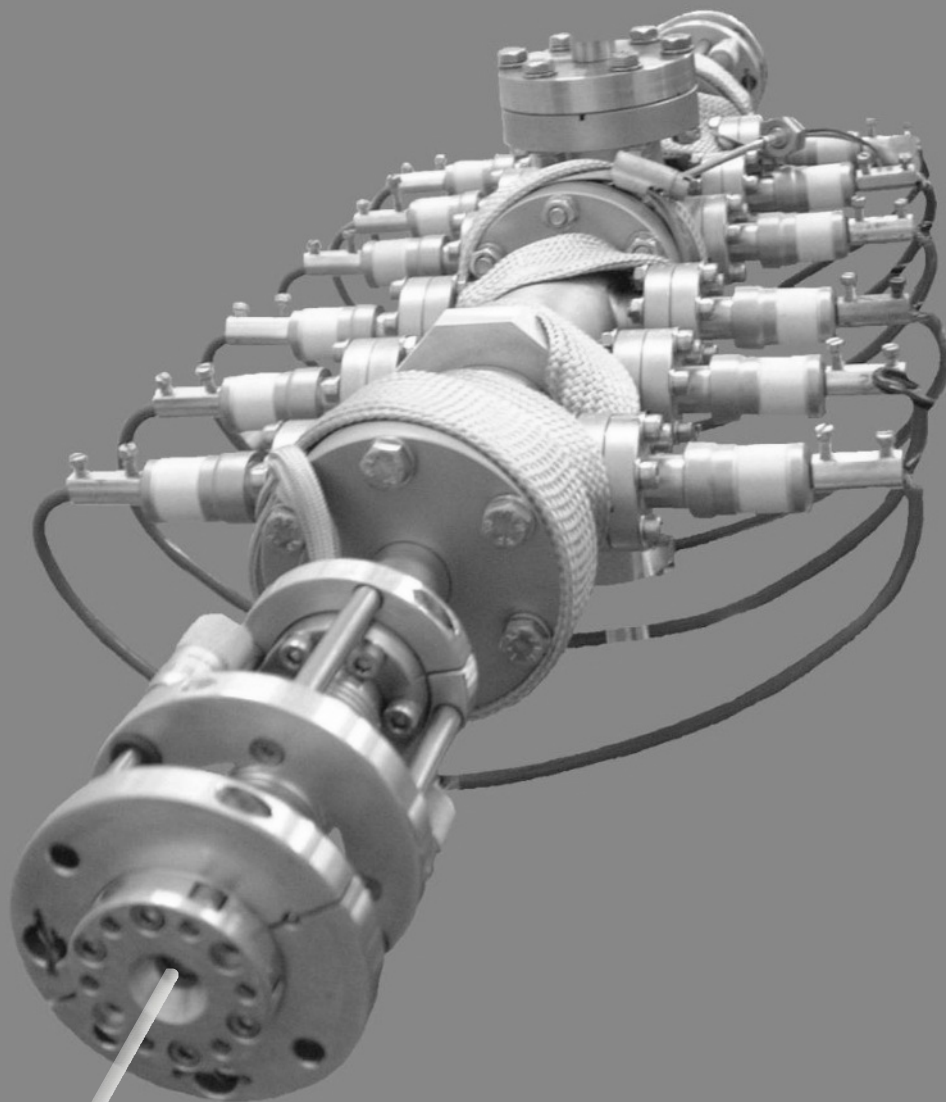


fizikai szemle



2005/7

A Magyar Tudományos Akadémia
Fizikai Tudományok Osztálya,
az Eötvös Loránd Fizikai Társulat,
a Magyar Biofizikai Társaság,
a Magyar Nukleáris Társaság és
az Oktatási Minisztérium
folyóirata

Főszerkesztő:

Berényi Dénes

Szerkesztőbizottság:

**Barlai Katalin (Csillagászat),
Faigel Gyula,
Gnädig Péter (Négyzögletes kerék),
Gyulai József,
Horváth Dezső (Mag- és részecskefizika),
Jéki László, Kanyár Béla (Sugárvédelem),
Németh Judit, Ormos Pál (Biofizika),
Papp Katalin,
Sükösd Csaba (Vélemények),
Szőkefalvi-Nagy Zoltán (Biofizika),
Tóth Eszter,
Turiné Frank Zsuzsa (Megemlékezések),
Ujvári Sándor (A fizika tanítása)**

Szerkesztő:

Hock Gábor

Műszaki szerkesztő:

Kármán Tamás

A lap e-postacíme:

fizszem.elft@mtesz.hu

A folyóiratba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A címlapon:

**224 nm hullámhosszon működő üreges
katódú ezüstionlézer az SzFKI-ban, lásd
Donkó Zoltán cikkét a 240. oldalon
(Bánó Gergely felvétele)**

TARTALOM

<i>Erdélyi Miklós: Árnyékfejtés – a számítógépes tomográfia mint a modern orvostudomány eszköze</i>	225
<i>Zimányi László: Spektroszkópia, algebra és bioenergetika</i>	229
<i>Zoletnik Sándor: Szabályozott magfúzió mágneses összetartással II.</i>	234
<i>Donkó Zoltán: Gázlézerek és gázkisülések</i>	240
AKADÉMIAI OSZTÁLYKÖZLEMÉNYEK	246
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>Kis Tamás, Papp Zoltán: A radioaktivitás tanítása, társadalmi hatások</i>	248
<i>A XXVIII. Országos Általános Iskolai Fizikatanári Ankét és Eszközkiallítás (Jubász Nándor)</i>	254
MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN	
<i>Orvosi képalkotó eljárások II. (Faigel Gyula)</i>	260
KÖNYVESPOLC	260
<i>M. Erdélyi: Shadow decoding: computed tomography, an important method of modern medical science</i>	
<i>L. Zimányi: Spectroscopy, algebra and bioenergetics</i>	
<i>S. Zoletnik: Controlled nuclear fusion with magnetic confinement II.</i>	
<i>Z. Donkó: Gas lasers and gas discharges</i>	
PROC. OF DEPT. FOR PHYS. SCI. OF THE ACADEMY TEACHING PHYSICS	
<i>T. Kis, Z. Papp: The teaching of radioactivity and its influence in society</i>	
<i>The XXVIII-th Meeting and Demonstration Equipment of primary school physics teachers (N. Jubász)</i>	
SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL	
<i>Medical imaging methods II. (J. Faigel)</i>	
BOOKS	
<i>M. Erdélyi: Entzifferung von Schatten – Computer-Tomografie, eine wichtige Methode der modernen medizinischen Wissenschaften</i>	
<i>L. Zimányi: Spektroskopie, Algebra und Bioenergetik</i>	
<i>S. Zoletnik: Steuerbare Kernfusion mit magnetischer Begrenzung II.</i>	
<i>Z. Donkó: Gaslaser und Gasentladungen</i>	
MITTEILUNGEN DER ABT. PHYS. WISS. DER AKADEMIE PHYSIKUNTERRICHT	
<i>T. Kis, Z. Papp: Der Unterricht in Radioaktivität und sein Einfluss in der Gesellschaft</i>	
<i>Das XXVIII. Landestreffen und Geräte-Ausstellung der Physiklehrer in der Grundschule (N. Jubász)</i>	
WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE	
<i>Verfahren der medizinischen Abbildung II. (J. Faigel)</i>	
BÜCHER	
<i>М. Эрде́ли: Расшифровка теней – компьютерная томография, важный метод современных медицинских наук</i>	
<i>Л. Зими́ни: Спектроскопия, алгебра и биоэнергетика</i>	
<i>И. Зо́летник: Контролируемая ядерная фузия с магнитным ограничением II.</i>	
<i>З. До́нко: Газовые лазеры и газовые разряды</i>	
СООБЩЕНИЯ АКАДЕМИИ НАУК	
ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ	
<i>Т. Киш, З. Пашп: Обучение радиоактивности в школе и его влияние в обществе</i>	
<i>XXVIII-й Советание и выставка преподавателей физики (Н. Югас)</i>	
НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ	
<i>Методы медицинского образования II. (Д. Фа́йгел)</i>	
КНИГИ	

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

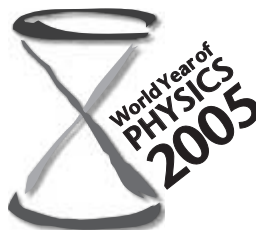
A Fizikai Szemle az Akadémia által 1862-ben elindított Matematikai és Természettudományi Értesítő és az 1891-ben Eötvös Loránd által alapított Matematikai és Fizikai Lapok utóda és folytatása

LV. évfolyam

7. szám

2005. július

NEM ÉLHETÜNK



FIZIKA NÉLKÜL



ÁRNYÉKFEJTÉS – A SZÁMÍTÓGÉPES TOMOGRÁFIA MINT A MODERN ORVOSTUDOMÁNY ESZKÖZE

Erdélyi Miklós

Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék

Az orvosi képalkotó módszerek a modern orvostudomány nélkülözhetetlen eszközei. Fontos szerepet játszanak mind a diagnosztikai, mind a klinikai kezelések, műtétek során. A számítógépes tomográfia egyike ezen módszereknek. A modern számítógépes tomográfiai készülék három tudományterület, a röntgentechnológia, a képrekonstrukciós algoritmusok és a számítógépek gyors fejlődésének köszönheti a létét.

1965-ben az első nemzetközi orvosságfizikai konferencián *Val Mayneord* professzor hat olyan tudóst sorolt fel, akik a legtöbbet tették a modern orvostudomány fejlődéséért. *Galileo Galilei*, *Giovanni Alfonso Borelli*, *Richard Mead*, *Thomas Young* és *John Tyndall* mellett *Wilhelm Röntgen* neve szerepelt.

Wilhelm Röntgen 1895. november 8-án figyelte meg első ízben az X-, azaz a később *Boltzmann* javaslatára a felfedezőjéről elnevezett röntgensugarakat. A katódsugárzás vizsgálata során felfigyelt arra, hogy a katódsugárcső közelében lévő fluoreszkáló só világít. December 22-én készítette az első radiográfot felesége, *Bertha* kezéről, és pár hónapon belül Európa számos fővárosában már röntgenképek segítségével illesztettek össze törött csontokat. A röntgensugarak intenzív tanulmányozását mutatja, hogy 1896-ban több mint 1000 cikk jelent meg a témában. Felfedezésének és kutatásainak elismeréséül Wilhelm Röntgen 1901. december 10-én elsőként vehette át a fizikai Nobel-díjat.

Röntgensugárzás generálása

A számítógépes tomográfia (*Computed Tomography*, CT) készülékekben fűtött katódú röntgensöveket alkalmaznak. A katódból kilépő elektronok a nagyfeszültség hatására felgyorsulnak és az anódba ütköznek. A becsapódó elektronok kölcsönhatásba lépnek az anód atomjaival, mely kölcsönhatás révén röntgensugarak keletkeznek. Két mechanizmus, a fékezési és a karakterisztikus sugárzás határozza meg a keletkezett elektromágneses sugárzás spektrumát.

A fékezési sugárzás spektruma folytonos. Ekkor az anódba becsapódó, annak atomjaival kölcsönhatásba kerülő elektronok (az 1. ábrán *a*-val jelölt elektron) eltérülnek és energiát vesztenek, amely foton formájában sugárzódik ki. A kölcsönhatás annál erősebb, minél jobban megközelíti az elektron az atommagot. Szélső esetben az anódból kilépő foton energiája egyenlő a belépő elektron teljes kinetikus energiájával. Ekkor a kilépő fotonok energiája

$$hf_{\max} = eV,$$

ahol *V* a röntgensőre kapcsolt feszültség, *e* az elektron töltése, *h* a Planck-állandó, és *f_{max}* a foton frekvenciája. Ha a röntgenső ablakában, illetve magában a céltárgyban fellépő abszorpciótól eltekintünk, akkor a spektrum

intenzitása a feszültség növelésével monoton módon csökken. Mivel a $\mu(E)$ abszorpciós együttható a fotonenergia növelésével általában csökken, a csövet elhagyó nyaláb spektrumának alacsony energiájú része jelentős szűrést szenved.

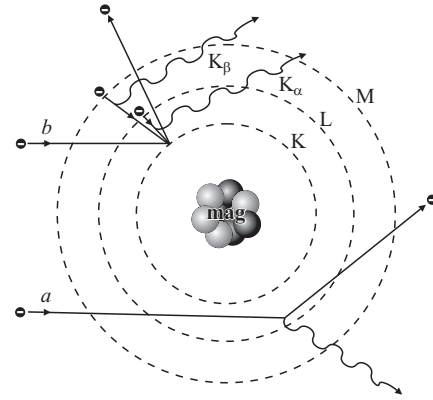
Karakterisztikus sugárzás akkor keletkezik, ha a bejövő elektron (az 1. ábrán *b*-vel jelölt elektron) egy kötött elektront gerjeszt. A gerjesztett elektron helyére egy felsőbb energiaszintről „ugrik le” egy elektron, és a két energiaszint energiakülönbsége foton formájában kisugárzódik. Ebből következik, hogy a karakterisztikus sugárzás a cél tárgy anyagára jellemző, vonalas színképpel rendelkezik.

A CT-képek egy háromlépcsős folyamat eredményeképpen jönnek létre. Az első fázis (adatgyűjtés) során veszik fel a vetületi képeket (szinogram). A második lépés a rekonstrukció, amely során a vetületekből (szagittális, frontális vagy ferde síkú) keresztmetszeti képeket számítanak ki. A harmadik lépés a kép megjelenítése, amely felhasználóbarát módon manipulálja, tárolja a képeket. A kézmanipuláció lényege, hogy az orvos számára minél használhatóbb kép jöjjön létre, amellyel megbízhatóbb diagnózis állítható fel. A képek tárolására egy nemzetközi szabványt, a DICOM-ot (*Digital Imaging and Communication in Medicine*) használják, amely lehetőséget ad különböző CT-rendszerek, illetve más képalkotó módszerekkel létrehozott képek egységesítésére.

CT-generációk

A tomográfia kifejezés nem új, már az 1920-as években használták, de igazán csak 1935-ben, a magyar *Grossmann Gusztáv* által kifejlesztett új eljárás révén vált ismertté. Bár a 60-as években *Oldendorf, Kubl, Edwards*, illetve 1963-ban *Cormack* révén már alkalmazták az orvosi képalkotásban, mégis 1967–1973-ig kellett várni, amikor *Hounsfield* vezetésével kifejlesztették az első klinikai alkalmazásra alkalmas CT-t, mellyel az emberi agyat vizsgálták. 1973 és 1983 között világszerte elterjedt a CT-k klinikai alkalmazása, amellyel 1974-től *Robert Ledley*nek köszönhetően már nemcsak a fejet, de az egész testet képesek voltak pásztázni. A gyors fejlődést leginkább az példázza, hogy 1974-ben már a negyedik generációs CT-k is megjelentek (2. ábra). A fejlődést szintén jól mutatja a feloldás és a pásztázási idő javulása. Míg 1972-ben 80×80 pixelből álló képeket sikerült rekonstruálni, addig 1993-ban elérték az 1024×1024-es feloldást. Ezzel párhuzamosan a több perces pásztázási időt sikerült egy másodperc alá szorítani. A fejlődés természetesen részben a számítógépek alkalmazásának, illetve azok gyorsaságának volt köszönhető.

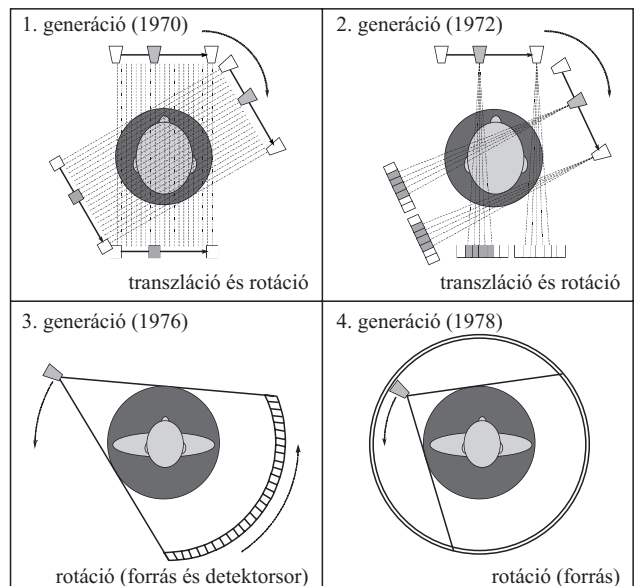
A röntgenképek jelentős segítséget nyújtanak az orvosoknak, hátrányuk viszont, hogy a háromdimenziós tárgyaknak csupán kétdimenziós vetületét adják, azaz a mélységi információ elvész. Ahhoz, hogy térbeli képet kapjunk, több vetületi képet kell felvenni és ezekből rekonstruálni az eredeti háromdimenziós tárgyat. Az eljárás némi hasonlóságot mutat az emberi látással, amikor két „szemszögből” nézzük a tárgyat, és az agy rekonstruálja a mélységi viszonyokat. A tomográfok négy technikai generációs fejlődési lépésen mentek keresztül. A generációs

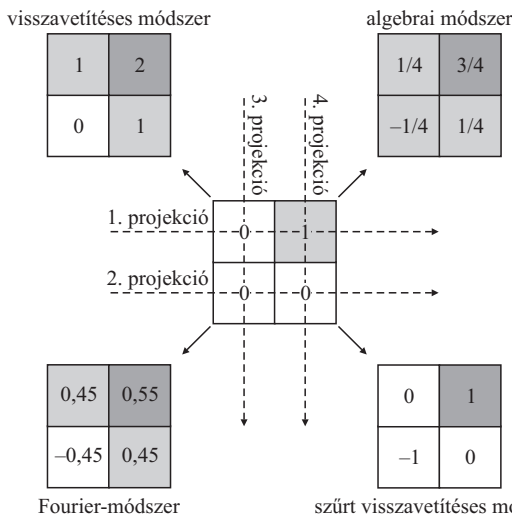


1. ábra. A fékezési (*a*) és a karakterisztikus (*b*) röntgensugárzás keletkezése

lépések elsősorban a detektorok számának növekedésében és a mozgó alkatrészek számának csökkentésében mutatkoznak meg. Az első generációs tomográfokban (*parallel beam geometry*) a röntgenső és a detektor egymással párhuzamosan mozgott és vett fel egy vetületi képet. Az újabb vetületi kép felvétele előtt a röntgenső és a detektor 1°-kal elfordult. A teljes rekonstrukcióhoz 180 elfordulásra volt szükség. Az első generációs tomográfok lassúságuk miatt nem kerültek klinikai alkalmazásra. 1969-ben az első, *Hounsfield* által fantomokon elvégzett kísérletek kilenc napot vettek igénybe. A második generációs, klinikai alkalmazásra is alkalmas tomográfokban egy lineáris detektorsort alkalmaztak. A röntgensövet elhagyó divergens nyaláb a beteg egy részén keresztülhaladva érte el a detektorsort. Mivel egyszerre több detektorral mérünk, a mérési idő lecsökken. Általánosságban azt mondhatjuk, hogy az alkalmazott detektorok száma fordítottan arányos a pásztázási idővel. A második generációs tomográfok 3 percre rövidítették le a pásztázási időt. A harmadik generációs készülékekben már nincs translációt végző elem. A röntgenforrást legyezőszerűen elhagyó nyaláb az egész testet képes átvilágítani. A páciensen áthaladó sugarakat egy körív mentén sorakozó detektorok fogják fel.

2. ábra. A CT-k fejlődésének négy generációs lépése





3. ábra. A négy képrekonstrukciós eljárás eredménye egy egyszerű fantom esetén

Ebben az elrendezésben a detektorsor együtt forog a forrással. A negyedik generációs CT-ben már a detektorsor egy teljes kört alkot, ezért csak a forrást kell forgatni. Az alapvető elvárás minden új képkalkító módszerrel szemben, hogy a beteget érő dózis minimális szinten tartásával a lehető legtöbb információt tartalmazó képet hozza létre. Több módszer is ismert, illetve áll fejlesztés alatt a dózis minimalizálására. Az egyik rendszerben közvetlenül a röntgenscő után, azaz még a páciens elé helyezett szűrők segítségével 15%-os dóziscsökkenés érhető el. További 25%-os csökkenés vált elérhetővé az új ultragyors kerámiadetektorok alkalmazásával, illetve további 40%-os javulást eredményezett az úgynevezett dózismanipuláció, amely során a röntgenscő áramát a vizsgált beteg egyedi tulajdonságaihoz igazítják.

Képrekonstrukciós módszerek

A képrekonstrukciós eljárások során a tárgyat azonos méretű, elemi kockákra, *voxelekre* osztjuk. A feladat az, hogy meghatározzuk az egyes voxelekhez tartozó abszorpciós együtthatókat. Itt érdemes megemlíteni, hogy a radiológiában az egyes voxelekhez tartozó denzitásvértékeket Hounsfield egységben (HU) szokás megadni. A levegő -1000 HU, míg a víz 0 HU értékű. Egy vetületi kép egyes pontjain lévő jel nagysága egy adott röntgensugár útjába eső voxelek integrált abszorpciójával arányos, és nem ad mélységi információt.

A képrekonstrukciós eljárások négy nagyobb csoportba sorolhatók: a) visszavetítéses módszer (*back projection*), b) algebrai (iteratív) módszer, c) Fourier-transzformációs módszer, d) szűrt visszavetítéses módszer.

A négy módszer könnyebb megértéséhez tekintünk a 3. ábrán látható egyszerű, négy szegmensből álló fantomot és alkalmazzuk a pontozott vonallal jelzett négy projekciót.

A visszavetítéses módszer során minden egyes voxel értékéhez, amelyiken az adott sugár keresztül halad, hozzáadunk a vetület értékét. A rekonstruált és az eredeti kép összehasonlításából kiderül, hogy a rekonstrukció jól

viszaadja, hogy a jobb felső képpont intenzitása a legnagyobb, de hamis értékeket ad a szomszédos két képpontra. A visszavetítéses módszer egyik hátránya, hogy hamis vonalakat, csíkokat vezet be, amelyek megnehezítik a képet kiértékelő orvos dolgát. A kontraszt a projekciók számának növelésével javítható. A visszavetítéses módszert általános matematikai formulával is felírhatjuk:

$$f(x, y) = \int_0^\pi p_{x,y}(r(\varphi), \varphi) d\varphi,$$

ahol $p_{x,y}(r(\varphi), \varphi)$ egy adott φ szög esetén jelöli a projekciót.

Az algebrai eljárás során a Beer–Lambert-törvényt kell felírni az összes röntgensugárra vonatkozóan és megoldani az egyes voxelekhez tartozó abszorpciós együtthatókra. Jelen esetben a négy ismeretlen voxel egyértelmű meghatározásához négy egyenletre van szükségünk, amely egyenletrendszer könnyen és gyorsan megoldható. A voxelek számának növelésével azonban az egyenletek száma drasztikusan megnő, például egy $256 \times 256 \times 256$ voxelből álló tárgy rekonstrukciója során egy 16777216 db egyenletből álló egyenletrendszer kellene megoldani, ami a mai gyors számítógépekkel is elfogadhatatlanul hosszú számítási időt jelent. Ezen eljárás helyett iteratív módszereket szokás alkalmazni, melyek közül egyet közelebből is megvizsgálunk. E módszer első lépése a visszavetítéses módszer. A második, iteratív lépés során a voxel értékét megváltoztatjuk az előző p projekció, az egyes V voxel értékek és az N_v voxelek számának függvényében, az i -edik iterációra:

$$V^{(i)} = V^{(i-1)} - \frac{p^{(i-1)} - V^{(i-1)}}{N_v}$$

A 3. ábra az első iteráció után kapott képet mutatja. A módszer hátránya, hogy a konvergencia nem mindig teljesül, azaz a projekciók számának növelésével a jósolt és a ténylegesen mért projekciós értékek különbsége nem tart nullához.

Jelentős előrelépést jelentett a Fourier-transzformációs módszer alkalmazása. A módszer alapelve, hogy egy $f(x, y)$ függvénnyel jellemzett kép egyértelműen megadható a függvény Fourier-transzformáltjával:

$$F(f_x, f_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy,$$

ahol f_x és f_y jelölik a térbeli Fourier-komponenseket. Vizsgáljuk meg az $f_y = 0$ esetet:

$$\begin{aligned} F(f_x, 0) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp(-i2\pi f_x x) dx dy \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) dy \right] \exp(-i2\pi f_x x) dx. \end{aligned}$$

Mivel a zárójeles kifejezés az $f(x, y)$ függvény x tengelyre vett projekcióját jelenti, az $f(x, y)$ függvény kétdimenziós

Fourier-transzformáltja az f_x tengely mentén kiszámítható egy projekció x szerinti Fourier-transzformációjából:

$$F(f_x, 0) = \mathcal{F}\{p(x)\}.$$

Mivel a fenti gondolatmenet során az x tengely felvétele tetszőleges volt, ezért azt a teljes 2π tartományon körbeforgatva rekonstruálhatjuk a teljes $F(f_x, f_y)$ függvényt, melynek inverz Fourier-transzformáltja adja a keresett $f(x, y)$ függvényt. Az eljárás egyik hátránya, hogy az inverz Fourier-transzformáció előtt, a hengerkoordináta-rendszerben kapott $F(f_x, f_y)$ függvény értékeit (általában interpolációs módszerrel) derékszögű koordináta-rendszerben kell megadni. Ebből az interpolációs hibából származtatható a 3. ábrán látható rekonstruált kép hibája.

A szűrt visszavetítéses, vagy más néven konvolúciós módszer megértéséhez először írjuk át a Fourier-transzformációs módszer során az $f(x, y)$ -re kapott kifejezést polár-koordináta-rendszerbe:

$$\begin{aligned} f(x, y) &= \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} F(f \cos \varphi, f \sin \varphi) e^{i2\pi f(x \cos \varphi + y \sin \varphi)} |f| df d\varphi \\ &= \int_0^{\pi} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(r, \varphi) e^{-i2\pi fr} dr \right\} |f| e^{i2\pi fr} df \Bigg\} d\varphi. \end{aligned}$$

Mivel az f szerinti integrálás egy szorzatra vonatkozik, a konvolúció-tételt alkalmazva írhatjuk:

$$f(x, y) = \int_0^{\pi} p'(r, \varphi) d\varphi,$$

ahol

$$p'(r, \varphi) = p(r, \varphi) * b(r) \quad \text{és} \quad b(r) = \int_{-\infty}^{\infty} |f| e^{i2\pi fr} df.$$

A kapott kifejezés alakja megegyezik a visszavetítéses módszer alakjával, csak itt nem közvetlenül a p projekciókat, hanem azok $b(r)$ függvényével „szűrt” konvolúcióját vetítjük vissza.

Képképzési hibák – nyalábkeményedés

A képképzési hibákat három nagy kategóriába sorolhatjuk. A fizikai okokra visszavezethető hibák (nyalábkeményedés, parciális térfogati hiba, mintavételezési hiba stb.), a beteg által okozott hibák (fémese protézisek okozta hibák, elmozdulásból származó hiba stb.) és az eszköz által bevezetett hibák (detektor linearitása, elmozdulás stb.) csoportjára. E hibák egy része kalibrációval, illetve szakértelemmel könnyedén kiküszöbölhető. A nyalábkeményedés talán az egyik legtöbb problémát okozó hiba. A jelenség oka, hogy az abszorpciós együttható energiafüggése miatt a polikromatikus röntgensugár spektruma a nagyobb energiák felé tolódik el. Érdemes megemlíteni,

hogy a nyalábkeményedés jelenségét már Röntgen is megfigyelte és 1897-ben közölte. A CT-felvételeken ez a kontraszt csökkenéséhez vezet. A korrekciós technikák két csoportba oszthatók: hardveres és szoftveres megoldásokra. Speciális, nyakkendő alakú szűrőkkel a nyalábot „előkeményítve”, a detektort elérő nyaláb homogenitása növelhető. Monokromatikus röntgenforrást alkalmazva vagy spektrálszűrőkkel monokromatizálva a polikromatikus röntgenforrást, a nyalábkeményedés jelensége nagymértékben csökkenthető. A szoftveres megoldásokban a rekonstruált képet szoftveresen javítják. Számatalan megoldási módszer ismert (posztrekonstrukció, effektív energia, iteratív statisztikus eljárás, hisztogramos kiértékelés stb.). Fontos megemlíteni, hogy a hardveres megoldások általában jóval költségesebbek, mint a szoftveres megoldások, ezért a gyártók elsősorban a szoftveres megoldásokat preferálják.

A jövő

Bár a nyolcvanas években – elsősorban az MRT-k elterjedésével – többször megjósolták a CT-k halálát, a mai napig azok mégis fontos szerepet játszanak a modern orvosi képképzésben. A kilencvenes években reneszánszát élte a CT, és napjainkban újra jelentős fejlesztések indultak el. A fejlesztések során a beteget érő dózis és a pásztázási idő csökkentése a két fő irány. A dózis csökkentését elsősorban az ionizációs detektoroknál gyorsabb és érzékenyebb ultragyors kerámiadetektorok (*Ultra Fast Ceramic*, UFC) alkalmazásával sikerült elérni. A pásztázási idő csökkentésére több megoldás is született. Az olykor 5. generációs CT-nek is nevezett elektronnyaláb-CT-ben nincs forgó alkatrész. A fókuszált elektronnyaláb végigpásztázza a beteg körül teljes kört alkotó céltárgyat és ott röntgensugarakat kelt. Mivel az elektronnyaláb iránya a mechanikai mozgásoknál gyorsabban változtatható, a pásztázási idő drasztikusan csökkenthető, és így mozgó szervek (pl. a szív) vizsgálata válik lehetővé. Ilyen ultragyors CT-kből jelenleg néhány tucat működik a világ klinikáin.

Bár a CT-készülékeket elsősorban orvosi alkalmazásokra fejlesztették ki, más területeken is sikerrel alkalmazzák. Az antropológusok egyiptomi múmiákat tudnak vizsgálni anélkül, hogy azok sérülnének. A repülőtereken a biztonság növelése érdekében szándékoznak a csomagok átvizsgálásához CT-készülékeket alkalmazni. Horodozható, mobil CT segítségével élő fákról lehet keresztmetszeti képeket nyerni a fák kivágása nélkül, vagy a geológusok kőzeteket vizsgálhatnak meg a helyszínen. *Kalender* professzor szavaival élve: „a CT él és jól van”.

Irodalom

- K. IIZUKA: *Engineering Optics* – Springer Series in Optical Sciences, 2nd ed. 1986.
- W.A. KALENDER: *Computed Tomography – Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications* – Publicis MCD Verlag, 2000
- E. SEERAM: *Computed Tomography – Physical Principles, Clinical Applications and Quality Control* – W.B. Saunders Company, 2nd ed. 2001
- S. WEBB: *From the watching of shadows – The origin of radiological tomography* – Adam Hilger, 1990

Mi is a (tudományos) bioenergetika?

Manapság újságok hirdeteiben, tv- és rádióműsorokban, szórólapokon és hirdetményekben gyakran találkozunk praktizáló bioenergetikusokkal. Nem célozom minősíteni a „pozitív” energiák felszabadításának, átvitelének gyógyászati értékét, vagy a „negatív” energiák romboló hatását, csupán leszögezem: a bioenergetika kifejezést az 1950-es években vezették be annak a biofizika, a biokémia és a sejtlelettan találkozási pontján kialakult határterületnek az elnevezésére, melynek fő tudományos problémája a következő volt. Milyen mechanizmussal képes a tápanyagok oxidációja vagy a fény elnyelése során felszabaduló energia olyan más, energiaigényes folyamatokat ellátni, mint például az adenozin-trifoszfát (ATP) szintézise vagy ionok sejten belüli koncentrációja? Pontosíthatjuk a kifejezést membrán-bioenergetikára is, de ezzel a hozzáértőknek nem árulunk el újat, a művelt, de nem specialista olvasó számára pedig esetleg csak egy újabb talánnyal szolgálunk. Definiáljuk hát közelebbről a bioenergetika tudományterületét!

