verseny, Öveges-verseny, Szilárd Leó Fizikaverseny). A korábbi évekhez hasonlóan 2006-ban is a Társulat szervezte meg a résztvevők kiválasztását és a magyar csapat felkészítését az évenkénti fizikai diákolimpiára.

A területi csoportok ismeretterjesztő rendezvényei közül kiemelendőnek tartjuk

• a Baranya megyei csoport *Kis esti fizika* című, hagyományos előadássorozatát;

• a Fejér megyei csoport ismeretterjesztő előadásait;

• a Hajdú megyei csoport által 27. alkalommal megrendezett debreceni Fizikusnapokat;

• a Békés megyei csoport *Játsszunk fizikát!* című interaktív kiállítását.

Igen örömdetesnek tartjuk, hogy a Csongrád megyei csoport munkája révén az év folyamán Szegeden már hazánk negyedik fizikai bemutatóközpontja megnyitására kerülhetett sor.

A tanári közösséget érintő, valamint a szélesebb tömegekre kiterjedő ismeretterjesztés területén végzett társulati tevékenységből a fentiekén kívül meg kívánjuk említeni a nemzetközi *Science on Stage* program hazai rendezvényeit. 2006. szeptember 29. és október 1. között, Székesfehérváron rendeztük meg a programot 2007-ben lezáró nemzetközi fesztivál magyar delegációját kiválasztó, előkészítő konferenciát. A program anyagi támogatásával nyolc területi szervezet szervezett a program általános célkitűzéseinek megfelelő rendezvényeket – előadásokat, előadás-sorozatokat, versenyeket, kísérleti bemutató-

## A 2006. év mérlege

Megnevezés	Előző év (eFt)	Tárgyév
<i>A. Befektetett eszközök</i>	1 250	1 474
Immateriális javak	5	0
Tárgyi eszközök	1 245	1 474
<i>B. Forgóeszközök</i>	6 578	12 543
Készletek	0	0
Követelések	1 598	464
Pénzeszközök	4 980	12 079
<i>C. Aktív időbeli elhatárolások</i>	8 406	7 144
<b>Eszközök (aktívák) összesen</b>	16 234	21 161
<i>D. Saját tőke</i>	5 571	5 670
Induló tőke	7 581	7 581
Tőkeváltozás	-2 075	-2 010
Tárgyévi eredmény	65	99
<i>F. Kötelezettségek</i>	10 574	15 291
Rövid lejáratú kötelezettségek	10 574	15 291
<i>G. Passzív időbeli elhatárolások</i>	89	200
<b>Források (passzívák) összesen</b>	16 234	21 161

kat. A tanári önképzés előmozdítását célozta a program keretében középiskolai tanárok számára kiírt, eredményesen zárult didaktikai pályázat (*Hogyan tanítanám?*) meghirdetése.

A továbbképzésben, szakmai ismeretterjesztésben és az információszolgáltatásban betöltött szerepe mellett a tehetséggondozás feladatait is szolgálja a Társulat folyóirat-kiadási tevékenysége. A Társulat 2006-ban kiadta a Társulat havonta megjelenő hivatalos folyóirata, a *Fizikai Szemle* 56. évfolyamának 12 számát. A Társulat tagjainak tagsági jogon járó *Fizikai Szemle* megtartotta elismert szakmai színvonalát, változatlanul a magyarul beszélő fizikustársadalom egyik igen jelentős összefogó erejének tekinthető. Kiadóként jelentette meg a Társulat a Bolyai János Matematikai Társulattal közösen szerkesztett Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok (KöMaL) 2006. évi évfolyamát. A lap kiadását 2007. január 1-jétől a MATFUND Alapítvány vette át, de a laptulajdonosok egyikeként a Társulat továbbra is közreműködik a lap megjelenítésében.