A sejtmagos, eukarióta sejtekben a mitokondrium, fotoszintetizáló szervezetekben ezen felül a kloroplasztisz az a sejtsejtszervecske, ahol a külső forrásból származó energia átalakítása folyik olyan kémiai energiává, mely a legtöbb életfolyamat számára elérhető energiaforrást jelent, ez pedig az ATP és az adenozin-difoszfát (ADP) koncentrációjának az egyensúlyi tömegaránytól 10 nagyságrenddel eltérő aránya az ATP javára. Az ATP szintéziséhez vezető folyamatok a fotoszintézis esetében már a fény elnyelésétől kezdve a kloroplasztisz belső membránrendszeréhez, a tilakoidokhoz kötöttek. A mitokondriumokban folyó úgynevezett oxidatív foszforilációnak pedig a végső lépései történnek meg a mitokondrium belső membránjában (a molekuláris oxigén redukciója vízzé és foszfátcsoport kötése az ADP-hez), miután a bonyolultabb tápanyag-molekulák (cukrok, zsírok, fehérjék) lebontása még a sejt vizes fázisában lezajlik. A kétfajta eseményben az a közös, hogy spontán (tehát szabadentalpia felszabadulásával járó) redoxfolyamatok – fehérjék közötti elektrontranszfer reakciók – kapcsolódnak az ATP-szintézis szabadentalpia-igényes, tehát magától végbe nem menő reakciójához.

Mi a szerepe a membránoknak, ezeknek a lipid kettősrétegből és a kettősrétegebe részben vagy teljesen beágyazott fehérjékből álló összetett rendszereknek, melyek zárt zsákocskákat alkotnak, még ha bonyolult redőzetük ezt nem is mindig mutatja nyilvánvalóan? A kérdésre *P. Mitchell* elmélete (kémiai Nobel-díj, 1978) adja meg a választ. Eszerint a membránba ágyazott redox partnerek közötti elektrontranszfer reakciók elő-

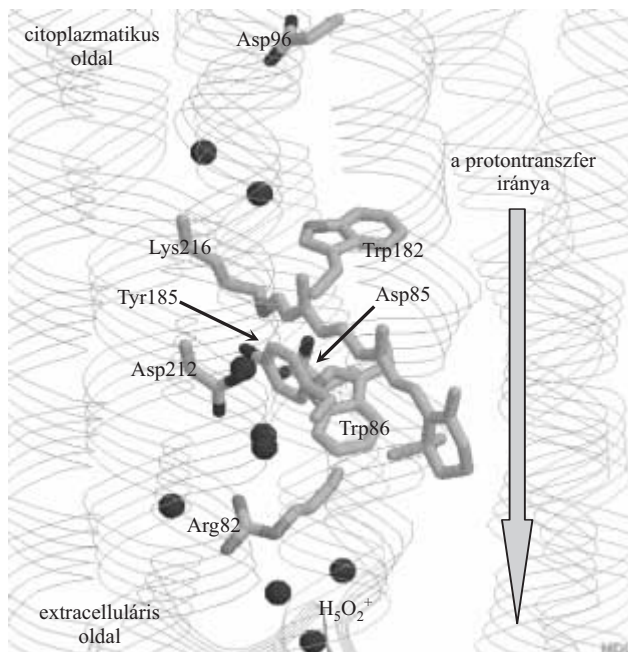
ször a membránra merőleges irányú vektoriális protontranszferet idéznek elő. Ennek eredményeképpen a zárt membrán egyik oldalán (pl. a zsákocska belsejében) felhalmozódnak a protonok, azaz a kémia nyelvén savasodás, pH-csökkenés történik, és a pH-különbség mellett elektromos potenciálkülönbség ($\Delta\psi$) is kialakul a membrán két oldala között. A protongradiens energiaktároló képessége azon múlik, hogy a biológiai membrán képes-e szigetelő módjára ellenállni a (mV-ban kifejezhető) $\Delta p = \Delta\psi - 60 \Delta pH$ feszültségnek, és azt tartósan fenntartani. A kloroplasztisz és a mitokondrium belső membránja akár 200 mV körüli membránpotenciálnak is ellenáll, ami – ha teljes egészében elektromos feszültség formájában van jelen – a membrán 10 nm-nél kisebb vastagságát figyelembe véve 10^5 V/cm nagyságrendű elektromos télerősséget jelent.

Az ATP-szintetáz fehérje, ez a lenyűgözően szellemes molekuláris gép, a protongradiensben rejlő energiát először mechanikai munkává alakítja, miközben az egyik oldalon felhalmozott protonokat „átzilipeli” a másik oldalra. A membránhoz kötött egyik fehérjealegységének, mint „bütykös tengelynek” a forgómozgása a fehérje távolabbi pontján pedig olyan mechanikai feszültségeket és alakváltozásokat okoz, melyek a felvett ADP- és foszfátmolekulák között létrehozzák a kémiai kötést. (A szerkezet és a működési mechanizmus kapcsolatának feltárásáért *P.D. Boyer, J.C. Skou* és *J.E. Walker* 1997-ben kémiai Nobel-díjat kapott.) A bioenergetika az elektrontranszfer – protontranszfer – ATP-szintézis folyamat részleteivel, a benne szerepet játszó molekulák (fehérjék, festékek, mobilis elektronszállítók stb.) szerkezetével és működésével foglalkozik, és minden olyan jelenséggel vagy molekulával, melynek hasonlóságok, analógiák alapján a fent vázolt alapvető energiaátalakító út megismerésében szerepe lehet [1]. Az utóbbi időben egyre nagyobb a bioenergetika orvosi jelentősége is, noha természetesen nem a fent már említett értelemben. Kiderült ugyanis, hogy számos betegségnek olyan genetikai oka van, mely a mitokondriális energiaátalakítás fehérjeinek valamilyen hibájához vezet, és ezért a sejt energiaháztartása felborul, vagy az elektrontranszfer hibás működése miatt veszélyes reaktív oxigéngyökök keletkeznek.

Kinetikus spektroszkópia a bioenergetika szolgálatában

A fehérjék az őket alkotó polipeptid és aminosav oldalláncok tulajdonságai alapján egyrészt az ultraibolya tartományban nyelnek el fényt, másrészt molekuláris rezgéseiknek megfelelően az infravörösben. Néhány kivételtől eltekintve tehát színtelenek. Ilyen kivételek a természet

Az szerző munkáját az OTKA (T034745) támogatta.

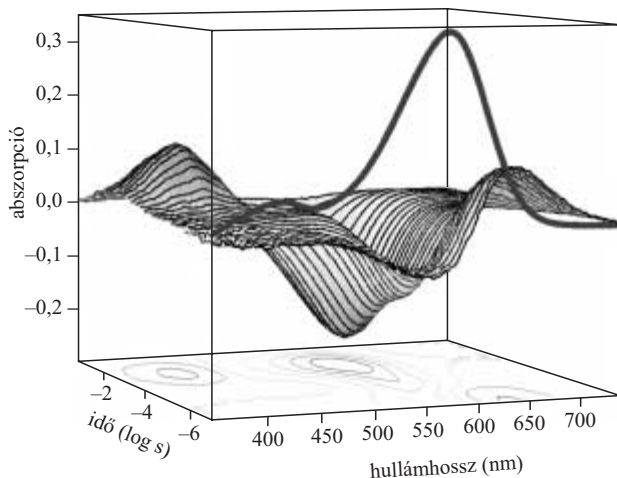


1. ábra. A retinál kromofór- és fehérjekörnyezete bakteriorodopszinban, röntgenkristallográfiás adatok alapján (felbontás: 1,47 Å, pdb kód: 1M0L, [3]). Kiemeltük az opszineltolódáshoz hozzájáruló töltött és gyűrűs aminosavakat, valamint a protontranszferben szerepet játszó aminosavakat és vízmolekula-klasztert. A kis gömbök a kötött vízmolekulák oxigénatomjait jelölik. A polipeptidlánc szerkezetét a halvány szalag mutatja.

által fényelnyelésre kifejlesztett fotoszintetikus és fényérzékeny fehérje-festékkomplexek (klorofilltartalmú fehérjék, retinálfehérjék vagy rodopszinok) és egyes redoxfehérjék (pl. citokromok), melyek az elektrontranszfer reakciót fémtartalmú kofaktorok segítségével végzik, és ezek – mellékesen – a látható spektrumtartományban abszorbeálódnak.

A rodopszincsalád tagjait a természet több célra is kifejlesztette. A látóbíborban működő rodopszin az elnyelt fény hatására olyan biokémiai reakciósorozatot indít el, melynek végeredménye a látóidegen végigfutó idegimpulzus. Létezik azonban egy másik, és egyre népeesebb

2. ábra. A bakteriorodopszin abszorpciós spektruma (az előtérben), valamint optikai sokcsatornás analízátorral készített differenciaspektrumok sorozata. A lézermimpulzus után eltelt idő logaritmikus időskálán egyenletesen nő 100 ns-től 150 ms-ig.



ága a rodopszinok családjának, melynek első és legjobban ismert tagja a *Halobacterium salinarum* sótűrő archaebaktérium sejtmembránjában bő 30 éve megtalált bakteriorodopszin (BR). Ez a 7 transzmembrán alfa-hélixet tartalmazó és mind-transz retinált kovalensen kötött fehérje 570 nm-es fény elnyelése után egymaga képes protonokat „pumpálni” a sejt belsejéből a külső térbe, akár néhány száz mV membránpotenciál ellenében is. A kialakult proton-elektrokémiai gradiens itt is ATP-szintézisre ad lehetőséget, valamint egyéb élettani folyamatokra, mint például a sejt ostorait forgató motor meghajtására, azaz a sejt térbeli mozgására.

A rodopszinok kromofórja, a retináldatban a közeli ultraióbolya tartományban nyel el, a retinálfehérjék abszorpciós maximuma viszont 400 és 600 nm között változik. A retinál a fényelnyelést megelőző nyugalmi állapotban protonált, azaz pozitívan töltött Schiff-bázissal ($C_{15} = N_{Lys}$ kötés) kapcsolódik egy lizin oldalláncához, bakteriorodopszin esetében a 216. aminosavhoz, és a fehérje belsejében kialakuló üreget foglalja el. Az abszorpciós sáv hangolását a fehérjekörnyezet végzi, ezért beszélünk opszineltolódásról (retinálfehérje = retinál + opszin). Az 1. ábrán, ahol a retinál és fehérjekörnyezete látható bakteriorodopszinban, megfigyelhetők a szín kialakításában elsősorban szerepet játszó szerkezeti elemek: a protonált Schiff-bázis töltését kompenzáló két negatív (Asp85¹ és Asp212) és egy pozitív (Arg82) töltésű aminosav, az ezeket hidrogénhid-kötésekkel összekapcsoló kötött vízmolekulák, és a retinálhoz közel lévő három aromás aminosav, melyek polarizálhatósága a retinál elektronikusan gerjesztett állapotát stabilizálja [2].

Fényelnyelés után a retinál gerjesztett állapotában a $C_{13} = C_{14}$ kettős kötés mentén izomerizálódik, mielőtt visszatér az elektronikus alapállapotba. Ezután metastabil intermedierek sora követi egymást (K, L, M, N és O állapotok), majd visszaalakul a kiinduló BR-állapot. Az úgynevezett fotociklus intermediereiben a retinál és a fehérje szerkezete fokozatosan módosul, ezek a változások egy proton sejten kívüli leadását és egy másiknak a sejt belsejéből (a citoplazmából) történő felvételét eredményezik, és a retinál konformációjának, valamint az opszineltolódásnak a változása a molekula színének a változásával jár. A fotociklus lépései a ps-os tartománytól a ms-os tartományig terjednek, a spektrális eltolódások tehát jó időfelbontású, látható tartománybeli kinetikus abszorpciós spektrofotometriával követhetők. A makroszkopikus mintában az egyes molekulák fotociklusának szinkronizált elindításáról egy impulzuslézer gondoskodik. Ezután különböző időkésleltetéssel pillanatfelvételek készíthetők a minta abszorpciós spektrumáról, egy kapuzott fotodiódasor érzékelő – úgynevezett optikai sokcsatornás analízátor – segítségével. A 2. ábrán látható egy ilyen mérés eredménye: időben felbontott differenciaspektrumok összessége, valamint a kiinduló BR-állapot abszorpciós spektruma.

¹ A szakirodalomban szokásos jelölésnek megfelelően: Asp85: a szekvencia 85. pozícióját elfoglaló aszparaginsav, Lys: lizin, Arg: arginin, Tyr: tirozin, Trp: triptofán, valamint SB: Schiff-bázis.

Mátrixalgebra a spektroszkópia szolgálatában

Az időben egymás után következő differenciaspektrumokat oszlopvektorokként egy mátrixba rendezhetjük (mind a hullámhossz-, mind az időskálán diszkrét mintavételezés történik). A Beer–Lambert-törvény értelmében ez a mátrix felírható az egyes intermedierek (differencia)spektrumai és időfüggő koncentrációi szorzataként:

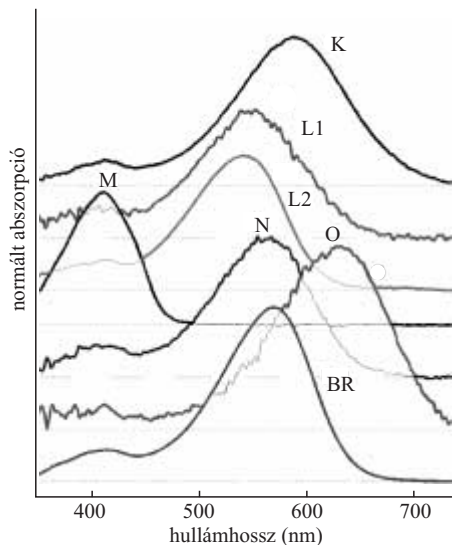
$$\mathbf{D} = \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{c}^T = \sum_{j=1}^k |\boldsymbol{\varepsilon}_j\rangle \langle \mathbf{c}_j|, \quad (1)$$

ahol k az intermedierek száma. A fotociklus ismerete azt jelentené, hogy ki tudjuk számolni az intermedierek koncentrációinak kinetikáját, azaz a \mathbf{c} mátrixot, erre megfelelő fotociklus-sémát tudunk illeszteni, és ezzel meg tudjuk határozni az egyes reakciók – molekuláris lépések – sebességi állandóit. Ha ezt a programot sikerül széles hőmérsékleti tartományban és szubsztrátkoncentráció (azaz pH-) tartományban elvégezni, akkor remény van arra, hogy a bakteriorodopszin mint protonpumpáló fehérje működésének teljes termodinamikai leírását el tudjuk végezni [4, 5].

A baj csak az, hogy az (1) egyenletben az intermedierek spektrumát sem ismerjük. Ennek két oka van. Egyrészt a spektrumok erősen átfednek egymással, és egyébként is meglehetősen részletszegények, másrészt az intermedierek kinetikailag is átfednek, azaz bármikor is „nézünk rá” a mintára a gerjesztés után, mindig több intermedier ismeretlen arányú keverékét fogjuk látni. Még abban sem lehetünk biztosak, hogy mennyi az intermedierek teljes száma.

Ha abszolút biztos megoldásban nem is, jó közelítő megoldásban azért reménykedhetünk [6]. A mátrixalgebrából ismert szingulárisérték-felbontás segítségével megbecsülhetjük a spektrálisan különböző intermedierek számát, és kapunk egy ortonormált bázisspektrumkészletet (\mathbf{U}), továbbá egy ennek megfelelő ortonormált

3. *ábra*. A bakteriorodopszin abszorpciós spektruma és a kinetikus sokcsatornás spektroszkópiai adatok kemometriai kiértékelésével kapott intermedier-spektrumok.



kinetikai bázist (\mathbf{V}). Az utóbbit – pontosabban az $\mathbf{S}\mathbf{V}^T$ szorzatot – a kemometriában kombinációs együtthatóknak nevezik:

$$\mathbf{D} \equiv \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T. \quad (2)$$

Tekintve, hogy a \mathbf{D} mátrix minden oszlopa, azaz minden mért differenciaspektrum kikeverhető az \mathbf{U} bázisvektorairól, arra törekszünk, hogy az ismeretlen „tisztá” intermedier-spektrumokat is ebből a bázisból keverjük ki. Az eljárás, melyet emiatt angolul *self-modeling*-nek neveznek, matematikai értelemben nem szükségképpen kell, hogy eredményre vezessen, de a tapasztalat szerint a bakteriorodopszin fotociklusa esetében eredményes. A keresést egy, az \mathbf{U} dimenziójánál eggyel kisebb dimenziójú, úgynevezett sztöchiometriai hipersíkon végezzük, kihasználva azt a megszorítást, hogy az intermedierek koncentrációja összegének meg kell egyeznie a kiinduláskor gerjesztett molekulák koncentrációjával:

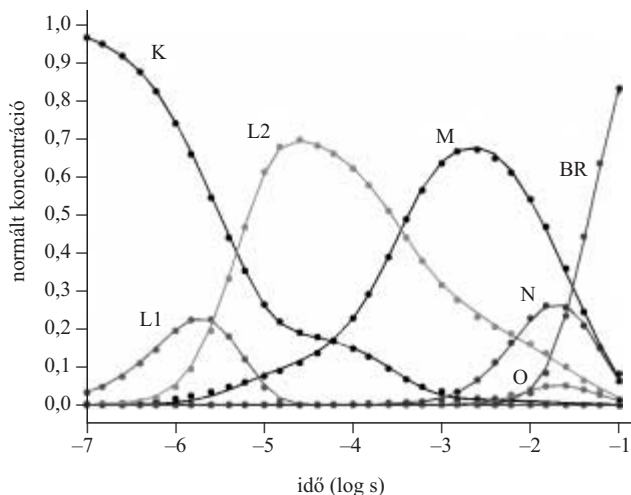
$$\sum_{j=1}^k |\mathbf{c}_j\rangle = |\text{konstans}\rangle, \text{ ahonnan } \sum_{j=1}^k |\mathbf{V}_j\rangle \mathbf{R}_j = |1\rangle \quad (3)$$

és a hipersíkot definiáló \mathbf{R} vektor legkisebb négyzetes illesztésből meghatározható.

További segítséget nyújt a keresésben egy sor, a retinálfehérjék spektrumára nézve megkövetelhető feltétel, melyek közül a legegyszerűbbek a nemnegatív abszorpció és az egyetlen, széles abszorpciós sáv kívánalma. Az eljárás eredményeképpen a 3. *ábrán* látható spektrumokat kapjuk a 2. *ábra* adatainak kiértékeléséből [7]. Mint az régóta ismert, az M intermedier spektrumának erős kékeltolódását az okozza, hogy ekkor a Schiff-bázis leadja a protonját a szomszédos Asp85 aminosavnak, ami a protonpumpa első lépését jelenti. A többi intermedierben a Schiff-bázis protonált, és a kisebb eltolódásokat a retinál változó konformációja, valamint a működés közben változó fehérjekörnyezet (töltéseloszlás, polarizálhatóság, hidrogénhidak) okozza.

Kinetika és működési mechanizmus

A spektrumok ismeretében az intermedierek koncentrációinak időbeli lefutása legkisebb négyzetes illesztéssel kapható az (1) egyenletből (4. *ábra*, szimbólumok). Két szembevetülő tulajdonság rögtön megállapítható a 4. *ábráról*. Egyrészt jól látszik az intermedierek időbeli átfedése, másrészt az is, hogy bizonyos intermedierek sok nagyságrenden átívelő és „lépcsős” kinetikája csak úgy magyarázható, ha valójában itt spektrálisan megkülönböztethetetlen állapotok koncentrációjának burkológömbjét látjuk. Ezért tehát a fotociklust leíró reakció-sémának kinetikai okokból kellően bonyolultnak kell lennie. A tapasztalat szerint nincs is remény arra, hogy teljesen „vakon”, csak matematikai problémának tekintve a feladatot, megtaláljuk a helyes fotociklus sémát. Szerencsére elég sok ismeret halmozódott fel a bakteriorodopszin működéséről az elmúlt évtizedekben ahhoz, hogy megpróbálkozhassunk egy „konszenzus” séma felállításá-



4. ábra. A bakteriorodopszin intermedierjeinek kinetikája 5 °C hőmérsékleten és 6,0 pH-értéken. A szimbólumok az adatmátrixnak a spektrumokkal való illesztéséből meghatározott koncentrációk. A folytonos vonalak a fotociklus séma illesztésének eredményei *Groma Géza* programjának (rate2.1) felhasználásával.

val, és megvizsgáljuk, hogy ez milyen jól illeszti az adatainkat, és hogy az illesztésből kapható reakciósebességeknek van-e, illetve mi a fizikai értelme. A világszerte felhalmozott ismeretanyag részben más típusú kísérletekből származik. Ilyen például a röntgenkristallográfiás szerkezetmeghatározás, a kinetikus infravörös spektroszkópia, a magmágneses rezonancia (NMR) spektroszkópia, a proton vizes fázisbeli megjelenésének és eltűnésének mérése pH-indikátor festékekkel, valamint a töltésmozgást kísérő elektromos jelek közvetlen mérése – ez utóbbi módszer elsősorban *Keszthelyi Lajos, Ormos Pál, Váró György, Dér András, Groma Géza és Tóth-Boconádi Rudolf* munkássága nyomán [8, 9]. Feltételezzük továbbá, hogy a fotociklus reakciói elsőrendűek és reverzibilisek. Ha valamely lépés mégis irreverzibilis, ennek ki kell derülnie abból, hogy az illesztésből kapott sebessége legalább 3–4 nagyságrenddel nagyobb, mint a fordított reakcióé.

Az általunk javasolt fotociklus sémája az 5. ábrán látható azzal az egyszerűsítéssel, hogy eltekintünk egy savas pH-értékeken fellépő elágazástól. Az alábbiakban a fotociklus és a protontranszport egyes molekuláris lépéseit ismertetjük *Lányi János* (Kaliforniai Egyetem, Irvine) modellje alapján [10], és bemutatjuk, hogy ez a modell hogyan tükröződik az 5. ábra sémájában, és az illesztésből milyen sebességi állandók adódnak.

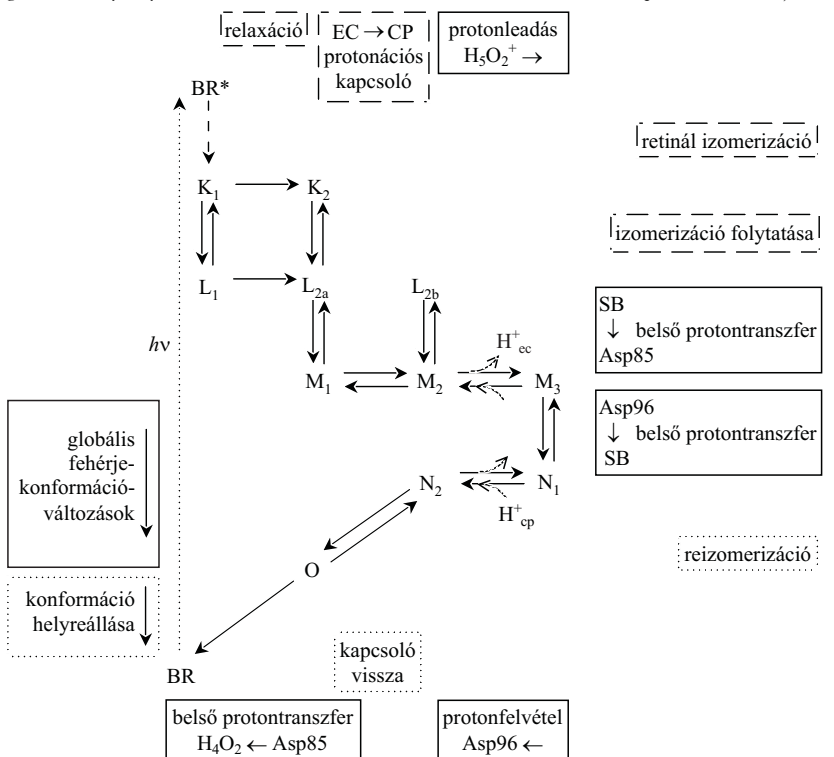
A retinál izomerizációja a $C_{13} = C_{14}$ kettős kötés körül nagyrészt, de nem teljes egészében, a K intermedier ki-

alakulásával megtörténik, ugyanakkor a fehérje üregének alakja még nem alkalmazkodik az új helyzethez. Az ebből adódó feszültségek miatt a retinál több kötési szöge csak később tud relaxálódni. Mivel a korai és későbbi L formák között spektrális különbséget is ki tudunk mutatni, fel kell tételeznünk, hogy a Schiff-bázis és a töltött Asp85 és Asp212 aminosavak között megbomlott kapcsolat helyreállása – ami a $K \rightarrow L$ spektrális átmenetben nyilvánul meg –, valamint a retinál egyéb kötéseinek relaxációja elkülönült folyamatok. Érdekes módon az utóbbiak az illesztésből egyirányúnak adódtak, ami talán nem is meglepő. Ezeknek a folyamatoknak a sebességi állandói a $10^{4,8} - 10^{5,7} \text{ s}^{-1}$ tartományba esnek.

Általánosan elfogadott nézet szerint a fehérje a protont több lépésben, részben a lyukvezetésre emlékeztető módon transzportálja. Az első lépés a gerjesztés előtt a Schiff-bázison lévő proton átugrása az akceptor Asp85 oldallánra. Ez, a sémánkban $L_{2a} \rightarrow M_1$ -ként jelölt átmenet egyrészt igen gyors ($10^{8,3} \text{ s}^{-1}$), másrészt nemhogy reverzibilis, de a fordított reakció még gyorsabb. A folyamatot tehát úgy lehet elképzelni, hogy mikor a feltételek kialakultak erre, a proton szinte „rezonál” a két hely között, de egyelőre még jobban érzi magát a Schiff-bázison.

A következő lépés a vektoriális protontranszfer szempontjából döntő jelentőségű. A Schiff-bázisnak deprotonált állapotában (azaz az M_1 állapotban) el kell fordulnia

5. ábra. A bakteriorodopszin fotociklusának sémája és az egyes lépések molekuláris jelentése. A sémát semleges és lúgos pH-ra javasoljuk, utóbbi felel meg a baktérium természetes élőhelyének. Egy sorban található a fő intermedierek spektrálisan azonos alállapotai. Kivételt képez az L intermedier, ahol az L_{2a} és L_{2b} azonos spektrumú, de az L_1 ettől kissé különböző (3. ábra). A magyarázó „dobozok” a velük azonos sorban, illetve oszlopban található nyilakra, azaz eseményekre vonatkoznak. A vastag szaggatott vonallal keretezett lépések a retinálra és közvetlen környezetére korlátozódó „lokális” konformációváltozások. A vastag folytonos keret a fehérje távolabbi helyeire is kiterjedő „globális” konformációváltozást jelöl. A protonok mozgását vékony folytonos kerettel láttuk el. A konformáció visszaalakulását pontozott keret jelöli.



az akceptortól a másik, azaz a citoplazmatikus oldalra, hogy az ott protonált állapotban várakozó Asp96 donortól át tudjon ugrani rá a proton. Ha ez nem történne meg, akkor az Asp85 protonálná újra a Schiff-bázist, főleg nagy külső oldali protonnyomás esetén, lerontva ezzel a protonpumpa határfokát, vagy teljesen megakadályozva annak működését.

Az intermedier-koncentrációk illesztéséből kiderült, hogy a Schiff-bázis és az Asp85 közötti kapcsolat nem szakad meg teljesen az extracelluláris \rightarrow citoplazmatikus protonációs kapcsoló lépés után sem, azaz ekkor is van lehetőség arra, hogy az Asp85 visszaadja a protont a Schiff-bázisnak, ami egy újabb, L_{25} -vel jelölt állapot kialakulásához vezet. A kapcsoló után azonban a Schiff-bázis és az Asp85 közötti protoncsere sebességi állandói 2,5–4 nagyságrenddel kisebbek, mint a kapcsoló előtt, ráadásul az egyensúly itt már a deprotonált Schiff-bázis javára tolódik el. A jelentősen lelassult protonátmeneteknek kézenfekvő a fizikai magyarázata: míg a kapcsoló előtt a Schiff-bázist és az Asp85-öt közvetlen, hidrogénkötésekből álló protonvezető csatorna köti össze egy vízmolekula közbeiktatásával, addig a kapcsoló után ilyen csatorna nem látható a röntgenkristallográfiás adatokból.

A fehérje közepén megbomlott töltésgyensúly és a vízmolekulákat is magában foglaló hidrogénkötések hálózatának megbomlása azzal jár, hogy az Arg82 oldallánc elfordul az extracelluláris felszín irányába, és ez magával vonja egy proton „kilökését” az ott elhelyezkedő, feltehetőleg két, protonált vízmolekulából álló klaszterből (ún. Zundel-ionból). A sejtén kívül megjelenő proton tehát nem azonos a Schiff-bázisról elmozdult protonnal – innen a lyukvezetéssel való hasonlatosság. Ez a lépés már elég lassú (milliszekundumos), a fordítottja szintén, és az ráadásul protonkoncentráció-függő, hiszen proton felvételét jelenti a vizes fázisból. Ismert az is, hogy a protonleadást „megérzi” a Schiff-bázis környezete is, azaz a protonleadó klaszter és az Asp85 protonaffinitása egymáshoz kapcsolt. Ez azt jelenti – mint ahogy az a modellillesztésből kiderült –, hogy a protonleadás után már lassan sem képes az Asp85 visszaadni a saját protonját a Schiff-bázisnak, azaz a protontranszfer vektorialis volta végképp eldőlt. A Schiff-bázis „kénytelen” a másik oldalról, az Asp96 protodonorról pótolni elveszített protonját.

Ez a folyamat ($M_3 \rightarrow N_1$) és fordítottja is meglehetősen lassúnak bizonyult, 10^2 s^{-1} nagyságrendű sebességi állandóval. Ennek két oka is van. Egyrészt a gerjesztés előtt nincs folytonos hidrogénhíd-összeköttetés a Schiff-bázis és az Asp96 között (a távolság kb. 11 Å), ennek tehát előbb ki kell alakulnia, mégpedig belépő vízmolekulák közvetítésével. Másrészt az elektromosan semleges Schiff-bázis–Asp96 párból töltésszétválasztás útján kell ionpárt létrehozni a kis dielektromos állandójú fehérjében, amelynek nagy lehet a potenciálgátja.

A következő lépésben az Asp96 a belső vizes fázisból pótolja elvesztett protonját. A folyamat meglehetősen gyorsnak adódott (μs -os tartomány), és nyilván pH-függő. Röntgenkristallográfiás és egyéb (pl. elektronspin-rezonancia) módszerekkel egyértelműen kimutatható volt, hogy a fotociklusnak ebben a stádiumában a fehérje

retináltól távolabbi részein is konformációváltozások történnek, elsősorban a hélixek tengelyének kis elfordulásai, aminek az eredményeképpen a fehérje belsejébe vízmolekulák tudnak belépni, ezzel elősegítve a proton felvételét. A retinál fotoizomerizációjával létrejött lokális konformációváltozás ekkorra tehát – ha nem is nagy, de globális konformációváltozást eredményez, azaz a kezdetben kis térfogatra korlátozódó többletenergia „szétterül” a fehérje teljes térfogatára.

A fotociklus végén helyre kell állítani a fehérje és a retinál szerkezetét, valamint a töltéeloszlást. A retinál reizomerizációja az $N_2 \rightarrow O$ lépéshez köthető. A töltésgyensúly helyreállításához még egy belső protontranszfer-lépés szükséges: az Asp85-ről a protonkibocsátó vízmolekula-klaszterre. Egyelőre nem tudjuk megmondani, hogy a fehérje konformációjának végső visszarendeződése egybeesik-e ezzel a lépéssel, vagy esetleg tőle független. Mint az a 4. ábrán látható, az O intermedier általában nagyon kis mennyiségben halmozódik fel, és ezért a kinetikájából igen nehéz pontos következtetéseket levonni. Az viszont nagy biztonsággal állítható, hogy az utolsó lépés egyirányú, mert ellenkező esetben a fotociklus végén a kiinduló állapot és az intermedierek valamilyen keverékét kapnánk meg.

Kitekintés

A bakteriorodopszin működését nagy vonalakban már értjük, noha részletkérdésekben és a pontos, kvantitatív termodinamikai leírásban még van tennivaló. Azaz tudjuk, hogy mi történik, de nem tudjuk elég pontosan, hogy hogyan és miért. Ez ügyben a kísérleti vizsgálatok mellett egyre fontosabbá válnak a molekuladinamikai, kvantumkémiái, illetve a kettőt kombináló hibrid számítások. A programok és a processzorok rohamos fejlődésével ma már lehetőség van a fotociklus egyes lépéseinek a modellezésére is.