## Eredménykimutatás a 2006. évről

Megnevezés	Előző év (eFt)	Tárgyév (eFt)
<i>A. Összes közhasznú tevékenység bevétele</i>	65 266	78 343
Közh. célú műk.-re kapott támogatás	10 836	17 365
Központi költségvetéstől	0	0
Helyi önkormányzattól	1 230	445
Egyéb (ebből SzJA 1%: 795 eFt)	9 616	16 920
Pályázati úton elnyert támogatás	9 535	17 790
Közh. tevékenységből származó bevétel	35 549	34 464
Tagdíjból származó bevétel	8 681	8 452
Egyéb bevétel	665	272
<i>B. Vállalkozási tevékenység bevétele</i>	0	0
<i>C. Összes bevétel</i>	65 266	78 343
<i>D. Közhasznú tevékenység ráfordításai</i>	65 201	78 244
Anyagjellegű ráfordítások	43 588	59 344
Személyi jellegű ráfordítások	18 679	17 329
Értékcsökkenési leírás	641	658
Egyéb ráfordítások	2 293	1 012
<i>E. Vállalkozási tevékenység ráfordításai</i>	0	0
<i>F. Összes ráfordítás (D+E)</i>	65 201	78 244
<i>G. Adózás előtti eredménye (B-E)</i>	0	0
<i>I. Tárgyévi vállalkozási eredmény (G-H)</i>	0	0
<i>J. Tárgyévi közhasznú eredmény (A-D)</i>	65	99

*Az euroatlanti integráció elősegítése* szolgálatában állt a Társulat nemzetközi tevékenysége, amellyel a hazai fizika nemzetközi integrálódásának folyamatát kívántuk erősíteni. Az Európai Fizikai Társulat (EPS) alapító tagegyesületeként a Társulat választott képviselői útján is tevékeny részt vett az EPS munkájában, képviseltette magát az EPS felkérésére az Osztrák Fizikai Társulat által 2006. április 19–22. között *Fizika és társadalom* címmel Grazban megrendezett konzultációs fórumon. Sikeresen kapcsolódott be a Társulat a hazai rendezvények kapcsán már említett, 29 európai ország részvételével szervezett „Science on Stage” programba.



A fenti Közhasznúsági jelentést az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Küldöttközgyűlése 2007. május hó 19-én tartott ülésén fogadta el.

## Egy hetes továbbképzés fizikatanároknak magyar nyelven a CERN-ben, 2007-ben is

Illeszkedve a CERN 2006-ban tanársoportok számára nemzeti nyelven indított tanártovábbképző programjához, 2007. augusztus 11–19. között az idén is tervezzük egy egy hetes továbbképzést (HTP2007).

Ezt a továbbképzést először a szegedi Középiskolai Fizikatanári Ankéton hirdettük meg. A csoport maximum 40 főből állhat, az Ankéton már 38 tanárkolléga

jelentkezett. További jelentkezéseket még elfogadjunk, a lista a jelentkezések sorrendjében töltődik fel. A negyvenes létszám fölöttiek „várólistára” kerülnek.

Jelentkezni e-mail-ben lehet a [sukosd@reak.bme.hu](mailto:sukosd@reak.bme.hu) címen a következő adatok megadásával: *név, lakcím, e-mail-cím, magán telefonszám(ok), iskola*. A magánjellegű adatokat az adatvédelmi törvény rendelkezé-

seinek megfelelően kezeljük, azonban szükség van rájuk, hogy a résztvevőket a nyári szünet alatt is el tudjuk érni, mert az indulás a nyári iskolai szünet idejére esik.

A teljes részvételi költség 140 eFt, ez azonban jelentősen csökkenhet, ha – reményeink szerint – idén is találunk támogatókat. A tavalyi továbbképzésen a

résztvevőknek csak az étkezést és a Mont Blanc-ra való feljutást kellett saját erőből fedezniük. Az utazási és szállásköltségeket szponzorok (SIF Alapítvány, Magyar CERN Bizottság) átvállalták.

Sükösd Csaba  
a tanulmányút szervezője

## Marx György emlékelőadás, 2007

Az ELTE Fizikai Intézete és az ELFT ötödször tartott tudományos előadást a Társulat 2002-ben elhunyt elnökének emlékére. Az előadásokat a *Marx György* születésnapjához, május 25-éhez legközelebb eső csütörtökön, az általa újraindított Ortvyay-kollokvium szemeszterzárójaként rendezik a szervezők. A neutrínófizika legújabb fejleményeit bemutató előadássorozatban idén május 24-én, *Serguey T. Petcov*, a trieszti SISSA elméleti részecskefizikai szekciójának vezetője a neutrínóoszilláció jelenségéhez kapcsolódó legújabb kísérleti eredményeket és az elméleti előrehaladást ismertette. A jelenséget elsőként javasló *Bruno Pontecorvo* egykori tanítványaként előadását élvezetes történeti áttekintéssel kezdte, amelyben kitért a neutrínófizika fejlődésében kiemelkedő szerepet ját-

szott balatonfüredi konferenciák méltatására. A földi reaktorok neutrínófluxusát használva nyert oszcillációs diagrammok bemutatásával érvelt amellett, hogy a részecskefizika Standard Modelljének kiegészítése elkerülhetetlen. A neutrínók tömegének jellegét (Dirac- vagy Majorana-típus) tisztázó neutrínómentes kettős béta-bomlási kísérletek helyzetének bemutatásával zárta előadását, amelynek végén átvette a 2007. évi Marx György emlékelőadónak járó bronzplakettet.

Az előadást megelőzően, Marx György születésének 80. évfordulója alkalmából avatta fel *Kiss Ádám* tanszékvezető az ELTE TTK Fizika Könyvtárában a Marx György életét, tudományos és oktatói munkásságát bemutató tablót, amelyet egykori tanszéke, az Atomfizikai Tanszék készített.

## Film az űrkutatásról

*Az üstökösök nyomában* címmel ismeretterjesztő filmet készített a Real Stúdió, a Magyar Mozgóképi Alapítvány támogatásával. A filmet, az időközben elhunyt, *Erdőss Pál* rendezte. A forgatókönyv és a szerkesztés *Jéki László* és *Szalai Sándor* munkája.

Az 50 perces film áttekintést ad az üstökös kutatás történetéről, az elmúlt húsz évben indított űrszondákról, a velük szerzett új ismeretekről. Kiemelt szerepet kapott a filmben az a két űrmisszió (VEGA, Rosetta), amelyek-

ben jelentős volt a magyar kutatók szerepe. A filmben megszólalnak a témában érintett fizikusok, mérnökök. Az Európai Űrtechnikai Központban (ESTEC, Noordwijk), az Európai Űrirányító Központban (ESOC, Darmstadt), és a Német Légi- és Űrkutatási Központban (DLR, Köln) is készültek felvételek, a központok vezető munkatársai mutatták be a nemzetközi űrmissziókat. A film alkotói tervezik a film DVD-n való sokszorosítását, hogy a film az érdeklődő iskolák számára elérhető legyen.

## MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

## HÁLÓZATOK MINDENÜTT

*Karinty Frigyes*t legtöbbször humoros és más szépirodalmi írásai révén ismerik. Talán kevesen tudják róla, hogy már középiskolás korában élénken érdeklődött a matematika és a természettudományok iránt. Ez az érdeklődése megmaradt később is, és 1929-ben a *Minden másképpen van* gyűjteményben egy kimondottan matematikai kérdésről írt *Láncszemek* címmel. Vajon hány közvetlen ismeretségi kapcsolaton keresztül lehet összekötni valamelyikünket egy

távoli helyen élő másik emberrel? Másképpen megfogalmazva: az emberek ismeretségi hálójában maximum hány lépésen keresztül lehet két, véletlenszerűen kiválasztott embert összekapcsolni? A példa kedvéért próbálja meg az Olvasó saját maga és egy esz-kimó között megtalálni a legrövidebb utat közvetlen ismerősökön (és barátokon, családtagokon) keresztül. Könnyen lehet, hogy az Olvasónak van egy sokat utazó ismerőse, akinek az egyik munkatársa járt

messze északon és találkozott az adott eszkimóval. Így az Olvasótól az utazó ismerősén és annak munkatársán keresztül három lépés vezet a kiválasztott eszkimóhoz. Karinthy becslése szerint az összes (akkoriban másfél milliárd) ember közül bármelyik kettő összeköthető legfeljebb 5 lépésben. Frissebb becslések szerint napjainkban ez a szám valahol 6 és 9 között van, azaz az ismeretségi hálóban két résztvevő között a távolság (a legrövidebb úthossz) jóval kisebb, mint az összes résztvevő száma. Általánosságban az ilyen tulajdonságú hálózatokat – az ismeretségi háló alapján – *kis világnak* hívjuk.