A bakteriorodopszin a fény által hajtott protonpumpa iskolapéldája, és a maga viszonylagos egyszerűségében mind a működését, mind pedig a kezelését, stabilitását illetően nagyon sok mindenre megtanított bennünket a fehérjék szerkezetére, működésére, az iontranszport mechanizmusára vonatkozóan. Az élet azonban, mint általában, sokkal bonyolultabb. A fotoszintézisben és az oxidatív foszforilációban szerepet játszó fehérjekomplexek nem egy – például fényel kiváltott – közvetlen konformációváltozást, hanem redox reakciókat kapcsolnak össze a protontranszporttal. A mechanizmus tehát részben hasonló (lehet), részben azonban biztosan nagyon különböző attól, amit a bakteriorodopszintól megtanultunk. A legtöbbet a mitokondriális elektrontranszfer utolsó (negyedik) komplexének, a citokróm c oxidáznak a működéséről tudunk. Ez a legalább 3 alegység, a bakteriorodopszinnál jóval nagyobb fehérje négy, egymás után megkötött citokróm c fehérjétől kap 1–1 elektront, ezeket két kofaktoron át eljuttatja a belsejében lévő aktív (katalitikus) helyre, ahol egy megkötött oxigénmolekulát a vizes fázisból felvett 4 proton segítségével két vízmolekulává redukál. A redox reakcióban

felszabaduló energiát a fehérje arra használja fel, hogy minden belépő elektronra 1–1 protont pumpál át a membrán belső oldaláról a külsőre. Úgy is felfoghatjuk, hogy minden felvett elektronra egy a bakteriorodopszin működéséhez hasonló protontranszport-ciklus játszódik le, de nem lehetünk biztosak afelől, hogy ez mindig egyformán, vagy esetleg minden elektronra máshogyan történik. A protonok felvételének és leadásának útvonaláról már vannak ismeretek, de a molekuláris részletekről még nagyon keveset tudni. Ha ehhez még hozzávesszük, hogy a mitokondriumban a másik három komplexből kétfő szintén protonpumpaként működik, nem lehet kétségünk afelől, hogy még jó ideig lesz mivel foglalkozniuk a – valódi – bioenergetikusoknak.

Irodalom

1. P. MARÓTI, G. LACZKÓ: *Bevezetés a biofizikába* – JATE Press, 2001.
2. H. HOUJOU, Y. INOUE, M. SAKURAI – J. Phys. Chem. B *105* (2001) 867–879
3. B. SCHOBERT, J. CUPP-VICKERY, V. HORNAK, S. SMITH, J.K. LANYI – J. Mol. Biol. *321* (2002) 715–726
4. G. VÁRÓ, J.K. LANYI – Biochemistry *30* (1991) 5016–5022
5. K. LUDMANN, C. GERGELY, G. VÁRÓ – Biophys. J. *75* (1998) 3110–3119
6. L. ZIMÁNYI – J. Phys. Chem. B *108* (2004) 4199–4209
7. L. ZIMÁNYI, J. SALTIEL, L.S. BROWN, J.K. LANYI – J. Am. Chem. Soc., közlésre benyújtva.
8. L. KESZTHELYI, P. ORMOS – FEBS Lett. *109* (1980) 189–194
9. A. DÉR, L. OROSZI, Á. KULCSÁR, L. ZIMÁNYI, R. TÓTH-BOCONÁDI, L. KESZTHELYI, W. STOECKENIUS, P. ORMOS – Proc. Natl. Acad. Sci. USA *J. 96* (1999) 2776–2781
10. J.K. LANYI, B. SCHOBERT – Biochemistry *43* (2004) 3–8

SZABÁLYOZOTT MAGFÚZIÓ MÁGNESES ÖSSZETARTÁSSAL II. – EREDMÉNYEK ÉS TERVEK

Zoletnik Sándor

KFKI Részecske és Magfizikai Kutató Intézet,
Magyar EURATOM Fúziós Szövetség

A *Fizikai Szemle* 2005/3 számában áttekintettük a mágneses fúziós kísérletek alapjait és a jelenleg alkalmazott tokamak- és sztellarátor-konfigurációkat. A cikk második részében a modern berendezésekkel elért eredményekről, fúziós technológiáról és a tervezett reaktorparaméterű kísérletről lesz szó.

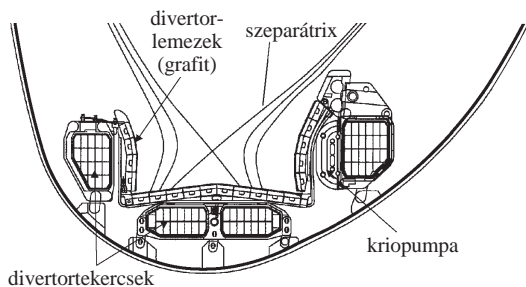
A tokamakok aranykora

A szovjet tokamak-kísérletek eredményeinek megerősítése után a hetvenes-nyolcvanas években egyre nagyobb és nagyobb tokamakokat terveztek és építettek az egész világon. Az első berendezéseknél a tórusz sugara még csak 30–40 cm volt, ez a nyolcvanas évek közepére 3–4 méterre nőtt. A méretnövekedést az az egyszerű tény indokolja, hogy nagyobb méretű test lassabban hűl, mivel viszonylag kisebb a felülete. Emellett ismert lett az is, hogy a plazma belseje felé haladva a sűrűség és a hőmérséklet nem növekedhet akármilyen gyorsan, egy kritikus meredekség felett instabilitások lépnek fel. Ebből következik, hogy adott sűrűség és hőmérséklet eléréséhez a plazmának egy minimális méretet el kell érnie. Egy reaktorplazmának még azért is több méteresnek kell lennie, mivel a reakcióban keletkező α -részecskék (hélium atommagok) Larmor-pályájának sugara fél méter nagyságrendű. A fúziós égés beindításához az α -részecskéket a mágneses térben kell tartani, így a plazma méretének sokkal nagyobbaknak kell lennie a Larmor-pálya sugaránál.

A plazma fűtését az első berendezésekben a plazmaáram Joule-hője oldotta meg (ohmikus fűtés, akárcsak egy rezsóban), de már a kezdetektől nyilvánvaló volt, hogy ezen a módon a magfúzióhoz szükséges hőmérsékletet nem lehet elérni. A plazmaáram értékét ugyanis a kívánt

mágneses konfiguráció meghatározza, az ellenállása azonban a hőmérséklet növekedésével $R \sim T^{-3/2}$ szerint csökken, így a $P = I^2 R$ fűtési teljesítmény is visszaesik. 1 keV (10 millió °C) hőmérséklet könnyen elérhető ohmikus fűtéssel, de a fúzióhoz szükséges 10^8 °C már nem. A magasabb hőmérséklet eléréséhez kiegészítő fűtési eljárásokat dolgoztak ki. Az egyik megoldásban a plazmába 50–100 keV-es semleges atomnyalábot lőnek be. A semleges részecskék a mágneses téren akadálytalanul áthatolnak, de a forró plazma ionizálja az atomokat, és így már a mágneses tér csapdájába esnek. A többi plazmarészecskével ütközve lassan leadják energiájukat és fűtik a plazmát. Más megoldásokban olyan rádióhullámokkal sugározzák be a plazmát, amelynek frekvenciája megegyezik vagy az elektronok, vagy az ionok ciklotronfrekvenciájával, elnyelődnek a plazmában, és így a plazma valamelyik komponensét fűtik. Mivel időközben a berendezések mérete nagyra nőtt, a kiegészítő fűtésektől megkívánt teljesítmény is megawattokra rúg. Itt már nem egyszerű labor-kísérletekről, hanem ipari méretű technológiai kísérletekről van szó! Ezekkel a kiegészítő fűtésekkel a plazma hőmérséklete már elérte a fúzióhoz szükséges értéket.

A legtöbb berendezés csak plazmafizikai kísérleteket szolgál, így hidrogén- vagy deutériumplazmával működik, de a 90-es években először az amerikai TFTR, majd az Európai Unió JET berendezésén rövid időre több MW fúziós teljesítményt értek el deutérium-trícium plazmában. Meg kell jegyezni, hogy a szovjet-orosz kutatások a nyolcvanas évek közepén részben pénzügyi, részben technikai problémák miatt megrekedtek. Az 1985-ben indítani tervezett T-15 tokamak, amelyhez a számítógéprendszerrel a KFKI építette, sohasem indult el. A kutatók felhalmozott tudása viszont a világ különböző kísérleteinél hasznosul.

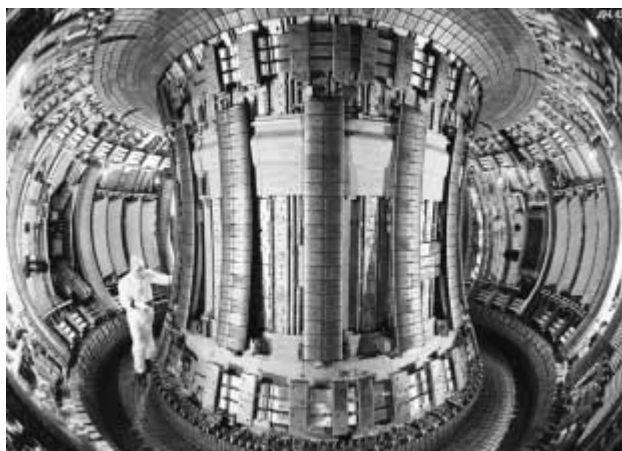


1. ábra. Divertor elrendezés a JET tokamakon. A rajzon a plazma alsó részének metszete látható. A szevátrixon kívüli tartományban (az X alakú vonaltól kifelé) az erővonalak néhány toroidális körülfutás után metszik a divertorlemezeket. (Az ábráért köszönet a JET-nek és a European Fusion Development Agreementnek.)

A fűtés mellett másik fontos kérdés a mágneses tér előállítás. A nagy tokamakokhoz erős mágneses terekre van szükség, mégpedig nagy térfogatokban. Az ezt előállító tekercsekben a vezetők kis ellenállása is nagy veszteségi teljesítményt okoz. Például a legnagyobb tokamakon, a JET-en a mágneses teret keltő áramok fenntartására közel tízszer annyi teljesítményt fordítanak (kb. 200 MW, ami a paksi atomerőmű teljesítményének 10%-a), mint a plazma fűtésére. Ez nyilvánvalóan megengedhetetlen egy energia-termelő reaktorban, ezért egy fúziós erőműnek mindenképpen szupravezető tekercsekkel kell rendelkeznie, amelyekben az áram ellenállás nélkül folyik. A szupravezető tekercsek működéséhez körülbelül -270 °C -ra kell őket hűteni. Bár ez elég nehéznek tűnik egy 100 millió fokos plazma közelében, mégsem okozott megoldhatatlan feladatot. Szupravezető tokamakok már az 1970-es évek óta épülnek, és ma már ezek elkészítése és üzemeltetése sem okoz gondot. Szupravezető tekercsekkel felszerelt fúziós berendezésekben a mágneses tér fenntartása a tekercsek hűtésére fordított teljesítménnyel együtt is sokkal kevesebb teljesítményt emészt fel, mint a plazma fűtése.

A fűtés és a mágneses tér mellett egy fúziós berendezés harmadik fontos eleme a gázcsere megoldása, amellyel a plazmából a szennyező részecskék és a fúzióban keletkező hélium kiszűrhető, és a friss üzemanyag bejuttatható. Erre a célra kifejlesztették a *divertor* nevű szerkezetet (lásd 1. ábra). Ez úgy működik, hogy kiegészítő tekercsekkel a plazma szélén egy *szevátrix* felületet hoznak létre. Az ezen belül levő mágneses felületek topológiája változatlan marad, a kívül esők viszont néhány körülfutás után eltávolodnak a szevátrixtól és kifutnak a berendezésből. Ahol az erővonalak kifutnak a vákuumkamra falára, nagy hőállóságú (tipikusan grafit-) burkolat található. Ezekon a *divertorlemezek*en a plazma semlegesítődik, és az eközben a lemezekből kilökött szennyező atomok nem nagyon jutnak vissza a fő plazmába. A plazma anyagutánpótlását a kevésbé hatékony gázbefűjás mellett kis, fagyasztott hidrogén jégdarabok (*pelletek*) belövésével szintén megvalósították.

Tokamak berendezéseken alapvető feltétel a plazmaáram fenntartása. Ez rövid ideig egy transzformátor segítségével indukív úton biztosítható, de folytonos üzemben ez nem lehetséges. Az áram hajtására olyan mikrohullámú eszközöket fejlesztettek ki, amelyek a képesek a plazmában az elektronokat egy irányban gyorsítani és ezzel transzformátor nélkül áramot kelteni. Nagynyomá-



2. ábra. A világ legnagyobb tokamakja, a JET karbantartás idején. A berendezés alján körülfutó árok a divertor, amely más nagy hőterhelésnek kitett tartományokkal együtt grafitéglákkal van burkolva. A kamra falán az ember mögött látható ferde panelok ion-ciklotronrezonancia-fűtőantennák. (A kép közreadásáért köszönet a JET-nek és a European Fusion Development Agreementnek.)

sú plazmában egy különös jelenség is segít a plazmaáram hajtásában. A csavarodó erővonalak mentén a tórusz belső és külső oldala között mozgó elektronok erősebb mágneses teret éreznek a tokamak belső oldalán, és egy részük erről mint mágneses tükörről visszaverődik és befogódik egy zárt pályára: ide-oda jár a tokamak külső és belső oldala között, és eközben lassú driftmozgást is végez. Ennek eredményeképpen az egyik irányban haladva közelebb megy a plazma sűrű közepéhez, mint a másik irányban. A többi részecskével való ütközés miatt egy adott pontban a sűrű tartomány felől több befogott részecske érkezik, mint a másik irányból. Ez a sebességaszimmetria az ütközések révén átadódik a nem befogott elektronoknak is, így állandóan aszimmetriát pumpál az elektronok erővonal menti mozgásába, és plazmaáramot kelt. Ez a folyamat nagyon szép példája az egyrészecske- és a kollektív mozgások közötti kölcsönhatásnak. A plazma nyomásgradiense tehát képes áramot kelteni. Ez a 90-es években kísérletileg is kimutatott „bootstrap-áram” nevű jelenség számítások szerint egy reaktor paramétereit berendezésben akár a plazmaáram felét is fedezheti.

Bár a 70-es és a 80-as évek egyértelműen a tokamak berendezések jegyében teltek, néhány kisebb csoport folytatta a sztellarátorok fejlesztését. A számítástechnika fejlődésének hatására tudtak már olyan tekercsrendszert is tervezni, amely a plazmában folyó áram és helikális tekercsek nélkül hoz létre csavart térszerkezetet. A geometriát úgy optimalizálták, hogy a részecskék neoklasszikus transzportját minimalizálják és az összetartható plazma nyomását maximalizálják. Ezek a berendezések néhány (3–5) azonos modulból állnak, melyeken belül minden tekercs különböző. Egy ilyen *moduláris sztellarátor* tekercsrendszert mutat a 3. ábra.

A 70-es és 80-as években megterveztek és kipróbáltak egy fúziós reaktor legtöbb elemét. Rengeteget fejlődött a technika, és kialakultak azok a mérési eljárások is (*diagnosztikák*), amelyek betekintést engednek a plazma belső folyamataiba. A különböző méretű berendezések eredményeinek összehasonlításából empirikus skálator-

vényeket állítottak fel, amelyekből becsülni lehetett, mekkora berendezés kell egy reaktor megvalósításához. A technikai előrehaladással párhuzamosan lassan fény derült arra is, hogy mi történik a plazmában.

Önszerveződés a plazmában

Az előző fejezetben leírt, világos technikai fejlődési folyamat látszólag egyenes úton vezetett az elért eredményekhez, valójában azonban az gazdag volt izgalmas pozitív és negatív fordulatokban. Az első szovjet tokamak kísérletek után különböző méretű berendezések épültek szerte a világon, először kizárólag ohmikus fűtéssel és divertor nélkül. Bár a plazmában zajló transzportfolyamatok részletei nagyrészt ismeretlenek voltak, mégis az egy méter körüli nagysugarú tokamak berendezések eredményeiből empirikusan extrapolálva úgy nézett ki, hogy 3 m körüli nagysugarú deutérium-trícium keverékkel működő tokamak elérhető lenne a $Q = 1$ energiamérleg, ha az akkor használt ohmikus fűtés mellé az előző fejezetben bemutatott kiegészítő fűtések is megvalósítanák. Ez ugyan még nem reaktor, de már nagyon közel van ahhoz, ezért az USA-ban és Európában is tervek készültek nagyméretű D-T tokamakokról. Princetonban 1982-ben indult meg a TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*), amely egy hagyományos kör keresztmetszetű berendezés. Európa még ambiciózusabb tervet dolgozott ki, egy hatalmas D keresztmetszetű tokamakot (JET). A speciális alak oka az volt, hogy adott méret esetén így nagyobb plazmatérfogatot lehet elérni, másrészt az MHD számítások szerint egy hosszúkás keresztmetszetű plazma magasabb nyomásig stabil. Az ohmikus fűtésű kezdeti kísérletek mindkét berendezésnél igazolták a várakozásokat, azonban a kiegészítő fűtések megindításakor igen kedvezőtlen tendencia rajzolódott ki: a fűtés teljesítményével körülbelül $P^{-1/2}$ szerint csökken a plazma energia-összetartási ideje. Ez a jelenség egyrészt teljesen érthetetlen volt, másrészt azt jelentette, hogy egy fúziós reaktor szükséges méreteinek sokkal nagyobbaknak kellene lenniük, mint azt eredetileg gondolták.

A reménytelennek tűnő helyzetből kiutat látszott mutatni az 1982-ben a garchingi (Németország) ASDEX (*Axially Symmetric Divertor Experiment*) tokamakon véletlenül felfedezett jelenség. Ez volt az első berendezés, amelyen az előző fejezetben leírt tengelyszimmetrikus divertor koncepcióját megvalósították. Azt találták, hogy bizonyos paramétertartományban a plazma spontán módon átugrik egy hosszabb energia-összetartási idővel jellemezhető állapotba. Ezt az állapotot elnevezték „H-mode”-nak (*high confinement*), hogy megkülönböztessék az „L-mode”-nak elnevezett hagyományos működéstől. Ezután rövid idő alatt mindenféle üzemmódokat találtak különböző berendezésekben, amelyek jó része csak egy berendezésen és speciális esetekben jelentkezik. A fúziós plazmafizika kezdett a zoológiára hasonlítani, a kevés mért paraméter alapján próbálták a különböző méretű és geometriájú berendezések eredményeit összehasonlítani. A kilencvenes évek elejére a kép tisztulni kezdett. A „H-mode”-ot minden divertoros tokamak, sőt a legnagyobb moduláris sztellarátor is reprodukálni tudta. Nem divertoros berendezé-



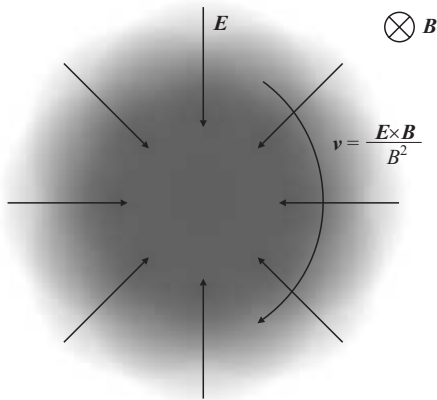
3. ábra. A Németországban építés alatt álló Wendelstein 7-X szupravezető sztellarátor moduletekerceinek számítógépes képe (az előtérben levő tekercek nélkül). Ezt a tekercksrendszert körülveszi még egy közös toroidális tekercs. A tekerceken belüli szalag a plazma. A csavarodó mágneses teret a tekerceken csavarvonalonban végigfutó alak adja. A berendezés átmérője körülbelül 10 m. (A kép közreadásáért köszönet a Max-Planck-Institut für Plasmaphysiknek.)

sekben is elő lehetett ezt az állapotot idézni a plazma szélén egy elektromos tér alkalmazásával. A plazmadiagnosztika fejlődésével aztán kiderült az is, mi történik az „L-H” üzemmódok átmeneténél: a plazma szélén megjelenik egy néhány centiméter vastagságú réteg, amelyben a hő- és részecsketranszport sokkal alacsonyabb értékű, mint mélyebben a plazmában (transzportgát). Olyan ez, mintha egy paplanba csomagolnánk a plazmát, és ezzel tartanánk melegen. Hogy megértsük, hogyan történik ez, vissza kell nyúlnunk a plazmán belüli transzportfolyamatokhoz.

Az előző fejezetben azt írtuk, hogy az elmélet szerint a mágneses felületeken keresztül a részecske- és hőtranszport az ütközések és driftmozgás által meghatározott neoklasszikus diffúzióval történik. Az elméletben ez valóban így is volt, a gyakorlatban azonban már a hetvenes években is látszott, hogy a hődiffúzió nagyságrenddel nagyobb, mint a neoklasszikus elméletből számolt. Ahogy a diagnosztika fejlődött, lehetővé vált sűrűség-, hőmérséklet-, sugárzási és egyéb profilok megbízható mérése, és ezek alapján az effektív transzportegyütthatók kiszámítása. Az eredmények igazolták a korábbi sejtéseket, hogy a mágnesesen összetartott plazmákban a transzport általában nem neoklasszikus, ezért elnevezték *anomális transzportnak*.

Az anomális transzport értelmezésére már a hetvenes években is születtek elképzelések. Ezek nagyrészt arra alapoztak, hogy a plazmában rövid hullámhosszú, körülbelül milliméteres hullámok instabilak lehetnek, és ezek az instabilitások (végül is a plazma kollektív viselkedése) okozhatja az anomális transzportot. Ha instabil hullámok vannak a plazmában, azoknak fluktuációkat kell okozniuk a plazma paramétereiben, ezért számos diagnosztikát fejlesztettek ki fluktuációk mérésére. A 80-as, 90-es évek mérései azután megmutatták a fluktuációk általános tulajdonságait:

- Nem láthatók karakterisztikus hullámhosszak vagy frekvenciák: a spektrumok egy érték felett $k^{-\alpha}$ vagy $f^{-\alpha}$ függést mutatnak.
- A fluktuációs amplitúdó a plazma szélén 10–50%, a plazma középső tartományaiban viszont csak 0,1–1%.
- A korrelációs hosszak tipikusan cm körül vannak, szemben az instabilnak gondolt hullámok milliméteres hullámhosszával.
- A mágneses tér fluktuációja kicsi, a fluktuációk elektrosztatikusak.

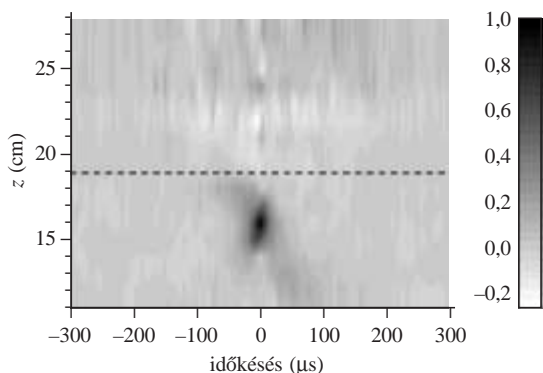


4. ábra. Elektrosztatikus örvény a plazmában. Az örvény közepén a potenciálmaximum radiálisan befelé mutató elektromos teret kelt, amely az $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift miatt körben mozgatja a plazmát.

Természetesen azonnal felmerül a kérdés, hogy a mágneses tér perturbációja nélkül hogyan transzportálódnak a részecskék a mágneses felületek között, hiszen Larmor-pályájuk középpontja egy mágneses erővonalhoz kötött. A magyarázatot a driftmozgások adják. Mint már említettük, az $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift a plazma minden részecskéjét egyformán mozgatja. Ha a plazmában valahol egy potenciálmaximum keletkezik (lásd 4. ábra), akkor ekörül az elektromos tér körben áramoltatja a plazmát: örvény keletkezik. Egy ilyen véges élettartamú elektrosztatikus örvény megkeveri a plazmát, és így egy térben változó profilon részecskéket és hőt transzportál. Sajnos az ilyen elektrosztatikus örvények kísérleti kimutatása nagyon nehéz, mert elektromos teret (potenciált) jó hely- és térbeli felbontással csak a plazma szélén tudunk szondákkal mérni. Ezek a szondamérések azonban valóban ki is mutattak korrelált potenciál- és sűrűségfluktuációkat, amelyekből számolt elektrosztatikus turbulens transzport magyarázatot adhat a mért globális anomális transzport nagyságára. Az egyszerű örvények mellett a mérések még azt is kimutatták, hogy időben erősen változó folyamatról van szó: csendes szakaszokat nagy kitörések követnek.

A mérések azt is megmutatták, hogy bár vannak különbségek a tokamak- és sztellarátorplazmában, a turbulencia alapjaiban nagyon hasonló. Ez arra utal, hogy az

5. ábra. Sűrűségfluktuációk tér-idő korrelációs függvénye a Wendstein 7-AS sztellarátor plazmájának szélső rétegében. Referenciapont $z = 16$ cm-nél, 43990 sz. lövés. A szaggatott vonal a legkülső zárt mágneses erővonal helyzetét jelöli, ez alatt a plazma érintkezik a vákuumkamrával. (A KFKI RMKI fúziós csoport mérése.)



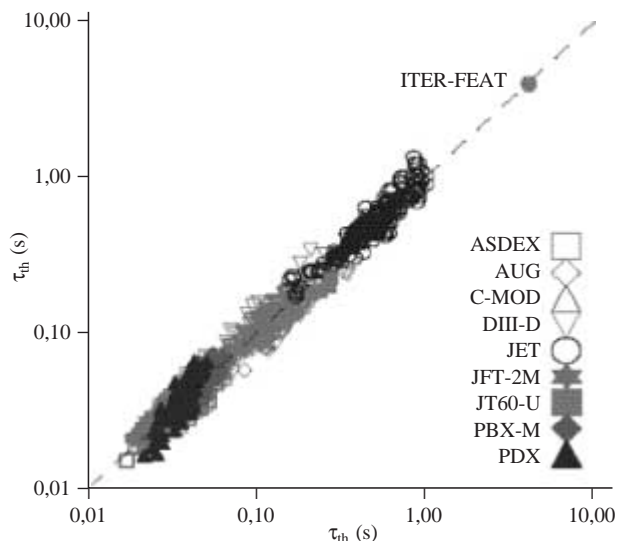
anomális transzport az összes mai berendezésben ugyanarra az alapfolyamatra vezethető vissza. Egy mért tér-idő korrelációs függvényt mutat példaként a 5. ábra.

Az általános tapasztalat, hogy nem találhatók a plazmában karakterisztikus hullámhosszak, megcáfolta azt a feltevést, hogy valamilyen hullám instabillá válik, részecskéket transzportál, majd elhal. A $k^{-\alpha}$ típusú spektrumok a hidrodinamikából ismert nemlineáris turbulenciára utalnak, amelyben sok hullám nemlineárisan hat kölcsön, és az energia a nagyobb hullámok felől áramlik a kisebb hullámok felé. A mérésekből tehát kikristályosodott az a kép, hogy a plazma anomális transzportját *mikroturbulencia* okozza. Azért hívjuk ezt mikroturbulenciának, mert a berendezés méretéhez képest kis örvényekről van szó.

Ha elfogadjuk, hogy a mágneses téren keresztüli transzportfolyamatokat a mikroturbulencia uralja, akkor kvalitatíven érthetővé válik a „H-mode”-ban a plazma szélén kialakuló transzportgát is. A magyarázat alapja az, hogy ha a plazmában a radiális potenciáeloszlásnak maximuma van, akkor a radiális elektromos tér erősen változik. Ez a változó elektromos tér változó sebességű (nyírt) $\mathbf{v}(\mathbf{r}) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) \times \mathbf{B} / B^2$ áramlást okoz a mágneses felületekkel párhuzamosan. Ha az áramlás elég erősen nyírt, akkor az örvényt a differenciális áramlás „szétnyírja”, és így az áramlás hat az effektív turbulens transzportsebességre. Bár az örvények az ionokat és az elektronokat együtt mozgatják, mégis az általuk keltett effektív transzportsebesség különböző lehet az ionokra és az elektronokra, mivel a csatolás az örvény körüli perturbálatlan plazmához alapvetően különböző a különböző tömegű részecskékre. Ennek megfelelően a turbulencia megváltozása hat a plazma radiális potenciáeloszlására is. Ha ez a hatás tovább növeli a potenciálmaximumot, és ezzel a nyírt áramlás erősségét, akkor a plazma átesik egy másik állapotba, ahol a nyírt áramlások lecsökkentik az anomális transzportot. A „H-mode”-ban a magasabb áramlási sebességet és lecsökkent fluktuációs amplitúdót valóban ki is mutatták kísérletileg. Természetesen az áramlási sebesség nem növekedhet akármeddig, így a nyírt áramlás radiális kiterjedése is korlátozott: a plazma szélén csak lokális transzportgát alakulhat ki így. Ez a kvalitatív magyarázat mindenben megegyezik a kísérleti tényekkel, így ma általánosan elfogadott.

A 90-es évek végére a számítógépek teljesítménye olyan szintet ért el, hogy több csoport megkísérelhette a plazmaturbulencia szimulációját. Ehhez általában legalább két-komponensű, kinetikus elméletre alapozott számítógépes kódokat használnak. Az eredmények érdekes mechanizmusokat mutatnak: a turbulencia képes potenciálstruktúrákat és ezen keresztül $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ áramlásokat kelteni, az áramlások visszahatnak a turbulenciára, illetve az áramlások maguk is instabillá válhatnak. Ezek a folyamatok önszabályozó rendszert alkotnak, ahol az áramlások és a turbulencia dinamikus egyensúlyban vannak. Egy ilyen önszabályozó rendszerben természetesen nem meglepő, ha olyan átmenetek lépnek fel, mint amelyet a „H-mode”-nál láttunk.

A plazma önszerveződésére más példákat is találtak. Például azt tapasztalhatjuk, hogy a hőmérséklet-eloszlás meredeksége egy kritikus értékig nő, majd onnan nem változik tovább. A helyzet olyan jellegű, mint amit a granuláris anyagok fizikájában lehet tapasztalni: ha megpróbáljuk egy



6. ábra. Empirikus tokamak adatbázis. A grafikon a tokamakplazma mért energiaösszetartási ideje és más mért paramétereiből – például geometria, sűrűség – a skálatörvény alapján meghatározott energiaösszetartási idő közötti kapcsolatot mutatja. A különböző szimbólumok különböző berendezéseket jelölnek. (A kép közrebocsátásáért köszönet a JET-nek és a European Fusion Development Agreementnek.)

homokdomb meredekséget egy kritikus érték fölé növelni, akkor az megnövekedett transzporttal, lavinákkal válaszol.

Összefoglalva tehát ma úgy látjuk, hogy egy mágnese- sen összetartott fúziós plazma önszabályozó turbulens állapotban van. Az önszabályozás a profilok, a turbulencia és az áramlások kölcsönhatása során valósul meg, és a plazma ezek dinamikus egyensúlya által meghatározott állapotba áll be.

A következő lépés

Láthattuk, hogy egy fúziós reaktor megvalósításához szükséges plazma összetartásának, fűtésének, szabályozásának és diagnosztizálásának módszerei rendelkezésre állnak. A mai legnagyobb berendezések tiszta deutérium-plazmában produkálnak olyan körülményeket, amelyek D–T keverék esetén a $Q = 1$ energiamérleget kielégítik. D–T keverékplazmával ma csak az EU JET tokamakja képes üzemelni, ebben $Q = 0,55$ értéket demonstráltak tranzienzen, és $Q = 0,3$ körüli értéket tartósan.

Az elmúlt körülbelül 20 év kísérletei alapján kialakult egy empirikus skálatörvény, amely a tokamakok H-üzem- módban érvényes energia-összetartási idejét és más paramétereit képes néhány 10%-os pontossággal leírni. Egy példa erre a 6. ábrán látható. A mért energia-összetartási idők két nagyságrendet fognak át, a reaktortartományig még körülbelül 3-as faktort kellene extrapolálni.