Karinthy példája csupán egy a sok hálózat (gráf) közül, amely körülvesz minket. Mindannyian ismerjük a világméretű számítógép-hálózatot, az internetet, és a számítógépeken tárolt weboldalak hálóját, a www-t. Legtöbbször naponta telefonálunk, és ha a telefonhívásokat ábrázoljuk, akár csak egyetlen telefontársaság előfizetői között, akkor is több millió pontból álló gráfot kapunk. Ennek a gráfnak a (csúc)s pontjai az előfizetőket jelölik, a csúcsokat összekötő vonalak (élek) pedig azt, hogy két előfizető között volt-e hívás. Hosszabb időszak alatt természetesen többször is telefonálhat egymásnak két ember, ilyenkor az adott kapcsolatot ábrázoló élnek nagyobb súlyt adhatunk. A felsorolt példák közül a www és a telefonhívások grájában is rendelkezünk irányt az élekekhez, ezekkel a nyilakkal a hiperlinkek, illetve a hívások irányát tudjuk jelölni.

Az emberi kapcsolatok és az elektronikus rendszerek mellett a biológiában is számos hálózat ismert. A legtöbb biológiai hálózat azt összegzi, hogy egy rögzített sejttypusban a különböző molekulák (például fehérjék és anyagcseretermékek) a reakcióik során milyen más molekulákkal lépnek kapcsolatba. Egy ilyen „kölcsonhatási térkép” tartalmazza például azt, hogy a vizsgált sejttypusban a víz- és a glükózmolekula között van-e kölcsönhatás. Ha igen, akkor a két molekulát ábrázoló egy-egy pont össze van kötve. Az emberi nyelvek és maga az emberi gondolkodás is sok hálót produkál. Könyvespolcokon gyakran megtalálható a magyar és az angol nyelvű szinonimaszótár; az ebben lévő kapcsolatok definiálják a szinonimahálózatot. Szintén hasznos eszköz a könyvtárak által a könyvek osztályozásához, besorolásához használt egységes tizedes osztályozás (ETO). Az ETO-ban minden téma nevet egy számsor jelöl, amelynek az elemeit tizedes-

1. *ábra.* Az úthálózatot városok alkotják és egy városnak általában 3–4 szomszédja van, de 10 vagy több szomszédal rendelkező várost nem találunk. Az internet egymással összekötött számítógépekből áll, és gyakoriak a kiugróan sok szomszédal rendelkező pontok, az ábrán világosabb színnel. (Az ábrák forrása a Google Maps, illetve a <http://www.caida.org> weboldal.)



pontok választják el. Ha ezt lerajzoljuk, akkor egy nagy elágazó fát kapunk (szintén hálózat), amelynek a legelső csúcspontjain általános címszavak találhatók, például 1. szépirodalom, 2. történetírás, majd ezek felett a fa kisebb ágain egyre speciálisabbak a témanevék: 1.1. regény, 1.2. vers stb. A közlekedésből is ismerünk hálókat, például a közúti hálózatban mindegyik város egy pont és két pontot összekapcsolunk, ha a két város egy főút mentén szomszédos. A légi közlekedésben szintén a városok a pontok (bár egy városnak több repülőtere is lehet), és két várost összekötünk, ha van köztük közvetlen repülőjárat.

A matematikusok a gráfokat több száz éve vizsgálják, és a gráfelmélet a matematika egyik igen jelentős ága. Azonban az utóbbi egy évtizedben a hálózatokról rendelkezésre álló adatok mennyisége és részletgazdagsága ugrásszerűen megnőtt. Ezt a jelentős változást felerősítette az internet fejlődése, amely korábban nem látott mennyiségű mérési adatot tett ingyenesen elérhetővé bárki számára. Emiatt a matematikusokon kívül a fizikusok, biológusok, szociológusok és más kutatók is egyre intenzívebben kapcsolódnak be a hálózatok kutatásába. Ezen belül a fizikusok a nagy és összetett (komplex) rendszerek megfigyelése során mindig az egyszerű, közös tulajdonságokat keresik. Sokszor nem a pontos egyezést vizsgálják, hanem csak a gyakran előforduló (statisztikai értelemben vett) hasonlóságot. Ezért a 90-es évek végétől kezdődően a fizikusok, más kutatókkal együtt, meglepve és örömmel tapasztalták, hogy a sokféle komplex hálózatban több egyszerű, hasonló tulajdonság található. Az egyik legkorábbi ilyen eredmény, hogy a nagy hálózatok közül sok rendelkezik az ismeretségi hálózatban már látott *kisvilág*-tulajdonsággal. Szintén kis világ az internet és a www, viszont nem kis világ egy pókháló és a közúti hálózat. A legkisebb számú lépést, amellyel egy gráfban két csúcst az éleken haladva összeköthető, a két pont közötti legrövidebb úthossznak nevezzük. A kisvilág-tulajdonság matematikai megfogalmazásban azt mondja ki, hogy ha növeljük egy hálózat méretét, akkor a benne mérhető legrövidebb úthosszak a hálózat méreténél jóval lassabban (legfeljebb logaritmikusan) nőnek. Azaz, ha egy kisvilághálózatban a csúcsok (résztvevők) száma tíz- vagy százszorosára nő, a legrövidebb út bármely két pont között akkor is csak egy vagy két lépéssel lesz hosszabb.