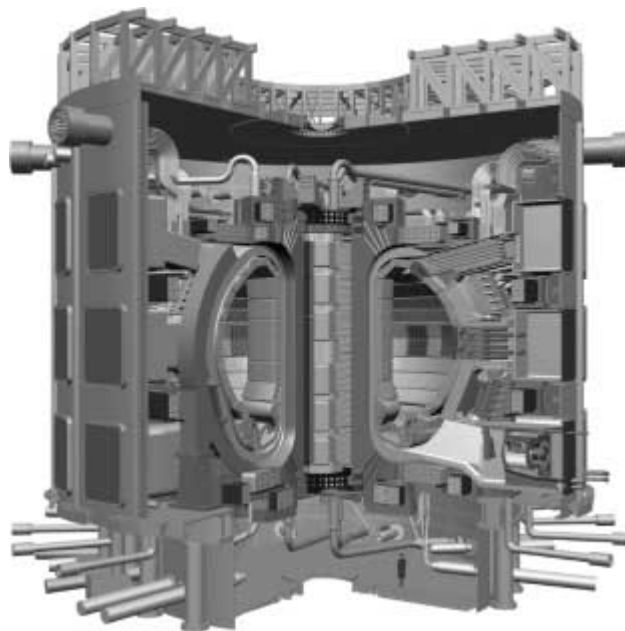
Bár a mai berendezések közel járnak a reaktortartományhoz, egy fontos dolgot mégsem lehet rajtuk vizsgálni: az α -részecskék fűtő hatását és természetesen a begyűjtést. Kérdés, hogy érdemes-e ennek a kérdésnek a vizsgálatára külön berendezést építeni, vagy praktikusabb lenne egy olyan kísérlet, amely egy reaktor technológiai elemeit is vizsgálni képes. Mindkét lehetőségre készültek tervek. Az α -fűtés vizsgálatára az USA-ban terveztek egy FIRE

nevű, a JET-nél kisebb, nagy mágneses terű tokamakot. Ebben réztekerccsekkel állítanák elő a mágneses teret. A tekercek hűtését hőtehetlenségük oldaná meg: a folyékony nitrogén hőmérsékletéről (-160 °C) indulva néhány tíz másodperc alatt felmelegednének a megengedhető maximális hőmérsékletig, így a plazmakisülés csak néhány tíz másodperc lehetne.

A komplex reaktortesztelésre az ITER nevű berendezést tervezték meg még a 90-es években EU–USA–Oroszország–Japán együttműködésben. Az eredeti tervek szerint a berendezés fúziós égést ($Q = \infty$) tudott volna demonstrálni, és teljesítménye körülbelül megfelelt volna egy energiatermelő reaktor teljesítményének. Az amerikai tudománypolitika változásai miatt az USA ebből a projektből 1998-ban kiszállt és saját fúziós kutatásának inkább fizikai alapkutatói irányt választott, közepes méretű és alternatív berendezésekkel. A megmaradó három partner a politika kívánságára áttervezte a berendezést kisebbre és olcsóbbra (7. ábra). A módosított tervek 2002-re készültek el. Ezek szerint az ITER $Q = 10$ energiamérleget tud majd produkálni körülbelül 500 MW fúziós teljesítmény mellett. A plazma standard paramétereit az eddigi berendezések alapján összeállított skálatörvénnyel és szimulációs programokkal határozták meg. A plazmát a jól ismert H-üzem módban tervezik működtetni, annak is az úgynevezett periodikus ELM (*Edge Localised Mode*) instabilitásokat tartalmazó fajtájában. Az ELM periodikusan rövid időre lerontja a plazmaszéli transzportgátat, és ezzel javítja a gázcserét a plazma és környezete között. Jelenleg ez a fajta működés tűnik a legjobbnak, bár az ELM-ek problémát is okoznak. Egy ilyen instabilitás a plazma termikus energiájának néhány százalékát kidobja a divertorlemezre, ahol az nagy, térben és időben lokalizált hőterhelést és a divertor erózióját okozhatja.

Az ITER a tervek szerint egy JET-hez hasonló elrendezésű tokamak lenne, körülbelül kétszeres méretben,

7. ábra. Az ITER berendezés terve. A méreteket a tórusz alatt álló ember sziluettje szemlélteti. A külső határoló henger a kriosztát fala, ezen belül a berendezés a szupravezető tekercek miatt körülbelül 3 K-re van hűtve. (A kép közrebocsátásáért köszönet az ITER tervezőcsoportnak.)



azonban szupravezető tekercsekkel. Ennek megfelelően a mágneses tér fenntartása minimális teljesítményt igényelne. A plazma fűtésére és szabályozására semleges részecskenyalábok, ion- és elektron-ciklotron-fűtés állna rendelkezésre 75 MW összteljesítménnyel. Hagyományos induktív áramhajtással $Q = 10$ mellett 300 másodperces plazmakisüléseket terveznek. Ez a plazmán belül zajló összes folyamat időállandójánál nagyságrenddel nagyobb, tehát plazmafizikai értelemben folytonos működésnek tekinthető. Kiegészítő áramhajtási eljárásokkal $Q = 3$ mellett legalább 1000 másodperces kisüléseket is terveznek, amely már az egész berendezés szempontjából stacionáriusnak vehető. A berendezés nemcsak egy papíron létező elképzelés, hanem számos kulcsalkatrészét meg is építették, és ki is próbálták. Ilyen például a tórusz közepén található központi szolenoid egyik darabja, valamint a vákuumkamra egy szegmense.

Az ITER működését az első 5 évben tiszta deutérium-plazmával tervezik, majd utána kerülne sor D–T működésre. Ehhez a trícium külső forrásból származna, de az ITER-ben különböző tríciumtermelő kazetták tesztelését is tervezik, így a berendezés valóban egy komplex fúziós plazmafizikai és technológiai teszt lenne.

Az ITER plazmaparamétereit elég konzervatív módon igyekeztek megbecsülni, így a kutatók körében általános vélemény, hogy tudni fogja az elvárt paramétereket. További bizakodásra ad okot, hogy az utóbbi években több olyan üzemmódot is kidolgoztak a mai tokamakokon, amelyek a standard ELM-es H-üzemmódnál jobb paraméterekkel rendelkeznek [1]. Az ITER működtetésével szembeni bizonytalan kérdések nem is annyira tiszta plazmafizikai oldalról jelentkeznek. Az egyik bizonytalanság, hogy a ma ismert skálátörvények alapján az egy ELM-ben kidobott energia nagyságát csak nagy bizonytalansággal tudjuk meghatározni. A becsült tartomány alsó határán a divertorok élettartama gyakorlatilag végtelen, a felső határon viszont a plazma eróziója miatt megengedhetetlenül rövid.

A másik kapcsolódó probléma, hogy a ma alkalmazott grafit divertorburkolat nem tűnik alkalmasnak hosszú tríciumműködésre. A plazma a grafitelemeket a nagy terhelésnek kitett helyeken erodálja, majd más helyen a sznet tríciummal együtt lerakja [2]. Ráadásul ezek a lerakott rétegek mechanikailag lazák és könnyen porlanak. A berendezésben felszaporodó néhány száz gramm feletti trícium szigorúbb sugárvédelmet tenne szükségessé, mint amit a szükséges mennyiség egyébként indokolna, ezért a trícium felszaporodását igyekeznek elkerülni. A grafitburkolatot, úgy tűnik, lehetne wolframmal helyettesíteni, azonban ennek hőterhelhetősége kisebb, mint a grafité, és éppen az ELM hőterhelési csúcsok bizonytalansága miatt ma még nem tudjuk, alkalmazható-e. Meg kell jegyezni, hogy az ELM-ek szabályozására már kipróbáltak néhány ígéretes módszert, szükség esetén azokat is be lehetne vetni.

Az ITER tervezett beruházási költsége körülbelül 5 milliárd euro. 2003-ban visszatért a projektbe az USA, valamint csatlakozott Kína és Korea is. (Mindkét ázsiai ország jelenleg maga is épít nagyobb tokamak berendezést.) A lehetséges helyszínről jelenleg intenzív tárgyalások folynak, a probléma most nem a pénz előteremtése, hanem a helyszín kiválasztása. Maga a berendezés építése a hely-

szín kiválasztása – lapzártakor dőlt el, hogy ez a franciaországi Cadarache lesz, a döntésről következő számunkban részletesebben beszámolunk (szerk.) – után 3 évvel kezdődhetne és körülbelül 8 évig tartana.

Az ITER sikeres működése esetén a következő berendezés egy demonstrációs áramtermelő reaktor lenne. Ehhez egy kérdés vár még tisztázásra, amelyet az ITER nem tud megoldani. A számítások szerint egy kereskedelmi fúziós reaktor plazmához közeli szerkezeti anyagában olyan nagy lenne a neutron dózis, hogy az az anyag roncsolódásához és felaktiválódásához vezet. A felaktiválódás alacsony szinten tartására kifejlesztettek egy EUROFER nevű alacsony aktiválódású acéltövezetet [3]. Ezt az anyagot neutronroncsolási vizsgálatoknak vetették alá fission kutatóreaktorokban, azonban ezek a reaktorok sem energiaspektrumban, sem dózisban nem tudnak olyan neutronbesugárzást utánozni, amely egy kereskedelmi reaktor sok éves működése alatt lépne fel. Viszonylag rövid kísérleti impulzusai alatt ezt az ITER sem tudná produkálni, így szükség lenne egy speciális gyorsítóra alapozott neutronforrás megépítésére. Ennek koncepciói tervei készen vannak, jelenleg kezdődik a mérnöki tervek elkészítése. Ennek az IFMIF-nek (*International Fusion Material Irradiation Facility*) nevezett berendezésnek az ITER-rel párhuzamosan kellene működnie, hogy az ITER-kísérletek végére eldönthessük, milyen anyagból épüljön az első áramtermelő fúziós reaktor, amely 2030 táján kezdhetne működni.

Zárszó

A mai eredményekből és szimulációkból kiinduló konzervatív extrapolálás azt mutatja, hogy egy reaktorparaméterű és legalább tízszeres energiasokszorozású fúziós plazmakísérlet megvalósítható. Ez lenne az ITER-kísérlet, amelynek megvalósítására 2003-ban egy hatoldalú együttműködés alakult ki az Európai Unió, Japán, Kína, Korea, Oroszország és az USA részvételével. Ha a helyszínről folyó tárgyalások véget érnek, akkor a berendezés körülbelül 3 éves engedélyezési és előkészítési eljárás után 8 év alatt épülhetne meg. Az ITER sikere esetén egy áramtermelő reaktor megvalósítása következhetne. Számítások szerint a fúziós energia más energiaforrásokkal versenyképes és környezetbarát lenne, azonban a berendezések nagy mérete és bonyolultsága miatt ezt az energiaforrást csak a 21. század második felében kezdhetnénk hasznosítani.

Irodalom, könyvek, Internet

1. M.L. WATKINS – Plasma Phys. and Controlled Fusion 44 (2002) B173
 2. V. PHILIPPS ET AL. – Plasma Phys. and Controlled Fusion 45 (2003) A17
 3. I. COOK ET AL. – Plasma Phys. and Controlled Fusion 44 (2002) B121
- C.M. BRAAMS, P.E. STOTT: *Nuclear Fusion* – Institute of Physics Publishing, 2002, ISBN 0-750-0705-6
- J. WESSON: *Tokamaks* – Oxford University Press, 2004, ISBN 0-19-850922-7
- F. CHEN: *Introduction to Plasma Physics* – Institute of Physics Publishing, 1997, ISBN 0-7503-0325-5
- Magyar magfúziós honlap (előadások, lexikon, hírek): www.magfuzio.hu
- ITER: www.iter.org
- JET: www.jet.efda.org
- Fúziós dokumentumgyűjtemény, hírek: fire.pppl.gov

A Központi Fizikai Kutató Intézetben (KFKI) az alapítás óta folytak optikai és spektroszkópiai kutatások. A kutatások során szerzett ismeretek és a kiépített infrastruktúra teremtették meg annak alapját, hogy az Intézet az országban elsőként tudott bekapcsolódni a gázlézerek kutatásába, és ezen a területen később számos nemzetközileg is elismert eredményt mutatott fel. A következőkben áttekintjük a KFKI Fizikai Optikai Laboratóriumában, majd az SZFKI Lézerfizikai Osztályán folyó, gázlézerekkel, illetve gázkisülésekkel kapcsolatos kutatásokat, hangsúlyt helyezve ezek történelmi vonatkozásaira és fizikai alapjaira is.

A lézerek működése a fénysugárzás *indukált emisszióval* történő erősítésén alapul (a LASER angol mozaikszó, a *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* rövidítése). Az *indukált emisszió* során egy foton egy gerjesztett állapotú atommal (vagy molekulával) kölcsönhatva azt sugárrá bírja. E folyamat lehetőségét *Einstein* vetette fel 1917-ben. Ahhoz, hogy az indukált emisszió az atomok *spontán emissziója* mellett lényegesen válhassék, el kell érni, hogy valamely magasabban fekvő energiájú állapotban több atom tartózkodjon, mint az alacsonyabban fekvő állapotokban. Ezt a feltételt – mivel termikus egyensúlytól eltérő állapotnak felel meg – nehéz teljesíteni, ugyanis a különböző energiájú állapotok betöltésére vonatkozó Boltzmann-eloszlás szerint egyensúlyi rendszerben egy magasabban fekvő E_2 energiájú állapotban egy alacsonyabb E_1 energiájú állapothoz képest

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

számú atom tartózkodik, ahol $\Delta E = E_2 - E_1$ a két nívó energiájának különbsége, k a Boltzmann-állandó és T a hőmérséklet.

Gázkeverékekben létrehozott elektromos kisülések fénykibocsátásának vizsgálata során már az 1930-as években felfigyeltek egyes spektrumvonalak intenzitásának anomális megerősödésére. A megfigyelt jelenséget azzal lehetett magyarázni, hogy az egyik gáz gerjesztett állapotú atomjai szelektíven populálják a másik gáz atomjainak egyes energianívóit. Ez a szelektív gerjesztés tehát lehetővé teszi a lézerműködéshez elengedhetetlenül szükséges *populációinverzió* létrehozását. Ezek a megfigyelések kevéssé jutottak be a tudományos köztudatba, így még az 1950-es években megjelent *Encyclopedia of Physics* egyik összefoglaló cikke is azt állítja, hogy gázkisülésekben az indukált emisszió folyamata elhanyagolható.

A sugárzás indukált emisszióval való erősítést először a mikrohullámú tartományban oldották meg, ennek ered-

ményeképpen született meg 1954-ben a MASER (*Micro-wave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Még hat évnek kellett eltelnie addig, amíg az optikai tartományban is megvalósult egy hasonló elven (és a MASER-rel ellentétben nyitott rezonátorban) működő eszköz, az első rubinlézer. Egy évvel később épült meg az első gázlézer (1961), amely hélium- és neongázok keverékében működött, 1,15 μm infravörös hullámhosszon [1]. A KFKI-ban ezt hamar követte az első magyarországi gázlézer megépítése [2, 3], amely 1963. december 6-án kezdett el működni. A lézer fényképe az 1. ábrán látható.

Az első, vörös fényt sugárzó (632,8 nm hullámhosszon működő) He–Ne lézer 1965-ben épült meg a KFKI-ban. Később kidolgozták különböző teljesítményű (5–50 mW) típusok gyártási technológiáját, illetve az évek során 40–50 darabot gyártottak ezekből. Azokban az években, amikor külföldről lényegében lehetetlen volt ilyen eszközöket beszerezni, a KFKI-ban gyártott lézerek számos hazai kutatóintézetben és egyetemen segítettek a kutatómunkát, emellett megkezdődött a lézerek orvosi felhasználása is. E lézerek nagy részét még ma is használják.

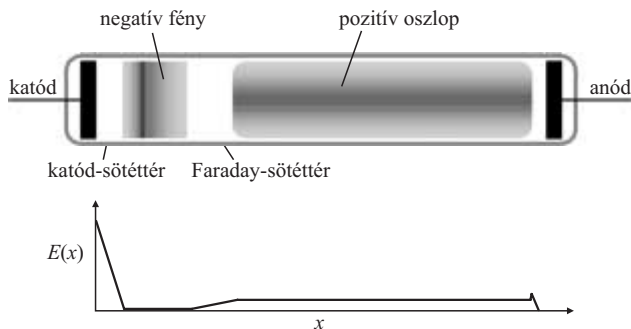
A lézerműködés közege: alacsony hőmérsékletű gázkisülési plazmák

A He–Ne lézer (és a többi később tárgyalt gázlézer) gerjesztési mechanizmusa alacsony nyomású gázokban elektromos árammal keltett *plazmában* lejátszódó ütközési folyamatokon alapul. Az alkalmazott kisülések az úgynevezett *kődfénykisülés* tartományában működnek. A lézercső megfelelő geometriai kialakításával elérhető, hogy a gázkisülési plazma azon része, amelyben a sugárzás erősíthető, az optikai tengely mentén helyezkedjen el. Mielőtt a lézer gerjesztési mechanizmusával foglalkoz-

1. ábra. Az első magyar hélium–neon gázlézer fényképe. A fényerősítés az optikai padon rögzített kvarcüveg-csőben a külső elektródás nagyfrekvenciás térerrel keltett kisülési plazmában jött létre. A lézerműködéshez szükséges visszacsatolást a cső két oldalán egymással pontosan szembeállított nagy reflexiójú ezüsttükörök biztosították. Háttérben a vákuum- és gáztöltő rendszer látható.



A Magyar Tudományos Akadémián 2004. szeptember 29-én *Kroó Norbert* akadémikus tiszteletére rendezett tudományos ülésen elhangzott előadás szerkesztett változata.

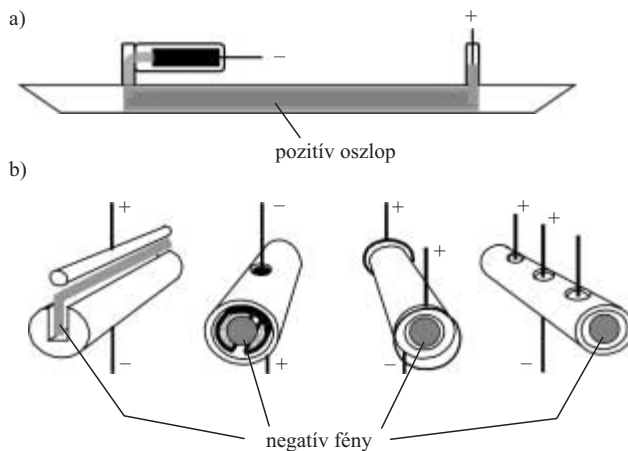
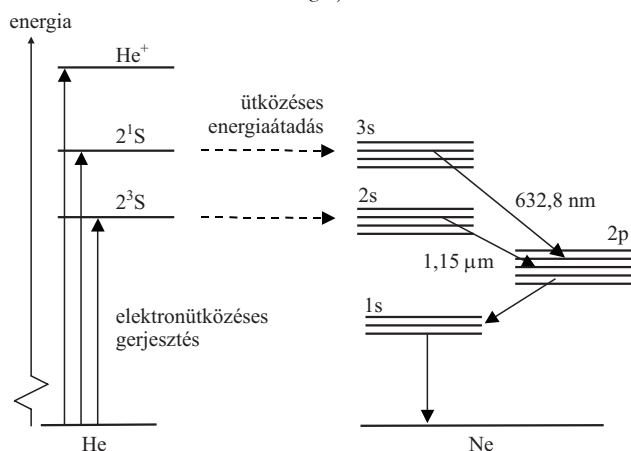


2. ábra. Az ábra felső részén az alacsony nyomású nemesgázban létrehozott ködfénykisülés jellegzetes térbeli szerkezetét láthatjuk. Az ábra első része az elektromos térerősség helyfüggését mutatja.

nánk, először röviden tekintjük át az alacsony nyomású gázkisülések fő jellemzőit és működésüknek alapjait. A 2. ábrán vázolt gázkisülési csőben alacsony (néhány mbar) nyomású gáz van. A kisülési cső elektródáira megfelelően nagy (~300–1000 V) feszültséget kapcsolva önfenntartó ködfénykisülést hozhatunk létre, amely jellegzetes térbeli tagozódást mutat. A kisülésnek több világító és sötét térrésze jöhet létre, amelyeknek a fizikai paramétereit igen eltérők [4, 5]. Lézerek céljára kézenfekvően a világító térrészek jöhetnek szóba, ugyanis ezekben számíthatunk a fénysugárzás erősítésére.

A katód közvetlen közelében megjelenik a *katód-sötéttér*; amely nagy és közel lineárisan csökkenő elektromos térrel jellemezhető. Itt a pozitív ionok jelentős tértöltést hoznak létre. A katódból (nagyrészt a pozitív ionok becsapódásának hatására) kilépő elektronok a nagy elektromos térben felgyorsulnak, energiamérlegük pozitív, azaz az elektromos tértől több energiát nyernek, mint amennyit az ütközések során elveszítenek. A katódtól távolodva következő térrészben, a *negatív fényben* az elektromos térerősség igen kicsi. Itt az ionizációért és a hatékony gerjesztésért a katód-sötéttérből belépő gyors elektronok felelősek. Az anód felé tovább haladva kialakul a *Faraday-sötéttér*; majd pedig a *pozitív oszlop* tartománya. Ez utóbbi tetszőleges hosszúságú lehet, gyakorlatilag semleges plazma alkotja, benne a kis (tengelyirányú) elektromos térerősség olyan mértékű ionizációt biztosít, amennyi a töltések radiális irányú veszteségeinek fedezéséhez szükséges [4]. A számunkra érdekes

4. ábra. A He–Ne lézer gerjesztési mechanizmusa.



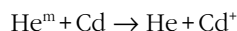
3. ábra. Lézerek céljára alkalmas a) pozitív oszlopú és b) üreges katódú kisülési elrendezések (-: katód-, +: anódelektrodák).

kisülésekben az áramot elektronok és (egyszeres) pozitív töltésű ionok hordozzák. A lézerek gerjesztésében – mint később látni fogjuk – különböző töltött és semleges részecskék ütközési játszanak központi szerepet.

Pozitív oszlopú és üreges katódú lézerek

A He–Ne lézerben a kisülés pozitív oszlopú részét használjuk fényerősítő közegként. A lézercső kialakítását a 3. ábra, míg a lézer gerjesztési sémáját a 4. ábra szemlélteti. Az 1,15 μm-es hullámhosszúságú sugárzás esetében a populációinverziót az elektronok és az alapállapotú He-atomok ütközéseiben keletkező 2³S metastabil He-atomok és alapállapotú Ne-atomok energiakicserélő ütközései hozzák létre, amelyek a Ne 2s állapotát szelektíven populálják. Megjegyzendő, hogy ez utóbbi ütközéstípus hatékonysága (hatáskeresztmetszete) erősen függ a megfelelő szintek energiarezonanciájától, így ily módon csak egyes meghatározott Ne-nívók gerjesztődhetnek. A vörös He–Ne lézerben He 2¹S atomok populálják a lézerátmenet felső nívóját, a Ne 3s szintet.

Az 1970-es években fontos szerepet kapott a fűtött fémionlézerek kutatása. Ilyen típusú lézerre példaként a kék (λ = 441,6 nm) fényt sugárzó He–Cd⁺ lézer említhető, amely ugyancsak a gázkisülés pozitív oszlop térrészében működik. Lézerműködést a Cd⁺-ion több spektrumvonalán hoztak létre [6], a szelektív gerjesztés mechanizmusa a



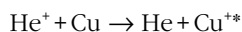
Penning-ionizációs folyamat (He^m metastabil állapotú héliumatomokat jelöl). A szükséges Cd fémgőz-koncentrációt egy, az anód környékén elhelyezkedő Cd-fém tartalmazó kályha biztosította. A kisülésbe jutva a Cd-atomok az alacsony ionizációs potenciál miatt könnyen ionizálódtak, és a pozitív oszlopú plazmában (azaz a lézer aktív közegében) a katód felé haladva a kisülésben egyetlen fémgőzsűrűség alakult ki.

A 70-es és 80-as évek központi témaköre az *üreges katódú lézerek* kutatása volt (3.b és 5. ábra). A lézerek ezen típusában a kisülés negatív fénye használható fel aktív térrészként, *üreges katódú* kisülési elrendezések

ben. Az üreges katódokban egymással szembenálló katódfelületek találhatók (pl. egy hengeres alakú katód belsejében), és olyan járulékos folyamatok léphetnek fel, amelyek jelentősen módosíthatják a kisülés tulajdonságait [7]. A legfontosabb folyamat a gyors elektronok oszcilláló mozgása a szemben elhelyezkedő katódfelületek között kialakuló potenciálvölgyben [8, 9], ami az ionizáció nagymértékű növekedéséhez vezethet, jelentősen növelve a kisülés áramát. Míg a kisülések pozitív oszlopában a gerjesztésben résztvevő elektronok energiaeloszlása közelítőleg Maxwell-típusú (tipikusan néhány eV energiával), addig a negatív fényben sokkal nagyobb energiájú elektronok is jelen vannak, amelyek energiáját csak a katódosésnek megfelelő feszültség (tipikusan 300–1000 V) korlátozza. Ezek a nagyenergiájú elektronok jó lehetőséget adnak magasan fekvő atomi és ion-energiaszintek gerjesztésére.

Az üreges katódú lézerek három nagy csoportját a következő típusok jelentik: i) nemesgáz-keverék lézerek, ii) fűtött fémionlézerek, valamint iii) katódporlasztásos fémionlézerek. Nemesgáz-keverék lézerekre példaként a He–Ar⁺, He–Kr⁺, valamint a He–Ne–Xe⁺ típusok említhetők [10–12]. A fűtött fémionlézerek közül az üreges katódú He–Cd⁺ és He–Zn⁺ lézerek voltak jelentősek. Intézetünkben mutatták ki, hogy a kisülés égési feszültségét, a többi elektromos paramétertől függetlenül, a kisülés geometriájával változtatni, optimalizálni lehet. Ezen elv alkalmazásával számos új lézertípusot fedeztek fel. A 3. b ábra néhány gyakran használt üreges katódú elektróda-konstrukciót mutat.

A 70-es évektől kutatott lézerek közül külön ki kell emelni a katódporlasztás révén működő fémionlézereket – az első ilyen elven működő lézert a KFKI-ban fedezték fel [13]. A lézer felfedezése lényegében véletlennek köszönhető: rézből készült üreges katódú kisülésben He–Ne lézert vizsgáltak, amikor a kilépő sugárzás teljesítményét mérő műszer jelentős értéket jelzett anélkül, hogy látható sugárzást figyelhetek volna meg. A sugárzás hullámhosszát megmérve az 780,8 nm-es „váratlan” értéknek adódott, amely egy Cu-II ionátmenet. Az átmenet felső nívója energiarezonanciában áll a He⁺-ion alapállapotával, így a lézer szelektíven gerjesztődhetett a



(közel) rezonáns töltéscserélő folyamattal (lásd 6. ábra). A gerjesztéshez szükséges rézatomokat a plazmából a katódot bombázó nemesgázionok porlasztó hatása juttatja a kisülésbe. Ily módon a szükséges fémgőzkoncentráció nehezen elpárologtatható fémek esetében is szobahőmérsékleten előállítható. Az eredmények publikálását (1974) követően számos külföldi (NSZK, USA-beli) kutatócsoport kezdett el foglalkozni katódporlasztásos fémionlézerekkel. Ezek a laboratóriumok hamarosan ultraibolya tartományba eső fémionátmeneteken is létrehozta lézereket, ezeken az átmeneteken az SZFKI-ban csak évekkel később sikerült elérni lézerműködést. Az Intézetünkben kidolgozott, *szegmentált üreges katódú kisülésben* [14–16] azonban a lézer hatásfoka jelenleg a legnagyobb, az irodalmi adatokkal összehasonlítva.



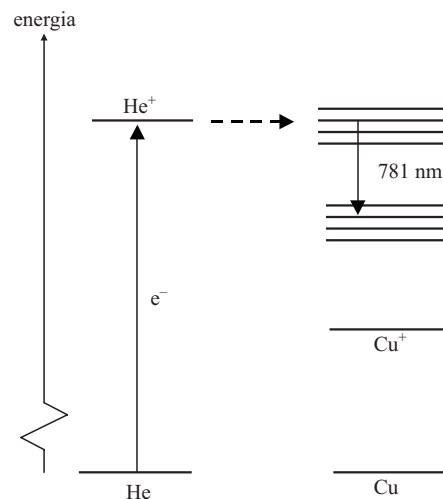
5. ábra. A gázlézer laboratórium az 1980-as években. A képen János Mibály dolgozik az üreges katódú He–Kr⁺ lézerrel.

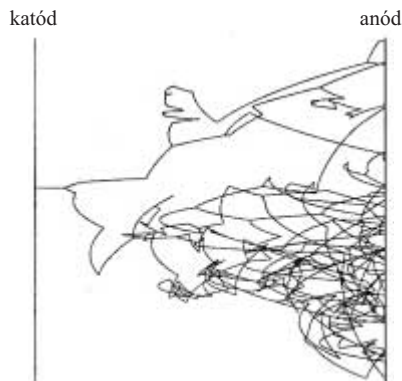
A szilárdtest- és félvezetőlézerek előretörése miatt a gázlézer kutatásának az utóbbi évtizedben a távoli ultraibolya hullámhosszknál volt jelentősége. Jelenleg a 224 nm-es hullámhosszon működő ezüstionlézert tanulmányozzuk. Ez a lézer viszonylag olcsó fényforrás lehet a Raman-spektroszkópia céljaira; a rövid hullámhossz nagy hatásfokú gerjesztést és jó hatásfokú detektálást tesz lehetővé, továbbá kiküszöbölhetővé teszi a zavaró fluoreszcenciajelet, ami egyes szerves anyagok (pl. gyógyszerek) vizsgálatánál alapvető fontosságú. A lézerrel 45 mW impulzusüzemű teljesítményt értünk el [17].

Alacsony hőmérsékletű plazmák kutatása

Mint láttuk, a gázlézer működéséhez szükséges gerjesztési folyamatok plazmaállapotú közegben játszódnak le. Az itt használt ködfénykisülésekben létrejövő alacsony ionizáltsági fokú plazmát gázlézer gerjesztésére szolgáló közeg mellett napjainkban széleskörűen alkalmazzák számos más területen is, például a fényforrás-technológiában (fénycsövekben és kisülési lámpákban), spektroszkópiai fényforrásokban, valamint az integrált áramkörök gyártásának technológiai lépéseiben, különböző

6. ábra. A He–Cu⁺ lézer gerjesztési mechanizmusa.





7. ábra. Egy szimulált elektronlavina képe. A trajektóriákon a „törések” az egyes ütközéseknek felelnek meg, az „elágazások” az ionizációs folyamatokat (új elektronok keletkezését) mutatják. (A szimuláció paramétereit: $U = 500$ V, $L = 1$ cm, azaz $E = 500$ V/cm és $p = 2,5$ mbar He.)

anyagok felületi tulajdonságainak módosításánál (szuperkemény, vagy biokompatibilis felületek létrehozása). Az elmúlt évtized során az alacsony hőmérsékletű plazmák kutatása az Osztályon önálló kutatási területté vált.

A ködfénykisülések egyes térrészeinek leírására számos próbálkozás történt analitikus módszerekkel. A XX. század első fele és közepe időszakából legsikeresebbként a pozitív oszlop Schottky-féle elmélete, illetve *Little* és *von Engel* katód térrészre kidolgozott elmélete említhető (lásd pl. [4]). Az elmúlt 1–2 évtizedben a széles körben hozzáférhetővé vált számítástechnikai lehetőségek ezen a területen is számos nyitott kérdés megválaszolásához adtak segítséget: lehetővé vált a töltött részecskék mozgásának kinetikus elmélet szerinti leírása, elsősorban direkt szimulációs módszerekkel. Numerikus módszerek alkalmazásával számos olyan jelenség kvantitatív kezelése vált lehetővé, amelyeket előzőleg csak kvalitatív módon sikerült megérteni. Példaként említhető a gázkisülés-fizika egyik legelemibb jelenségének, a gázkisülések begyűjtésének a vizsgálata, amely korrekten csak numerikus módon írható le [18]. Az eredmények lehetővé tették a korábbi „klasszikus” modellek pontosítását, kiterjesztését, valamint a lézerek esetében a kísérleti megfigyelések kvantitatív értelmezését.

A kinetikus elméletnek megfelelő transzportleírás alapjául a Boltzmann-egyenlet, vagy a részecskeszimulációs megközelítés szolgálhat. A Boltzmann-egyenlet általános alakjában egy, a 6-dimenziós fázistérben felírt folytonossági egyenlet, és megoldása általános esetben (3-dimenziós, időfüggő probléma) igen nehéz (valós kisülésfizikai esetekben általában még ma is megoldhatatlan) feladat. Stacionárius megoldást keresve, illetve a térbeli dimenziószámot csökkentve (pl. 1-dimenziós, vagy hengerszimmetrikus rendszert feltételezve) az egyenlet egyszerűbb alakra hozható. Megoldására azonban ezekben az esetekben is bonyolult numerikus módszereket használnak, a problémák analitikusan nem kezelhetők. Az alternatívát jelentő szimulációs módszerek, például a Monte Carlo szimuláció, egyes részecskék követésén alapulnak, és a sokaságra jellemző paramétereket az egyes részecskék jellemzőinek átlagolásával adják meg. Ily módon a szimuláció alkalmazásával valós képet kaphatunk a lejátszódó folyamatokról, egyszerűen vizsgálható az események statisztikája.

Részecskeszimulációs módszerek segítségével számos gázkisülési plazmát modelleztünk, például nemesgázkeverék-kisülésekben [19], üreges katódú és nagyfeszültségű kisülésekben [20], valamint lézerek céljára szolgáló plazmaforrásokban [21]. Vizsgáltuk a gázban történő ionizációk során kialakuló elektronlavinák jellemzőit, megmutattuk, hogy az elektronlavinák fraktálszerkezettel rendelkeznek [22]. A lavinák statisztikáját vizsgálva arra a következtetésre jutottunk, hogy a gázok átütése (szigetelő fázisból vezető fázisba történő átmenete) a statisztikus fizikai értelmezés szerint kritikus jelenséggént írható le [23].

A Monte Carlo szimuláció során a részecskék

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = q \mathbf{E}$$

mozgásegyenletének integrálásával határozzuk meg a részecskék trajektóriáit (m és q a részecske tömege, illetve töltése, \mathbf{E} az elektromos térerősség). A részecskék mozgása során bekövetkező ütközések pozícióit az alábbi egyenlet adja meg, amelyet a fenti mozgásegyenlettel egyidejűleg integrálunk a pálya mentén:

$$\int_{s_0}^{s_1} n \sigma[\varepsilon(s)] ds = -\ln(1 - R_{01}),$$

ahol s_0 és s_1 az előző és a következő ütközés pozíciója a részecske pályája mentén, n a gáz sűrűsége, $\sigma = \sum \sigma_j$ az ütközési folyamatok hatáskeresztmetszeteinek összege, ε a részecske kinetikus energiája és R_{01} a $[0,1)$ intervallumon egyenletes eloszlású véletlen számot jelöl [24]. A szabad úthossz befutása után a részecske különböző ütközési folyamatokban vehet részt, az egyes folyamatok bekövetkezésének valószínűsége arányos az ütközési energiánál vett megfelelő hatáskeresztmetszet-értékekkel.

Ez a módszer azokban az esetekben használható, amikor (az alacsony ionizációs foknak köszönhetően) elhanyagolható a töltött részecskék közötti direkt kölcsönhatás (pl. elektron–elektron ütközések), és így csak a töltött részecskék (elektronok vagy ionok) transzportját kell leírni a semleges háttérgázban. A szimuláció természetesen lehetőséget ad arra, hogy az ionizációs folyamatokban keletkező újabb elektronokat is kövessük, így megfigyelhetjük a katódból induló elektronok által keltett elektronlavinákat. A 7. ábra erre mutat egy példát – az ábrán 2,5 mbar nyomású héliumgázban, $L = 1$ cm elektródátávolság és $U = 500$ V feszültség esetén láthatjuk egy elektronlavina Monte Carlo szimulációval kapott képét.

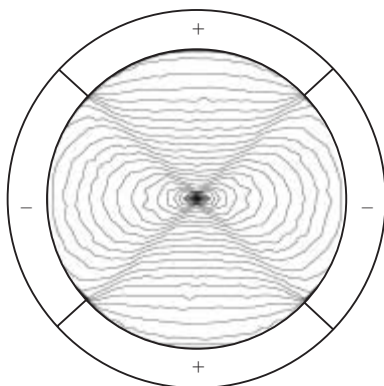
A szimulációkkal vizsgálható a kisülések időbeli felépülése, illetve a töltött részecskék kinetikája bonyolultabb elektródakonfigurációk esetében is. A 8. ábra egy lézercélú szegmentált üreges katódú kisülés [15] keresztmetszetében szemlélteti az ionizáció térbeli eloszlását. A kisülés négy elektróda között jön létre, a két katód és a két anód aktív felülete egy közös hengerpaláston helyezkedik el. A görbült katódfelületek a kisülés tengelye irányába fókuszálják a katódból kilépő, majd annak környezetében felgyorsult elektronokat, ahol az ionizációs for-

rás éles csúcsot mutat. Az erős fókuszálás a geometriai viszonyok mellett a szegmentált üreges katódú kisülések nagy égési feszültségével (400–1000 V) magyarázható. Az ennek megfelelő energiákra felgyorsult elektronok szabad úthossza igen nagy (összemérhető a katódüreg átmérőjével), ugyanis az ütközési hatáskeresztmetszetek ebben az energiatartományban már lényegesen kisebbek a maximális értékeknél. A szimulációkkal megmutattuk, hogy a szabályozott feszültségű üreges katódú kisülésben a nagyobb feszültséget a töltéshordozók veszteségének növekedése eredményezi, ilyenkor növekszik az ionizáció a gyors elektronok hatására, továbbá közvetlen bizonyítékát tudtuk adni a kisülésben az oszcilláló elektronok jelenlétének [21].

Komplex kisülések önkonzisztens leírását teszik lehetővé a részecskeszimulációs (Monte Carlo szimulációt) és hidrodinamikai leírást egyesítő 1- és 2-dimenziós önkonzisztens, úgynevezett *hibrid modellek*. (Önkonzisztens leírás alatt itt azt értjük, hogy a töltött részecskék olyan elektromos térben mozognak, amelyet a saját töltéssűrűségük is befolyásol.) Hibrid modellek alkalmazásával sikeresen vizsgáltuk gázkisülések különböző jelenségeit: öngerjesztett oszcillációkat, az elektródakonfiguráció hatását a kisülés jellemzőire, az üreges katódú kisülések létrejöttét, a katódporlás jelenségét, a kisülési plazmák fénykibocsátásának térbeli eloszlását [25], a gázkisülések tranzienseit [26], illetve a He–Au⁺ lézer gerjesztési viszonyait [27].

Egy további kutatási területként megemlítendő a folyadékfelületen létrehozott atmoszférikus nyomású plazma felhasználása környezetvédelmi analitikai célokra [28, 29]: az elektrolitkatódos atmoszférikus nyomású kőd-fénykisülés (*Electrolyte Cathode Atmospheric Glow Discharge*, ELCAD) a vizek nehézfém tartalmának közvetlen meghatározására használható. Az utóbbi években részletesen foglalkoztunk ezen speciális kisülés működési mechanizmusával. Értelmeztük az összetétel hatását a katódporlásra, vizsgáltuk a gáz- és elektronhőmérséklet-eloszlásokat, valamint a kisülés gerjesztési viszonyait. E kutatások gyakorlati alkalmazásaként szubnanogramm érzékenységű többelemes fémdetektort építettünk kapilláris elrendezésű ELCAD-ban.

8. ábra. Az ionizáció tipikus térbeli eloszlása (forrásfüggvénye) ultraibolya lézerek céljára használt üreges katódú kisülés keresztmetszetében [21]. (A kisülés paraméterei: $U = 625$ V, $p = 15$ mbar He. A kisülés közepén a sűrűsödő szintvonalak az igen intenzív ionizációt jelzik, –: katód-, +: anódelektrodák.)



Erősen csatolt plazmák kutatása

Az eddig tárgyalt plazmatípusokban a részecskék kölcsönhatásából származó potenciális energia elhanyagolható az $E_{\text{kin}} \sim kT$ kinetikus energiához képest, a két energiát arányát megadó *csatolási paraméter*, $\Gamma \ll 1$. Egyes nemklasszikus plazmákban viszont a kölcsönhatási (potenciális) energia (lényegesen) nagyobb lehet a kinetikus energiánál, és ekkor *erősen csatolt plazmákról* beszélünk, amelyekre $\Gamma > 1$. Erősen csatolt plazmákra példa a neutroncsillagok köpenyében, fehér törpecsillagokban, óriásbolygók belsejében található anyagállapot, ahol a teljesen ionizált atomok iontörzsei erősen csatolt rendszert alkotnak, miközben a degenerált állapotú elektronok egy semlegesítő háttérrel képeznek. Mesterségesen létrehozott erősen csatolt plazmákra példaként említhetők a csapdában tárolt ionok, amelyek esetében a hőmérséklet igen alacsony lehet, és így a rendszerek kristályos állapotba kerülhetnek [30].

A plazmák speciális (és egyre inkább az érdeklődés középpontjába kerülő) fajtáját képviselik a komplex plazmák, amelyekben az elektronok, ionok és semleges gázatomok (molekulák) mellett nanométer–mikrométer méretű részecskék is jelen vannak. Ilyen rendszerekre asztrofizikai példaként a csillagközi por, az üstökösök csóvája, a Szaturnusz és az Uránusz gyűrűi említhetők. A porrészecskék az ultraibolya sugárzás miatti elektronemisszió, vagy nagyenergiájú részecskékkel való ütközések hatására elektromosan töltötté válnak, így a plazma többi összetevőjével kölcsönhatásba kerülnek, és azokhoz hasonlóan reagálnak a külső elektromos és mágneses térre. Mivel a plazma egyéb összetevőihez képest az igen nagy méretű porrészecskék nagy töltést vehetnek fel, a porrészecskék gyakran erősen csatolt rendszert alkotnak, plazmakristályok keletkezhetnek, amint azt laboratóriumi kísérletekben is megmutatták.

Az erősen csatolt plazmák területén végzett munkánk Coulomb- és Yukawa-kölcsönhatási potenciállal jellemezhető sokrészecske-rendszerekben lejátszódó jelenségek nyomon követésére, különleges körülmények között található anyagok tulajdonságainak leírására irányul. A statikus termodinamikai jellemzők mellett a szimulációkkal vizsgáltuk az erősen csatolt rendszereket alkotó részecskék lokalizációját [31], valamint a rendszerek kollektív (dinamikus) jelenségeit [32, 33]. Nemegyensúlyi molekuladinamikai szimulációs módszerekkel meghatároztuk a rendszerek egyes transzportjellemzőit (nyíró viszkozitást és hővezetési együtthatót) [34, 35].

Összefoglalás, jelenlegi kutatási irányok

A gázlézerek területén jelenleg a He–Ag⁺ ($\lambda = 224$ nm) lézer kutatása és praktikus lézer fejlesztése a legfontosabb feladat, elsősorban Raman-spektroszkópiai vizsgálatokhoz. Az elektrolitkatódos atmoszférikus nyomású kisülés esetén az egyre nagyobb érzékenység (kisebb kimutatható szennyezőkoncentráció) elérésén dolgozunk.

Az alacsony nyomású gázkisülések (kis ionizáltsági fokú plazmáinak) területén legfontosabb az önkonzisz-

tens, első elvekből kiinduló modellezési eljárások fejlesztése. Elsődlegesen a PIC (Particle-In-Cell) szimulációs módszerek [36] továbbfejlesztésére koncentrálnak. A PIC-módszer a töltött részecskék mozgását a klasszikus mozgásegyenlettel írja le, a részecskékre ható erő az elektromos térerősségből adódik, ezt pedig a töltött részecskék jelenléte és az elektródákra kapcsolt potenciál határozza meg. A mozgásegyenlet és a Poisson-egyenlet együttes megoldása biztosítja az eredmények önkonzisztens voltát. Egy évtizeddel ezelőtt csak az akkori szuperszámítógépek adtak lehetőséget ilyen modelleken alapuló számításokra, a módszer szélesebb körű elterjedése a számítástechnikai háttér igen gyors fejlődésének köszönhető.

Az erősen csatolt plazmák vizsgálata egy új, dinamikus fejlődő terület. Itt elsősorban a Coulomb- és Yukawa-kölcsönhatási potenciállal jellemezhető sokrészecske-rendszereket kutatjuk. Az eredményeknek a laboratóriumban létrehozott állapotok vizsgálata mellett asztrofizikai jelentőségük is van.

A jövőben tervezett kutatási témáink elsősorban alap-kutatás-motiváltak, de az itt szerezhető ismeretek az alkalmazások szempontjából is hasznosak lehetnek.



Az itt bemutatott, több évtizedet átfogó kutatásoknak a *Kroó Norbert*, majd *Kollár János* által vezetett MTA SZFKI adott, illetve ad otthont. A korábbi, illetve jelenlegi kutatásokat támogató szervezetek (OMFB, OTKA, NATO, MTA, NSF) mellett őket illeti köszönet a kutatómunka segítéséért és feltételeinek biztosításáért. Végezetül álljon itt azon kollégák neve, akik részt vettek az ismertetett munkában: *Apai Pál, Ádám Ferenc, Bakos József, Bánó Gergely, Bergou János, Császárs György, Csillag László, Csonka Lajos, Ferencz Kárpát, Hartmann Péter, Horváth Péter, Jánossy Mihály, Kántor Károly, Kaspari Jánosné, Kutasi Kinga, Lutter András, Majorosi Antal, Mezei Pál, M. Császárs Lili, Rózsa Károly, Rubin György, Salamon Tamás, Sárközi Elek, Szalai László, Szántó Sándor, Szigeti János, Thomanné Forgács Judit, Tóth József, Varga Péter.*

Irodalom

1. A. JAVAN, W.R. BENNETT, JR., D.R. HERRIOTT: *Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture* – Phys. Rev. Lett. 6 (1961) 106
2. *Magyar laser a Központi Fizikai Kutató Intézetben* – Magyar Nemzet 1963. dec. 15.
3. J. BAKOS, L. CSILLAG, K. KÁNTOR, P. VARGA: *Ezüsttűkrös nagyfrekvenciás gerjesztésű He-Ne laser* – KFKI Közlemények 13 (1965) 195
4. G. FRANCIS: *The glow discharge at low pressure* in Encyclopedia of Physics, XXII (1956) 53, Springer, Berlin
5. A. VON ENGEL: *Ionized Gases* – Clarendon Press, Oxford, 1965.
6. L. CSILLAG, M. JÁNOSSY, K. KÁNTOR, K. RÓZSA, T. SALAMON: *Investigations on a continuous wave 4416 Cd ion laser* – J. Phys. D: Appl. Phys. 3 (1970) 64
7. P.F. LITTLE, A. VON ENGEL: *The hollow-cathode effect and the theory of glow discharges* – Proc. Roy. Soc. (London) A224 (1954) 209
8. H. HELM: *Experimenteller Nachweis des Pendel-Effektes in einer zylindrischen Niederdruck-Hohlkathoden-Entladung in Argon* – Z. Naturforschung 27a (1972) 1812
9. Z. DONKÓ: *A study of the motion of high-energy electrons in a helium hollow cathode discharge* – Z. Naturforschung 48a (1993) 457
10. M. JÁNOSSY, L. CSILLAG, K. RÓZSA: *CW laser oscillation in a He-Ar hollow cathode discharge* – Phys. Lett. 63A (1977) 231
11. M. JÁNOSSY, K. RÓZSA, P. APAI, L. CSILLAG: *He-Kr ion laser in a D. C. hollow cathode discharge* – Optics Commun. 49 (1984) 278
12. M. JÁNOSSY, P. MEZEI, P. HORVÁTH: *On the excitation of Xe-II lines in a He-Ne-Xe hollow cathode laser* – Optics Commun. 65 (1988) 287
13. L. CSILLAG, M. JÁNOSSY, K. RÓZSA, T. SALAMON: *Near infrared cw laser oscillation in Cu-II* – Phys. Lett. 50A (1974) 13
14. K.A. PEARD, R.C. TOBIN, K. RÓZSA, Z. DONKÓ: *A high-voltage hollow-cathode Au-II 282 nm laser* – IEEE J. Quantum Electronics 30 (1994) 1181
15. R.C. TOBIN, K.A. PEARD, G. BODE, K. RÓZSA, Z. DONKÓ, L. SZALAI: *High-gain hollow-cathode metal ion lasers for the UV and VUV* – IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 1 (1995) 830
16. Z. DONKÓ, L. SZALAI, K. RÓZSA, M. ULBEL, M. PÖCKL: *High gain ultraviolet Cu-II laser in a segmented hollow cathode discharge* – IEEE J. Quantum Electronics 34 (1998) 47
17. G. BÁNÓ, P. HORVÁTH, L. CSILLAG, J. GLOSIK, T.M. ADAMOWICZ, K. RÓZSA: *224 nm segmented hollow cathode silver ion laser* – Appl. Phys. B 80 (2005) 215
18. P. HARTMANN, Z. DONKÓ, G. BÁNÓ, L. SZALAI, K. RÓZSA: *Effect of different elementary processes on the breakdown in low-pressure helium gas* – Plasma Sources Sci. Technol. 9 (2000) 183
19. Z. DONKÓ, M. JÁNOSSY: *Model of the cathode dark space in noble gas mixture discharges* – J. Phys. D: Appl. Phys. 25 (1992) 1323
20. Z. DONKÓ, K. RÓZSA, R.C. TOBIN, K.A. PEARD: *Modeling and measurements on an obstructed glow discharge in helium* – Phys. Rev. E 49 (1994) 3283
21. Z. DONKÓ, K. RÓZSA, R.C. TOBIN: *Monte Carlo analysis of the electrons' motion in a segmented hollow cathode discharge* – J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (1996) 105–114
22. Z. DONKÓ, I. PÓCSIK: *On the fractal structure of electron avalanches* – Fractals 1 (1993) 939
23. Z. DONKÓ: *Avalanches and bursts in low pressure helium gas below the breakdown voltage* – Phys. Rev. E 51 (1995) 3934
24. J.P. BOEUF, E. MARODE: *A Monte Carlo analysis of an electron swarm in a non-uniform field: the cathode region of a glow discharge in helium* – J. Phys. D: Appl. Phys. 15 (1982) 2169
25. D. MARIC, K. KUTASI, G. MALOVIC, Z. DONKÓ, Z.I.J. PETROVIC: *Axial emission profiles and apparent secondary electron yield in abnormal glow discharges in argon* – Eur. Phys. J. D 21 (2002) 73
26. Z. DONKÓ: *Heavy-particle hybrid modeling of transients in a direct-current argon discharge* – J. Appl. Phys. 88 (2000) 2226
27. G. BÁNÓ, L. SZALAI, P. HORVÁTH, K. KUTASI, Z. DONKÓ, K. RÓZSA, T.M. ADAMOWICZ: *Au-II 282 nm segmented hollow cathode laser: parametric studies and modeling* – J. Appl. Phys. 92 (2002) 6372
28. P. MEZEI, T. CSERFALVI, H.J. KIM, M.A. MOTTALEB: *The influence of chlorine on the intensity of metal atomic lines emitted by an electrolyte cathode atmospheric glow discharge* – The Analyst 126 (2001) 712
29. T. CSERFALVI, P. MEZEI: *Subnanogram sensitive multimetal detector with atmospheric electrolyte cathode glow discharge* – Journ. Anal. At. Spectr. 18 (2003) 596
30. H. THOMAS, G.E. MORFILL, V.G. DEMMEL: *Plasma crystal: Coulomb crystallization in a dusty plasma* – Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 652
31. Z. DONKÓ, G.J. KALMAN, K.I. GOLDEN: *Caging of particles in one-component plasmas* – Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 225001
32. Z. DONKÓ, G.J. KALMAN, P. HARTMANN, K.I. GOLDEN, K. KUTASI: *Dynamical structure functions, collective modes and energy gap in charged particle bilayers* – Phys. Rev. Lett. 90 (2003) 226804
33. G.J. KALMAN, P. HARTMANN, Z. DONKÓ, M. ROSENBERG: *Two-dimensional Yukawa liquids: Correlation and dynamics* – Phys. Rev. Lett. 92 (2004) 065001
34. Z. DONKÓ, B. NYÍRI, L. SZALAI, S. HOLLÓ: *Thermal conductivity of the classical electron one-component plasma* – Phys. Rev. Lett. 81 (1998) 1622
35. Z. DONKÓ, B. NYÍRI: *Molecular dynamics calculation of the thermal conductivity and shear viscosity of the classical one-component plasma* – Physics of Plasmas 7 (2000) 45
36. C.K. BIRDSALL: *Particle-in-cell charged-particle simulations plus Monte Carlo collisions with neutral atoms, PIC-MCC* – IEEE Trans. Plasma Sci. PS-19 (1991) 65

A MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA 174. KÖZGYŰLÉSE

A Magyar Tudományos Akadémia 2005. május 2-án és 3-án tartotta évi rendes közgyűlését. A köztestület nyilvános ünnepi ülését május 2-án *Vizi E. Szilveszter*, az MTA elnöke nyitott meg, majd *Mádl Ferenc*, a Magyar Köztársaság elnöke emelkedett szólásra. A köztársasági elnök üdvözlő szavait *Veres János* pénzügyminiszter beszéde követte. Ezután került sor a díjátadásokra, majd József Attila születésének 100. évfordulója alkalmából *Jordán Tamás* és *Sebő Ferenc* József Attila-emlékműsorát hallgatták meg a jelenlévők. A délelőtti ünnepi ülés *Horváth Zalán* akadémikus *Einstein és a Fizika Nemzetközi Éve* című előadásával zárult.

Akadémiai díjak

A 2005. évi *Akadémiai Aranyérem* kitüntetettje MARKÓ LÁSZLÓ, az MTA r. tagja, a Veszprémi Egyetem Műszaki Kémiai Kutatóintézet kutatóprofesszora, nemzetközileg kiemelkedő tudományos eredményeiért, iskolateremtő és oktatói munkásságáért, a magyar tudomány és ezen belül a Magyar Tudományos Akadémia érdekében kifejtett tudományszervező és tudománypolitikai munkájáért.

Az Akadémia Elnöksége és Vezetői Kollégiuma a 2005. évi *Wabrmann Mór-éremet* DEMJÁN SÁNDOR-nak adományozta, aki kiemelkedő érdemeket szerzett hazánk gazdasági felemelkedése érdekében végzett tevékenységével, valamint az Akadémia Klub Egyesület társelnökéként sikeresen közreműködött az akadémiai klubélet újjászervezésében.

A Magyar Tudományos Akadémia Elnöksége kiemelkedő tudományos munkásságuk elismeréseképpen 2005-ben több tudóst *Akadémiai Díjjal* tüntetett ki, köztük a fizika tudományok területén megosztott Akadémiai Díjban részesült GRÁNÁSY LÁSZLÓ, az MTA doktora, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézetének tud. főmunkatársa és IGLÓI FERENC, a fizikai tudomány doktora, az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézetének tud. tanácsadója.

Gránásy László és *Iglói Ferenc* tudományos munkája a kondenzált anyagokban és egyéb komplex, sokrészecskés rendszerekben fellépő inhomogenitások és rendezetlenség hatásának vizsgálatára irányul. Ezen belül nemzetközileg is kiemelkedő eredményeket értek el a különböző instabilitások (mintázatképződés, fluktuációk) és szingularitások (fázisátalakulások, Griffiths-effektus) elméleti módszerekkel és számítógépes szimulációkkal való leírásában és értelmezésében.

A Magyar Tudományos Akadémia Elnöksége a tudomány népszerűsítése érdekében kifejtett eredményes újságírói munkásságuk elismeréseképpen 2005-ben *Akadémiai Újságí-*

rói Díjban részesítette: KAPITÁNY KATALIN-t, a *Természet Világa* rovatvezető szerkesztőjét, TANDI LAJOS-t, a *Szeged* című folyóirat főszerkesztőjét, HANÁK GÁBOR történeeszt, újságíró, filmrendező és BOKOR PÉTER újságíró, filmrendező.

A Magyar Tudományosság Külföldön Elnöki Bizottság az *Arany János-díj* és *-érem* a tudományos kutatásért kitüntetést – tudományos munkásságuk és tudományszervezői tevékenységük alapján – többek között az alábbi kutatóknak ítélte oda:

Életmű-díjat kapott GÁBOS ZOLTÁN fizikus, (Kolozsvár, Románia) az MTA külső tagja.

Az *Arany János-éremet* GULYÁS BALÁZS biológusnak (Stockholm, Svédország), az MTA külső tagjának ítélte oda a bizottság.

Tisztújítás

Az MTA Közgyűlése május 3-án tisztújítással folytatta munkáját, melynek során elhangzott az elnöki expoze, a főtítkári beszámoló, sor került a kormány számára készített beszámolók előterjesztésére, határozatok elfogadására, végül a tisztújításokra. Az MTA új vezetősége:

Elnök: *Vizi E. Szilveszter*

Alelnökök: *Kroó Norbert* (természettudomány), *Hámori József* (élettudomány), *Marosi Ernő* (társadalomtudomány)

Főtítkár: *Meskó Attila*;

Főtítkárhelyettes: *Pléb Csaba*;

Elnökségi tagok: *Keviczky László* (természettudomány), *Dudits Dénes* (élettudomány), *Enyedi György* (társadalomtudomány).

Az MTA új vezetése: *Meskó Attila* főtítkár, *Vizi E. Szilveszter*, MTA elnöke, *Hámori József*, alelnök – élettudomány, *Kroó Norbert*, alelnök – természettudomány, *Pléb Csaba*, főtítkárhelyettes, *Marosi Ernő*, alelnök – társadalomtudomány





Horváth Zalán Einstein-ről beszél

Fizikai Tudományok Osztálya tudományos ülése

Az MTA 2005. évi közgyűlését követő napokban került sor a tudományos osztályok üléseire. A *Fizikai Tudományok Osztálya* tudományos ülése május 4-én zajlott, melyen *Horváth Zalán* osztályelnök átadta a fizikai díjakat.

A *Fizikai fődíjat* kapta MENYHÁRD NÓRA tud. tanácsadó (MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézet)

Menyhárd Nóra a kondenzált anyagok fizikájában végzett több évtizedes munkásságának kiemelkedő eredményeiért – amelyeket a dinamikai skálázás elméletének kidolgozása, renormálási csoport módszerének kidolgozása és alkalmazása az egyszemélyes elektronrendszer fázisainak meghatározására, a skálaviselkedés és univerzalitás nemegyensúlyi rendszerekben való felismerése terén ért el – részesült a kitüntetésben.

A *Fizikai díjak* kapták:

KEMÉNY TAMÁS tud. tanácsadó (MTA Szilárdtest Fizikai Kutató és Optikai Intézet)

Kemény Tamás tudományos kutatásai elsősorban az atomi rendezettség és a fémek anyagok mágneses tulajdonságai közötti kapcsolat felderítésére irányultak. Ilyen kutatásokat végzett nemegyensúlyi kristályos, amorf és nanoszemcsés anyagokon. Eredményei komoly nemzetközi elismerést nyertek.

ZIMÁNYI LÁSZLÓ tud. tanácsadó (MTA Szegedi Biológiai Központ Biofizikai Intézet)

Zimányi László kutatási területe a biológiai energiaátalakításban szerepet játszó egyes fehérjék működése, elsősorban spektroszkópiai és elméleti módszerekkel. Jelentős eredményeket ért el a bakteriális retinálfehérjék (bakteriorodopszin, halorodopszin) iontranszportáló fotociklusának vizsgálatában. A spektroszkópiai adatok mátrixalgebrai kiértékelését továbbfejlesztette, és ezzel az eddigieknél pontosabb és megbízhatóbb eszközt adott a folyamatokban fellépő intermedierek spektrumainak meghatározására. Hozzájárult a mioglobinn és a hemoglobinnal kapcsolatos fehérjedinamikai jelenségeinek – mint például a konformációs állapotok egymásba alakulása, fehérjerelexáció –, továbbá redoxfehérjék (pl. citokrom c) működésének jobb megértéséhez.

WOLF GYÖRGY tud. tanácsadó (MTA KFKI RMKI, Elméleti Főosztály):

Wolf György tudományos tevékenysége az elméleti magfizika tárgykörébe tartozó közepes energiájú nehézion-fizika területére összpontosul. Kutatásai során a nagy barionsűrűségű anyag hatását vizsgálta azon elemi részecskékre, amelyek maguk is részt vesznek ezen anyag kialakításában, illetve amelyek áthaladnak ezen az erősen kölcsönható anyagon. Elméleti számításainak eredményeit a CERN SPS-ben és a GSI SIS gyorsítóban folyó kísérletek eredményeinek értelmezésénél nagy sikerrel használták fel.

A díjátadást követték a fizikai tudományos bizottságok elnökeinek – *Kövér Ákos* (Atom- és Molekulafizikai Bizottság), *Csikor Ferenc* (Részecskefizikai Bizottság),

Lovas Rezső (Magfizikai Bizottság), *Szabó Gábor* (Lézerfizikai és Spektroszkópiai Bizottság), *Beke Dezső* (Szilárdtestfizikai Bizottság), *Iglói Ferenc* (Statistikus Fizikai Bizottság), *Szatmáry Zoltán* (Sugárvédelmi, Környezetfizikai és Reaktorfizikai Bizottság), *Balázs Béla* (Csillagászati és Űrfizikai Bizottság), *Fidy Judit* (Biofizikai Bizottság) – beszámoló.

Fizikai Tudományok Osztálya tudományos ülése a *Fizika fejlődési irányjai* című előadássorozattal zárult:

Varga Kálmán: Elektrontranszport nanostruktúrákban

Groma Géza: Femtoszekundumos rezonáns optikai egyenirányítás. Egy fehérjecsald funkcionális motorja?

Lévai Péter: Kvar-komográfia

Katz Sándor: A kvantum-szindinamika fázisdiagramja

Krasznaborkay Attila: Új elemi részecske kimutatása atommagátmenetekben



2005. május 5-én a *Szilárdtestfizikai Bizottság* tudományos ülése keretében a *Szilárdtestkutatás és Fizikai Anyagtudomány 2005 – Lány anyagok* című előadássorozat zajlott:

Éber Nándor: Folyadék-kristályok az alkalmazott- és alapkutatásban, túl az ezredfordulón

Bóta Attila: Modell-membránok röntgenvizsgálata

Vass Szabolcs: Micelláris rendszerek szerkezetvizsgálata szórással. Eredmények és problémák

Turzó Kinga: Polipeptidekkel módosított titánfelületek és implantológiai vonatkozásai

Nemcsics Ákos: Félvezető polimerek, polimér-napelemek

Török János: Nyírási sávok szemcsés anyagokban



2005. május 5-én az *Atom- és Molekulafizikai Bizottság* tudományos ülése keretében zajlott előadássorozat:

Berényi Dénes: Hol tart az atom- és molekulafizikai kutatás?

Gulyás László: Egy- és többelektronos folyamatok atomi ütközésekben

Kövér László: Kemény röntgensugárzással keltett elektronok spektroszkópiája

Kürti Jenő: Kis átmérőjű szén nanocsövek

Nagy Ágnes: Pársűrűség-funkcionál-elmélet

Surján Péter: Perturbációszámítás a kvantumkémiában

Szőkefalvi-Nagy Zoltán: Hogyan segítheti az atomfizika a kulturális örökség megővését?



2005. május 10-én a *Csillagászati és Űrfizikai Bizottság* tudományos ülése keretében rendeztek előadássorozatot:

Kálmán Béla: A napfizika jelene és jövője

Erdélyi Róbert: A napkorona szeizmológiája és a szpikulák eredete

Kecskeméty Károly: Úridőjárás és a STEREO program

Vinkó József: Extragalaktikus távolságmérés szupernóva-robbanásokból

Erdős Géza: A Szaturnusz plazmakörnyezete a Cassini mérései alapján

Paparo Margit: Asztroszeizmológia: ahol az elmélet és a megfigyelés találkozik

Jurcsik Johanna: Modulációk az RR Lyrae csillagok oszcillációiban: 100 éve nyitott kérdések

Kun Mária: A csillagfejlődés korai szakaszai

Bagoly Zsolt: Egy s más a gamma kitérősekről

A RADIOAKTIVITÁS TANÍTÁSA, TÁRSADALMI HATÁSOK

Kis Tamás, Heves, Eötvös József Középiskola
Papp Zoltán, DE Környezetfizikai Tanszék

Kevés olyan fizikai jelenség van, mellyel az átlagember érzelmi viszonyt alakít ki. Úgy tűnik, hogy a radioaktivitás és néhány, vele rokon jelenség, fogalom (mint a sugárzás, maghasadás, reaktor, nukleáris) ilyen. E jelenségek, fogalmak sokszor előfordulnak a sajtóban és a médiában. A híradásokban például gyakran hallhatunk a környezetvédő mozgalmak harcáról az atomerőművek ellen, a radioaktív hulladékok tervezett tárolóinak ügyéről, az atomfegyverek felhasználásának esetleges veszélyeiről, vagy a sugárzó anyagok csempészetéről. Így az emberek gyakran találkoznak a „radioaktivitás” szóval és a rokon fogalmakkal, melyek bizonyos érzelmeket is kiváltanak belőlük. A fenti jelenségeknek, fogalmaknak a sajtóban és a médiában való szerepléséből az szűrhető le, hogy a hozzájuk fűződő érzetek, érzelmek túlnyomóan negatívak: közöttük a szorongás, a félelem, az elutasítás dominál. Ez a mindennapokban leginkább az atomenergia békés felhasználásának elutasításában, valamint a nukleáris fegyverek alkalmazásától való félelemben mutatkozik meg. Tudományos ismereteink alapján e negatív érzelmek, félelmek eltúlzottnak tűnnek. A negatív érzelmek okai sokfélék, ezeket mások (több-kevesebb körültekintéssel) már próbálták azonosítani (lásd pl. [1–3]). Az okok között a tudáshiány, az oktatás hibái és hiányosságai is fölmerültek. Jelen írásunkban azt szeretnénk megvizsgálni, hogy a radioaktivitással kapcsolatos tudás, érzetek és érzelmek kialakulásában milyen szerepe van az oktatásnak. Vajon mennyien és mennyire tudják jól, hogy mi a radioaktivitás, mik azok a sugárzások, és mitől kell, illetve nem kell félni? Miket hisznek az emberek a radioaktivitásról? A használható tudás hiányában, és a negatív érzelmi attitűd kialakulásában milyen szerepet játszik a közoktatás, és mit kellene ezen a területen változtatni ahhoz, hogy a helyzet javuljon? Ilyen és ezekhez hasonló kérdésekre próbálunk választ keresni írásunkban.

Honnan szerezhethet információt az átlagember a radioaktivitásról?

E tekintetben a közoktatás mellett alapvetően még két jelentős információforrás jöhet szóba: a sajtó és a média. Azokat a folyóiratokat (*Természet Világa*, *Élet és Tudomány*, *Fizikai Szemle*), melyekben szakmailag igényesen foglalkoznak a témával, csak kevesen olvassák, és ők is többnyire az átlagosnál jóval műveltebb emberek. Az e lapokban megjelenő cikkek feltételeznek is némely előismereteket, ezért megértésük az átlagember számára nem is lenne könnyű. A szélesebb olvasói rétegek informálásáért azok a sajtótermékek tehetnének többet, melyeket

szélesebb tömegek olvasnak. Ezeknél viszont a megnyilatkozó szakember tudálékossága és a laikus újságíró tudatlansága egyaránt komoly gondot okozhat. Ha egy cikkben az olvasó magyarázat nélkül hagyott olyan fogalmakkal és szakkifejezésekkel találkozik, melyek számára ismeretlenek, akkor hamar lemond az olvasottak felfogásáról. A szakkifejezések tudatlanságból származó téves használata is káros lehet. Erre jó példa a hírekben gyakran hallható, ijesztő „sugárfertőzés” szó. (Ennek érzelmi hatása még rombolóbb lehet, ha a következő hír az influenzajárványról vagy az agyhártya-gyulladásról szól.) A televíziós, rádiós hírműsorokban hallható információk is sokszor egyoldalúak, félrevezetőek, megbízhatatlanok, hibákat tartalmaznak. Még szerencse, hogy egyre több nézőhöz jutnak el a tudományos alapokon álló, színvonalas ismeretterjesztő tv-csatornák műsorai, és az MTV-ben is találkozhatunk megbízható, igényes tudományos műsorokkal, mint a nagy múltú *Delta*, vagy a nemrég indult *Mindentudás Egyeteme*. Ezek többségükben a laikus közönség számára is érthető ismereteket közvetítenek, és sokan nézik őket, de még nem elegenden ahhoz, hogy hatásuk átütő lehessen.

A sajtó és a média a fentiek szerint többnyire nem működik színvonalas információforrásként, a különféle szakmailag igényes ismeretterjesztő fórumok, „akciók” hatása pedig a teljes népesség szintjén nem kielégítő. Nehezen tűnik összeegyeztethetőnek a szakmai igényesség és pontosság a laikusok számára való érthetőséggel. Ez igencsak felértékeli az intézményes, iskolai oktatás szerepét. Az emberek a radioaktivitással kapcsolatban is leginkább a közoktatásban, középiskolai tanulmányaik során tehetnének szert alkalmas, használható tudásra. Kérdés, hogy ma szert tesznek-e?

Egy felmérés eredményei

A radioaktivitást a tudomány több mint egy évszázada ismeri. Iskolai oktatása csak jóval később kezdődött, de nálunk már több évtizede folyik. A radioaktivitás fogalma a sajtóban és a médiában is gyakori szereplő. Feltehető tehát, hogy az emberek nagy hányadának van valamilyen tudati képe erről a jelenségről. A radioaktivitásról kialakult tudás, vélemények, tévképzetek és érzelmi attitűdök felmérése céljából összeállítottunk egy kilenc kérdésből álló kérdőívet. Annak nem volt értelme, hogy ebben fizikai fogalmak, törvények ismeretét kérjük számon iskolás módon. A célunk inkább az volt, hogy az oktatás, valamint a sajtó és a média által közvetített információk nyomán létrejött „összképet” felmérjük.

A válaszadás könnyítése céljából nyolc kérdés esetében előre megadtunk több válaszlehetőséget, melyek között a helyes válasz(ok) is jelen volt(ak) több más, helytelen, félrevezető válasz mellett. A kitöltés tehát (egy kivétellel) az előre megadott válaszok közül való választást jelentette. A kérdőívek kitöltésére diákokat (20 fő) valamint közép- (56 fő) és felsőfokú (28 fő) végzettséggel rendelkező embereket kértünk meg, összesen 104 személyt. Közülük 16 diplomás budapesti volt, a többiek mind Heves megyei lakosok. A kérdőív kitöltése előtt a következő felhívásokat intéztük hozzájuk: „Kérjük, hogy a kérdőívet utánanézés, tájékozódás nélkül, saját meglévő ismeretei és érzései alapján töltsse ki! Ha az egyes válaszokat nem érzi egymást kizáróknak, vagy bizonytalan a válaszban, minden kérdésnél több válaszlehetőséget is megjelölhet!” A kiértékelt $104 \cdot 9 = 936$ kérdésből csupán kettő maradt válasz nélkül, ezzel szemben többször előfordult, hogy egymást logikailag kizáró lehetőségek közül egyszerre többet is választott a megkérdezett. Az alábbiakban bemutatjuk a kérdőív kérdéseit és a rájuk adott válaszok százalékos megoszlását. (A százalékarányok összege általában több 100%-nál, mivel sokan több választ is megjelöltek.)

1. kérdés: Ismeretei szerint mi a radioaktivitás?

- Egyes anyagok rádióhullámokat bocsátanak ki magukból (a tv- vagy rádióadókhoz, ill. a mobiltelefonhoz hasonlóan).
- A radioaktív anyag részecskéi időnként szerkezeti átalakuláson mennek át, és ennek során nagyon kicsi részecskék repülnek ki belőlük nagy sebességgel.
- A radioaktív anyagban vegyi folyamat megy végbe, melynek során az anyag kémiaiilag átalakul, és közben ultraibolya sugárzást bocsát ki.
- A radioaktivitás biológiai folyamat: az élő testszövetek működésük közben hőt termelnek, és hőszugárzást bocsátanak ki.

Válasz	Diák (%)	Középfokú v. (%)	Felsőfokú v. (%)	Összesen (%)
a	20	21,4	17,9	20,2
b	40	35,7	78,6	48,1
c	50	57,1	14,3	44,2
d	5	5,4	0	3,8

Ez a kérdés kifejezetten a fizikai fogalom jelentésére, tartalmára vonatkozott. A diákok még nem tanulták a középiskolában a fizikának ezt a részét, tehát ők csak egyéb forrásból megszerzett információkra támaszkodhattak. (Ez a többi kérdésnél is igaz!) Megdöbbentő, hogy a közép-fokú végzettségűek közül többen tartják a jelenséget vegyi eredetűnek, mint fizikainak. A megkérdezettek közül minden ötödik úgy véli, hogy a radioaktivitás a rádióhullámokkal kapcsolatos. Félő, hogy ez nem csak a két szó hangzásának hasonlósága miatt alakult így. Csak a válaszadók 48%-a ismeri jól a fogalmat, s ezek többsége felsőfokú végzettséggel rendelkezik.

2. kérdés: Ön szerint honnan származnak, és mikor keletkeztek a környezetünkben jelen lévő radioaktív anyagok?

- Kizárólag természetes eredetűek, és már a Föld keletkezése előtt létrejöttek.
- Kizárólag természetes eredetűek, de csak a Föld keletkezése után jöttek létre földi természetes folyamatokban.
- Részben természetes, részben mesterséges eredetűek: egy részük természetes úton keletkezett, másik részüket az emberi tevékenység hozta létre.
- Kizárólag mesterséges eredetűek, az ember technikai civilizációjának fejlődése során keletkeztek évezredek alatt.

- Kizárólag mesterséges eredetűek, az utóbbi száz év során keletkeztek (tudományos kísérletek, nukleáris fegyverkezés, atomerőművek).

Válasz	Diák (%)	Középfokú v. (%)	Felsőfokú v. (%)	Összesen (%)
a	0	3,6	7,1	3,8
b	10	5,4	7,1	6,7
c	50	50	92,9	61,5
d	20	8,9	0	11,5
e	25	41,1	3,6	27,9

A kérdés a jelenség kialakulásának időbeli elhelyezésén túl az eredetére is vonatkozik. A válaszadók csaknem 40%-a gondolja (tévesen), hogy a radioaktivitás egyértelműen mesterséges képződmény! Bizonytalán mérsékelné a radioaktív anyagokkal kapcsolatos túlzott félelmeiket, ha többen tudnának arról, hogy ezen anyagok túlnyomó hányada természetes eredetű, és már az ember előtt, annak működésétől függetlenül is jelen volt a környezetben. A felsőfokú végzettségűek közül többen gondolják a jelenséget természetes eredetűnek, mint mesterségesnek (a másik két csoportnál ez fordított), és itt kiugróan magas a helyes választ adók aránya, de néhányan közülük több, egymást logikailag kizáró választ is megjelöltek.

3. kérdés: A környezetben hol fordulnak elő kimutatható mennyiségben radioaktív anyagok? (Többet is választhat!)

- a talajban
- a kőzetekben
- a folyók, tavak vizében
- a csapadékban
- a levegőben
- az élelmiszerekben
- az ivóvízben
- az építőanyagokban
- a használati tárgyakban
- egyes ipari létesítményekben
- egészségügyi intézményekben
- az emberi testben

Válasz	Diák (%)	Középfokú v. (%)	Felsőfokú v. (%)	Összesen (%)
a	40	60,7	75	60,6
b	30	35,7	92,3	50
c	10	12,5	46,4	21,2
d	0	17,9	46,4	41,3
e	30	53,6	50	48,1
f	0	0	25	6,7
g	0	1,8	32,1	9,6
h	0	14,3	35,7	17,3
i	15	5,4	14,3	9,6
j	85	85,7	78,6	83,7
k	25	46,4	67,9	48,1
l	20	1,8	14,3	8,7

Több válaszadónak problémát okozott a kérdés általános vagy konkrét jellege (pl. „a mai Ukrajna területéről származó gombát nem érdemes megenni, de a spanyol narancsban aligha van sugárzó anyag”). A megadott 12 előfordulási lehetőség közül többen is (helyesen) mindet bejelölték. Volt, aki meg is jegyezte, hogy „mindenütt van radioaktív anyag, csak jó detektor kell a kimutatására, és sokáig kell szűrni”. Az élelmiszereket, az ivóvizet, a használati tárgyakat és az emberi testet viszonylag kevesen (<10%) jelölték meg előfordulási helyként, a talajt és az

ipari létesítményeket viszont a válaszadók több mint 60%-a. A mezőgazdaságban, illetve az iparban dolgozók saját termelési águkat nagyobb gyakorisággal jelölték meg. A válaszokból egyértelműen kiderül, hogy a megkérdezettek túlnyomó többsége nem tudja, hogy környezetében szinte mindenütt vannak radioaktív anyagok, sőt, azok saját testében is megtalálhatók.

4. kérdés: *Hogyan hat a radioaktív anyag a környezetre?*

- Zavarja a tv-, rádió-, illetve mobiltelefon-vételt.
- Gyakorlatilag nincs rá hatással, hiszen a keletkező sugárzás akadálytalanul áthatol a környezet anyagán (mint pl. a röntgensugarak az emberi testen).
- Aktivizálja a környezetében lévő anyag részecskéit, vagyis melegíti az anyagot.
- Változásokat okoz az anyag fizikai mikroszerkezetében: megbolygatja az atomok elektronszerkezetét, felbont egyes molekulákat.
- Megváltoztatja az anyag kémiai szerkezetét: hatására vegyi átalakulások mennek végbe az anyagban, új vegyületek keletkeznek.
- Az életműködés felgyorsításával növeli az élőlények aktivitását, javítja a reagáló-képességet.

Válasz	Diák (%)	Középfokú v. (%)	Felsőfokú v. (%)	Összesen (%)
a	15	7,1	7,1	8,7
b	40	21,4	10,7	22,1
c	15	5,4	10,7	8,7
d	50	48,2	85,7	58,7
e	0	26,8	35,7	24,0
f	0	1,8	0	1,0

Csupán egy valaki vélte úgy, hogy a radioaktív sugárzásnak kedvező hatása van az élő szervezetre. A megkérdezettek csaknem 10%-a gondolja azt, hogy a radioaktív sugárzás zavarja a rádiózást. Ez az arány az 1.a válasznál kapott 20%-nak csak a fele, de így is elgondolkodtató eredmény. A többség véleménye szerint a magátalakulások mikrofizikai változásokat okoznak a környezetükben, de jelentős a tábor a hatástalanságnak és a kémiai hatásnak is. Az adatokból megfigyelhető, hogy minél magasabb a válaszadók végzettsége, annál kevesebben mondják azt, hogy a radioaktív anyagok nincsenek kölcsönhatásban a környezetükkel.

5. kérdés: *Milyen a radioaktivitás hatása az élettelen környezetre?*

- Kedvezőtlen, mert számottevően megváltoztatja a természetes, eredeti viszonyokat, rontja a természeti környezet minőségét (pl. mérgező anyagok is keletkeznek).
- Közömbös, mert az élettelen környezet állapotát számottevően nem tudja befolyásolni.
- Előnyös, mert megváltoztatja ugyan a környezet állapotát, de az előidézett változások összességükben kedvezőek a környezet szempontjából (pl. a melegítőhatás).

Válasz	Diák (%)	Középfokú v. (%)	Felsőfokú v. (%)	Összesen (%)
a	60	76,8	75	73,1
b	40	41,1	25	36,5
c	0	0	10,7	2,9

Ez a kérdés már nem a hatás anyagi lényegére, mechanizmusára, hanem annak összefoglaló, szubjektív értékelésére vonatkozott. A megkérdezettek közül csupán a felsőfokú végzettségűek 10%-a van azon a véleményen, hogy a radioaktivitás pozitív hatással van az élettelen környezetre. Ezzel szemben a válaszadók csaknem háromnegyed része azt mondja, hogy a sugárzásnak káros

hatásai vannak, ami negatív elfogultságot mutat. Érdekes, hogy a helyes választ (b) a felsőfokú végzettséggel rendelkezők választották a legkisebb arányban.

6. kérdés: *Milyen a radioaktivitás hatása az élőlényekre?*

- Káros, mert a keletkező sugárzás roncsolja az élő szöveteket, és ez növeli egyes betegségek kialakulásának esélyét (a sugárzás erőssége függvényében).
- Gyakorlatilag nincs rájuk hatással, mert a keletkező sugárzás akadálytalanul áthatol a testükön.
- Előnyös, mivel kedvező élettani hatásai folytán az életműködéseket gyorsítja, az ellenálló-képességet növeli, az élettartamot meghosszabbítja.

Válasz	Diák (%)	Középfokú v. (%)	Felsőfokú v. (%)	Összesen (%)
a	95	98,2	96,4	97,1
b	5	3,6	10,7	5,8
c	0	0	17,9	4,8

Ez az előzőhöz hasonló jellegű kérdés volt az élővilágra vonatkozóan. A felsőfokú végzettségűek véleménye jobban megoszlik, mint a másik két csoporté, közülük többen mindhárom (egymást logikailag kizáró) választ megjelölték. Csak ezen válaszadók közül jelölték meg néhányan azt, hogy a radioaktív sugárzásnak pozitív hatása is van az élő szervezetre (ami kis dózisosknál, a kutatások jelen állása szerint akár még igaz is lehet). Azon megkérdezettek többsége, akik az előző kérdésnél úgy vélték, hogy a sugárzás nincs különösebb hatással az élettelen környezetre, az élőlények esetében már káros hatásokat feltételeztek.

7. kérdés: *Használnak-e ma radioaktív anyagokat szándékosan, mesterséges célokra? Ha igen, hol?*

- nem használnak
- használnak (az alábbiakból kiválasztandó, többet is megjelölhet):
 - az egészségügyben
 - az élelmiszeriparban
 - az energiatermelésben
 - a hadiiparban
 - az építőiparban
 - a rendőrségnél
 - a fémgyártásban
 - mobiltelefonokban
 - a közlekedésben
 - a régészetben

Válasz	Diák (%)	Középfokú v. (%)	Felsőfokú v. (%)	Összesen (%)
a	0	1,8	0	1,0
b (1)	60	58,9	89,3	67,3
b (2)	10	3,6	25	10,6
b (3)	95	89,3	82,1	88,5
b (4)	65	82,1	92,9	81,7
b (5)	5	5,4	7,1	5,8
b (6)	5	0	17,9	5,8
b (7)	25	7,1	14,3	12,5
b (8)	5	19,6	14,3	15,4
b (9)	5	3,6	10,7	5,8
b (10)	15	3,6	53,6	19,2

A 104 közül mindössze egyetlen ember gondolta úgy, hogy nem használnak radioaktív anyagokat a gyakorlatban. A legismertebb alkalmazási területek közül az energiatermelést inkább a diákok, a hadiipart pedig elsősorban a felsőfokú végzettséggel rendelkezők választották. Meglepő, hogy az utóbbi csoportba tartozók majdnem

1/5 része a rendőrséget is megjelölte (talán a lézeres sebességmérőre gondoltak?!). A megkérdezettek 15,4%-a szerint a mobiltelefonokban szándékosan használnak radioaktív anyagokat. Ez a tévképzet az 1.a és a 4.a válasszoknál is megfigyelhető volt, körülbelül hasonló arányban. A régészetet mint alkalmazási területet az alacsonyabb végzettségűek közül kevesen választották.

8. kérdés: *Megszavazná-e, hogy (megfelelő hatásvizsgálatok után) radioaktív hulladék-lerakót építsenek lakóhelye közelében?*

- Nem támogatnám, mert nem érezném magamat biztonságban.
- Nem támogatnám, mert a hatásvizsgálatok eredményében nem bízna meg, azt úgyis a különféle érdekek szerint alakítják.
- Nem mennék el szavazni, mert nem érdekelne az ügy.
- Nem mennék el szavazni, mert nem értek a témához.
- Igennel szavaznék, mert nem tartom veszélyesnek, és lakóhelyem támogatásához jutna, új munkahelyek is létesülnének.
- Igennel szavaznék, mert úgy ítélem meg, hogy alapos vizsgálatok után, hozzáértéssel megépített tárolóban ezek az anyagok biztonságosan tárolhatók.

Válasz	Diák (%)	Középfokú v. (%)	Felsőfokú v. (%)	Összesen (%)
a	50	73,2	53,6	63,5
b	30	42,9	21,4	34,6
c	0	0	0	0
d	10	3,6	3,6	4,8
e	5	0	0	1,0
f	30	3,6	25	14,4

Ezzel a kérdéssel a már kialakult véleményeket és a hozzájuk tartozó érzéseket kívántuk feltérképezni. Az „a” és „b” válasz egyértelműen elutasító. Többen mindkettőt megjelölték; ezt figyelembe véve a válaszadók körülbelül 85%-a szavazna „nem”-mel. Szomorú, hogy egyharmad részük nem bízik meg a hatásvizsgálatokban. Az, hogy a „c” és „d” lehetőséget nem, vagy alig választották, arra utal, hogy az emberek nem lennének közömbösek egy ilyen kérdés eldöntésénél. Igennel csupán a megkérdezettek 15%-a szavazna a hulladéktemető megépítésére. Ezek nagyobb hányada diák (aki még feltehetően nem veszítette el bizalmát) és felsőfokú végzettségű (aki valószínűleg több ismerettel rendelkezik). Valós esetben azonban a szavazók többsége szakmunkás vagy érettségizett személy lenne.

9. kérdés: *Írjon három olyan szót, amely a radioaktivitásról az eszébe jut!*

Szavak, szócsoporthoz	Gyakoriság
atomenergia, atomerőmű, reaktor	47
atombomba, nukleáris fegyverek	37
betegség, daganat, rák	33
sugárzás	22
Csernobil	14
hulladék	9
röntgensugárzás, tüdőrák	9
káros	8
Paks	8
sugárterápia, gyógyászat	8

A megadott szavak közül az azonos jelentésűeket ugyanabba a „szócsoporthoz” soroltuk. A 104 megkérdezett 65féle szócsoporthoz adott meg, a tíz leggyakoribbat tüntettük fel a táblázatban. Ezek között jóval több a negatív, mint a pozitív érzelmi töltetű. Várható volt, hogy az atomerőmű és

az atombomba fordul elő legtöbbször. A csernobili katasztrófa még most is élénken él az emberek emlékeiben; három diák is választotta, annak ellenére, hogy ők már a bal eset után születtek. Valószínűleg kevesen tudják a megkérdezettek közül, hogy a röntgensugárzás és a radioaktivitás között nincs szoros kapcsolat, erre utal a tüdőrák. Néhány további szó az összegyűlteknél (zárójelben az előfordulás száma): radioaktív izotóp (7), Curie-házaspár (4), maghasadás (3), uránérc (3), láthatatlan veszély (3), Hiroshima (3), sugárfertőzés (2). Érdekes képzettársítások: rádió (3), mobiltelefon (2), ultraibolya sugárzás (2), tv (1), szmog (1), zöld (1), elektromágnes (1), adóvevő (1).

Közvetlen tanulságok

A kérdőívek kiértékelése nyomán egyértelműen kiderült, hogy a kérdések által érintett témakörökben a megkérdezettek többsége nem rendelkezik helytálló, a hétköznapiakban megbízhatóan használható tudással. Azok, akik a magátalulást vegyi folyamatnak gondolják, vagy azt hiszik, hogy a mobiltelefonok működéséhez radioaktív anyagokra van szükség, minden bizonnyal ebbe a csoportba tartoznak. A kitöltés során néhányan megjegyezték, hogy nem értenek a témához. Nyilvánvaló, hogy egy esztendővel vagy egy magyar szakos tanárnőtől nem várható el, hogy ismerje a bomlástervezést vagy az egy nukleonra jutó kötési energiára vonatkozó összefüggéseket. De akkor milyen ismeretekre lenne szükségük?

A radioaktivitástól sokan félnek. Úgy tűnik, hogy e mögött jelentős részben az ismeretlentől való félelem húzódik meg: a helytálló tudás, a megbízható információk hiánya vezet a túlzott félelemhez. Nem lehet és nincs is értelme megszerettetni az emberekkel a radioaktivitást, de egyes információk közlésével az ellenérzések jelentősen enyhíthetők lennének. Ilyen szempontból jó lenne, ha az átlagember is tudna egy keveset arról, hogy

- honnan származnak a radioaktív anyagok, és mióta léteznek,
- a természeti környezetben hol fordulnak elő, és milyen célokra használja őket az ember,
- mekkora veszélyt jelent a radioaktivitás az élőlényekre,
- mik azok az ionizáló sugárzások, és hogyan hatnak az anyagra,
- milyen összetevői vannak a lakosságot érő sugárterhelésnek, és ezek közül milyen a mesterséges és természetes eredetű komponensek aránya.

Ezeket a tudáselemeket a felnőttekhez már csak nehezen tudjuk eljuttatni, de a felnövekvő generációk még hozzájuthatnának ezekhez az információkhoz az iskolákban. Látható tehát, hogy nagy felelősség hárul az oktatásra.

A radioaktivitás az iskolában, a követelmények oldaláról

A radioaktivitás a felfedezéséért kapott 1903-as fizikai Nobel-díj után vált szélesebb körben ismertté, a középiskolai tananyagban azonban csak majd fél évszázaddal később jelent meg. A középiskolai oktatásba csak az egy-

szerűbb, viszonylag kevés matematikai ismeretet igénylő anyagrészek épülhettek be.

A II. világháború előtt, illetve az azt követő években csak néhány jól felkészült, lelkes pedagógus tanította a témát középiskolában saját kezdeményezéséből. Ők az általuk készített jegyzetből, saját módszereikkel, tankönyv nélkül oktattak. Az általunk fellelt első tankönyv, mely a témát tárgyalja, az *Öveges József* által írt, 1954-ben megjelent *Kis fizika II.* A hivatalos állami tantervbe az 1960-as években került be a téma. *Sas Elemér* 1974-ben felvételizőknek írt könyvében (*Beszélgetések a fizikáról*) az atomfizikán belül két oldalt szentel a radioaktivitásnak. Az 1975 után íródott középiskolai fizika tankönyvek (nem önálló fejezetként) már részletesen bemutatják a jelenséget.

Az 1996/97-es tanévben megjelent Nemzeti Alaptanterv (NAT) szerint minden általános- és középiskolában el kellett készíteni a helyi tantervet. A radioaktivitást a NAT *Ember és természet* műveltségi területe Fizika tantárgyának tanterve tartalmazza. *Az atommag és szerkezete* című témakör a tanterv szerint 11 órát kap. A tantervben nem esik szó a radioaktivitás környezeti előfordulásáról, viszont említésre kerül a sugárvédelem.

Az 1999/2000-es tanévben megjelent Kerettanterv újítása, hogy a fizikától elvett egy évet a középiskolában, és még egy évet az általános iskolában. Tehát a tanterv alapján fizikát 7. osztálytól 11. osztályig kell tanulni, szemben a korábbi gyakorlattal, mely szerint 6.-tól 12.-ig (vagyis IV-ig) oktatták a tárgyat. A kerettantervben csupán 8 óra marad a teljes magfizika megtanítására. Ilyen leépítés mellett nehéz elérni, hogy a tanulóknak megfelelő kép alakuljon ki az atommaggal kapcsolatos jelenségekről.

2004-ig fizikából választható volt szóbeli vagy írásbeli érettségi. Az utóbbi évek írásbeli vizsgáinak feladatai között alig voltak radioaktivitással kapcsolatosak. Csak elméleti kérdésként merült fel néhány fogalom: rendszám, tömegszám, izotóp (1998-ban). A szóbeli érettségi feladatait a szaktanárok állították össze úgy, hogy a négyéves fizika tananyag minél nagyobb részét lefedje. Ennek megfelelően a tanár saját ízlése, a gyerekek tudása és a leadott anyag szerint elég szabadon válogathatott. Radioaktivitással kapcsolatos fogalmak így a szóbeli érettségiben is eléggé ritkán kerültek elő.

Tapasztalataink szerint az írásbeli felvételen sem volt szokás atomfizikai feladatot adni. Szóbeli felvételi fizikából az utóbbi években kevés egyetemen vagy főiskolán volt, a jelentkezők általában mentességgel kerültek be a felsőoktatási intézményekbe. Az orvosi egyetemeken esetében nem volt mentesség, és a kiadott tételsorok mind egyikében szerepelt a radioaktivitás.

Komoly változást hozott a vizsgarendszerben az idén bevezetett kétszintű érettségi. Az érettségi kiváltja a felvételi vizsgát, és a felsőoktatási intézmények eldönthetik, hogy milyen szintű vizsgát követelnek a jelentkezőtől. Fizikából mindkét szinten kötelező az írásbeli és a szóbeli vizsga. A vizsga tartalmi követelményei között, *Az atommagban lejátszódó jelenségek* címszó (4.3.) alatt külön alfejezetként szerepel a *Radioaktivitás* (4.3.2.), amely azonban elsősorban a szorosan vett fizikai ismeretekre koncentrál. A témák között szerepel a *Mesterséges*

radioaktivitás, a követelmények között pedig előkerül a radioaktív izotópok *ipari, orvosi és tudományos alkalmazása* is. Mindez azonban egyoldali, mert a logikailag szükséges *Természetes radioaktivitás* téma hiányzik. A követelmények között főfejezetként (4.4.) szerepel a *Sugárvédelem* témakör, és ezen belül említésre kerül a *radioaktív sugárzás biológiai hatása*, a *háttérsugárzás eredete*, valamint *az embert érő átlagos sugárterhelés összetétele* is. Ezek fontos lépések a jó irányban, kérdés azonban, hogy hogyan, és egyenként milyen részletességgel tárgyalják ezeket a témák a tanórákon.

A fizika érettségien megkövetelt ismeretmennyiség általában véve aránytalanul nagy a lecsökkentett óraszámhoz képest! Szem előtt tartva az elérendő célokat és az oktatásra rendelkezésre álló időt, talán érdemes lenne újragondolni a követelményeket. A helyzetet jelentősen az sem könnyíti, hogy az iskoláknak biztosítaniuk kell egy bizonyos órakeretet az emelt szintű érettségit választó fiatalok felkészítésére. Szerencse, ha ezeken az órákon sikerül pótolni a kimaradt tananyagot a résztvevő néhány diák esetében.

Érdekes módon a radioaktivitás megjelenik a közép-szintű *matematika* érettségire szánt példatárban, amely a jól ismert „zöld könyv”, az *Összefoglaló Feladatgyűjtemény Matematikából* felváltására készült. Például:

„845. A bizmut-214 radioaktív izotóp 10%-a 3 perc alatt elbomlik. Tudjuk, hogy a radioaktív bomlás exponenciális folyamat, az $m = m_0 \cdot 2^{t/T}$ egyenlet írja le, ahol m a pillanatnyi tömeg, m_0 a kezdeti tömeg, t az eltelt idő, T pedig az anyag felezési ideje.

a) Mekkora a ^{214}Bi felezési ideje?

b) Mennyi idő múlva marad meg az eredeti mennyiség 0,01%-a?”

A példatár még öt hasonló feladatot tartalmaz. A fenti feladat szövege félvezető: azt sugallja, hogy a radioaktív bomlásban a tömeg eltűnik.

Hogyan és miből taníthatjuk?

Az atommag szerkezetének és a magfolyamatoknak a megtanítására jó esetben körülbelül 10–12 óra áll rendelkezésre. Nem egyszerű feladat a témához kísérletet bemutatni, mert a legtöbb középiskolában még egyszerű GM-csőves számláló sincs. Nagyon sok interaktív CD-ROM és videoanyag közül lehet választani, de a videofilmelek vagy a számítógépes szimulációk nem helyettesíthetnek igazi órai kísérleteket.

A radioaktivitás a fizikán belül olyan témakör, melyről a fiataloknak nincs saját tapasztalatuk, ezért különösen oda kell figyelni arra, hogyan alakítjuk ki az egyes fogalmakat.

Az atom szerkezete, a radioaktivitás érdeklí a diákokat. Érdeklődésüket könnyebb fenntartani, ha a tanár a szorosan vett fizikai ismeretek mellett beszél a tanultak tágabb természettudományos, társadalmi, környezeti vonatkozásairól. Az, hogy majd szó lesz az atombomba működéséről és a csernobili balesetről, a fejezet tárgyalása során folyamatosan fenntartja a diákok figyelmét. Mivel a témáról az iskolán kívül is sokat hallanak, felme-

rülő kérdéseikkel besegítenek az órák felépítésébe. A tananyag logikus magyarázatát, az órák menetét meghatározza, hogy minden fogalmat, jelenséget a történetiséghez hűen, a felfedezések sorrendjében is lehet tanítani.

Egy jó tankönyv egyaránt segíti a diákok és a tanárok munkáját. Mivel a rendszerváltás óta a tankönyvkiadás piacorientált lett, igen sok fizikakönyv, példatár és segédanyag jelent meg. A tantervek folyamatos változtatása, az iskolarendszer átalakítása (a hat- és nyolcévfolyamos gimnáziumok létrejötte, a szakiskolák képzési struktúrájának módosítása) azt eredményezte, hogy kipróbálatlan, gyakran hibás könyvek kerülnek az iskolákba. A négyhat évre tervezett tankönyvcsaládokat felmenő rendszerben adják ki: a tanároknak úgy kell választaniuk, hogy csak egy-két évfolyamra elkészült könyvet látnak, és a többi kötet még nyomda közelébe sem került. Az ilyen tankönyvcsaládokat két-három évenként átdolgozzák, ezért a tanároknak is mindig új példányt kell rendelniük ezekből (a szertárakban polcokat töltenek meg a néhány éves, de már „elavult” könyvek).

A magfizika tárgyalása abban mindenképp eltér a többi fejezetétől, hogy itt kevés a „számolás feladat”, néhány könyv nem is tartalmaz ilyet. A téma abból a szempontból is speciális, hogy kevés kísérlet mutatható be hozzá, ezért csak a könyvekben található képek és ábrák vannak a tanárok segítségére.

Napjaink fontos követelménye az oktatással szemben, hogy a hétköznapi életben is jól használható, gyakorlatias tudást közvetítsen. Éppen ezért probléma, hogy a forgalomban lévő tankönyvekben gyakorlatilag nem esik szó arról, honnan származnak, és a környezetben hol, milyen mennyiségben fordulnak elő a különféle természetes és mesterséges eredetű radioaktív anyagok. Pedig, ha ezek az ismeretek nem jutnak el a diákokhoz, akkor a további, sugárterhelésről, sugárvédelemről szóló információk megalapozatlanná, érthetlenné, félrevezetővé, sőt, ijesztővé is válhatnak. A sugárzás káros biológiai hatásáról ugyanis általában szó esik a könyvekben, és viszonylag részletesen tárgyalják a maghasadás, láncreakció, atomerőmű, atombomba témakört is. A természetes háttérsugárzásról viszont legfeljebb csak az említés szintjén esik szó, és ez az egyoldalúság kedvez a negatív érzelmi attitűd kialakulásának.

Egy nemzetközi összefogásról

Nemcsak hazánkban, hanem sok más országban is tapasztalható a lakosság félelme a sugárzó anyagoktól és az atomenergiától. A félelmet és az ezzel együtt járó bizalmatlanságot részben bizonyára az ismeretek hiánya okozza. „A világnak a magfizikáról alkotott véleménye nyomasztóan negatív.” – írja *Ray Mackintosh* [4]. Az 1990-es évek végén két nemzetközi tudósszervezet – a PANS (*Public Awareness of Nuclear Science*) és a NuPECC (*The Nuclear Physics European Collaboration Committee*) – összefogást sürgetett a fizikusok között azzal a céllal, hogy dolgozzanak ki módszereket a magfizikáról kialakult kép javítására. A sok ország fizikusaiából és fizikatanáraiból álló csapat egyik vezéregyénisége az imént idézett *Ray Mack-*

intosh lett. Alapvetően három tervet dolgoztak ki arra, hogy emberközelihez hozzák az atomfizikát:

- *Népszerűsítő könyv*: ez a magfizika érdekességeit mutatja be, s széles olvasóközönség számára íródott. A könyv több nyelven is megjelent, Magyarországon 2003-ban *Az atommag – utazás az anyag szívébe* címmel került a boltokba. A könyv valóban érthetően, egyszerű nyelvezettel mutatja be a nukleonok világát. *Nukleáris tájkép* című fejezetében sokat olvashatunk arról, hogy környezetünkben hol található radioaktív anyagok. A szerzők komoly gondot fordítottak arra, hogy a radioaktivitást ne valamilyen idegen, misztikus jelenségként mutassák be.

- *Vándorkiállítás: Radioaktivitás, a természet része* címmel. „A kiállítás színes képanyaggal és kapcsolódó szöveges részekkel mutatja be a radioaktivitás rendkívül színes és sokoldalú világát. A jelenségek, alapelvek ismertetése mellett képet ad az alkalmazások igen széles területéről. Kísérleti eszközök állnak rendelkezésre a fontosabb berendezések és mérési eljárások szemléltetésére.” – olvashatjuk a kiállításról megjelent tájékoztatóban. A látványos bemutatót hazánkban a Debreceni Egyetemen és az Eötvös Loránd Tudományegyetemen láthatták az érdeklődők 2003-ban.

- *Weboldal*: a tervek szerint ez a többnyelvű internetes oldal – www.nupex.org – oktatási segédanyagokat tartalmaz majd. A legfrissebb kutatási eredményeken kívül az iskolai felkészülést segítő anyagok, képek és videofelvételek is találhatóak lesznek rajta.

Mi azonban a magunk részéről azt gondoljuk, hogy a fenti típusú akcióktól várható siker eltörpül ahhoz a hatáshoz képest, amelyet a kötelező közoktatás terepén végrehajtott alkalmas változtatásokkal el lehetne érni.

Mit kellene változtatnunk?

A fentiek szerint úgy tűnik, hogy az emberek nagy hányada egyszerűen nem tud arról, hogy a radioaktivitás főként természetes eredetű jelenség, hogy a környezetben mindenütt (még az emberi testben is) jelen van, és hogy annak nyomán keletkező (jórészt természetes eredetű) ionizáló sugárhatásnak állandóan ki vagyunk téve. De hát honnan is tudna ezekről, ha soha nem hallott vagy olvasott róluk? Ezek az ismeretek sokáig nem voltak kötelező elemei (és többnyire még ma sem azok) sem a gimnáziumi, sem az egyetemi oktatásnak, még a fizikus és fizikatanár egyetemi szakok esetében sem. (Ezzel magyarázható, hogy fizikus–fizikatanár körökben is szinte az újdonság erejével hatott a fent említett kiállítás címe, vagyis hogy a radioaktivitás a természet része.)

Mások tapasztalatai is azt mutatják, hogy gondok vannak a magfizika tanításával, és ezért a diákok és a lakosság ismeretei hiányosak és egyoldalúak. Több mint ezer 11–16 éves angol diákra terjedt ki az a felmérés, melynek eredménye szerint a diákok 84%-a vélte úgy, hogy az atomerőművek (ionizáló) sugárzás forrásai, ugyanakkor csak 33%-uk gondolta, hogy ilyen sugárzás természetes úton, a világűrben, vagy a kőzetekből is származhat. Ugyanezeknek a diákoknak 78%-a tudta, hogy a su-

gázás halálos lehet, de csak 21%-uk hallott arról, hogy az hasznos célokra, például sterilizálásra (kórokozók elpusztítására) is használható [5]. Kézenfekvőnek tűnik a feltételezés: a diákok sokkal többet hallottak az atomerőművekről és a sugárzás veszélyességéről, mint arról, hogy a sugárzásnak természetes forrásai is vannak, és hasznos technológiai célokra is alkalmazható. Mindez nyilván az oktatott tananyag egyoldalúságának és hiányosságainak köszönhető, ami aztán később bizalmatlansághoz vezet a sugárzó anyagok alkalmazásaival, a nukleáris technikával szemben. Figyelembe véve, hogy a széles körben elterjedt alkalmazások – beleértve az atomenergia békés célú felhasználását is – nélkülözhetetlenek az emberi civilizáció számára, fontos lenne mérésékelni a lakosság alaptalan kételyeit, túlzó félelmeit. Ebben segíthet az ismeretterjesztés is, de sokkal fontosabb a szerepe a közoktatásnak.

A fizikaoktatás legfőbb célja a természet megismertetése. A környezetünkben megfigyelhető jelenségeket modellező, leíró fogalmak és törvények azonban tartalmatlanok maradnak, ha nem kapcsoljuk össze őket a valós élettel, és nem mutatunk rá arra, hogy miért fontosak ezek az ismeretek az emberiség számára. Ezért a fizika tantárgy keretében is a mainál több időt kell fordítanunk a mindennapi életben való jobb eligazodást segítő, hasznos információk közlésére, még akkor is, ha ennek nyomán csökken az elvont, akadémikus jellegű, tudományos ismeretanyag közlésére fordítható idő.

A diákoknak a fentiek miatt fontos lenne többet tudniuk arról, hogy a környezetben jelenlévő radioaktív anyagok hogyan és mikor kerültek a környezetbe, és a környezet egyes elemeiben hol és milyen mennyiségben fordulnak elő. Ennek alapján reálisabban tudnák megítélni, hogy ezek milyen veszélyt jelentenek az élőlényekre és az emberre. Tudniuk kellene továbbá arról is, hogy az

ionizáló sugárzásoknak a radioaktivitáson kívül más forrásai is vannak, és hogy az ionizáló sugárzásoktól származó egészségi kockázatok hogyan viszonyulnak a mindennapi élet más kockázataihoz. A divatos szakszavak használatával azonban óvatosabban kellene bánni. A „sugárvédelem” szót például csak olyan szöveggörnyezetben kellene használni, amikor ténylegesen a (túl nagy mennyiségű) sugárzás elleni indokolt védekezésről esik szó. A sugárvédelem szó túl gyakori és indokolatlan használata (pl. a természetes környezeti sugárzással kapcsolatban) ugyanis a laikusokban azt a tévképzetet erősítheti, hogy az ionizáló sugárzás mindig, minden formájában veszélyes dolog, amely ellen minden körülmények között védekezni kell. E cikk második szerzője ebből a megfontolásból javasolta annak idején, hogy a kétszintű fizika érettségi követelményrendszerében a 4.4. téma címe *Sugárvédelem* helyett *Ionizáló sugárzások* legyen, de javaslata nem talált meghallgatásra.

Az a véleményünk, hogy a radioaktivitással és a nukleáris technika alkalmazásával szemben megnyilvánuló félelmeket, szorongást, bizalmatlanságot jelentősen oldani lehetne azzal, ha változást tudnánk elérni az oktatott ismeretek tartalmában és hangsúlyaiban a fent körvonalazott irányok mentén, és ehhez hozzá tudnánk igazítani követelményrendszerünk és tankönyveink tartalmát és szemléletmódját is.

Irodalom

1. Z. JAWOROWSKI: *Radiation risk and ethics* – Physics Today 52 (1999) 24–29
2. *A nemzetközi Csernobil-vizsgálat* – Fiz. Szemle 42 (1992) 375
3. *Temelin és a bétlábú zsiráf* – Fiz. Szemle 52 (2002) 85
4. R.S. MACKINTOSH: *Telling the world about nuclear physics* – Physics Education 36 (2001) 35–39
5. E. BOYES, M. STANISSTREET: *Children's ideas about radioactivity and radiation: Sources, modes of travel, uses and dangers* – Res. Sci. Technol. Educ. 12 (1994) 145–160

A XXVIII. ORSZÁGOS ÁLTALÁNOS ISKOLAI FIZIKATANÁRI ANKÉT ÉS ESZKÖZKIÁLLÍTÁS

A XXVIII. Országos Általános Iskolai Fizikatanári Ankét és Eszközkiallítást 2004-ben június 21–25. között Karcagon rendezte meg az Általános Iskolai Oktatási Szakcsoport. Az általános iskolai fizikatanárok számára szervezett legrangosabb szakmai konferenciának több mint 110 résztvevője volt. A sikeres rendezvényen hagyományosan sok olyan általános iskolai tanár volt jelen az idén is, aki 30 óras akkreditált továbbképzésként teljesítette azt.

A magas színvonalú szakmai tanácskozásnak a Karcagi Déryné Művelődési és Ifjúsági Központ adott helyet és biztosított kellemes körülményeket. A megnyitó ünnepélyességét fokozta a tehetséges karcagi gyerekek szereplése, az ízesen előadott vers (*Kunsági Elégia*), az élvezettel bemutatott néptánc (rábaközi ugrós) és az ugyancsak helyi ihletésű próza.

A díszelnökségben helyet foglaló *Fazekas Sándor*, Karcag polgármestere meleg szavakkal köszöntötte az ideérkezőket és kifejtette: Karcag – a Nagykunság fővárosa – elismerésnek és megtiszteltetésnek tekinti, hogy a rendezvénynek helyet adhatnak. *Németh Judit* akadémikus, az ELFT elnöke röviden, tömören tartalmaz egyúttal kívánt, *Csákány Antalmé*, az Általános Iskolai Oktatási Szakcsoport elnöke pedig nyitó beszédében az ankét mottójára kívánta felhívni a figyelmet: „Az iskolának tekintettel kell lennie a tudomány és a társadalom változásaira” – idézve *Nagy Károly* professzort (ELTE).

A megnyitó alkalmával került sor a 2004. évi Mikola-díj átadására, amelyet eddigi eredményes munkája elismeréseként FÜLÖP VIKTORNÉ mosonszentmiklósi és HORVÁTHNÉ FAZEKAS ERIKA szegedi fizikatanár kapott. Ebben az



Az ankétot Csákány Antalné, az Általános Iskolai Oktatási Szakcsoport elnöke nyitotta meg.

évben már ötödik alkalommal került átadásra az Öveges József-érem, amelyet az idei verseny győztese, SZIRMAI PÉTER (Kisvárdai) nyolcadik osztályos tanuló és tanára, MÓNUS TIBOR vehetett át.

Az ünnepélyes szavak után Németh Judit akadémikus *A világegyetem fejlődése* címmel tartott szemléletformáló előadást, amellyel a kozmológia „fiatal tudományának” rejtelseibe vezette be a hallgatóit a világról kialakult ismeretek fejlődési folyamatának döntő lépéseit felvillantva egy-egy kimagasló egyéniség megemlékezésével Arisztarkhosztól, Kopernikusz, Galilei, Kepler, Newton, Einstein és Hubble tevékenységén át Gamowig és Wilsonig. A folytonosság jegyében arról is szólt, mely területeken várható áttörés, és milyen irányokban folynak előrehaladott kutatások. A tennivalók fontosságát azzal a ténnyel is aláhúzta az ELFT elnöke, hogy a tanítás során már az általános iskolás korosztályban is tudatosítani kell: a fizika sem lezárt tudomány, mindig vannak nyitott kérdések, amelyek megfejtése a növendékekre vár, akik újabb kérdéseket találnak majd.

A nap második előadását Janszky József *A fizika jelene és jövője* címmel tartotta. Az előadás szinte az előző téma folytatása, kiegészítése volt. A fizika fejlődése és forradalma nemcsak a tudomány régi paradigmáit váltotta fel újakkal, hanem új természetszemléletet is létrehozott. Két nagy kérdés vonul végig: az egyik a tér és az idő természetének, a másik az anyag felépítésének a kérdése. Az első az abszolút és a viszonylagos, a második a folytonos és a nem folytonos kategóriáinak konfliktusát hordozza. Az elsőből született a relativitáselmélet, a másodikból a kvantumelmélet. A kvantumelmélet az emberiség legnagyobb intellektuális kalandja, amelyről nehéz eldönteni, hogy áldás-e vagy átok. A kvantummechanika, lézerekémia, szupravezetés terén elért eredmények ismertetése mellett, látványosan illusztrált újításokat láttunk, hallottunk még a nanostruktúrák, nanotechnológia, nanoelektronika kutatási területeiről, várható jövőjéről.

Szóba kerültek a legfrissebben felfedezett anyagszerkezeti alapelemek és az összetett hadronok is, így egyebek között a pentakvarkok is. Megtudtuk továbbá, hogy a nanotechnológia olyan tervezési és építkezési elvek,

eljárások és módszerek összessége, amelyek segítségével az atomi szinten, nanométeres méretű objektumok építése, létrehozása válik lehetővé. A nanotechnológia az a terület, amely a mindennapi életünket teljesen átforgalmazhatja, és amelyen elmosódik a határvonal az élő és élettelen között. A XXI. században az idegtudományok fejlődése elérte azt a fokot, ahol a modellek egzaktága már lehetővé teszi a neuromorf eszközök elkészítését és egyben az ember mint kommunikátor és információfogyasztó kognitív képességeinek figyelembevételét.

Egy másik fontos területről szólt még az előadó, amely fontos lehet az emberiség sorsa szempontjából, a magfúzióról. Ha nem sikerül megoldani az ellenőrzött fúziós energiatermelést, a XXI. század egy nagy energiaválság évszázada lehet, hiszen körülbelül ötven év alatt elfogyhatnak a jelenleg használt energiahordozók. A jövő beláthatatlan fejlődési ütemét és irányát is volt hivatva ez az előadás érzékeltetni.

Folytatásként a fenti gondolatok kissé más aspektusból való megközelítése következett Tóth Nelli és Kardos Péter előadásában, akik az Energia Klubot és a tőlük beszerezhető, gyerekeknek szóló oktatóprogramjaikat mutatták be. Az Energia Klubot 1991-ben tíz magyar környezet- és természetvédelmi szervezet hozta létre, és 1995-től Energia Klub Környezetvédelmi Egyesület néven önálló, kiemelkedően közhasznú szervezetként van bejegyezve. Célja az energiatermelés és az energiafelhasználás környezeti és társadalmi problémáinak minimalizálása. Ennek érdekében olyan fenntartható, atomenergia mentes energetikai rendszer létrejöttét támogatja, amely decentralizált, diverzifikált és a legkisebb költség elvén nyuszik. Céljai megvalósítása érdekében leginkább az energiapolitika, a klímavédelem, az energiahatékonyság, a megújuló energiaforrások, az atomenergia, valamint a globalizáció kritikája területén tevékenykedik. Szemléletformálással próbálnak mindenkit rádöbbeníteni, hogy „*Apró, kis lépéseket tehetünk azért, hogy kisebb legyen az ökológiai lábnyomunk a Földön. Az első fontos lépés, hogy információt szerezzünk a körülöttünk lévő világról annak tudatában, hogy milyen bonyolult folyamat a szén korából átlépni a Nap jövőjébe.*”

Fontos cél a környezettudatos, energiatakarékos gondolkodás mikro és makro méreteken, ami nemcsak köz-

Az ankétot otthont adó Karcagi Déryné Művelődési és Ifjúsági Központ



vetlen anyagi haszonnal jár, de a környezetszennyezést is csökkenti. Szinte minden emberi tevékenység üvegházhatású gázok kibocsátásával jár. Bolygónk lakhatóságának egyik alapja az egyensúlyban tartott üvegházhatásnak köszönhető viszonylag állandó átlaghőmérséklet és éghajlat. Földünk éghajlata nagyon érzékeny, összetett rendszer. Annak érdekében, hogy elkerüljük a katasztrofális méretű éghajlatváltozást, nemzetközi szintű összefogásra, nemzeti szintű elkötelezettségre és konkrét lépésekre van szükség. Ilyen konkrét lépés lehet az a bemutatott oktatási segédanyag, amely plakátokat, feladatlapokat és a 11–15 évesek életkori sajátosságaihoz illeszkedő konkrét tevékenységek szervezéséhez készült oktatócsoportot tartalmaz. Hatékonyan segíti a természeti jelenségek és folyamatok jobb megismerését, a környezettudatos nevelést.

Nagy várakozás előzte meg a Szabó Gábor, az ELFT főtitkára által vezetett fórumot, amelyen az Oktatási Minisztérium megjelent képviselőihez már előzetesen lehe- tett kérdéseket intézni. Az OM képviselőjében Szentirmai László főosztályvezető *A tanügyirányítás aktuális kérdései* címmel tartott tájékoztató előadást a tudásváltás jellemzőiről, a paradigmaváltásról, a tanári szerep változásairól, az EU lisszaboni stratégiájáról.

A hallgatóság érdeklődéssel fogadta a XXI. századi tanármodellről felvázolt jellemzőket: ő az, aki a tudásalapú társadalomban információmenedzserként társ az élet-hosszig tartó tanuláshoz szükséges képességek, kompetenciák kialakításában, fejlesztésében. A fejleszteni kívánt, szükséges kompetenciák pedig: az intelligens tanulás, digitális írástudás, problémamegoldó készség, kommunikációs készség, szociális és életviteli készségek. Karsai László, az OM főosztályvezető-helyettese is bekapcsolódott a fórumon felmerülő kérdések megvitatásába. Az előzetesen összegyűjtött, konkrét kérdésekre adott – olykor túl diplomatikus, vagy „hivatalos” – válaszok, beszédek nem nyugtatták meg maradéktalanul a fizika egyre szűkülő mozgásteréért aggódó résztvevőket.

Az ELFT Általános Iskolai Oktatási Szakcsoportjának szervezeti életében fontos eseményre került még sor ezen a napon, amikor taggyűlés keretében a Szakcsoport vezetősége személynként beszámolt a tagságnak az elmúlt éves tevékenységéről. A jelen lévő tagok pedig megfogalmazták, miben kérik a vezetőség, a Társulat segítségét. A Szakcsoport hagyományossá kívánja tenni az ilyen nyílt párbeszédet a tagsággal.

A következő nap az alternatív pedagógiák, alternatív iskolák bemutatkozása jegyében telt, az első jelentős akkordként Vekerdy Tamás *Intézmény? Tanterv? Tudomány? Gyerek?* című nagy ívű előadása hangzott el. Ebben főként a pedológiáról és a Waldorf-iskoláról esett szó összehasonlításban a mai magyar valósággal. „*A mai magyar iskola kudarcra szocializál, ... Nálunk a tanulók közötti társadalmi különbség évről évre nő.*” Ezek okát abban látja az előadó, hogy mi, pedagógusok siettetjük a fejlődést. Nem engedjük, hogy a gyerek saját egyéni ütemében haladjon előre a tudás megszerzésekor. Így a tanulak nem tudnak összeállni egységes egésszé. „*Olyan tanulási szituációkat kell teremteni, ahol a tanuló »megmerítkezhet« az ismeretszerzés élményében, így*

biztosan maradandó tapasztalatokra tehet szert. Ebben a munkában a tanár szerepe elsősorban a szervezés.” – hangsúlyozta Vekerdy professzor.

Ezt követően konkrét iskolai programokról számoltak be ott tanító szakemberek, mint a solymári Waldorf Iskolából Karkus Ottó a náluk folyó fizika- és kémia-tanítás témáit ismertette, Somogyi Ágota pedig a természettudományok integrált oktatását mutatta be kooperatív csoportmunka szervezésével, ahogyan azt a Közgazdasági Politechnikumban csinálják, külön blokkokban. Ebbe a sorba illeszkedett a Tóth László által bemutatott digitális segédanyag, amely a fizikatanítás hatékonyságát növelheti az érdekes kísérletekkel és szimulációkkal.

A következő napon elsőként Pongrácz László, az OKÉV főigazgató-helyettese adott tájékoztatót a 2003-as országos kompetenciamérés háttéréről és tapasztalatairól. Hallottunk arról, hogy az utóbbi években megváltozott a nyolcadikosok továbbtanulási iránya. A középfokú oktatás az utóbbi években tömegessé vált. Évről évre többen (ma már 75%-ban) jelentkeznek gimnáziumba, illetve szakközépiskolába. Ma már olyan tanulók is ilyen intézményekbe jelentkeznek, akik korábban tanulmányi eredményük miatt erre nem bátorkodtak. Ugyanaz és ugyanúgy nem tanítható ma, mint amikor a nyolcadikosok alig 45%-a tanult érettségit adó középiskolákban.

A mérési eredmények azt mutatják, hogy Magyarországon az iskolák közötti teljesítménykülönbségek nagyok, de egy-egy iskolán belül lényegesen kisebbek. (Skandináviában ez fordított tendenciát mutat.) A bemutatott táblázatokból és diagramokból megállapítható, hogy az élmezőny tágabb lett, és a gyengék lemaradása nőtt. A 9. évfolyamon csökkent a tanulók teljesítménye, a mért tanulók 10–15%-a minimumszint alatt teljesített. Nem megnyugtató, de érdekes adat, hogy a matematika megértése és a szövegértés eredményei milyen szoros korrelációt mutatnak. Az 5. évfolyamon a konkrét adatok szerint a művelési szintek feladattípusonkénti eredményei a reprodukív szinten a legjobb, integratív szinten már gyengébb, és kreatív szinten a leggyengébb. 9. évfolyamon vizsgálva ugyanezeket a szinteket, megállapítható, hogy nő a különbség a három feladattípus eredménye között. Fizikatanításunk szempontjából fontos információ, hogy 9. osztályban a tanulók 61%-a érti és tudja alkalmazni az egyenes arányosságot és 41%-a a fordított arányosságot. A PISA-méréssel összhangban az is kiderült, mennyire nem tudják alkalmazni a tanultakat. A következtetés egyértelmű: olyan tanulásszervezéssel kell eredményesebbé tenni az oktatást, amely a tanulóknak a gyakorlati életben hasznosítható tudását eredményezi.

Magával ragadta a hallgatóság figyelmét Fodor István, az Ericsson Hungary Rt. vezérigazgatója *Mit vár ma a társadalom és a gazdaság az iskolától?* címmel tartott, szokatlanul temperamentumos előadása. A gazdasági szakember racionalitásával szembeállította a pedagógushallgatóságot a hétköznapi gyakorlat valós összefüggéseivel. A világot a gazdasági élet (a pénz) vezérli, ezért növelni kell a versenyképességet. Maholnap megszűnik az egy egész életre szóló szakmák presztízse, érvényessége, a munkamorál átalakul, más emberi értékek kerülnek előtérbe. Olyanok, mint hatékonyság,

fejlődőképesség, kezdeményezőkézség, kreativitás, képzelőerő, sebesség (gyorsaság a változtatásban). A fejlődés sikere nagymértékben függ a társadalom, a cégek és a pedagógusok együttműködésétől. A felgyorsult fejlődési ütemű világban a tudás új szerepkörben jelenik meg. „A tudás gazdasági hatalom, tehát az oktatásnak is »be kell szállni« a megújulásba. Kérdés, hogy a mellettünk száguldó vonatra fel tudunk-e szállni? Válasz: igen, de ahhoz nekünk is fel kell gyorsulni, ami csak teljes társadalmi összefogással megy. A fejlődés lehetősége a tudásintenzív technológiákban rejlik.” Ez lehet számunkra is egy kitörési pont. Az oktatási intézmények feladata az erős alaptudás biztosítása, a képességfejlesztés, elsősorban a tanulási képességek fejlesztése, a nyelvtudás, a fegyelem, az igényesség, a motiváltság, a kommunikációs képesség, az erkölcs és az etika alapjainak lerakása. Nem az számít, hogy mit tanít az intézmény, hanem hogy milyen képességekkel hagyják azt el a fiatalok. A pénzügyi, gazdasági vagyon ugyanis egy rossz döntéssel pillanatok alatt eltűnhet, de az intellektuális vagyon egy életre szól, maradandó, folyton gyarapítani lehet és kell. Az emberiség jövője jobban függ a tudástól, mint a pénztől. Az információs társadalomban a fejlődés kiteljesedésével a technológiai forradalom és az Internet hatására leomlanak a kommunikációs határok. A nagy változásokat hozó globalizáció folyamataiban sem szabad feledni, hogy „A sivatag és a zöld kert között nem a víz a különbség, hanem az ember!” Új szemléletre van szükség: az utánpótlás alapuló sorozatgyártás helyett a mindig jobbra, tökéletesebbre törekvés, az átlagosat a kiválóknak kell felváltania, a szokásosat a dinamikus, a tömegeset pedig a specifikus. Minderre eklatáns példával szolgált maga az előadó, megkapó stílusban, lendületesen kifejtett, magvas gondolataival. „Emberről próbáló feladat volt követni.” – fogalmazott az egyik hallgató. Az előadó nagyon meggyőző volt, véleményét gondosan, határozottan alátámasztva el tudta fogadtatni. Tömeges igény jelentkezett, hogy az előadás anyaga legyen hozzáférhető nyomtatott vagy elektronikus formában is. Az előadó a nyár folyamán az ankét szervezőinek rendelkezésére bocsátotta az előadáson használt diákat.

Némileg pihentetőbb volt ezt követően Radnóti Katalin előadása, amelyben *A fizikai fogalmak kialakulása* címmel adott részletes, didaktikus példákon keresztül végigvezetett ismertetést. Az előadó szerint a fizika népszerűtlenségének egyik oka, hogy időhiány miatt gyakran csak a letisztult *végeredményt* mutatjuk be a tanítás során, és nem járjuk be a tanulókkal azt az *utat*, amelyen végighaladva az adott elmélet megszületett. Ez a genetikus út pedig lényegesen több saját élményt tartogat, ami nemcsak hogy maradandóbbá teszi az ismereteket, de példát szolgáltat az ismeretszerzés egy lehetséges módjára. A heliocentrikus világkép kialakulásának bemutatása tényanyagában remélhetőleg egy fizikatanárnak sem jelentett újat, de mint természettudományos *megismerési* módszer, nagyon szemléletes reprezentációként szolgált. Szemléletformáló, didaktikai funkciója is volt a bemutatott példának részben azzal, hogy a fizikatörténet felhasználása, felidézése motiváló eszköz is, részben pedig azzal, hogy

„Jó tudni a tanulóknak arról is, hogy bizony voltak tévedések, és voltak szerencsésen egybeeső véletlenek, amelyek segítettek az emberiség okosodását.” – fűzte hozzá az egyik résztvevő.

Nagy érdeklődést mutatott a hallgatóság a Szombathegyi Berzsenyi Dániel Főiskola Fizika Tanszéke által készített film iránt. Sokan mondtak köszönetet a film elkészítéséért és a hozzájárulás lehetőségéért. A tudománytörténeti események felidézésének szenzációs példája volt ugyanis a Guericke életét, munkásságát és a Magdeburgi feltekével végzett kísérletet újra bemutató film is.

Zátonyi Sándor a tőle megszokott igényességgel és precizitással összegyűjtött érvrendszerrel igyekezett meggyőzni hallgatóságát, hogyan lehet az adott helyzethez (szűkülő időkeret, változó követelmények) alkalmazkodva és azt kihasználva eredményesen dolgozni. *A fizikai ismeretek gyakorlati alkalmazásai* című előadásában a modern technika vívmányait mutatta be olyan szempontból, hogy mennyire sugallják a fizika fontosságát. Hangsúlyozta, hogy mennyire hasznos és mozgósító erejű a gyerekek már meglévő tudására építeni. Környezetünkben gyakran találkozhatunk nem szokványos adatokkal, amelyek szakszerű elemzése is érdeklődést felkeltő lehet. Módszertanilag egységes rendszerben gyűjtötte egy csokorba az alkalmazás különféle szintjeit és lehetőségeit:

1. gyakorlati alkalmazás mint didaktikai feladat (az alkalmazás az ismeretek felhasználására épülő tevékenység),

2. a fizika eredményeinek gyakorlati alkalmazásai (a felhasználásokkal való megismertetés),

3. kísérletek (új technikai megoldásokra) az alkalmazás fázisában,

4. példák a fizika gyakorlati alkalmazásaira. Külön kitért a fizika oktatásán belül az *alkalmazási szintekre*:

- a) a jelenség megnevezése,
- b) a befolyásoló tényezők felismerése,
- c) a jelenség magyarázata,

és a *megismertetés szintjeire*:

- a) az eszköz, gép működési elve,
- b) az eszköz, gép egy-egy fizikai sajátossága,
- c) „rácsodálkozás” egy-egy korszerű fizikai alkalmazásra.

A nagyon áttekinthető, követhető diaképek anyagának mindig nyomatékot adott az országos reprezentatív mérési eredmények éppen aktuális adatainak felidézése. Így került szóba az „iskolai tudás” és a „hasznosítható tudás” közötti tartalmi különbség is, amire szintén szolgáltatott konkrét mérési eredményeket az előadó. Videofilmekkel színesített példát is láthattunk a tanult fizikai ismeretek érdekes gyakorlati alkalmazására.

Ebben az évben 14. alkalommal került megrendezésre a tizennégy éves diákoknak kiírt Öveges József Országos Fizikaverseny. Ebből az alkalomból *Berkes József*, az országos versenybizottság elnöke számolt be a verseny néhány érdekes feladatáról és a verseny tapasztalatairól. Az elmúlt években jelentősen megváltozott a fizika tantárgy társadalmi megítélése, a közoktatás körülményei és a fizikával szemben támasztott követelmények. Ennek kapcsán a versenyek szervezésének formai és tartalmi lehetőségei is megváltoztak, illetve változnak a jövőben

is. Egyre több gondot jelent a verseny reális tartalmi kereteinek meghatározása éppen úgy, mint a zavartalan lebonyolítás anyagi feltételeinek előteremtése. Ugyanakkor ez a verseny a hazai tehetségevelés nagy lehetősége volt, és reményeink szerint marad is, a megváltozott versenyrendszerben is.

Az ankét során tájékoztató hangzott el egy másik, tehetséges „kis fizikusok” számára szervezett országos fizikaversenyről is. *Jármezei Tamás* ismertette az általa évek óta szervezett Jedlik Ányos Fizikaverseny céljait és tapasztalatait, néhány kedves gyermekmunkával fűszerezve mondandóját.

A XXVIII. Általános Iskolai Fizikatanári Ankét zárójelében került sor *Sükösd Csaba* nagy érdeklődésre számot tartó előadására *Atomenergia-termelés és Az atomenergia kockázatai* címmel. Az atomenergia napjaink vitatott kérdései közé tartozik. Vannak lelkes hívei és esküdt ellenségei. A vita gyakran érzelmi alapon folyik, a tények néha háttérbe szorulnak. A fizikatanárok szerepe és felelőssége különösen nagy a közvélemény-formálásban, hiszen ők (mi) nyújthatják a folyamatok megértéséhez szükséges, egzakt természetudományos alapismereteket, amelyek eleve eloszlatthatják az esetleges tévhiteteket, és biztos kapaszkodót jelenthetnek a szélsőséges társadalmi vitákban, az érvek és ellenérvek harcában való eligazodásban.

A BME Nukleáris Technika Tanszék tanszékvezetője bebizonyította, hogy lehet fontos, komoly, mély dolgokról érdekfeszítően, közérthetően beszélni. Nagyon világos és érthető, ábrákkal illusztrált előadásban mutatta be a maghasadás és láncreakció feltételeit és szabályozási lehetőségeit, majd az atomreaktorok szerkezetét, működését és az atomerőművek biztonsági tényezőit. Világossá tette, hogy miért nem válhatnak bizonyos reaktorok atombombává semmilyen körülmények között sem.

Kiemelte az előadó az atomenergia-termelés előnyeit: a nyersanyaga koncentrált energiaforrás), olcsó a szállítása, környezetbarát: nem keletkezik üvegházhatást növelő gáz, az erőmű földrajzi adottságoktól függetlenül telepíthető.

Foglalkozott az atomenergia-termelés járulékos problémáival is: hogy az radioaktív hulladék keletkezésével jár, amelyet gyűjtenek, feldolgoznak és szigorú biztonsági követelmények szerint tárolnak, védve az embert és a környezetet. A radioaktív hulladék kezelése ma már technológiailag megoldott. Az előadás második részében az atomenergia kockázatairól hallhattunk. Az előadó szemléletes és meghökkentő példákkal érzékeltetett olyan fogalmakat, mint kockázat, sugárzás, biológiai hatások. A kockázat mérési lehetőségeiről, arról, hogy hogyan lehet mérőszámot rendelni a kockázathoz. Konkrét adatokkal alátámasztott információi folyamatosan fenntartották a hallgatóság érdeklődését. Megismerhettünk néhány módszert, amelyek segítségével csökkenthetők a kockázatok. Szó esett a radioaktív sugárzások eredetéről és kockázatairól, az emberre gyakorolt hatásairól is.

A napjainkban is folyó kísérletek reményt adnak arra, hogy az emberiség egy új energiatermelő eljárás és berendezés birtokába jut, amely előnnyel fog rendelkezni az atomreaktorral szemben. Nem termel radioaktív mel-

lékterméket, amely környezetszennyeződéshez vezet. A fűzős reaktorok kiépítése irányában tett erőfeszítések a fizika egészen új ágait fejlesztették ki. (Remény van arra, hogy az előadás teljes anyaga külön cikk formájában hozzáférhető lesz.)

A tanári ankétokon évtizedek óta rendezünk kísérleti bemutató műhelyfoglalkozásokat és kiállításokat is olyan szereplőkkel, akik gyakran a legmindennapibb eszközökkel állítanak elő egyéni ötletekkel nem mindennapi jelenségeket, végeznek el egyszerű kísérleteket, vagy mutatnak be új eszközöket, módszereket.

Műhelyfoglalkozásokról

Csákány Antalné előadásában a kerettantervhez illeszkedő 7. és 8. évfolyam számára készült tankönyveiket, munkafüzeteket mutatta be, és alkalmazásukhoz adott praktikus módszertani tanácsokat. Az oktatás megváltozott körülményeire és követelményeire hívta fel a kollégák figyelmét. Szólt azokról az új módszerekről, melyekkel többé-kevésbé megőrizhetők az oktatás hagyományos értékei a jelentősen csökkent órakeretek között is.

Lévainé Kovács Róza bemutatta a 10 éve folyó *München báró és a pogácsás versenyt*, amelyen évről évre körülbelül 1500 általános iskolás vesz részt lelkesen. Ők még élvezettel foglalkoznak a fizikával, szeretik a tárgyat.

Kátiy Károlyné az ismeretszerzés hatékonyságának projekt módszerrel történő növelését mint a fizikatanítás egy lehetséges eljárását mutatta be. Annak esélyét is felvillantva, hogy a tanulók közötti különbségek is csökkenthetők azáltal, hogy fokozódik a tanulók érdeklődése a tantárgyi tartalom és a hétköznapi élet jelenségei iránt. A projekt módszer a tanulók ismereteire építve saját tevékenységeiből és tapasztalataiból indul ki. A tananyagot több kisebb egységre – projektre – bontja, amelyek középpontjában egy-egy gyakorlati természetű, a mindennapi élethez kapcsolódó probléma áll. Ez a tanulásszervezési módszer az együttműködésre épít mind a társak, mind pedig a tanár és a tanulók között. Az egyéni tapasztalatok meggyőzőek voltak.

Geda Gábor és Vida József egy készülő digitális segédanyagot mutatott be, amelyet virtuális kísérletezéshez és a kísérleti eredmények elemzéséhez lehet hatékonyan felhasználni. A felhasználó tanuló a program futtatásával a mérések eredményeit különböző formában rögzítheti, értelmezheti, következtetéseket vonhat le belőlük.

Molnár László a 8. osztályos fizika tanításában alkalmazandó látványos kísérleteit az elektromosságtan téma köré csoportosította. A bemutatott kísérletek a mindennapi gyakorlatban jól hasznosíthatóak, és csak olyan eszközöket igényelnek, amelyek az iskolai szertárban vagy a háztartásban megtalálhatók. A leleményességet olyan bájos ötlet is illusztrálja, mint a dörzselektromos hatás kimutatására használt gyermekláncfű ejtőernyőcskéinek röptetése.

Sebestyén Zoltán bemutatójával arra felhívta a figyelmet, hogy a mindennapi munkánkban, környezetünkben mennyi helyen vesz körül bennünket mágnes, és mennyi

használati eszközünknek a lelke mágnes. A mágneses mező tulajdonképpen az ember legjobb segítője, különösen, ha még a hulladékból is elővarázsolható egy-egy darab kiselejtezett eszközeinkből (mobiltelefon, floppy-meghajtó).

Kotormán Mihály foglalkozásán közös gyűjtőmunkával kerestük a körülöttünk lévő tárgyaknak, úgymint vonalzó, golyóstoll, szem, kréta, ajtó, seprű, pénz, egy pohár víz stb.-nek a didaktikus felhasználási lehetőségeit egy-egy jelenség szemléltetésére.

Vida József gyermekkori játékaikat, a botot, karikát, csúzlit és egyebeket hívott segítségül. A sok élményt nyújtó foglalkozáson olyan eszközök kerültek elő, amelyek egy része ismerős a mai gyerekek előtt is, míg másokat fizikai tartalmuk mellett is érdemes a figyelmükbe ajánlani, mert velük máshol már nemigen találkozhatnak, és szórakoztató időöltésre is alkalmasak, továbbá fellelhető bennük a fizika is. A paletta a címben felsoroltakon túl is igen széles: a fűvócsó, krumplipuska, trambulin, papírhajó, sárkány, fakutya, nádhegedű, fűzfásip, dominó, libikóka fizikájára való rátalálás, és annak tudatosulása önmagában élmény.

Berkes József az alig több mint 40 éve feltalált lézert a tanításban való alkalmazási lehetőségeit vette sorra az optikai jelenségek bemutatásakor. A lézert fény több vonatkozásban is különbözik a természetes vagy közönséges fénytől, mivel monokromatikus, koherens, kicsi a divergencia, és bizonyos feltételek mellett nagy felületi energiasűrűség érhető el vele. A lézert fény segítségével élményt és meggyőző látványt adóan mutathatók be olyan optikai jelenségek, mint a fény terjedése különböző közegekben, a geometriai optika alapjelenségei (fényvisszaverődés, fénytörés prizmaikon, lencséken, síkpárhuzamos lemezen) és a hullámoptika.

Molnár Miklóstól Esés, süllyedés, lebegés, emelkedés témában egész estét betöltő kísérletsorozatot láthattunk. Számos, gyermekkorból jól ismert játék is visszaköszönt, amelyek mint kísérleti eszközök alkalmasak az egyes jelenségek szemléltetésére, és segítségükkel a tanulók érdeklődésének felkeltésére/fenntartására is. A látott kísérletek nagy értéke, hogy egy részüket a gyerekek önállóan is elvégezhetik, így még az otthoni tanulást is segíthetik. A nagyon didaktikusan felépített bemutató a kísérletek elvégzése mellett a tapasztalatok pontos elméleti magyarázatát is adta, sőt az önálló kísérletezéshez praktikus tanácsokat is kaptak az érdeklődők.

A zsúfolt szakmai napokat kellemes kikapcsolódást jelentő kulturális, szabadidős programok zárták szinte minden nap, amelyek keretében a Karcagi Zeneiskola tanári zenekarának hangversenyére, jó hangulatú, zenés-táncos esti fogadásra, lovaskocsis karcagi túrákra, egy helyi fazekasműhelyben és a tűzoltóságon tett látogatásra vagy hortobágyi kirándulásra és nagyon kellemes, romantikus estre kerülhetett sor a vendéglátók jóvoltából.

Hagyományosan az ankét záró rendezvényének része az eszközkiallító értékelése. Ezt a körülmények között az Eszközbíráló Bizottság idén is elvégezte. Az ismert körülmények között különösen elismerésre méltó azoknak a megszállott fizikatanároknak a munkája, akik a saját maguk által tervezett és készített kísérleti eszközök-



Hagyomány az ankéthez kapcsolódó eszközkiallítás.

ket bemutatják az érdeklődőknek. Idén négy lelkes kiállító fizikatanár munkája, egyéni ötlete vált közkinccsé. Mindannyian – a kiállított anyagaik hasznosíthatóságának arányában – tárgyi, anyagi jutalomban, elismerésben részesültek.

Nagyon hasznos szolgálatot tesznek az ankéteken rendszeresen megjelenő/kiállító tankönyveket, taneszközöket és oktatási segédeszközöket gyártó, forgalmazó cégek is, amelyek „élőben” működés, használat közben mutatják be „áruikat”. Így voltak jelen a tankönyvpiac jeles képviselői közül a Nemzeti Tankönyvkiadó, a Mozaik Kiadó, Typotex Kiadó és a Dinasztia Kiadó, valamint a taneszközgyártók közül a Taneszköz Kft., a Laborer Kft., az ITE Kft., a Biokalderoni és a Melo-diák Taneszközcentrum.

Az ankét zárása bensőséges hangulatban és a köszönet jegyében zajlott. Csákány Antalné, a Szakcsoport elnöke elismeréssel mondott köszönetet a gondos előkészítésért, az alapos felkészülésért minden közreműködőnek, előadóknak, kiállítóknak, foglalkozásvezetőknek. „Nagyszerű volt az is, hogy az előadások nem izoláltak, hanem szinte egymáshoz kapcsolódók voltak.” – idézte az egyik hallgatót. Kiemelt köszönet illeti a helyi segítő szervezőket, az ELFT helyi csoportjának aktivistáit, akik gondos előkészítő munkával igyekeztek zavartalan környezetet teremteni a tanácskozáshoz és mindent megmutatni a városból és környékéről. Elmondható, hogy hosszú ideje nem volt ilyen családias, barátságos hangulatú, tartalmas ankétja az általános iskolai fizikatanároknak.

Őszinte örömet fejezte ki az elnökasszony, mivel az egész rendezvény alatt folyamatosan a résztvevők elégedettségét tapasztalta. Ennek persze a program gazdag tartalma mellett főként a házigazdák határtalan vendégszerete, szívélyes gondoskodása adott kellő alapot. Amit Lévainé Kovács Róza és *Kovácsné Kerekes Katalin* családtagjaival és lelkes csapatával az öt nap alatt és az ankétot megelőző időben értünk és érdekünkben tettek, azt valóban nehéz néhány szóval vagy egy csokor virággal elismerni, megköszönni. Minden résztvevő azt érezhette (és élvezhette), hogy egész Karcag magáénak vallotta a Fizikatanári Ankétot és egész Karcag vendégei voltunk.

Köszönjük Karcag, hogy ott lehettünk!

Juhász Nándor, Szeged

ORVOSI KÉPALKOTÓ ELJÁRÁSOK II.

Ebben a cikkben az orvosi képalkotó eljárások közül a tomografikus módszereket tárgyaljuk. Az előző részben (*Fizikai Szemle* 2005/2, 83. o.) láttuk, hogy a hagyományos röntgenfelvétel egy árnykép, tehát a vizsgált test egy adott irányból való vetülete. Azonban testünk a tér mindhárom dimenziójában kiterjedt, így pontos leírására nem elégséges egy vetület. Ezt a problémát érzékelteti az *1. ábra*. Jól, látható hogy különböző irányokból nézve más és más árnyképet kapunk. Visszatérve a röntgenfelvételhez azt mondhatjuk, hogy egy felvételtől nem tudjuk meg, hogy az árnyképrészlet a vetítés irányában milyen „mélyen” helyezkedik el. Tehát nem ismerjük a szervek háromdimenziós (3D) elhelyezkedését és alakját. Sok esetben ez igen fontos lenne. Ennek pótlására gyakran két különböző szögből is készítünk hagyományos röntgenfelvételt, ami sokat segít, de ez a megközelítés sem eredményez pontos 3D képet a vizsgált tárgyáról. A tomografikus eljárások ezt a hiányt pótolják azzal, hogy egy részletes 3D térfogati képet nyújtanak a vizsgált területről. Hogyan? Az egyszerűség kedvéért induljunk ki ismét a röntgensugárzással való felvételkészítésből. Forgassuk kis lépésekben (ez tipikusan néhány fok) a tárgyat (ami jelen esetben a páciens), minden egyes szögállásban készítünk egy árnyképet, ekkor már el tudjuk képzelni, hogy a sok különböző nézetbeli képből meghatározható a test térbeli pontos alakja, felépítése. Persze csak úgy ránézésre nehéz lenne felrajzolni a sok kép egyesítését, számítógép segítségével azonban, megfelelő algoritmusokat felhasználva, megkaphatjuk a test 3D térfogati képét. A gyakorlatban a felvételkészítés nem úgy történik, hogy a teljes testről készítünk filmre árnyképeket, hanem rétegekre bontjuk a testet, és az egyes rétegek rajzolatát határozzuk meg külön-külön, majd ezeket

1. ábra. Egy háromdimenziós testet különböző irányokból nézve más és más alakot látunk. A valódi háromdimenziós alakot csak sok irányból felvett képek alapján tudjuk rekonstruálni.

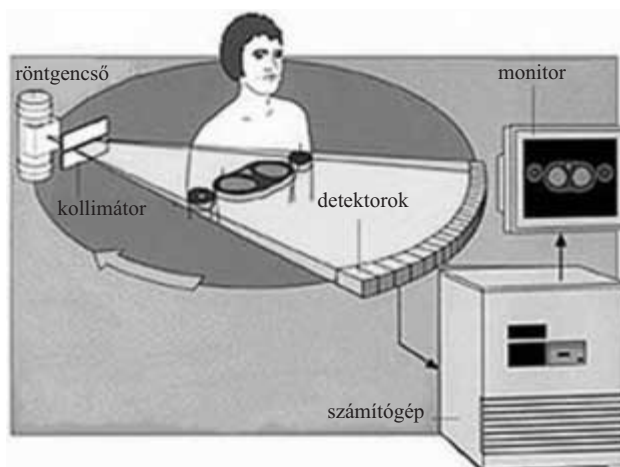


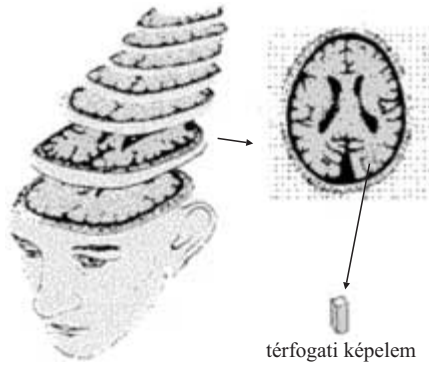
egyesítjük egy 3D képpé. Egy tipikus elrendezést mutat a *2. ábra*. A test egyik oldalán helyezkedik el a röntgenforrás, vele szemben, a túloldalon szorosan egymás mellett röntgendetektorok sorozata. A forrásból a detektorokhoz húzott egyenesek mentén halad a röntgensugárzás. Ezek az egyenesek egy síkot feszítenek ki. Erre a síkra merőleges tengely körül forgatjuk a detektor–röntgenső együttest, és sok szögállásban felvesszük a testen áthaladó röntgensugárzás intenzitását. Egy-egy ilyen „körfelvételtől” meghatározható az adott síkban az anyageloszlás, tehát a különböző szervek egy-egy metszete, kétdimenziós (2D) képe. Egy körforgás után a detektor–röntgenső együttest a forgástengely irányában egy picit továbbléptetik, és egy következő szelet képét készítik el. Így haladva a teljes vizsgálni kívánt területet végigmérik, és a 2D szeletekből egy 3D képet rakhatunk össze. Egy tipikus 2D szeletet és szeletsorozatát látunk a *3. ábrán*.

A tomografikus módszer lényege tehát az, hogy egy-egy 2D szelet szerkezetét határozzuk meg a különböző irányokban való intenzitásméréssel, és ezekből rakjuk össze a teljes 3D képet. Természetesen a módszer nemcsak röntgensugárzással működik, hanem minden olyan sugárzással, amely esetén az áthaladó próbanyalábhoz hozzá tudunk rendelni egy irányt (egy egyenest) és ehhez egy intenzitást, amely arányos az egyenes mentén az adott próbanyaláb elnyelésével (abszorpciójával) vagy kibocsátásával (emissziójával, forrassűrűségével). Az első esetre jó példa az említett röntgentomográfia, míg a másodikkra a pozitronemissziós tomográfia (PET).

Ennél a módszernél egy nem stabil izotóp bomlásakor kibocsátott pozitron elektronnal való találkozásakor kisugárzott fotonokat detektáljuk. A pozitron egy antianyag-

2. ábra. Röntgentomografikus mérési elrendezés vázlata. A pontszerű forrásból kiinduló sugarak a testen keresztülhaladva és egy részük elnyelődve érkeznek a detektorokba. A minden irányban mért intenzitás-eloszlásból vissza tudunk következtetni egy szelet anyageloszlására.



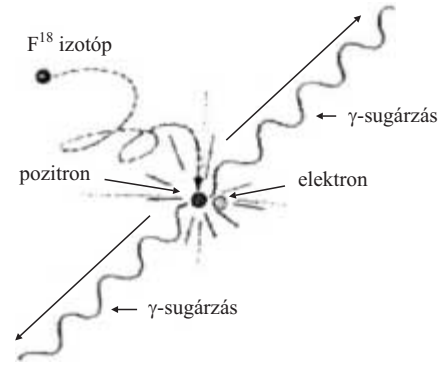
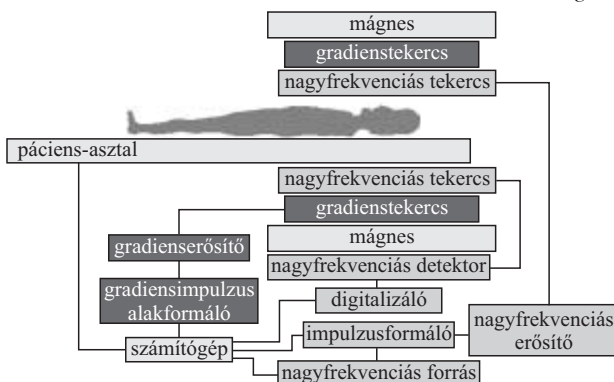


3. ábra. A szeletelés elve. Jobb oldalon egy szelet szerkezetét látjuk, ilyenek sokaságából állítjuk össze (bal oldal) a teljes 3D képet.

részecske, pontosan az elektron antirészecskéje. Amikor egy részecske és annak antianyag-párja találkozik, akkor mindkét anyagi részecske megsemmisül, és két nagyenergiájú foton sugárzódik ki egymással ellentétes irányban (4. ábra). A PET berendezés ezeknek a fotonoknak a számát méri. Hogyan kaphatunk ilyen folyamatokból egy tomogramot? A páciens szervezetébe olyan izotópot juttatunk, amely bomlásakor pozitront sugároz ki. Erre tipikus példa a fluor 18-as izotópjá. A fluoratomokat egy, a cukorral rokon vegyületben megkötött formában (fluor-dezoxi-glukóz) adjuk a páciensnek. Ez az anyag így a szervezet anyagcsere-folyamatait követve olyan helyekre jut el, ahová a cukor is eljutna. A kibocsátott pozitronok száma és így a másodlagos folyamatban keletkező fotonok száma arányos a fluoratomok számával. Vagyis, ha egy tomografikus intenzitástérképet veszünk fel, tér- és időbeli képet kaphatunk az anyagcsere-folyamatok lezajlásáról. Ily módon ez a módszer például unikális lehetőséget nyújt az agy különböző területeinek és az itt lezajló folyamatoknak a vizsgálatára.

Végül a fenti módszerekkel rokon NMR (*Nuclear Magnetic Resonance*) vagy MRI (*Magnetic Resonance Imaging*) képalkotás alapjait mutatjuk be. Bár e két elnevezés ugyanazon elvek alapján működő módszereket takar, a gyakorlatban különbséget tesznek közöttük. Ahogy látni fogjuk, ezen eljárások a hidrogénatomok valamiféle válaszanak detektálásán alapulnak. Az MRI csak a vízben található hidrogénre érzékeny, míg az NMR a testben található összes hidrogénre. Ezentúl a rövideg kedvéért mindig MRI-t fogunk írni, de mindkét módszert értjük alatta. Az MRI a tomográfiák közül talán a PET-hez van

5. ábra. MRI berendezés vázlata. A működés leírását lásd a szövegben.



4. ábra. Pozitron–elektron találkozás alakalmával kisugárzódó fotonpár. Esetünkben a pozitron a fluor 18-as izotópjá radioaktív bomlásából keletkezik.

legközelebb, mivel itt is forrassűrűséget mérünk, de az MRI-nél az emittált fotonokat az energia szerint is analizáljuk, és ebből a forrás helyének egyik komponensét tudjuk meghatározni. A másik két komponens a gerjesztő forrás és detektor helyének pásztázásával térképezzük fel. Tehát mi is ebben az esetben a forrás vagy abszorber? Ismert, hogy egyes atomok rendelkeznek olyan mágneses tulajdonsággal, mint az iránytű, szakkifejezéssel, a mágneses dipólusok. Egy ilyen dipólust mágneses térbe helyezve arra forgatónyomaték hat mindaddig, amíg az be nem fordul a tér irányába. Ha ebből az egyensúlyi helyzetből kitérítjük a dipólust, akkor az rezegni kezd (vagy 3D-ban precesszál). A rezgés frekvenciája arányos lesz az alkalmazott tér nagyságával (a visszatérítő erővel). Ha a dipólus kitérését egy külső, periodikusan változó elektromágneses térrel hozzuk létre, akkor a legnagyobb kitérést éppen akkor kapjuk, amikor a gerjesztő tér frekvenciája megegyezik a dipólus saját szabad rezgésének frekvenciájával. Tehát, ha mérjük a gerjesztő elektromágneses hullámokból elnyelt energiát mint a frekvencia függvényét, akkor kapjuk a legnagyobb értéket, amikor a dipólus sajátrezgéseinek frekvenciáját elérjük. A gyakorlatban nem az abszorpciót szoktuk mérni, hanem az ezzel arányos emissziót. Ez úgy lehetséges, hogy a gerjesztő elektromágneses impulzus után a kis dipólusok az elnyelt energiát kisugározzák, ezt egy detektorral felfogjuk, és a jel nagyságát számítógépben tároljuk. Egy MRI berendezés vázlatát mutatja az 5. ábra. A két mágnes egy nagy, néhány tesla állandó irányú és homogén mágneses teret szolgáltat, amely beállítja a dipólusok precesszálásának tengelyét. A gradiens mágnesek sokkal kisebb terűek (néhányszor 10 millitesla), ezek a feltérképezni kívánt terület közelében mozognak, és különböző irányban hoznak létre térben változó mágneses teret. Ezzel elérhető, hogy a tér különböző pontjaiban más és más lesz a dipólusok rezgési sajátfrekvenciája. Így a nagyfrekvenciás gerjesztő, illetve detektáló tekercsekre adott, illetve detektált különböző frekvenciájú jelekkel kiválaszthatjuk, hogy milyen térbeli pontról jött az információ. (Ez a bekezdés elején említett energiaanalízis.) Tehát a gradiens mágnesek megfelelő mozgatásával és a rezgési sajátfrekvencia beállításával pásztázzuk végig a kívánt térfogatot. Az MRI előnye, hogy a detektáló atomok (ami tipikusan hidrogén) környezete szín-

tén befolyásolja lokális terével a precesszási tulajdonságait, frekvenciáját, illetve az időbeli lecsengés sebességét, ezért szövetspecifikus információt kapunk.

Már az előző részben írtunk a kontrasztanyagok szerepéről. A most említett módszereknél is használnak ilyen anyagokat. A röntgentomográfiánál hasonló kontrasztanyagokat használnak, mint a hagyományos röntgenfelvételeknél. Itt szeretnék egy helyesbítést tenni az orvosi képalkotó eljárások első részében írottakkal kapcsolatban: ott az érrendszer vizsgálatokhoz használt kontrasztanyagokra példaként báriumtartalmú vegyületeket írtunk. Ez téves volt, a báriumtartalmú vegyületeket a bélrendszer vizsgálatánál használják. Az érrendszer esetén jódtar-

talmú anyagot juttatnak a szervezetbe. Az MRI-nél is sokat segítenek a kontrasztanyagok, itt gadolíniumtartalmú komplexeket, vagy vas-oxidtartalmú kolloidokat használnak leggyakrabban. Az MRI-nél használt kontrasztanyagok hatásmechanizmusa nem azon alapszik, hogy lokálisan megnöveljük a protonok (hidrogén) mennyiségét, ami megfelelne az abszorpció vagy forrás-erősség növelésének, hanem azon, hogy ezek az anyagok változtatják a precesszálo hidrogénatomok precessziójának lecsengési idejét. Ezt a hatást a detektáló tekerccsekkel és jelanalízissel érzékelni tudjuk, és használhatjuk a kontraszt javítására.

Faigel Gyula, MTA SZFKI

KÖNYVESPOLC

Sz.G. Gingyikin: TÖRTÉNETEK FIZIKUSOKRÓL ÉS MATEMATIKUSOKRÓL

Typotex Kiadó, Budapest, 2003, 449 o.

A könyvben a matematika (és részben a fizika) történetét találjuk meg nagy tudós egyéniségek életének és eredményeinek bemutatásán keresztül. Ahogy a szerző az előszóban fogalmazza: „Négy évszázad eseményeiről lesz szó, amelyek az európai matematika története szempontjából rendkívül fontos XVI. században kezdődtek, amikor az antik matematika hanyatlása után ezer évvel elkezdődött a matematika újjászületése.” (13. o.) Ugyanakkor azonban nem valamilyen rendszeres, teljes matematikatörténeti műről van szó az elmúlt négy évszázadra vonatkozólag, mert mint ugyancsak a szerző írja: „... emlékeztetni szeretném az olvasót, hogy nem szisztematikusan megírt könyvet tart a kezében, hanem olyan cikkválogatást, amelyet elsősorban a matematika iránt érdeklődő diákok és egyetemi hallgatók számára írtam.” (8. o.)

A könyv alapjául azok a cikkek szolgáltak, amelyek az orosz *Kvant* című tudomány népszerűsítő folyóiratban (amelyet különben Amerikában is kiadtak *Quantum* címen) jelentek meg. A könyvet egyébként számos nyelvre lefordították, és összesen – a harmadik kiadás előszava szerint – már a nyolcvanas évek közepéig több mint ötszáz ezer példány kelt el belőle. A magyar fordítás a mű harmadik, bővített kiadása alapján készült. A fordítás több magyar matematikus munkája, hozzá az előszót *Major Péter* írta, aki a könyvet szerkesztette is. A szerző maga egyébként neves kutató matematikus, aki sokat tett a matematika korszerű oktatásáért és a tehetséggondozásért Oroszországban. Ma az Egyesült Államokban él és dolgozik.

A könyv a XVI. századi matematikusokkal indul: *Cardanóval*, *Ferroval*, *Tartagliával*, akik talán fizikusok számára nem

annyira ismertek, de ezekkel kell kezdeni, mert: „Az európai matematika a XVI. században született újjá hosszú, középkori téli álma után.” „... csak a XVI. században jelentek meg olyan jelentős eredmények, amelyek mind az antik, mind a keleti tudomány számára ismeretlenek voltak; nevezetesen a harmad- és negyedfokú egyenletek megoldásai.” (21. o.)

Ezután jönnek sorban, időrendben a matematikusok és köztük a fizikusok. Ezeket – különösen a korábbi századokban – sokszor nehéz igazából szétválasztani, bár ma sem mindig könnyű. (Lásd például a könyvben szereplő utolsó tudóst, *Roger Penrose*-t, aki legalább annyira fizikus, mint matematikus.)

A fizikusok számára a *Galileiről* és *Huygensről* szóló részek a legérdekesebbek, de ilyen szempontból például természetesen a *Pascalról*, *Eulerről*, *Lagrange-ról*, *Laplace-ról* és *Gauss-ról* írottak sem érdektelenek.

Az egyes tanulmányokban bőven találunk matematikai levezetéseket, geometriai szerkesztéseket. Vannak azonban olyanok, különösen a fizikusok számára legérdekesebbek, amelyekben ilyenek alig fordulnak elő. Azt lehet mondani végül is, hogy a könyv nem a szokásos értelemben népszerűsítő, ismeretterjesztő írás. Nagyobb részének élvezéséhez bizonyos matematikai előképzettség, illetve még inkább bizonyos elmélyülési készség szükséges, és az olvasónak rá kell szánnia az időt, hogy követni tudja az olvasottakat. Megjegyezzük azonban, hogy akik felületesebben olvassák, azok is profitálhatnak belőle.

Berényi Dénes

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: Berényi Dénes főszerkesztő.

Kéziratokat nem őrzünk 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 egyszámlán.

Megjelenik havonta, egyes szám ára: 600.- Ft + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257