A legrövidebb utak vizsgálata után most nézzük meg azt, hogy vajon egy kiválasztott csúcspontból nézve másnyilván látjuk-e a www-t és az úthálózatot (1. *ábra*). A www-n és az úthálózatban is sok olyan pont (weboldal, város) található, amelynek kevés kapcsolata van (hiperlinkkel kapcsolt másik weboldal, illetve szomszédos város). Azonban, ha a sok kapcsolattal rendelkező pontokat vizsgáljuk, akkor a két hálózatban jelentős eltérést tapasztalunk. Egy városnak általában 3–4 közúti szomszédja van, de 10-nél semmiképp sem több. Viszont a weboldalak között soknak van ezernél is több kapcsolata és néhányának, mint a Google és a Yahoo, több millió. Egy csúcst szomszédainak számát az adott csúcst *fokszá-*

mának nevezzük. A különböző fokszámok eloszlásfüggvénye,  $p(k)$ , megmutatja, hogy ha az összes csúcs közül véletlenszerűen kiválasztunk egyet, akkor annak a fokszáma  $p(k)$  valószínűséggel lesz  $k$ . Az úthálózatban nagyon kis eséllyel találunk olyan csúcst, amelynek a fokszáma az átlagos értéknél jóval nagyobb; az útvonalak gráfján és a hasonló hálózatokban végzett mérések szerint ez a valószínűség a  $k$  értékkel exponenciálisan csökken:

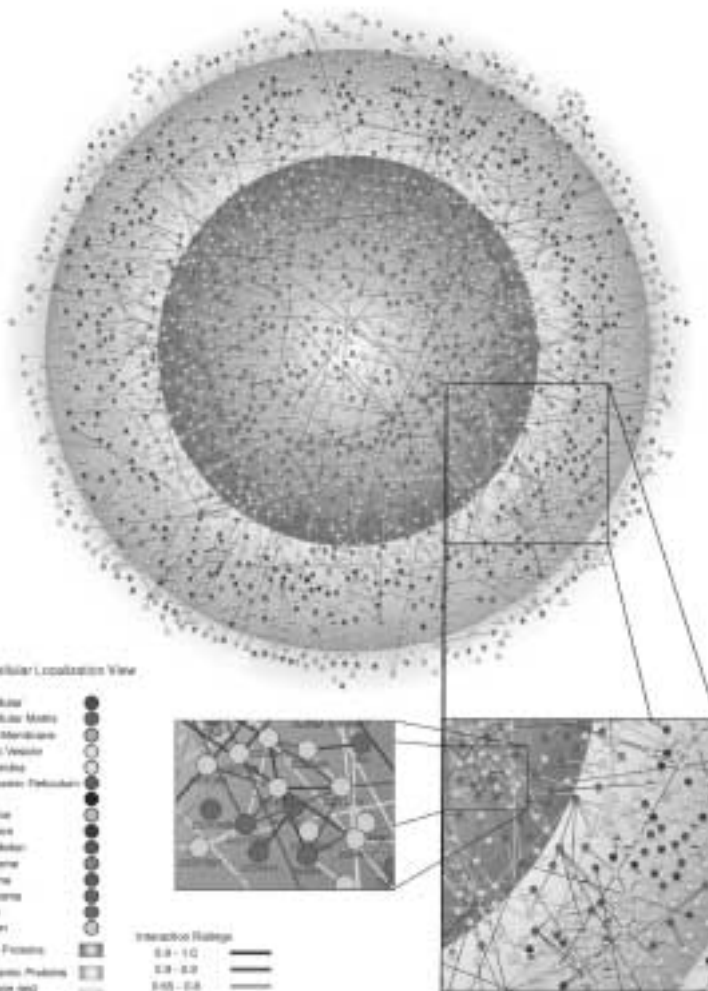
$$p_{\text{utak}}(k) \sim e^{-k}.$$

A www-n és a biológiai hálózatokban gyakoriak az átlagosnál jóval több kapcsolattal rendelkező csúcsok. A mérések szerint ezekben a hálózatokban a fokszámeloszlás a nagy fokszámoknál hatványfüggvény szerint csökken:

$$p_{\text{www}}(k) \sim k^{-\gamma}.$$

Itt  $\gamma$  általában 2 és 3 közötti szám. Ha például  $\gamma = 3$ , akkor a  $k = 10$  fokszámú csúcs előfordulási valószínűsége 8-szor kisebb, mint a  $k = 5$  fokszámú csúcsé. Ezzel szemben az exponenciális esetben a  $k = 10$ -es csúcs  $e^5$ -szer (körülbelül 150-szer) kevésbé gyakori, mint a  $k = 5$ -ös. A nagy fokszámú csúcsok előfordulási valószínűsége alapján a hálózatokat két fő csoportba szokás sorolni. Az *exponenciális* hálózatokban az átlagosnál jóval több kapcsolattal rendelkező csúcsokat nem találunk (az exponenciális függvény nagyon gyorsan csökken), míg a *hatványfüggvény* szerinti fokszámeloszlású, más néven *skalafüggetlen* hálózatokban ehhez képest gyakoriak a kiugróan sok szomszédal rendelkező csúcsok.

A fokszámeloszlás és a *kisvilág*-tulajdonság sok alkalmazásban igen fontos szerephez jut. A www-n és a légi közlekedésben alapvető, hogy néhány lépéssel (kattintással, illetve átszállással) a hálózatban bárhová eljuthassunk. De ezért a jó tulajdonságért mindkét esetben árat kell fizetnünk. A www-n gyakran előfordul, hogy a legtöbb kapcsolattal rendelkező oldalakat egyszerre próbálja sok felhasználó letölteni, a légi közlekedés pedig lehetőséget ad arra, hogy távoli vidékek fertőző betegségei gyorsan eljussanak mindenhová. Érdekes, hogy az elmúlt években az ezekkel kapcsolatos jelenségekre a statisztikus fizika elméleti eszközeivel igen pontos leírásokat és javaslatokat sikerült adni.



2. ábra. A gyümölcslegy (*Drosophila melanogaster*) fehérjéinek kölcsönhatási hálózatára vonatkozó első részletes „térkép” 2004-ben készült el. Az emberi sejtek fehérjei közötti kölcsönhatások térképe ilyen részletességgel még nem ismert. Azonban a gyümölcslegy fehérjei között talált kölcsönhatások segítségével, szekvencia-hasonlóság alapján az emberi fehérjék kölcsönhatásai is pontosabban jósolhatóak. (Az ábra forrása: Giot et al., *Science*, 302 [2004] 1727–1736.)

Napjainkban az egyik legaktívabban kutatott hálózat az élő sejtek fehérjéinek kölcsönhatási hálózata. Sok ismert szekvenciájú és szerkezetű fehérjéről még nem vagy csak részben ismert, hogy milyen feladatot végez a sejtben. A hálózatban vele kölcsönható más fehérjék (szomszédok) segítségével azonban ez a funkció jósolható. További érdekesség, hogy a fehérjék általában csoportosan, összekapcsolódva végeznek el egy-egy feladatot. A fehérje–fehérje kölcsönhatási hálózat segítségével új fehérjecsoportokat találhatunk, és jobban megismerhetjük, hogy ezek a csoportok (fehérjemodulok) hogyan működtetik az emberi, állati és növényi sejteket (2. ábra).

Farkas Illés

MTA–ELTE Biológiai Fizika Kutatócsoport

**Fizikai Szemle**  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését anyagilag támogatják:

