

# fizikai szemle

NEM ÉLHETÜNK FIZIKA NÉLKÜL



2005/1

12982,9 nm

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 (Négyszögletes kerék),  
Horváth Dezső (Mag- és részecskefizika)  
Jéki László, Kanyár Béla (Sugárvédelem),  
Németh Judit, Ormos Pál (Biofizika),  
Pál Lénárd, 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:

**fizsem.elft@mtesz.hu**

A folyóiratba zánt írásokat erre a címre kérjük.

## TARTALOM

<i>Berényi Dénes: A Fizika Éve – 2005</i>	1
2005 a Fizika Nemzetközi Éve ( <i>ELFT Elnöksége</i> )	2
<i>Bencze Gyula: Nem élhetünk fizika nélkül</i>	3
<i>Németh Judit: Fizika és társadalom</i>	4
<i>Vámos Tibor: Fizika – fűszisz – információ társadalom</i>	8
<i>Gyulai József: A fizika és a műszaki fejlődés</i>	11
<i>Köteles György: Fizika az orvoslásban</i>	17
<i>Berényi Dénes: Az energiakérdés ma – a fizikus szemével</i>	22
<i>Szatmáry Zoltán: Az atomenergia hasznosítása és a fizika</i>	29
<i>Jéki László: Fizika és a mindennapi élet</i>	35
<b>PÁLYÁZATOK</b>	
Pályázat a „Fizika Éve” megünneplésére	40
<b>MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN</b>	
<i>Bagoly Zsolt, Papp Gábor: Levele érkezett</i>	41
<b>TÁRSULATI ÉLET</b>	42
<b>VÉLEMÉNYEK</b>	
A PET és a környezet ( <i>Trón Lajos</i> )	43
<b>HÍREK – ESEMÉNYEK</b>	
Gábor Dénes-díj 2004	44
<b>KÖNYVESPOLC</b>	44
<i>D. Berényi, Editor-in-Chief, and The Presidential Board of the Roland Eötvös Physical Society: The World Year of Physics, 2005</i>	
<i>G. Bencze: We do need physics</i>	
<i>J. Németh: Physics and Society</i>	
<i>T. Vámos: Physics, Nature and the Information Society</i>	
<i>J. Gyulai: Physics and technological progress</i>	
<i>G. Köteles: Physics for health care and cure</i>	
<i>D. Berényi: The energy problem, as seen by a physicist</i>	
<i>Z. Satmáry: Physics and the use of nuclear power</i>	
<i>L. Jéki: Physics and everyday life</i>	
<b>SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL</b>	
<i>Z. Bagoly, G. Papp: There is a letter for you</i>	
<b>OPINIONS</b>	
PET and environment ( <i>L. Trón</i> )	
<b>TENDERS, NEWS OF THE PHYSICAL SOCIETY, EVENTS, BOOKS</b>	
<i>D. Berényi, Hauptredakteur, und Der Vorstand der Roland-Eötvös Physikalischen Gesellschaft: Das internationale Jahr der Physik 2005</i>	
<i>G. Bencze: Ohne Physik geht es nicht</i>	
<i>J. Németh: Physik und Gesellschaft</i>	
<i>T. Vámos: Physik, Natur und die Informationsgesellschaft</i>	
<i>J. Gyulai: Physik und technischer Fortschritt</i>	
<i>G. Köteles: Physik im Heilwesen</i>	
<i>D. Berényi: Das Energieproblem, wie ein Physiker es sieht</i>	
<i>Z. Satmáry: Physik und die Nutzung der Kernenergie</i>	
<i>L. Jéki: Physik im Alltag</i>	
<b>WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE</b>	
<i>Z. Bagoly, G. Papp: Ein Brief für Sie ist da</i>	
<b>MEINUNGSÄUSSERUNGEN</b>	
PET und Umweltschutz ( <i>L. Trón</i> )	
<b>AUSSCHREIBUNGEN, AUS DEM GESELLSCHAFTSLEBEN, EREIGNISSE, BÜCHER</b>	
<b>Главный редактор Д. Берени и Президиум Физического Общества:</b>	
<b>Международный год физики 2005</b>	
<i>Д. Бэнце: Без физики не обходиться</i>	
<i>Ю. Немет: Физика и общество</i>	
<i>Т. Вámos: Физика, природа и информационное общество</i>	
<i>Й. Дьюлаи: Физика и прогресс техники</i>	
<i>Д. Кётелеш: Физика и здравоохранение</i>	
<i>Д. Берени: Проблема энергии – глазами физика</i>	
<i>З. Сатмари: Практическое применение ядерной энергии и физика</i>	
<i>Л. Еки: Физика в быту</i>	
<b>НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ</b>	
<i>Ж. Баголь, Г. Пап: Вот письмо для вас</i>	
<b>ЛИЧНЫЕ МНЕНИЯ</b>	
PET и окружающая среда ( <i>Л. Трон</i> )	
<b>ОБЪЯВЛЕНИЯ-КОНКУРСЫ, ИЗ ЖИЗНИ ФИЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА</b>	
<b>ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ, КНИГИ</b>	

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@mtesz.hu](mailto:mail.elft@mtesz.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 egyzámlán.

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

**HU ISSN 0015-3257**

# 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 Physikai Lapok utóda és folytatása

LV. évfolyam

1. szám

2005. január

## A FIZIKA ÉVE – 2005

Miért kell egyáltalán egy évet a fizikának szentelni? Válaszul számos szempontot fel lehet hozni. Többek között erre vállalkozik a *Fizikai Szemlének* ez a száma.

Induljunk ki abból, hogy *a fizika az alaptudományok közül is a legalapvetőbb természettudomány*. Ez nem valamiféle „rangkülönbséget” jelent. A Nobel-díjas *Leon Lederman* így fogalmazta meg ezt a kérdést: „*A tudományoknak létezik egyfajta hierarchiája. ... A fizika alapvetőbb réteg a kémiánál, mert a fizikusoknak a saját munkájukban nem kell ismerniük a kémia törvényeit, ezzel szemben a vegyész, aki az atomok kapcsolódásával és az atomkapcsolatok révén felépült molekulák tulajdonságaival foglalkozik, nem élhet meg az atomok között ható fizikai erők, elsősorban az elektromos vonzás és tasztítás erőinek ismerete nélkül. A következő szint a biológia, amelyben a stabil tudás nagyrészt a kémia és fizika törvényeinek ismeretén alapul.*” Ennek szellemében ír a Nobel-díjas biológus, *Francis Crick* is: „*Hamar meggyőződtem, hogy a biológia számos alapvető problémáját csupán a fizika és a kémia precíz gondolkodásának és módszerének segítségével lehet megoldani.*”

A fizikán, a fizikában megállapított törvényeken alapul a többi természettudomány és – tegyük hozzá – *a tudományos igényű megfigyeléseken, méréseken és kísérleteken alapuló tulajdonképpen természettudomány a fizikával kezdődik* a XVI–XVII. században (*Galilei, Kepler, Newton*). Amikor tehát a fizikáról beszélünk, akkor a természettudományok alapjairól és gyökereiről van szó, amelyről nem lehet, sőt – mondjuk ki – bizonyos értelemben veszélyes is megfeledezni, tudniillik a századok folyamán sok minden változott, de a természettudományos megismerés alapja ma is a megfigyelés, a kísérlet és a mérés és csak addig természettudomány a természettudomány, amíg ismereteit ezekre a módszerekre alapulva szerzi. A „legvadabb” elméletek is „ide térnek vissza”, ezeken mérik le érvényességüket.

Hogy az alapok milyen fontosak – például korunk egyik meghatározó technikája, *az informatika szempontjából is* –, arra vonatkozólag érdemes *Vámos Tibort* idézni. Eszerint: „*Az informatika valójában alkalmazott tudomány, máig is teremtő anyja a fizika és a kémia.*”

Az utóbbi idézettel már a fizika alkalmazásaihoz érünk, *az alapkutatási eredményeken alapuló modern civilizációhoz*. Anélkül, hogy a részletekbe bocsátkoznánk, elmondhatjuk, hogy nemcsak az elmúlt évszázadok, de a legutóbbi évtizedek során is átalakult az életünk éppen a fentiek eredményeképpen. Gondoljunk csak mai konyhánkra (jégszekrény, mikrohullámú sütő, infrásütő stb.), irodánkra és hírközlésünkre (kvarcóra, számítógépek, e-posta, xerox, fax, mobiltelefon stb.) vagy szórakozásunkra (TV, videó, képmagnó stb.) vagy a modern orvoslásra (ultrahang, CT, MRI, PET, besugárzásos terápia stb.).

Túl azonban a „hasznos” alkalmazásokon, *a fizika rendkívül nagy mértékben hozzájárult és hozzájárul az emberi kultúrához*, arról a világról kialakított képünkhöz, amelyben élünk. Mindenekelőtt ráébredtünk a minket körülvevő világ hihetetlen gazdagságára, túl azon, amit érzékszerveinkkel közvetlenül észlelünk. Az elektromágneses spektrumnak csak elhanyagolható kis részét tudjuk érzékelni, pedig azok a rádióhullámoktól a röntgen- és gamma-sugarakig is a világ részét képezik. Ugyanakkor a mindennapi ember számára igen távol eső tényekről kimutatja, hogy azok lényegében azonosak, például az alma földre esése és bolygók mozgása mind a gravitációs jelenségek közé tartozik. Az elektromos és mágneses jelenségek ugyancsak a természeti jelenségek különböző oldalai. Bebizonyította, hogy egész hatalmas Univerzumunk ugyanazokból az atomokból épül fel. Másrészt Univerzumunk kezdetét, az ősrobbanást csak az elemi részecskék és az alapvető kölcsönhatások jobb megismerésétől remélhetjük. Így kapcsolja össze a fizika a „legnagyobb” a „legkisebbel” a Világmindenség makrovilágát az elemi részecskék nanovilágával.

Még egy mondat arról, hogy miért éppen 2005 lett a fizika éve. Ez az év százéves évfordulója *Einstein* korszakalkotó közleményeinek a speciális relativitás elméletéről és a fény kvantum természetéről.

Mindezek fényében bízást osztozhatunk *Wigner Jenő* reményében, hogy „... *az emberek érdeklődése és öröme nem fog csökkenni a fizikában*”.

Berényi Dénes  
főszerkesztő

# 2005 A FIZIKA NEMZETKÖZI ÉVE

A Fizika Nemzetközi Évének méltó megünneplését az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Elnöksége az idei év legfontosabb feladatának tartja. A fő cél az, hogy a fizikát népszerűsítsük az egész magyar társadalom, és ezen belül is kiemelten a fiatalság körében. A népszerűsítés egyik legfontosabb eszköze lehet annak bemutatása, hogy mit adott a fizika az emberiségnek, életünk hogyan gazdagodott, kényelmünk, biztonságunk hogyan javult a fizika segítségével. Az ELFT az egész év folyamán nagyszámú rendezvényt kíván szervezni, illetve támogatni. Az alábbiakban ezek közül csak ízelítőül sorolunk fel néhányat:

- Amint az a *Fizikai Szemle* jelenlegi számában is látható, megindítjuk a *Mindentudás az iskolában* című rovatot. (Szeretnénk egyúttal felhívni a figyelmet, hogy hasonló rovatot indít a *Természet Világa* is.)

- A *Mindentudás Egyeteme* szervezői több, fizikáról szóló előadást iktattak be a 2005-ös programba, köztük olyat is, amely kifejezett a Fizika Nemzetközi Évének szellemében a fizika gyakorlati/társadalmi hasznosságát ismerteti.

- A Területi Csoportokat biztatjuk arra, hogy minden megyében és lehetőleg minél több iskolában tartsanak előadásokat és más megmozdulásokat. Kiemelten fontosnak tartjuk az olyan rendezvényeket, amelyek azt „utca emberét” próbálják megszólítani.

- A *Csodák palotájában* kísérletező fizikatanárok bevonásával, havi rendszerességgel rendeznek a Fizika Nemzetközi Évéhez kapcsolódó előadásokat.

- Elkészült három videokazetta, amelyek ismeretterjesztési célból kikölcsönözhetőek. (Az egyik egy interjú *Simonyi Károly*val a *Fizika Kultúrtörténete* című könyvről. A másik film – melyet részben a KFKI-ban, részben az USA-ban, illetve a CERN-ben készítettek – címe *Ősrobbanás a laboratóriumban*. A harmadik film a lézerről és a szegedi lézerekről szól.) A filmek készítésében közreműködők, illetve a téma neves szakértői jelezték, hogy igény esetén a vetítésekhez kapcsolódó beszélgetéseken részt vesznek.

- Az ELTE TTK Fizikus Tanszékcsoportja márciusban tartandó tanári összejövetelén megemlékezünk a Fizika Nemzetközi Évéről.

Kérjük a *Fizikai Szemle* minden olvasóját, hogy kapcsolódjon be a Fizika Éve rendezvényeibe. A programokkal kapcsolatos információk az ELFT honlapján (<http://www.kfki.hu/elft>) folyamatosan hozzáférhetőek. Kérjük továbbá azokat a kollégákat, akik bármilyen rendezvényt terveznek, hogy az ezzel kapcsolatos információkat juttassák el az ELFT Elnökségéhez ([mail.elft@mtesz.hu](mailto:elft@mtesz.hu)), hogy azok a honlapra felkerülhessenek.

Az ELFT támogatja a Magyar Fizikus Hallgatók Egyesülete (MAFIHE) által a fizika népszerűsítésére tervezett megmozdulásokat. A MAFIHE az alábbi programokat tervezi:

- *Nemzetközi Tudományos Nyári Iskola* – Fizikushallgatók és doktoranduszok számára szervezett egyhetes program, amely során a tudományos kutatás élvonalába tartozó, ám az egyetemi tantervben nem szereplő témáknak körül a meghívott előadók.

- *Rajzpályázat közép- és általános iskolásoknak* – A pályázat célja, hogy a diákokat közelebb hozza a fizikához, rádöbentse őket (legalább is azokat, akik foglalkoznak vele), hogy mindennapi életünket milyen nagy mértékben határozzák meg a fizikai vívmányok, találmányok. (Mi lenne, ha nem ismernénk az alapvető összefüggéseket sem?) A legjobb plakátokat az Eötvös Egyetem Természetudományi Kara épületében néhány hétre szeretnénk kiállítani, valamint díjazni. A beadási határidő előreláthatólag március vége.

- *Regionális fizikustalálkozó* – Közép-európai fizikushallgatói szervezetek képviselőinek szervezett találkozó, tudományos előadással, kulturális programokkal, kirándulással, szórakozással.

- *Nemzetközi CERN-kirándulás* – Egyesületünk minden évben szervez látogatást fizikushallgatóknak a CERN-be, Európa legnagyobb részecskefizikai kutatóintézetébe. Az intézmény 2004-ben ünnepelte 50. születésnapját, és a Fizika Nemzetközi Éve alkalmából

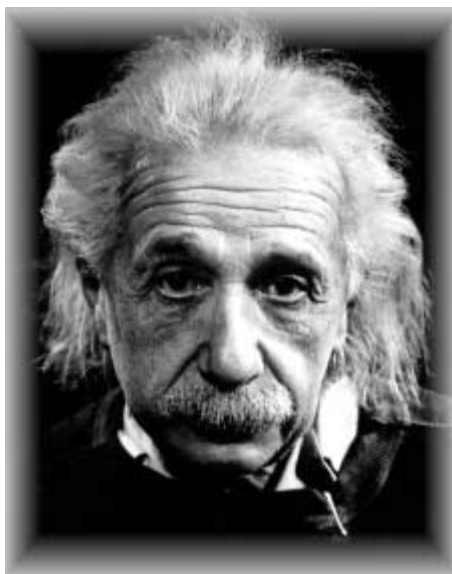
- *Nemzetközi CERN-kirándulás* – Egyesületünk minden évben szervez látogatást fizikushallgatóknak a CERN-be, Európa legnagyobb részecskefizikai kutatóintézetébe. Az intézmény 2004-ben ünnepelte 50. születésnapját, és a Fizika Nemzetközi Éve alkalmából

egyesületünk középiskolai fizikatanároknak is szervez egy ilyen kirándulást. Ez utóbbi időpontja március 3–7.

- *Labirintus a fizika történetébe* – Ez egy interaktív kiállítás, melynek célja, hogy egy labirintus keretében bemutassuk a fizika történetét, a fejlődés irányát, a sikereket és a zsákutcákat egyaránt. Szólni kívánunk tudósokról, találmányokról, szórakoztató vagy éppen tanulságos anekdotákkal színesítve kiállítást. Célunk az, hogy a program mind az egyetemeken fizikával foglalkozó hallgatók, mind a középiskolás diákok számára érdekes legyen, sőt, az általános iskolás felső tagozatosok is találjanak benne élvezetet.

- *„Flash Mob” és fizika-standok Einstein születésnapján* – Rutherford-kísérlet emberekkel, március 14-én a Hősök terén! Diákok testesítik majd meg az alfa-részecskéket és az atommagokat egyaránt. Egy látványos „előadás”, melyben részt venni, s melyet megnézni egyaránt nagy élmény lesz! Kísérő programként pedig érdekes, szórakoztató kísérleteket mutatunk be a standokon.

*Eötvös Loránd Fizikai Társulat Elnöksége*



A nemzetközi tudományos közösség évek óta készül arra, hogy megünnepelje a Fizika Évét, végül a választás 2005-re esett. Miért éppen most, kérdezhetnék sokan? A szervezők szerint ennek két fontos oka is van.

2005-ben éppen századik évfordulója *Albert Einstein* „annus mirabilis”-ének, csodálatos évének, amelyben néhány hónap különbséggel három korszakalkotó jelentőségű cikket publikált, melyekkel megalapozta a modern fizika diadalmas évszázadát. Egyik cikkében *Max Planck* kvantumhipotézise alapján magyarázatot szolgáltatott a fényelektromos effektusra, és a foton fogalmának bevezetésével a kvantummechanika előfutára volt. Ezért a munkájáért nyerte el 1921-ben a Nobel-díjat [1].

Második cikkében a mozgó testek elektrodinamikájának vizsgálatával jutott el a speciális relativitás elméletének kidolgozásáig [2], amely mára kísérletekkel alátámasztott és lényegében lezárt fejezete a modern fizikának.

Harmadik cikke [3] *Ludwig Boltzmann* statisztikus fizikai vizsgálatait kiterjesztve részletes magyarázatát adta a Brown-féle mozgásnak, ezzel közvetett bizonyítékot szolgáltatva az atomok létezésére.

A nemzetközi fizikusközösség ezzel a választással tisztelg Albert Einstein előtt, akinek munkásságát *Albrecht Fölsing* a következőképpen értékelte: „*Soha ezelőtt, és azóta sem létezett olyan személy, aki egymagában ilyen rövid idő alatt és olyan sokkal gazdagította a tudományt, mint Albert Einstein tette az ő csodálatos évében.*” Csak zárójelben jegyzem meg, hogy amint az Magyarországon már szinte elvárható, az ünneplés ellensúlyaként a megelőző években soha ennyi *intellektuális macskajancsi* nem jelentetett meg nálunk könyvet, amelyben Einstein „hibáit” vagy alapvető „tévedéseit” korrigálják – ellentétben „az ostoba és ünneplő” nemzetközi tudományos közösséggel – vagyis feltehetően léteznek sajátosan magyar út is Európába!

A második ok abban rejlik, hogy a fizika fontosságának és legújabb eredményeinek a nagyközönség egyre kevésbé van tudatában. Az érdeklődés csökkent a fizika iránt, ezt jelzi világszerte a fizika szakot választó egyetemi hallgatók egyre csökkenő száma. Ezzel szemben a fizika nem csupán a tudomány és technika fejlődésében játszik létfontosságú szerepet, hanem társadalmunk életére is rendkívüli hatással van. Bár ez a fizikában járatosak számára triviális, nem mindenki van ezzel tisztában. A XXI. század hajnalán a fizika hozzájárulása más tudományok fejlődéséhez alapvető fontosságú lesz olyan globális problémák sikeres megoldásában, mint az energiatermelés, a környezetvédelem és a népegészségügy. A nemzetközi fizikusközösségnek tehát hatékony lépéseket kell tennie, hogy a jövőre vonatkozó elképzeléseit és terveit megossza nemcsak a nagyközönséggel, hanem a felelős politikusokkal is.

A Fizika Évének küszöbén hazánkban is hasonló problémákkal kell a fizika tudományának szembenéznie. „*Tudásalapú társadalmat építünk*” – szajkózzák nap-nap

után politikusok és a média képviselői. Egy más változatban szintén naponta halljuk: „*legnagyobb kincsünk szűrkeállományunk*”. Ezzel szemben a valóság egyáltalán nem rózsás, a tudomány támogatása nem éri el az európai átlag minimumát sem.

A sors iróniája, hogy az (amerikai mintára létrejött) kutatóközponti struktúra „desztalinizálása” során a KFKI Kutatóközpontot a hatalom kifürkészhetetlen akaratából szétverték (az SZBK maradt), míg az azt követő, most már igazi magyar „antidesztalinizálás” logikája létrehozta a társadalomtudományok, a kémia és a földtudományok terén ugyanazt a kutatóközponti struktúrát. A Fizika Évében tehát hazánkban *a fizika az egyetlen olyan alapvető diszciplína, amelynek nincs kutatóközpontja!* A szerencse a szerencsétlenségben azonban az, hogy az akadémiai kutatóhálózat és az egyetemek között olyan szoros kapcsolatok alakultak ki, amelyek mind a kutatás, mind pedig a felsőfokú oktatás színvonalára termékenyítően hatnak.

Ha nemzetünk európaiságát ecsetelik vezetőink, szinte kötelező a „marslakókat”, a külföldön élő világhíres magyarokat emlegetni az unalomig. Ugyanakkor társadalmunk nincs tudatában annak, hogy a múlt század második felében és napjainkban is, kiemelkedő magyar kutatók öregbítették/öregbítik eredményeikkel tudományos hírnevét világszerte. A hazai közvélemény csak a sokféle valóságshow műsorok résztvevőinek (hős?) tetteiről értesül. Csoda hát, ha a fizika szorgalmas kutatója helyett intelligenciahányadosán taposó, saját zenei CD kiadásán szorgoskodó tetovált sztár a fiatalok példaképe?

Eredményeink birtokában azonban bátran kimondhatjuk: a hazai fizikának (bár szurkolóinak száma még mindig kevesebb, mint a labdarúgásé) nincs mit szégyenkeznie a társadalom és a médiumok előtt – talán megfordítva inkább helyénvaló lenne.

A hazai fizikának, élén az Eötvös Loránd Fizikai Társulattal, mindenesetre kötelessége a világ tudományosságával együtt, kellően megünnepelni a Fizika Évét. Meg kell ismertetnünk a legszélesebb körben a fizika új és fontos (valamint régebbi, de a nagyközönség számára ismeretlen) eredményeit, rá kell ébreszteni az embereket arra, hogy a modern társadalmakban a fizikának és különféle alkalmazásainak létfontosságú szerepe van az életminőség javításában, a társadalom életében felmerülő problémák megoldásában.

*Carl Sagan*, a nemrég elhunyt kiváló csillagász, űrkutató, valamint tudománynépszerűsítő *Korok és démonok* című nemrég magyarul is megjelent könyvében a következőképpen fogalmaz: „*Napjaink globális civilizációja úgy van megszervezve, hogy minden lényeges elem – a transzport, a kommunikációk a mezőgazdaság, a medicina, az oktatás, a szórakoztatás, a környezetvédelem, sőt a demokrácia működéséhez nélkülözhetetlen választások lebonyolítása is – alapjaiban függ a tudománytól és technikától, amelyeket azonban a dolgok mai állása szerint szinte senki sem ért. Ez a helyzet*

felér egy beprogramozott katasztrófával, amelyet ugyan ideig-óráig elodázhathatunk még, de a tudatlanság és a hatalom vészjósló keveréke előbb-utóbb belerobbán a képünkbe.”

Tömören megfogalmazva, a Fizika Évének küszöbén mutassuk meg az embereknek, hogy a fizikában még rengeteg a megoldásra váró kérdés, a fizika izgalmas, a fizika szép, és ami a legfontosabb, nélkülözhetetlen. Csatlakozunk tehát a világ fizikusközösségeihez és kiáltunk világággá együtt: *nem élhetünk fizika nélkül!*

## FIZIKA ÉS TÁRSADALOM

„Physics infiltrating” – mindenhova beszivárgó fizika: ez volt a mottója a 2004-es Társulati Vándorgyűlésnek. A cél az volt, hogy megmutassuk, hogyan szivárog be a fizika a tudomány különböző területeire, és a társtudományokat hogyan befolyásolja. Az itt következő rövid áttekintésnek még messzebbmenő a célja: azt szeretnénk megvizsgálni, hogyan befolyásolta a fizika nemcsak a többi tudományt, hanem az egész emberi gondolkodást.

Mielőtt azonban erre rátérnék, szeretném hangsúlyozni, hogy mindezt egy fizikus mondja. Lehet, hogy egy vegyész vagy egy biológus ugyanezt állítja a kémiáról, vagy a biológiáról. Másrészt az is lehet, hogy nem mindenki ért egyet azzal, mit tekintek fizikának, mivel a csillagászatnak és a technikának bizonyos részeit is ide fogom sorolni. Mentségem az, hogy az egyes tudományágak manapság nagyon összefonódnak: ki tudja például megmondani, hogy a periódusos rendszer magyarázata fizika vagy kémia-e. Különlegesen fontosak a fizikai ismeretek a csillagászatban. Mi a kozmológia például: fizika vagy csillagászat? És a számítógépeknek mennyi köze van a tranzistorhoz, azaz a fizikához, vagy mennyire csak a technika szülöttei. A világ egy és oszthatatlan, és az egészről mindenki annyit vág le magának, amennyit gondol és tud.

Néhány napja egy Nobel-díjas fizikus előadásában azt mondta, hogy az emberiség egyik legnagyobb megrázkódtatást okozó felismerése a kopernikuszi elv volt, hogy a Föld forog a Nap körül. Ez azt jelenti, hogy nem a Föld a középpont. Ha meggondoljuk, milyen technikai, tudományos és szellemi erőfeszítés, illetve bátorság kellett ahhoz, hogy ezt a tényt felismerjék, és elfogadják azt, hogy nem mi vagyunk a középpont, akkor nem csodálkozhatunk azon, ha valaki ezt az emberiség egyik legfontosabb tudományos felfedezésének tekinti. A kopernikuszi elvet mára úgy általánosították, hogy nem is a Nap a középpont, a Világegyetem minden pontja egyforma, amely rengeteg naprendszerből, sőt rengeteg galaxisból (Tejútrendszerből) áll.

A következményei beláthatatlanok voltak. Nem akarom most a filozófiai fontosságát említeni, inkább a fizika szempontjait hangsúlyoznám. A hihetetlen nagy Univerzumban mindenütt ugyanazok a fizikai törvények érvé-

### Irodalom

1. A. EINSTEIN: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (A fény keltésének és átalakulásának egy heurisztikus szempontjáról) – *Annalen der Physik* 17(1905) 132–149
2. A. EINSTEIN: *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (A mozgó testek elektrodinamikájáról) – *Annalen der Physik* 17(1905) 891–922
3. A. EINSTEIN: *Über die molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* (Nyugvó folyadékokban lebegő apró részecskék mozgásáról a hő kinetikus elmélete alapján) – *Annalen der Physik* 17 (1905) 549–561

Németh Judit

ELTE Elméleti Fizikai Tanszék, Budapest

nyesek. A törvény szerepe elsődleges fontosságúvá vált. A törvények optimizmust sugallnak. Tekintélyt szerez nekik az a meggyőződés, hogy a természet valóban alájuk van vetve. Természetesen a nagy kérdés az, hogy a természet ugyanazoknak a törvényeknek engedelmeskedik-e, mint amelyeket elménk ki tud gondolni.

Az újkori tudományos szellem ott kezdődik, ahol a reneszánsz mohósága megnyugszik és az emberi érdeklődés szerénnyé válik: az egész helyett a részletek vizsgálatával foglalkozik. A legjobban talán *Leonardo da Vinci* és *Galilei* összehasonlításával lehet ezt érzékelteni. Leonardo mindent akar csinálni, és mindent akar tudni. Galilei azt akarja megérteni, milyen szabályok szerint esik le egy darab kő. A törvényt akarja felismerni, és matematikailag megfogalmazni. Vele kezdődik el az újkori fizika.

### A fizika kialakulása

A fizika komoly tudománnyá válásához négy dolog kell: a technika fejlődésével a mérések és így a megfigyelések tökéletesedése, az elvont gondolkodás kialakulása, amely ezeket a megfigyeléseket elemzi, a matematika fejlődésével ezen gondolatok matematikailag megfogalmazható törvénybe foglalása és végül a törvények kísérleti igazolása. (A fizikai Nobel-díjat pusztán elméletért soha nem lehet megkapni: kísérleti igazolás kell hozzá.)

Ennek az utolsó feltételnek a jelentőségét nem lehet eléggé hangsúlyozni. Soha nem szabad semmit dogmaként elfogadni: ha egyetlen (biztos és megismételt) kísérleti adat ellentmond az elméletnek, az elméletet módosítani kell. Vagy teljesen elvetni, vagy az érvényességi határát korlátozni.

Ami a fizika szerepét annyira kiemelkedővé tette, az a törvények matematikai megfogalmazásának a szerepe, főleg a jelnyelv bevezetése után. Első nagy eredménye a földi és égi mechanika összekapcsolódásakor jelentkezik, azaz *Newton*nál. Newton a fizika történetének egyik legnagyobb alakja (nem véletlen, hogy Dürrenmatt *Fizikusok* című darabjában ő az egyik fizikus), ő már a fizika

mint tudomány teljes fegyvertárát alkalmazza. A sajátmaga és mások által megfigyelt jelenségek okait vizsgálja, és ennek során egy teljesen új és zseniális fogalmat vezet be: a távolba ható erőt (azaz a gravitációs erőt). A gravitáció jelenségét foglalja törvénybe. A törvénybe foglalás új matematikát igényel, amelyet Newton alkot meg (*Leibniz*től függetlenül és korábban): a differenciál- és integrálszámítást. Hihetetlen érdeme, hogy a mechanika törvényeit már ezek segítségével írja le. A fizika korábban csak alkalmazta a matematika eredményeit, ettől az időtől fogva azonban visszahat rá, beszívárog: az igényeivel új matematikai ágak kidolgozására készíti a matematikusokat (és néha a fizikusokat is).

## A természettudományos gondolkodás kialakulása

A technika, a fizika és a matematika közös alkalmazása segíti a többi természetismereti területet tudománnyá válni. A csillagászat annyira együtt fejlődik ebben az időben a fizikával, hogy nehéz elválasztani attól. A mechanika kialakulása után először fejlődik a kémia, azután a többi természettudomány: biológia, biokémia, mikrobiológia, a különböző földtudományok, asztrofizika, az orvostudomány egyes fejezetei, és sorolhatnánk tovább. A különböző ágak összefonódnak, a tudomány egységét jelentik, és ma már nehéz meghatározni, hogy mi ezeknél a területeknél a „beszívárgó fizika” szerepe. Kétségtelen azonban, hogy a fizika egyik legfontosabb hatása a módszerei alkalmazásában volt. A kétely és a szigor, ami a mechanikát létrehozta, kötelező lett, és a tudományos ismereteket nagymértékben függetlenítté az emberi szeszélytől. A többi tudomány is átvette a fent ismertetett szabályokat, matematikailag megfogalmazott törvényeket alkotott, és azokat kísérletileg igazolta. A törvény szerepe egyre nagyobb lett. Lassan kialakulnak a természettudományok.

Természetesen a módszereken kívül van néhány olyan alapfelismerése a klasszikus fizikának, amelyek szerepe minden tudományágban elsőrendű fontosságú. Ilyenek például a mozgások törvényei, az energiamegmaradás, az entrópia állandó növekedésének az elve, az elektromágneses jelenségek..., és még sorolhatnánk tovább. A fizikai kémia, geológia, meteorológia, biofizika, csillagászat... – azt mondhatjuk, a természettudományok összessége – ezek nélkül elképzelhetetlen.

## A természettudományok hatása az emberi gondolkodásra

A természettudományok fejlődése a világ megismerésén és a technikai eszközök fejlődéséhez való hozzájárulásán kívül azért is fontos volt, mert hatott az emberi gondolkodásra. Nemcsak olyan módon, ahogy *Kopernikusz* vagy *Darwin* – hogy alapvetően új ismereteket közölt, amelyek a régi meggyőződések újragondolását kívánták meg –, hanem úgy is, hogy az emberi gondolkodás szabályait módosította.

Németh László erről a következőket írja: „*A kétely és a szigor, ami a mechanikát létrehozta, kötelező lett*”, a tudományos ismereteket nagymértékben függetlenítté az emberi szeszélytől, „*az ismeretkincsnek nemzetközi klérust szervezett, melyben a nemzeti indulat, elfogultság véteknél számított. A reneszánsz szenvedélyek zajlását követő józanodás s a szerény, megbízható tudásra törvő érdeklődés mellett ez a kritikai s szerzetesi fegyelem volt, ami az új tudományt a régi fölé ... oly felbőrkölő magasba emelte.*” „*Olyan világgépet teremtett, amely nem a valóságérző képzelet, hanem a valóságvallató megfigyelés és kísérlet műve.*” Az újkori civilizáció története szerinte: „*hogy járta át ez a természettudományt létrehívó szellem, gondolkodás a szellemi és gyakorlati élet más területeit, miféle idegen erőket riasztott fel, hogy került velük termékeny harcra, hogy futott szét a föld területén, s a mi korunkban hogy merült alá*”.

Az új szellem új műfajokat hozott létre: a természettudományok után behatolt a filozófiába, a történettudományba, a XVIII. században Angliában a közgazdaságtanba, majd még később, a tudományban bevált módszereket alkalmazva létrehozta a szociológiát, pszichológiát. Hadtudományok, jog, politika – mindent átalakított ez a gondolkodás. A kor szelleme, a törvény tisztelete igyekszik kiküszöbölni minden túlzó szenvedélyt, babonát, mértéktelenséget. Ez az a szellem, amelyet más civilizációk is átvettek. Műveltségében, technikájában s szervezeti leg is az emberi civilizáció keretei kialakultak.

De nemcsak a szellemtudományokban érezhető a természettudomány hatása, hanem a művészeteknél is. Az elemzés szinte kötelezővé vált. Fellép a XIV. Lajos korabeli drámában, az angol esszében, a zeneelméletben. A szerkezetük ezeknek szabályos, egy-egy természettudományos képletre emlékeztet. Micsoda különbség érezhető egy Shakespeare- vagy egy Racine-dráma között! „*S mi más a nagy regény, mint a természettudományok módszerének: a megfigyelésnek, kísérletnek, tényfeltárásnak, elemzésnek a tobzódása.*” A bécsi zene, a francia impresszionizmus, majd a modern fizika térhódítása után a homo ludens irodalom – mind egy-egy diadalmas állomása ennek az új szellemnek.

Az újkori szellem első nagy központja XIV. Lajos udvara, ahol ez a szellem egy új, emelkedőben levő társadalommal találkozik. Az a szédítő hatás, amelyet XIV. Lajos udvara a vele ellenséges Európára tett, jórészt az új vívmányoknak volt köszönhető. A következő laboratórium a XVIII. századi Anglia, ahol az udvari arisztokrácia helyett egy jóval szélesebb réteg, a kialakuló polgárság veszi át az új szellemet. A tudománynak technikává válását ott a mesterségeket, gazdasági kérdéseket megbecsülő társadalom is támogatta. Az újkor szellemét aztán a felvilágosodás terjesztette el Európában.

Volt azonban a természettudományos szellem terjedésének még egy fontos hatása: módosította kissé az emberek értékelésének a rendjét. A görög demokráciák óta három fő csoportja volt a hatalmasságoknak: a származás és a pénz arisztokráciája, illetve az egyház. Ezeknek a kezében volt a hatalom. Természetesen elismerték a művészeket is, de egy művésznak patrónusokat kellett találni, bizonyos mértékben ki volt szolgáltatva annak, aki fizetett.

A tudományok terjedésével azonban kialakult egy új, fontos és majdnem független újabb központ, az egyetemek világa. Az egyetemek ugyan az államtól, az egyháztól, vagy magánszemélyektől kapták a pénzüket, de ha azt megkapták, már nagymértékben függetlenedni tudtak az adományozótól (legalább is Európában). És az egyetemeken az emberek megítélése nagymértékben a tudásuktól függött, főleg a természettudományos területeken. A diákok oda mentek, ahol jó tanárok voltak – talán még inkább, mint manapság. Kialakult lassan a tudás elismerése, hatalma és a tudósok köre. A XVIII. századtól kezdve a tudomány dolgaiba egyre kevésbé szóltak és szólhattak bele az egyházi és világi hatalmasságok.

## A XIX. század ragyogása

A fizika fejlődése által elindított és a fentiekben természettudományosként definiált szellem által uralt korszak legcsodálatosabb ragyogását a XIX. század második felében érte el. A klasszikus fizika ekkorra kiteljesedett, megszülte legjelentősebb eredményét, az elektrodinamikát, az emberiség sorsára és mai kényelmünkre olyan döntő fontosságú tudományát. Létrejött a mechanika mellett ekkorra az elektromágneses fényelmélet, a kinetikus gázelmélet, a termodinamika, a statisztikus fizika bizonyos részei (Maxwell–Boltzmann-eloszlás). Kimondták az energiamegmaradás elvét. A fizikusok úgy érezték, megcsinálták, amit lehet. Egy-két „apróság” még nem volt ugyan teljesen tisztázott, de ezek megoldását már csak idő kérdésének tekintették. A kémiai is hatalmas fejlődésen ment át, szétvált a szerves, a szervetlen és a fizikai kémia, és a periódusos rendszer felállításával a klasszikus kémia is elérte a csúcát. A biológia egy-egy ága részben a fizika és a kémia egy-egy részének a kifejlődése révén, részben a növény–állat-rendszertan fejlődése során érett tudománnyá, és szintén eljutott egyik csúcsához, a darwini elmélethez, amely – akárcsak a kopernikuszi elmélet – rákényszerítette az embereket, hogy bizonyos dolgokat újragondoljanak. A fizika és a kémia fejlődésével kialakult a modern technológia egy része is: az emberek vasúton vagy gőzhajón utaztak, villanykörtével világítottak. És természetesen a technológia fejlődése visszahatott a tudományok fejlődésére is.

A művészetek ekkor még közel álltak az emberekhez. Egy Balzac-, Stendhal-regényt, vagy Keats-, Shelley-, Arany-verset általában mindenki megértett, és sokan olvasták is. Egy klasszicista vagy egy romantikus festőt, Ingres, Munkácsit, Delacroix-t még méltányolt a közönség. A XIX. századi zene, Liszt, Csajkovszkij, Verdi a nagyközönség köreiből rendkívül népszerű: az olaszok Verdi-dallamokat énekeltek az utcán. A tudomány, művészet és a közönség még nagyjából összhangban van. Európa a világ közepe, és – részben Haussmann báró jóvoltából, aki erősen átépítette a várost, részben a Párizsban összegyűlt művészvilág hatására – Párizs a világ fővárosa. A század végén a párizsi világkiállítás megismerteti a várost az egész világgal. Európa, a művészetek, a tudományok még egyszer utoljára, teljes fényükben együtt ragyogtak.

## A harmónia megbomlása

A mélységben azonban ez a harmónia kezd megszűnni. Nehéz megmondani, mi okozza ezt a bomlást kezdetben, hiszen tulajdonképpen ez már a romantikával elkezdődött, és a fénykor idején határozottan érződött. A fő ok valószínűleg az, hogy az új szemléletmód bizonyos lényeges elemei sokakban – akik ezt vagy nem értik, vagy nem tudják alkalmazni – visszatetszést szül. Melyek ezek a lényeges elemek? Mértéktartó, elemzést igényel, önkorlátozó, ismeri a megismerhetőség határait, és végül a nyelve nehéz: matematikai ismereteket követel. A jelenségek magyarázatára absztrahálás révén új fogalmakat alkot, az absztrakciókat aztán új felfedezésekre használja fel. Absztrakcióra azonban kevesen képesek. Azaz a vívmányok élvezetéhez sokat kell tudni. Amikor Galilei távcsövét az égre szegezte, a nagy tömegek megértették, miről van szó, sőt még valamilyen szinten állást is tudtak foglalni a Föld forgása kérdésében, esetleg élvezettel figyelték a csillagok mozgását. *Bolyai Farkas* távcsövével előkelő hölgyeket kápráztatott el. A XIX. század végére azonban az elektromágnesség lényegét, noha milliók élvezték a technika által létrehozott áldását, már nem nagyon értette senki.

Még nagyobb probléma azonban, hogy a tudás elkülönült részekre szakadt szét. Megszűnt a polihisztorság. A XVIII. századig a szellem ügye egyetlen ügy volt, a szellem embere kora egész műveltségét áttekinthette. Ha nem is tudott mindent, mindenről tudhatott. A felvilágosodás az utolsó ilyen kor. Az enciklopédistáknál a szellemi érdeklődés és az ismeretek özöne még egyensúlyt tart. A XIX. századra az enciklopédistákat kiszorítja a szakember. A szakember nem a közös műveltség nyelvén szól a tényekhez, hanem minden tárgyhoz a maga nyelvén. A tudomány szörnyeteggé puffadt, amelyet egy ember nem tudott áttekinteni. Az egyik terület elsődrendű tudósa laikus a másik területen.

A legnagyobb baj azonban nem az újkori ismeretek mennyiségével, hanem a milyenségével volt. A középkor demokratikus: az evangélium kora. Ezt mindenki megérti. Az újkor a természettudományá. Az embereket foglalkoztató legfontosabb filozófiai kérdésekre, hogy: „mi a világ, miért vagyok itt, mihez kell igazodnom?” a tudomány képviselői „nem tudom”-mal feleltek, ami persze nem kielégítő válasz. Röviden összefoglalva, az újkori szellem végzetesen arisztokratikus maradt. Az ismeretekhez a nagy tömegek nem tudtak hozzáférni, a törvényeket nem értették, és így nem is fogadták el.

## A XX. század

Az igazi szétválást azonban tudomány és a társadalom között megint a fizika okozta. A évszám 1905, a kvantummechanika és a relativitáselmélet kezdete.

A kvantummechanika eredményei hihetetlen nagyok. Kvantummechanikai oka van a lézersugárzásnak, a szilárdtestfizika, a részecskefizika, a statisztikus fizika számos jelenségének, az atommag alkotórészeit összekötő erőknél. Hatása a fizika mellett a többi tudományágban is fontos, elsősorban a kémiában. Segítségével sikerült



például megoldani a periódusos rendszer magyarázatát, a kémiai kötések. De napjainkban a természettudomány és az ehhez kapcsolódó technológia minden területén érezhető a szerepe, hiszen a tudományágak között egyre nagyobb az összefonódás.

A kvantummechanikával kapcsolatos probléma az eddigieknél sokkal nagyobb: az, hogy a szemléletünknek mond ellent. Azt valahogy el lehet fogadni, hogy bizonyos feladatok megoldását, bizonyos törvények mélységét nem tudjuk megérteni, mert nem ismerjük eléggé a matematikát, azt azonban, hogy valami hol részecske, hol hullám módjára viselkedik, már sokkal nehezebb belátni. Döntsük el végre: a fény hullám, vagy apró részecskékből áll. Hogyan kell értelmeznünk az alagúteffektust? Vagy átjut egy részecske (hullám) egy gáton, vagy nem. De hogy részben jut át! Vagy határozzuk meg, hogy valami az A vagy a B pontban van-e. De hogy bizonyos valószínűséggel az egyikben, bizonyos valószínűséggel a másikban: ez érthetetlen – mondja az egyszerű ember, aki próbálja megérteni a fizikát. És feladja, másfele fordul. De mivel a kvantummechanika a többi tudományba is behatolt, azok felé sem tud fordulni. A természettudományok iránti érdeklődés lassan megszűnik.

De az érdeklődés a művészetekben sem talál kielégülést. Az impresszionista festészetet, Baudelaire költészetét már a XIX. század végén nem értette eléggé a korabeli közönség. Ezt azonban lassan még megszokta. De a kvantummechanikába beleízelt művészvilág ennél is szokatlanabb fordulatokat tudott produkálni. Pirandello egyik drámájában a közönség végig nem tudja meg, hogy a faluba költözött háromtagú családban az anya vagy a férj-e az idegbeteg. Dürrenmatt alagútja nem ér véget, örökké megy benne a vonat. Dalí festményein felfordul a világ. Cage zeneművei még a szakértő közönséget is mehökkentik. A bizonytalanság, amely a művészetekbe beköltözött, a kvantummechanika szellemét tükrözi vissza.

A modern művészetek élvezeténél ugyanaz a helyzet, mint a természettudományoknál: sokat kell tudni hozzá. Az absztrakt festők képeit, Proust vagy Eszterházy könyveit, Lutosławski, de néha még Bartók zenéjét is nem könnyű megérteni és méltányolni. A rohanó XX. században még a gondolkodó emberek egy része sem veszi ehhez a fáradságot, másodrendű pótlékokkal elégíti ki a kíváncsiságát.

## A technika kora

Sokan mondják azt, hogy a természettudományok kora után a huszadik század második felére a technika kora következett be. Kérdés, mi a szerepe ennek a kialakulásánál a fizikának.

A XX. századra a fizika már minden tudományágba behatolt. A Föld szerkezetének vizsgálatához vagy a Nap energiája magyarázatához magfizika szükséges, a meteorológia a hidrodinamikai egyenleteket használja, a statisztikus fizikai módszereket még a kockázatelemzésben is használják – *physics infiltrating*.

A tudományok összefonódása mellett azonban egyre fontosabb a fizika és a technika kapcsolata. A röntgensugárzás, a radioaktivitás, a maghasadás, a lézersugárzás, az



Salvador Dalí: A negyedik dimenzió keresése

elektroncső, a félvezetők, a tranzistor felfedezése, működésének megértése fizika. De ezeken alapszik a repülőgép, a reaktor (Magyarország elektromos energiaszükségletének 40%-át Paks adja), a rádió, a televízió, a légűtés, a mobiltelefon, a DVD, és napjaink áldása és átka, a számítógép működése – és sorolhatnánk még a számtalan technikai eszközt, amelyek létrehozásához a fizikai ismeretek és a technikai tudás, illetve érzék magas szintű elsajátítása szükséges. Az orvosok lézerral operálnak, az agy működésének vizsgálatát pozitronemissziós tomografiával végzik, a röntgenspektroszkópia szinte minden tudományterületen elterjedt.

Érdekes azonban az, hogy a sok pozitívum ellenére a társadalom nem ismeri el a fizika eredményeit. Az atomreaktorról sikerült rémtörténeteket kialakítani a lakosságban, miközben nem gondolnak arra, hogy a szénből nyert energia, vagy a vegyi gyárakban keletkezett szennyezőanyagok sokkal több betegséget és halált okoznak, mint a reaktorok. És kérdés, hogy az a tény, hogy 1950 és 1990 között, amikor két világhatalom rendkívül ellenségesen állt egymással szemben, nem azért tört-e ki a harmadik világháború, mert a vezetők is tudták, hogy még egy nyereség esetén is nemcsak a katonák pusztulnak el, de számukra is nehezen lakhatóvá válhat a környezetük. Arra is kevesen gondolnak azok közül, akiknek lézerral operálják a szemüket, hogy Magyarország az ehhez szükséges lézernyalábot a szegedi egyetemen kísérletezték ki (*Bor Zsolt*, a csoport vezetője ezért kapott néhány hete Bolyai-díjat, Magyarország egyik legnagyobb tudományos díját).

Az újkori civilizációban a természettudomány és technika szövetségre lépett. A technika révén az eredményekben százmilliók részesültek, de ami az eredményeket létrehozta, csak kevesen értették. A nagy tömegek előtt az új tudományok lényege rejtve maradt. Ha egyszer a szellem embere sem tájékozódhatott többé kora kultúrájában, nem meglepő, hogy az emberek nagy tömegei végképp elszoktak a gondolkodástól. A tudományos eredményeket nem értik, a tudományos gondolkodás szelleme nem hatja át őket. A kvantummechanika tökéletesen irracionálisnak tűnik, ennél hihetőbb az, hogy ufók jelennek meg a légkörben. Hiába bizonyítja a tudomány, hogy ez lehetetlen, jobban hisznek a dilettánsoknak. Az iskola, amelynek ezen a helyzeten segíteni kellene, csak ismereteket tanít, nem a tudomány szellemét, és pláne nem ennek a szellemnek a méltánylását, vagy élvezetét.

Mit várhatunk a jövőben? Mi lesz a gondolkodó emberrel?

## Adományok vagy valami egészen más?

„Mi a csudáról is tetszik kérdezni?” – kérdezem vissza szemtelen diákként, ha a szigorú, de maradi tanító kérdezi, ha viszont *Szókratész*, akkor a válasza: helyes a kérdésed, Telónész.<sup>1</sup>

Ugyanis a *φύσις*, azaz a latinok kissé torzító betűivel fűszisz, az maga a természet, méghozzá átvitt értelemben is, azaz a pszichológia szerinti természet is, a *φυσικός*, a fűszikosz, akinek és akikről ez a folyóirat is szól, az a természetet tanulmányozó ember.

A késői, a szabadon gondolkodó és ezért a többenél most sikeresebb angolszász nyelveken szólók ezt a tudományt *science*-nek nevezték, de nem szűkítették le arra a kontinentális kisiskolás ízére, amely szerint a fizika addig terjed, amíg valami nem él, és onnan számítódik, ha valami nemcsak keveredik, hanem egyesül is. (Csak jó egyesülésekre tessék gondolni, teszi hozzá Szókratészünk, filozófushoz illő, hamiskás mosollyal.) Eljön az idő, jósolja, amikor az eredeti értelemez térnek vissza a bölcsek és nem vagdossák szét a természetet saját ismereteik korlátai szerint, és akkor helyre is áll ez az eredeti, hellén értelem.

No, jegyzi meg jövőbe látó Szókratészünk, volt/lesz sok olyan elme, aki ezt mélyen tudta, így idézhetjük *Born Ignác* (többek között Selmechányán is működött *mineralógus* professzor, *Mozart Sarastrojának* élő mintája) tudós társaságának kitűnő tagját, *Goethét*: (ha már ilyen jövőlátó Szókratészünk van, akkor *Szabó Lőrinc* fordításában)

Fürkész a Lét műhelyében  
mindig egészet a részben.  
Semmi *hégban*, semmi *magban*:  
mert ami kint, bent is az van,  
*Villám-szemed így hatol be*  
a nyitott-szent rejtelembe.



Vonz a *való látszata*,  
játék komolyodhat:  
ami *él*, nem Egy soha,  
kerete a Soknak.

Van itt tehát nukleáris tudomány, tomográfia, fenomenológia, biológia és persze szintézis.

De ez totalitási igény nem csak a nosztalgikusan nézett XVIII. századi, még a világot egyben néző és a magukat elsősorban filozófusnak, sőt teológusnak valló óriás ellenfeleknek, *Leibniz*nek és *Newton*nak a törekvése, nem csak racionalista tanítványaiknak. Egy huszadik századi magyar, *Simonyi Károly* is fizika címen tanított és írt általános kultúrhistoriát. Ugyanebben, az éppen túllépett században minden jelentősebb fizikus és biológus gondolkodva a *Nagy Összefüggés*en, saját elméleteik helyén a fűsziszben, szükségszerűen átlépett azon a határon, amit *Karintby*, egy másik nem eléggé ismert géniusz gú-

nyolt: „*nem búztat ki tussal Magyarország batárát a térképen, ... A katonák ott állanak a batáron, és nem mernek átlépni, mert félnek, hogy belépnek a tusba, mielőtt megszárad.*”

Azaz: teljes zűrzavar, mert tessék mondani, mi az az információ? A morgensterni, Szabó Lőrinc-i *hal* néma éneke, amelyről kiderült, hogy van valami olyan, csak más hullámhosszon, más fizikai közeggel, mint amelyet a primitív dogma törvényesített. (De hát a fent említett Goethe ezt is tudta, nem beszélve az igazi hellénekről, meg a tudatokban sötétített európai középkor nagy nominalista filozófusairól: *A tudás bővítése során időről-időre átrendezés szükséges; ez legtöbbször új maximák szerint történik, de az is mindig csak időleges marad.*)

Mi az információ legemberibb megnyilvánulása? A nyelv, amely nemcsak szavakból, hanem gesztusokból, hangsúlyokból, testbeszédből tevődik össze, és amelynek két és fél évezrednyi kutatásai után a fizikai képalkotás (fMRI) segítségével kiderült, hogy a szavak és a mondatok elemei, meg a nyelvtan az agy más és más lokalitásaiban dolgoznak, mindenkinek mást mutatva a képzelt ugyanarról.

Nemrég egy kitűnő mérnökasszony, *Kurutz Márta* mutatta meg akadémiai székfoglalójában, hogyan dolgozik a fizikát alapozó mechanika a homo erectus biológiájában és gyógyászatában, mindezt a fizika képalkotó módszereivel, a fiziko-kémiai eredményeire támaszkodva, a multimédia (mágneses és optikai videorögzítés, optikai vetítéstechnika, lézerfizika, látáspszichológia, és bizonyosan még több minden) segítségével agyainkat informálva, fájó gerinceinket kúrálva.

## Miről szól ez a lakoma?

Kedves Szókratész, azt hisszük, elég a példázatból, amit gyönyörű idézetekkel napestig és azon túl is lehetne folytatni, közben a lakomáról, azaz a szümpozicionról pedig elkészénék.

Miről is szól ez a szümpozicion? A lényegről, tehát nem arról, hogy éppen pillanatnyilag kinek, milyen csoporttagság hoz legtöbb babért és nem szagló pénzt (*pecunia non olet*<sup>2</sup>). Ugyan most is átlépték ezt a nemes diszciplínaris határt éppen a szaglás, tehát az egyik legegységesebb információátvitel ügyében egy orvosi végzettségű molekuláris biokémikus-fizikus és egy neurobiológus kutatónak adott Nobel-díjjal, de nekünk most és itt az a sorsfordító kérdésünk, hogy a diszciplínaris rend hogyan értékelendő a kutatásban, a goethei *magban*, *Egyben* és annak a *hégjra*, a *Sokra* vonatkozásaiban és hogyan a tanításban, ahol a *mit* és *hogyan* és *mikor* a legvitatottabb, összefüggő gyötrelmünk.

Telónész (Τελωνις) = Vámos

<sup>2</sup> a pénz nem szaglik (bűzlik?)

A kutató felkészítésében és jó papságának (azaz holtig tanuló) fenntartásában könnyebb a dolgunk. Az elhivatott kutató elme nemcsak ás, hanem kapcsol is, nemcsak elmélyül a fűszisz olyan részleteiben, amelyek kíváncsiságát nem hagyják nyugton, hanem állandóan keresi azokat a kapcsolódásokat, amelyek kérdéseire válaszokat adhatnak, azaz általában igen széles fronton is kíváncsi, hiszen azt is tudja, hogy az analógiák, metaforák, asszociációk messzire vezető világi mutatók meg számára az új *maximák*, a nagy átrendezések üdvözítő vízióit. Alig találunk a tudomány igazi nagyjai között olyat, aki egy szűk diszciplínába vakon beleásva magát alkotta meg az ércnél maradandóbbat, de annál több olyat, akinek elméje sokfelé kóborolt. Csak a közelmúlt magyar példáiból: *Teller Ede* ingadozása a zongora és a fizika között, *Neumann János* mindentudó csodabogársága,<sup>3</sup> *Fejér Lipót*, aki elméjének szomorú végelszürkülése idején is minden jelentősebb opera teljes zenei anyagát el tudta dúdolni, *Rényi Alfréd* emlékét őrző élő legendagyűjtemény, az utóéletében egyre rendkívüli nagyságúnak bizonyult *Haar Alfréd*ünk, akinek műveltségéről és érdeklődéséről nem kisebb tanú szól gyönyörűségesen, mint *Móra Ferenc*.<sup>4</sup>

Talán ez a tudományos asszociációéhség, *maxima*-kíváncsiság indokolja, hogy az ellenpélda sokkal kevesebb, de hát olyan univerzális polihisztor művészelme, mint *Leonardo* és Goethe is kevesebb született.

Az igazi kutató felkészülésében és önkarbantartásában nem nyugodhat anélkül, hogy ásóját (szerszámát, fegyverét, kinek ahogy tetszik) naponta ne tisztogassa, élezze, fényesítse. Ez a diszciplináris tudás és gyakorlat a művésznél kettős: az újgyakorlat és a hangszer, a festék, a papír, a vászon és a színek, fények, látszatok megjelenítésének mesterei tudása. Mesterei tudás, ez alapfeltétel, aki ezt nem tudja, aki nem áldozza a nevezetes kilencvenkilenc százalékos izzadságot,<sup>5</sup> az nem kaphatja meg az intuíció ígéretének egyszázaléknyi megvilágosodását. Valamennyi avatott mester, tudatosan, vagy öntudatlanul is, a maga példájával, így neveli utódait, leendő megcáfolóit.

## A pedagógia gyönyörű, kegyetlenül nehéz kihívása

Sokszorosan nehezebb a pedagógia feladata. Ennek az írásnak az első részében összehordott, kicsit páváskodó hivatkozásgyűjtemény fő célja az volt, hogy megmutassa, az ingatag fogalmi megnevezések zsákutcájából a kitörési kísérlet hogyan vezet egy beláthatatlan rengeteg felé, a

<sup>3</sup> S. ULAM: *John von Neumann, 1903–1957* – Bulletin of the American Mathematical Society 64/3 1–49

<sup>4</sup> Frédi, in: MÓRA FERENC: *Szegedi Tulipános Láda* – Magvető, 1964. *Staar Gyula* hívta fel erre a figyelmemet, adjuk tovább!

<sup>5</sup> ez ugyan *Edison*, de van nekünk kicsit régebbi, Héziódosz az időszámítás előtti nyolcadik századból:

Ámde örökké élő isteneink az érényhez  
izzadság árán visznek, hosszú meredélyen,  
útja göröngyös kezdetben, de a csúcsra felérve  
aztán már könnyűnek tetszik, bármi nehéz volt.

HÉZIÓDOSZ: *Munkák és Napok, Trencsényi-Waldapfel Imre* fordítása, *Görög költők antológiája* – Európa, 1959

mai emberiség tudásának átfoghatatlanul félelmetes birodalmába. Mit tegyen az, aki ismeri e beláthatatlanság lényegét, és felelős az utódok tájékozódásáért, hiszen ez a tájékozódás, főleg a demokrácia áldásainak árnyoldalai révén eldönthetik az emberiség jövőjét, milliók, sőt százmilliók életét is. Gondoljunk a környezetvédelemre, annak fontosságára és tévtanaira, a gyógyászatra és a sarlatánokra és nem utolsósorban a történelemhamisító ideológus gyújtogatókra. A fizika mindenütt ott van, ha az utolsó példánkban csak közvetett csatornákon is. (Hiszen maga a csatorna csupa fizika, nem beszélve az új természeti *maximák* és azok hirdetőinek a huszadik századig és máig lángoló máglyáiról.)

Ami itt következik, abban semmi új sincs, a pedagógia klasszikusai erről mind gondolkodtak, a legfőbb intelme *Comenius–Komenskýé*: „*primum amare, deinde docere*”: előbb szeretni és csak azután tanítani. Mennyire mélyen igaz ez a *maxima*, azt végigkísérhetjük a pályaválasztások történeteiben, mennyire az határozza meg az emberek érdeklődését, hogy milyen tárgykörben volt szeretett pedagógusuk, és mennyire egész életen át tartó taszítást hoz létre egy-egy utált tanító. A szülő és a szülőtagadás belénk kódolt érzemereje is hat ezekben.

A változás kettős: az átfoghatatlan mennyiségű információ és az információközvetítés új eszközzrendszere, a korlátlan dialóguslehetőség és a multimédia, ebben is az animáció.

## Új információtechnikai segédletek

A másodikkal végzünk hamarabb, ennek is óriási ma már az irodalma, hamis csodavárásokkal, a tanító ember személyét kikapcsoló törekvésekkel. Valóban nagyszerű, hogy meg tudunk jeleníteni tájakat, eseményeket, kapcsolatokat, és ami a fűszisz megértését legjobban támogatja, a dinamika és modellezésének fogalmi rendszerét. Ez a matematikai fogalmi rendszer, mint arra már itt is volt célzás, a klasszikus mechanika, azaz az elemi megfigyelés világából deriválódik, a differenciál az elemi sebességélményből, a második a gyorsulásból, a parciális derivált pedig akár az itatóspapíron szétfolyó festékből, a halmazelmélet és valószínűség fogalmi a dobókockák viselkedéséből, a bonyolultság a szaporodási analógiákból, főzés és csere mind tartozékai ennek a fogalmi-általánosítási mechanizmusnak. Mindez annyira triviális, hogy egyfelől minden régebbi tanítási segédletben szerepel, másfelől hallhatjuk a témák kutatóinak jogos óvásait az egyszerű példákkal történő általánosítások veszélyeiről.

Saját gyakorlatból is mondhatom, hogy felelős ellenőrzés mellett készült animációk valóban pillanatok alatt segítenek megértetni azt, ami alig volt korábban elképzelhető és az átlagtanuló számára csak elérhetetlen absztrakciónak tűnő jelenség volt, és lehetőséget ad a fenoména mélységeinek, csapdáinak is a megmutatására. Különösen fontos szerepe lehet az animációnak, mozgóképi és színes reprezentációknak, élénkítő, játékos dialógusoknak az eltérő kultúrkörökben oktatásban. Erre jó tapasztalataink voltak roma gyerekeknél a Soros Alapítvány keretében végzett munkák során.

Azt sem szabad elfelejteni, hogy világunkban a gyakorlati oktatásnak, a napi feladatok megtanulásának a körülményei megváltoztak. Az egész életen át folyó tanulás öröme és kényszere új dolog, még a kutatók számára is, hiszen oly mértékben és gyorsan változnak a megértendő, kezelendő tények, tárgyak, munkamódszerek, hogy ennek oktatása egyfelől felesleges, hiszen mindennapos tapasztalattá vált, másfelől értelmetlen, hiszen amire kikerülünk az adott iskolából, minden másképp van. A legtöbb hibát itt az informatikaoktatásban követik el. Tanítanak olyan programozási részleteket, amihez a felhasználónak éppúgy nincs köze, mint a szelepkialakítási technikához az autóvezetőknél, tanítanak elavult programnyelveket, mintha most a KRESZ-tanfolyamokat a lófogatú járművekre vonatkozó ismeretekkel töltenék meg. De a legfőbb hiba nem ez, hanem az a tévút, amin elvásztják a számítástechnikai–informatikai oktatást mint elkülönített tárgyat a tartalomtól, azaz a fűszisz ismeretében alkalmazandó gyakorlattól és gondolati összefüggésektől.

Erre a változáslényegre a természetes válasz volt a készség oktatása, a tényekkel szemben. Már a tradicionális angol oktatásban is volt olyan jelszó: *we don't teach facts, but principles*. Ezzel magyarázták a régi, nyitott szerkezetű, monumentálisabb gépek oktatási szerepét a modern tervezésű, burkolt, összeépített berendezések bemutatásával szemben. A kettő – mint arról a kutató gyakorlati készségénél már volt szó – szétválaszthatatlan, ennek tanulságait legjobban az új matematika oktatásának negatív fogadtatásában és ténylegesen kérdéses eredményeiben is megtapasztaltuk. A bonyolultság ismerete a pedagógiában is a leegyszerűsítések előnyeinek és kérdésességeinek mérlegelésére figyelmeztet.

Már közben át is csúszunk a másik fő vonulatra, az általánosításokból adódó szintézishez.

## Információ – óceán és szintézis

A matematika és a fűszisz elválaszthatatlan kapcsolata, azaz a modellezés absztrakciójának és magának a modellezés objektumának veszélyes elválasztása, illetőleg egyszerű interakciója a kiút és az emberiség reménye. Nagy szavaink jelentőségéről, nem túlzott voltárról a pedagógiáról szóló fejezet elején talán meggyőztük a nyájas és a nem olyan nyájas olvasót. (Sajnos a nem olyan nyájas ezt jobban tudja, és vissza is él vele.) A tudomány mindig törekedett az Egész megértésére, erre szolgáltak a megújuló *maximák*, de soha annyira nem állt közel egymáshoz az Egészre vonatkozó filozófiai, teológiai spekuláció a Részek fizikai–biológiai–pszichológiai tényanyagához, mint ma.

Naponta és hetente kapjuk azokat a mozgóképeket, amelyek az agyi folyamatoknak, érzelmi–értelmi percepciók válaszoknak útvonalait, elemi fűsziszbeli reprezentációit értelmezik, amelyek korábban csak zseniális megfigyelések és sejtések, vagy nagy félremagyarázások történeteit és azok következményeit gazdagították. *Ma a bíróságok judíciúmat is támogathatja e gyönyörű tényáradat, közvetlen tapasztalat, de méginkább lehet szerepe az emberiség számára, mint saját sorsa bírójának.*

Itt fogható meg és érzékeltethető a tudomány, annak szabadságának jelentősége és a pedagógia páratlan szerepe. Pedagógia most már a teljes életúton át, azaz a médiának nevezett valamit (óvakodom a lelkes és gyalázkodó jelzőktől) bőven beleértve. Persze, ahogy a fejlődés tan ma már az idézett felvételek tényeivel is bizonyítja, a gyermek- és ifjúságpedagógia, azaz az iskolai pedagógus személye a meghatározó.

Itt kereshetjük tehát a közelítést (megoldás nincs, hiszen az a tudomány számára a történet vége, ahogy idéztük Goethét). Nincs tantárgyakra tagolt fűszisz, és így hamis lehet a tantárgyakra tagolt oktatása. Simonyi értelmében kultúrtörténetre, megismeréstörténetre, annak esztétikájára és etikájára, megértési módszereire, az elsajátítások technikájára kell oktatni, annyira integráltan, amennyire csak lehet, amennyire az új eszközök segíthetik és amennyire a mai tudásunk e kapcsolatokat feltárja.

Rengeteg egyedi próbálkozást lehet szemlélteni, én is megkíséreltem ilyesfélért a Soros Alapítvány közoktatási programjában, Jefferson-projekt címmel és egyet a rendszermélet kereteit választva. Sokan bizonyították, hogy lehet ilyen szintetikus tananyagot alkotni, ami részben vagy egészében sikeres, nem csak Simonyi Károly iskolája, vagy *Németh Lászlóé. Péter Rózsa* matematikai játékaiknak hány élvezője és követője van, hány hasonló műnek a fizikában. Sokszor a legnagyobb alkotó kutatók, mint *Feynman* állnak be néptanítónak, idézhetjük *Wittgenstein* életkísérletét is. Mára a tudományos ismeretterjesztő folyóiratok, könyvek, televíziós műsorok sikeranyagok lettek, méghozzá majdnem mind ilyen vagy olyan szintézisoktatási szándékkal és nézetvilágot alakító fogyasztói igényből táplálva.

Egyre több a szintézis a tudományban, a matematika–informatika–biológia–fizika–kémia–pszichológia–szociológia–gazdaságtan problematikája így fut egybe az információs társadalom kormányzásának feladatában, de ugyanígy állunk a globális környezet és az energetika valamennyi előbb felsorolt tudományágat megszólaltató döntéssorozatában, az életmód változásának és változtatásának dilemmáiban.

Van már sok nyoma ennek az új szintézisnek, a matematika sok új modellezési eszközt ad hozzá, a természettudományok egyre mélyebbre és távolabbra ható tényanyaggal, a társadalomtudományok egyre több, objektívebben feldolgozható és feldolgozott tapasztalati faktummal. *Minden nagy eszközforradalom, így a felvilágosodás tudományát megalapozó optika és a ma tudományát forradalmasító fizikára, matematikára és sok másra támaszkodó informatika új maximákat, azaz szintéziseket készít elő!*

A pedagógus ennek az elképzelt társadalomnak legfontosabb szereplője, akinek felkészültségét, emberi arculatát gazdaságnak, politikának és a társadalom minden szereplőjének támogatnia kell, megfelelő szabadságot és tanultságot biztosító életkörülményekkel, de az elkötelezettség fegyelmével is – írtam nem is olyan régen, valahol azoknak a döntéshozóknak, akiket kevésbé fog a pedagógia.

A szintézist terjesztők papi rendje a pedagógus. Szerintem ez a ma hivatása. Bizonyosan nincs általános megoldás.

dás, más és más a módszer a konszolidált európai szintén, más a kevésbé szerencsés csillagzatok alatt, más az európaiktól eltérő hagyományú nagy kultúrákban. Ezekből egyébként fontos tanulság, hogy az indiaiak, kínaiak és japánok úgy tudták a legmagasabb fokon magukévá tenni az európai kultúra eredményeit, hogy a magukét azokkal egyesítve képesek őrizni.

De más a módszer igénye egy országon belül is, a különböző szociológiai, kulturális környezetekben, más

volt Neumannék gazdag polgári (nem a mai értelemben, sőt annak ellentmondva!) házában, más a zsellérek és proletárok milliós leszármazottaiban, más az úgazdagok talmi magukmutogatásában, és más a *homeless*ek empátiával értendő világában.

Erről és minderről szól a ma valós feladata, ez már nem egy ember véleményétől és tapasztalatától függ, hanem igazi nemzeti, európai közösségi, emberiséget átfogó lecke. Maga a fűszisz!

## A FIZIKA ÉS A MŰSZAKI FEJLŐDÉS

Gyulai József

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

### Bevezető aggodalmak

Amikor a megtisztelő felkérést és a cikk tervezett címét megkaptam, a feladatot szinte megoldhatatlannak tartottam. Hogy miért? A műszaki haladás „alapanyagát” ugyanis mindaz a tudás, jelenségértelmezés, felfedett törvényszerűségek tára képezi, amelyeket az alaptudományok, így most kiemelten a fizika, valamint más tudományok, például a kémia vázol fel, vagy a fizika mérnöki tudományként önállósodott részei, mint például a mechanika, az aero-, illetve hidrodinamika, műszaki termodinamika, elektromosság tanra le. A feladat megoldására tehát csak egy „Simonyi Károly-i kvalitás” vállalkozhatnak.

Érthető, ha más irányt veszek. Például megmagyarázom, hogy nem tollbotlás volt, hogy a szigorúan vett alaptudományoknál „vázolás”-t írtam. Az alap kutatásban a megértéshez vezető út tévedésmentessége, egyértelműsége érdekében ugyanis a probléma egyszerűsítésének, lemezletlenítésének útját kell választani. Emiatt, ha a modell-szerűvé redukált problémát megoldották, a kutatók többnyire lezártak is érzik az ügyet (mai prioritásokra gondolva: aligha hoz már magas impact faktort vagy jelentős számban további hivatkozásokat...) – ritka és kivételes tehát, hogy alapkutatói szakmai iskolák felbővítsék az értelmezéseket arra a komplexitásra, részletességre, amely a gyakorlati alkalmazások megvalósításához viszont nélkülözhetetlen. A célzott alap kutatás, a *targeted research* teszi meg az első lépéseket ebben az irányban és viszi közel az iparhoz, hívja fel annak a figyelmét, hogy valami „használható” született. Ez a „munkamegosztás” alap- és alkalmazott kutatók, valamint a horogra került fejlesztők között: ez az ideális modell. A fordított a sorrend, amikor az értelmezés csak késve követi az alkalmazást, sajnos az is gyakori, de ott kibuknak a gondok – mondjuk – a környezeti, egészségi hatások környékén... Szeretném hinni, hogy a csúcstechnológia éppen ebben az értelemben talpára állítja a világot: értelmezésben az a csúcstechnológia, ami szimulációval is követhető, előre lejátszható, és tökéletesen kézben tartott folyamatokkal alkot.

A műszaki tudományok tehát az alaptudományok által felfedezett és leírt törvényeket úgy kezelik, alkalmazzák, mint „szerszámokat”, amelyekkel valami olyan alkotást le-

het létrehozni, ami eddig nem létezett. Emiatt azután szinte a teljes civilizációs világ nem egyéb, mint a (matematizált) fizika, kémia stb. műszaki alkotássá formálódásának példája, azaz a most megírandó cikknek valamennyi emberi termék, alkotás természetes tárgya lehetne.

Érthető tehát az elbátortalanodásom. Végül a konfliktusból azzal bújtam ki, hogy feltettem magamnak a kérdést: melyik az a fizikaalapú felfedezés (lehetőleg a Nobel-díjjal is jutalmazottak, vagy akár a szabadalommal védettek közül), amelyik közvetlenül, vagy a háttérben, de leginkább hozzájárult a 20. század arculatának kialakításához, illetve melyik vált kiemelten a mai életformánkat meghatározó tényezővé. Döntse el a tisztelt Olvasó, mekkora sikerrel tettem...

Elgondolkozhat az ember, hogy a legtöbb felfedezés valahol a természettől ellesett gondolatra, analógiára alapozódott. Alig van olyan, amelynek nincs, vagy amelynek a felfedezés idején nem lehetett természeti ötletadója. Sokan a kereket, a forgómozgást tartják ilyennek, bár arra a pusztai szél által hajtott kórok azért adhattak ötletet. A másik, szerintem a legjobb példa, az indukált optikai emisszió, illetve az arra alapozott lézer. Erre ugyanis legfeljebb logikai, netán formális általánosítás alapján gondolhatott *Einstein*.

Kezdtém tehát gondolatban sorra venni a 20. században tárgyasult felfedezéseket. Kiderült, hogy a komplex rendszerek önmaguktól is hátrább kerültek az ítéletemben. Például az óriási jelentőségű gépkocsi előre engedte a sorrendben magát az Otto-motort...

Itt, szívem szerint, cezúrát alkalmaznék, vagy a cikk végén egy „Megfejtések” részt iktatnék be – fejére állított betűkkel – megvárva a tisztelt Olvasó következtetéseit. Hiszen itt lehet véleményeltérés. Remélem azonban, hogy a cikket végigolvasva, meggyőző lesz mindaz, amire gondoltam.

Ne tekintsen aposztatának a tisztelt Olvasó, hogy a nagyszerű fizikai elveket, úgymint a relativitáselméletet vagy a kvantumfizikát, vagy a reméltem egységes térelméletet nem hoztam ki nyertesnek. Noha nyilvánvaló, hogy ezek a szellem legnagyobb fizika tárgyú alkotásai, amelyek beleszóltak már a század alakításába is, és abban én is hiszek, hogy a jelentőségük a 21.-ben ki fog teljesedni

(amelyre igyekszem példát is hozni), de eddig csak korlátozottan kaptak alapvető, életátformáló szerepet. A következő, műszakivá vált ötletként az előzőekben már a kiemelt fontosságú lézerek jutnak az ember eszébe, amelyek az életünket jelentősen és széles körben átformáló alkalmazásokhoz vezettek és – várhatóan – fognak továbbiakhoz vezetni.

## A megoldás

Van azonban egy eszköz, felfedezés, találmány, alkotás (minek is nevezzem?), amely nélkül sem a nagy elméleteknek, sem más ötletnek az íve nem alakulhatott volna olyaná, mint ami az ezredforduló világában élénk táru. Beleértve a kvantumkémia praktikus értéké válását is. Ami nélkül a lézerek sem fejlődhetek volna a mai gyakorlat szintjére, sőt az egyik, egyre fontosabbá váló fajtájuk, a félvezető lézer meg sem született volna.

Lassan közeledik – feltételezem – a tisztelt Olvasó a rákérdezéshez. Azt kell mondanom, hogy egy alapvető találmányt, eszközt várok válaszul, nem általánosan azt, hogy „Számítástechnika” vagy „Elektronika”, amelyről lesz önállóan is szó e célszámban...

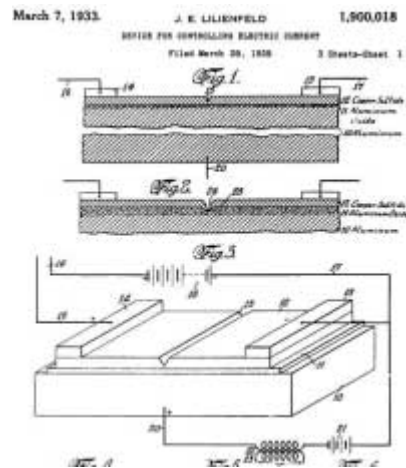
A magyar szomorú valóságban az általam várt válasz a számítástechnika Hamupipókéje, a félvezető eszköz, a dióda, de főleg a tranzisztor. Magyarul azért nevezem Hamupipókének, mert nálunk az oktatás–kutatás–ipar rendszerében ez a zseniális felfedezés elkerülte a köztudattá válásnak másutt természetes formáit. A középiskolába éppen csak hogy beverekedte magát – szinte akkorra, amikor a gyerekeink fizikát se nagyon tanulnak. A felsőoktatásból meg mára szinte kikopott...

A kései siratómhoz kérem a tisztelt Olvasó empátiáját.

Elismerem, hogy a tranzisztor nem *deus ex machina* robbant be a műszaki életbe, nem is annyira originális, mint a lézer vagy a maser. A tranzisztor őse ugyanis egy erős versenyző, a vezérelhető rádiócső. Ez vezetett el a gondolathoz, már a húszas években, hogy meg lehet-e mindazt, vagy hasonlót, amit ez a zseniális vákuumeszköz produkál, szilárd testekben is valósítani. A gondolat első szabadalma 1924-ből való: egy orosz kutató, *Lossow* jelentett be szabadalmat Németországban *Kristalle als Verstärker* címen. Az első, kifejezetten tranzisztor-analóg USA-szabadalom 1925–26-ból, *J.E. Lilienfeld*től<sup>1</sup> származik. Ő még rézszulfid vékonyrétegekkel működő eszközt, de már rádióvevő kapcsolási rajzát is tartalmazó bejelentést tett, amelyet 1928-ig két további szabadalma követett [1] (1. ábra).

*H.F. Mataré* 1944-ben szabadalmaztatta a tűs tranziszort Németországban, amely eredmény eltűnt a világkavarodásban. *H. Welker* azonban 1945-ben bejelentett egy német szabadalmat a térvezérelt tranzisztorra, kidolgozva annak egyenleteit is. Ők ketten, közösen jelentettek be szabadalmat 1954-ben – 1948-as franciaországi elsőbbségi igényvel [2].

<sup>1</sup> A Monarchiában honfitársunk Lembergben született 1882-ben, iskoláit már Németországban végezte, 1926-ban emigrált az USA-ba, és ott is halt meg 1963-ban.

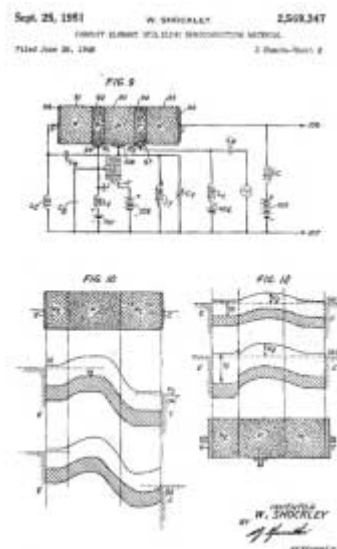


1. ábra. J.E. Lilienfeld szabadalma: Device for controlling electric current, US Patent 1,900,018, amely, akkor, rézszulfid félvezetővel működött

A tranzisztor gondolatnak tehát mindkét változata a „levegőben lógott”: mind az unipoláris, amelyet ma MOS-nak nevezünk, mind a bipoláris eszköz. Érthető, hogy az USA történelmi értékű laboratóriumában, a Bell Telephone Laboratoriesban (legyünk jóhiszeműek, a háborús nyertesek eufóriáját is megértve), mindentől függetlenül kezdtek a kérdéssel foglalkozni – bár *A. Glaser*nek 1932-ben megadott, 130102. számú osztrák szabadalmáról, amely két szembefordított kristálydiódával, amelyet egy vezérlőelektróda választ el, és így működik erősítőként – igazán tudhattak volna...

A Nobel-díjassá vált Bell-trió, *J. Bardeen*, *W.H. Brattain* és *W. Shockley* története is szokatlan. Nem csak abban, hogy két egymás utáni bejelentést tettek 1948-ban. Először Bardeen és Brattain a vezérelt, lényegében tűs eszközre, majd Shockley, a főnökük az ötvözött npn-tranzisztorra (2. ábra). Tudjuk, hogy ez utóbbi indította el a hódítást.

A trió, az akkori személyes ítéletemben (a párhuzamokról persze akkoriban nem volt tudomásom) azzal érte el a Nobel-díj normáit, hogy rájött a külső térrel vezérelt germánium-tranzisztor kudarcának okára is. Fizika 2. ábra. *W. Shockley* szabadalma az ötvözött tranzisztorra. A potenciál-eloszlás teljesen kidolgozott modelljével



volt az a javából, amikor rájöttek, hogy a levegőből pára-komponensek (hidroxilgyökök, ionok) adszorbeálódnak a germánium felületére, és mint dipólusok, a geometriai közelségük miatt teljesen leárnyékolják a mikrométer vastag távtartóval alkalmazott külső teret. Azaz, annak hatása elhanyagolhatóvá vált az úgynevezett tértöltési rétegben, ahol a vezérelt vezetési jelenségek zajla(ná)nak. Ezzel megalkották a „felületi állapotok” elméletét is. A rétegt tranzisztort (*junction*) azonban nemcsak megvalósították, de például Shockley első könyvében olyan részletes elméletet is közöl, amely ma is alapmű.

A rétegt tranzisztort nemcsak megindította az elektroncsövek kiszorulását, de emellett ébren tartotta a tudományt, az érdeklődést a külső térrel vezérelt eszköz megvalósítására is. Amíg *Bruce Deal* vezetésével, *Andy Grove* és mások kongeniális munkájával, az Intellé váló Fairchild kutatógárda megoldotta az oxidnövesztés technológiai higiéniáját, és esély lett az unipoláris tranzisztornak (MOS: *Metal-Oxide-Semiconductor* tranzisztort) a megvalósítására, valamint a hatvanas években.

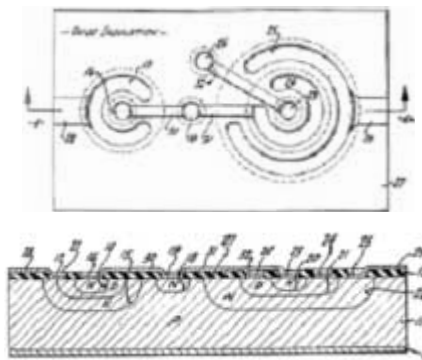
Ehhez azonban a szilícium „győzelmére” is szükség volt. A szilícium ugyanis istenáldotta anyag: a) kiváló kristály növeszthető belőle, ma akár 450 mm átmérőben, b) a saját termikus oxidja kiváló dielektrikum a MOS kapuelektrodájának távtartására. Ugyanez az oxid c) alkalmas arra is, hogy megakadályozza a nemkívánatos anyagok atomjainak bejutását a kristályba („maszkoló anyag”), de – a HF specifikus marószere lévén – a kristály felületén kialakított oxidábrák „ablakaiban” igenis bejuttathatók az adalékok, azaz a kívánatos atomok. Egy átok azonban sújtja: a sáv szerkezetének a sajátosságai miatt nem lehet hagyományosan világító diódát (LED), pláne lézert készíteni belőle. A vajt fülűek indirekt félvezetőnek nevezik ezeket.

### A mai varázslat, az integrált áramkör

A következő lépést az integrált áramkör ötlete adta (*J.S. Kilby*, 1959, és *R.N. Noyce*, 1961, [3] csak az előbbi érte meg a Nobel-díjat, 2000-ben). A 3-4. ábrán mutatjuk be a kezdeteket.

A következő meghatározó ötlet inkább üzleti, semmint fizikai volt. *G. Moore*-tól ered (ejtsd „mór”), aki szintén a „Fairchildból Intelt alapító” csapat tagja, annak kereske-

3. ábra. *J.S. Kilby* integrált áramköre



4. ábra. Az iparivá vált változat, *R.N. Noyce*

delmi igazgatója volt a hetvenes évek elején. Tőle kért a fiatal cég üzleti tervet. Moore megvizsgálta az első néhány év termelését, és észrevette, hogy az Intel képes volt minden évben kétszer annyi tranzisztort kialakítani egy-egy chipen, mint az azt megelőző évben. Arra következtetett, hogy ez a fejlődés még egy ideig, akár a hetvenes évek végéig tartható lesz. Nem gondolhatott arra, hogy a szakma generikus jellegét vette észre. Az üzleti verseny, az informatikai alkalmazások elvárásai ugyanis ilyen tempójú fejlődésre készítették a mikroelektronikát, amely fejlődés – noha a kettes faktor mára 1,8-re mérséklődött – évtizedes trenddé változott, és amely minden jel szerint még vagy tíz évig tartható. Jómagam olyan „nagyra” tartom a „Moore-törvényt”, hogy remélem, ha már végleg lezárul a mai logikájú, mai szervezésű integrált áramkörök korszaka, és valami más elv veszi át a helyét, lesznek mérnökök, akik elkészítik az akkori, nagyságrendekkel komplexebb eszközöknek a helyettesítési kapcsolását. Azaz, hogy hány billió-trillió tranzisztorkapuvall lehetne azt, az akár biológiai funkciót megvalósítani, amikor is – szorítok – kiderülhetne az, hogy a törvény tényleg generikus...

Hol kezdődött mindez az én emlékeimben? Természetesen a Caltech-es tartózkodásokkal teli életem évtizedében, ahol sikerült – *J.W. Mayer* csoportjában – egy felvetett kételyem nyomán és egymást váltó munkatársaimmal, elsősorban a tragikus sorsot élő *Csepregi László*val, valamint amerikai kollégákkal, elsősorban az NSF pénzügyi támogatásával egy az ipar által mindmáig általánosan használt implantációs eljárást, valójában egy szilárdtestfizikai „trükköt” felfedeznünk, amely nem jelentéktelen mértékben járult hozzá a Moore-jósolta fejlődéshez. A KFKI-ban is megkaptuk a támogatást, az eszközöket, hogy mindezt laborszinten itthon is megvalósítsuk.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> A KFKI-ba kerülésemtől, 1970-ben már itt találtam *Csepregi Lászlót*, míg az első, általam felvett fiatal *Keresztes Péter* volt, majd *Révész Péter*, *Hegedűs András*, *Kótai Endre* következett, illetve *Erős Magda* technikus említendő együtt azokkal, akiket az Egyesült Izzó előrelátása delegált: *Mobácsi Tibor*, *Schiller Róbertné*, *Gyimesi Jenő*. A később – még a KFKI-s időkben – *Lobner Tivadár*, *Drozdy Győző*, *Fried Miklós*, *Vályi Géza* lett tagja a csapatnak. Velük – és az implantációt működtető és sajátfejlesztésű implantert is építő *Pásztor Endre* részlegével – sok műszaki „elsőséget” valósítottunk meg. A témához annak kezdetekor csatlakozott fizikusokkal, *Keszthelyi Lajossal*, *Mezei Gáborral*, *Demeter Istvánnal*, *Varga Lajossal*, *Bagyinka Csabával*, *Manuaba Ashramával*, *Szőkefalvi-Nagy Zoltánnal*, majd *Pásztai Ferenc* és *Szilágyi Edit* révén – és a gyorsítót üzemeltető *Kostka Pállal*, *Klopfer Ervinnel* és csapatukkal pedig az ionsugaras analitikában tettük le a névjegyünket.

A miniatürizálási trendről egy kedves hazai emlékem maradt. Valamikor a hetvenes évek közepén érkezett haza az USA-ból *Zámori Zoltán*, KFKI-s barátom, egy ZX-80-as miniszámítógéppel, amelyet egy szemináriumon bemutatott. Ott fogalmazott úgy, talán az egyik első Semiconon szerzett tapasztalatai alapján, hogy amikor egyetlen bit információ kezelésének költsége egy ezred dollárcent alá süllyed, attól fogva minden aritmetikai műveletet érdemes digitálisan végezni. Nos, ez mára valahol a piko–femto-szinten van, és nincs megállás. Mára ugyanis már az iparág „brute force” dominanciája is érvényesül – hátrálatva akár izgalmas, például az analóg megoldások újbóli terjedését.

De beszéljünk a miniatürizálásról. A közhit – nem csekély joggal – a miniatürizálás fő hasznának a kis méretben azonos vagy nagyobb számítási kapacitást, vagy a kisebb fogyasztást, vagy a hordozhatóságot tartja. Van azonban egy ennél talán még fontosabb elem. Ez a méretcsökkenéssel együtt járóan, a megbízhatóság növekedése. A tranzisztorok öregedése, meghibásodása egyértelműen szilárdtestfizikai kérdés: a helyi melegek, nagy elektromos télerősségek képesek nemkívánatos – ma „nanofizikainak” mondanók – anyagtranszportot létrehozni. Ez vezet a katasztrofális meghibásodásokhoz. Egy jól méretezett chip belsejében azonban ilyenek csak a legkisebb valószínűséggel lépnek fel. Azaz, ha a chipbe maximális intelligenciát zsúfolunk, hogy az önállóan lássa el a feladatokat, és csak ritkán kérdezzen tőlünk, tévedésre hajlamos emberektől bármit, a megbízhatóság jelentősen megnövekszik.

A Moore-törvény „professzionizálását” az úgynevezett Roadmap-tanulmányok, teljes mai névvel: *International Technology Roadmap of Semiconductors* (<http://public.itrs.net>) valósították meg. A nyolcvanas években bízott meg először az USA félvezető ipara egy szakértő csoportot, hogy készítsen tanulmányt a szakma fejlődése fenntartásának követelményeiről. Ezek a nemzeti tanulmányok bővültek mára nemzetközivé. Négyévenként újra elemzik, kétévenként kiigazítják a tanulmányt. Sorra veszik valamennyi feladatot, azaz a tízegeynéhány kritikus műveletet, valamint a simulációt, a rendszerré szervezést érintő követelményeket, azoknak az előrelátható szakmai igényeit. A Természet – ritka eset – nagyon segíti a szakmát azzal, hogy érvényes a skálázási elv: ha egy tranzisztor bizonyos méretekkel működőképes, annak minden méretét arányosan lecsökkentve, ugyanolyan paraméterű tranzisztort kapunk. Itt kell megemlíteni, hogy mindez elsősorban a mára befutott, úgynevezett komplementer MOS, a CMOS technológiára<sup>3</sup> vonatkozik.

Egy-két mennyiség azonban nem skálázik, például a Joule-hő... ennek hatása van/lesz a végleteknél kritikus... A Roadmap-tanulmány – szellemesen – színekódolja a problémákat: fehér alapon szerepelnek azok, amelyek ma már ipari fejlesztés szintjén lényegében megol-

<sup>3</sup> A CMOS, egy invertert alkotó komplementer tranzisztorpár egy p- és egy n-csatornás elemből áll, azaz ezeknek a tértöltési rétegében, a „csatornában” az egyiknél lyukak, a másiknál elektronok közvetítik az áramot. Ennek az a fő előnye, hogy csak tranzienst áramok folynak és a logikai „0”, illetve az „1” állapot tartása nem emészt energiát.

1. táblázat

**Egymást követő (1999 és 2003) ITRS-ek összehasonlítása.  
A számok mutatják, hogy a fejlődés konzervatívva  
minősítette az előreléjzést.**

év	1999	2003	1999	2003
	félmodul (nm)		effektív oxidvastagság (nm)	
2001	150	130	1,6	1,4
2005	100	80	1–1,5	1,0
2007	80	65*	1	0,8
2010	55	45	0,8	0,6
2016	–	22	0,5	0,4

\* A dőlt betűk a „red brick wall”-ra utalnak. Vö. az oxidvastagságot a szilícium rácsállandójával, amely 0,5 nm!

dottak, zöld kóddal azok, amely követelmények teljesítése még komoly KF-munkát igényel. Vörös alapon szerepelnek a „red brick wall”-ként aposztrofált kérdések, amelyekre „No known solution” a jelző. Ez az olvasmányrész aranybánya az érdeklődő kutatóknak, akár az akadémiai szférában is (*1. táblázat*)...

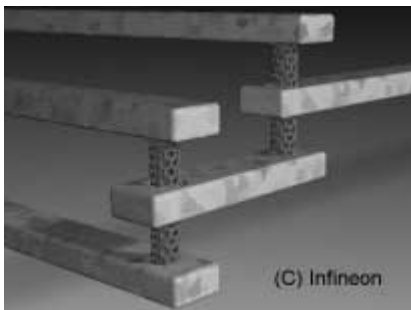
## A fizika csodái az integrált áramkörökben

Az eléggé közismert, hogy a fizikai nagyberendezések, gyorsítók vagy az űrkutatás is óriási műszaki fejlesztéseket kényszerít ki, de számomra az integrált áramkörök jelentik a csúcshizikát. Ezt néhány példával kívánom megvilágítani. Az egyik maga a szilícium alapanyag. A Moore-törvény egyik sajátja, hogy megszabja a gazdaságosságot is: a tehát a mintegy tizenötféle fizikai-kémiai műveletnek<sup>4</sup> vagy kétszázlépéses (!) egymásutánját úgy kell megszervezni, hogy a gyártósor átbocsátóképessége 1 szelet/perc legyen – függetlenül az egyre növekvő komplexitástól. Ez megköveteli az egyre nagyobb átmérőjű szeletek alkalmazását. Ma 300 mm (!) a standarddáváló, 450 mm a remélt. Ekkora, emberderék méretben kell tehát „diszlokációmentes” kristályt előállítani (számszerűen: egy-két diszlokáció tűrhető el a szűken 10 cm<sup>2</sup> chipfelületen)...

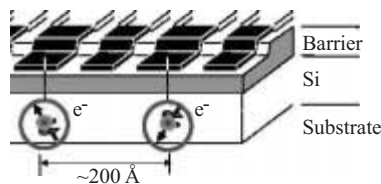
Hadd idézzek két számot, mielőtt a kritikus kapuelektroda kialakítására térnék rá: a Si-kristály rácsállandója 0,5 nm, továbbá az anyagok dielektromos letörése valahol 10<sup>10</sup> V/m télerősség körül következik be. Mindez azt jelenti, hogy a mára 300 mm átmérőjű, tehát közel egytized m<sup>2</sup> szeletfelületen hihetetlenül egyenletes vastagságban kell a szigetelőréteget létrehozni. A viszonylag „passzívált” szilíciumfelületen (ami azt jelenti, hogy a szabad

<sup>4</sup> A rétegépítő műveletekre példa a fizikai, illetve kémiai rétegleválasztás, ionimplantáció (amely az IC-iparban vált nélkülözhetetlenné: egy mai Intel processzorchip 23-szor jár az ionimplanterben – ebből három kritikus esetben alkalmazzák az említett Caltech–KFKI trükköt...), a rétegtávoltító műveletekre a kémiai marások mellett az egyébként szelektív és anizotróp plazmás marások a példa. Az egyes rétegek rajzolatait a rézkarcteknikából eredeztethető *litográfias eljárások* jelentik... A litográfia és az implantáció a két legtöbbször előforduló művelet, de talán a kapuelektrod dielektrikumának előállítása a legkritikusabb.





5. ábra. Az Infineon cég (Drezda), W. Höbner, fantomképe a szén nanocsöves áramkőről



6. ábra. D. Jamieson (Melbourne) sémája a CMOS-kompatibilis spintronikai eszközről (Kane-komputer)

kötések miatt az elektronok páronként „súlyzókat” – *dumbbell* – alakítanak) fel kell tépni a kötéseket, és szabályosan ma két Si-O-Si-O, holnap már talán csak egy réteget kell létrehozni. Tehát a szükséges – nem több és nem kevesebb – oxigénatomnak a teljes szeletfelületen egy időben rendelkezésre kell állnia. Azaz a redukált atomszférát úgy kell kialakítani, hogy a maradékgázok parciális nyomása a pikobarok tartományában legyen, és az oxigénatomok szabad úthossza elég nagy legyen ahhoz, hogy biztosítsa az egyenes transzportot. Utalhatnék itt arra, hogy milyen szimulációs programok képesek a reaktortervezést átlendíteni a véletlen próbálkozások (*trial and error*) stratégiáján. Még egy nem kevésbé kemény követelmény, hogy a dielektrikum ellenálljon a letörési feszültséget szinte megközelítő üzemi feszültségnek. A lehetőleg nagy feszültség azért követelmény, hogy a  $kT$ -től minél messzebb legyünk. Emellett, mivel a Si és az oxid határfelületén keletkezett hibák, atomi lépcsők mind „lógó kötéseket” (*dangling bond*) okoznak, amelyek elektronsapdáként viselkednek, a lépcsőhibák számára is korlát adódik: legfeljebb minden *ezredik* atom helyén tűrhető el egyetlen egyatomos lépcső.

Az ionimplantáció feladata sem sokkal egyszerűbb. Gondoljuk meg, hogy egy tranzisztor kapuelektrodája néhány tíz nm, amelybe egy-két bóratomot kell bejuttatni, hogy azok a töltésükkel beállítsák az üzemi feszültséget. A statisztika mindennél ellene dolgozik. Vagy, a Si kristályos jellege csatornázza a bórionokat, és reprodukálhatatlan mélységekbe jutnak. Mindmáig az 1975-beli Caltech–KFKI trükk segít leginkább, amikor is Si-ionokkal amorfizáljuk a felszín, és az adalékionokat ebbe a rétegbe implantáljuk, amelyet egy alacsony hőmérsékleten végzett epitaxiás visszánövesztéssel hozunk rendbe. Ezzel is gondok vannak, persze, valahol a 45 nm-es „csomópont”<sup>5</sup> táján, amikor egy-két (nem mindegy, hogy egy vagy kettő!) bóratom kell az üzemi feszültség beállításához, de jobb ötletéről még nem tudunk: az Intel most induló processzorgyártásában is még 23 ionimplantációs lépés szerepel.

Hasonlóan kitérhetnék az ábraméretetek követelményeinek kielégítésére, amelynél évtizedek óta jósolják, hogy a fotolitográfia nem lesz képes ennek eleget tenni. Nos, a félvezetőipar szorítása az optikát is csodákra kény-

szérette: hol van már a tanult szabály, hogy a hullámhossz közelébe eső méreteket nem lehet hibátlanul leképezni? Mert ma valahol az egyharmad lambdánál látszik gond, azaz a még a 193 nm-es excimer vonal is jó a 90 nm-es csomópontnál. A 157 nm-es vonal használata is lehetséges (65 nm csomópont) és csak ezt követően látszik az áttérés szükségessége a röntgen-, elektron-, vagy ionlitográfiára...

Hogy mi lesz 2015 táján, amikor már nem lehet hagyományos szerkezetű, kisebb tranzisztorokat előállítani – nincs ugyanis elég atom hozzá, hogy klasszicizálódjék a rendszer? A kvantumfizika ad már ma is ötletet a kvantumszámítógépek változataira, azaz belép az emberiség e nagy szellemi alkotása a műszaki világunkat direktben alakító erők közé – és az abból kiépült műszaki tudomány új szerepet kap. És ezek fognak megmérkőzni... a közgazdaságtannal. Mert ez lesz a döntő. Személyes jóslatom szerint csak olyan változatok lehetnek „nyerők”, amelyek a mai CMOS-technológia alapjaira épülnek. Egyébként a mai, gazdaságilag erős IC- és a ráépülő elektronikai ipar aláásná a haladást. Tudok két változatról, amelynek látok esélyét, mert mindkettő csak egyetlen, hozzáadandó technológiai lépést igényel. Az egyik a vertikálisan, *in situ* növesztett, félvezető tulajdonságú szén nanocsövekre épül (5. ábra), a másik a spintronika CMOS-kompatibilis változata, ahol <sup>28</sup>Si epitaxiás rétegbe implantálnak egy-egy, de a spinjeik tekintetében kölcsönható távolságban lévő foszforatomot (6. ábra).

Az igazi kvantumkomputer, ahol a szuperponált állapotoknak a parallel-processzorok tulajdonságait megvalósító rendszeréről van szó, csak ezután várható. Idő is kell ugyanis a gyártmánnyá válásig. Meghívtak 1986-ban (!) arra a diszkusszióra, amely a Cornell Submicron Facilityben elkészült, első 100 nm-es tranzisztorok közel nulla kihozatalának javítását célozta. Nézz meg a tisztelt Olvasó a *táblázaton*: a 100 nm-es eszköz ma lett tömegtermék! Azaz a húszas évek közéjük már itt kell(ene) lennie a laborokban! És nem sok, gyökeresen más van itt. Én a *nanowire*, nanocsőre, illetve a spintronikára foga-dok, de hát könnyű egy öregembernek, úgymint megússza a tetemrehívást...

## Kissé terjedelmes epilógus

Hogy azért szóljak más nagyszerű, a számítógépek által való paradigmaváltásoknak köszönhető eredményről is. Utcai Cato után szabadon egy, a római–pún kérdésnél nem kevésbé életbevágó „Egyébként...” kívánczik ide:

„*Ceterum censeo, artem omnium industrialium esse revisitandam.*”

<sup>5</sup> A csomópont (*node*) egy-egy, a tranzisztor félméretével jelzett miniaturizációs generációra vonatkozik, amelynél jelentős technológiaváltások is megszokottak.

## A mai anyagkutatás frontvonalai – anyagcsaládok és iparágak szerint

	infotechnológia	energetika	közlekedés	gépipar, építőipar	agro-, biotechnológia	gyógyászat
félvezetők	Si, SiGe, A, B <sub>5</sub> , szén nanocső	teljesítményelektronika, SiC		napelemek	organikus félvezetők	aktív implantok
szerkezeti kerámiák	átlátszó kerámiák	turbinák, csapágyak	motorok (1–2 l-es)	motorok, szerszám, kemény bevonatok, gépek		protézisek
funkcionális kerámiák	szenzorok, szupravezetők	tűzelőanyag-cella, magas hőmérsékletű szenzorok, akkumulátorok, szupravezetők?		szenzor, nanomegmunkálás	szenzorok, beavatkozók	idegstimulátorok
optikai, fotonikai anyagok	bullámvezető, chip, „photonic bandgap”	kisfogyasztású elektronika, LED, lézer (GaN), kisülésselámpa a világítás forradalma		monitorok	távírányítás	mesterséges érzékszervek
polimerek	low, high k, CD, memóriák, szigetelők	napelemek, szigetelők	járműipari igények szerint	hőálló és terhelhető polimerek (300– 500 km önhordóképeség!), „smart” aktív anyagok		biokompatibilis, terhelhető, „smart” aktív anyagok
	a világítás forradalma: OLED, PLED				membránok, önszerveződés	
fémkutatás	tiszta fémek, Cu, Au, W, Ta stb.), szupravezetés	könnyű fémötvözetek, kompozitok, „smart” aktív anyagok, acélok, fémhabok			korrózióálló ötvözetek	kompozitok, protéziselemek, „smart” aktív anyagok
nanoszerkezetű anyagok	mágneses anyagok egyel. tranz., kvantumkomputer	turbinák	fullerénszerűek, CN, BN, gyémánt		genom	protézisek, biokompatibilis fullerénszerűek, gyémánt
			teherbíró és korrózióálló szerkezeti anyagok, bevonatok			
többfunkciós mikromegmunkálás, MEMS + nano	adaptív optika	őnoptimalizáló anyagok	intelligens távolságtartók, fékek, ütközők, biztonság minden formában	intelligens szersz., intelligens házak	intelligens gépek, GPS-vezérlésű	intelligens implantok, „smart” aktív anyagok bekapcsolásával, mesterséges érzékszervek
	metaanyagok (negatív permeabilitás?); a szenzorok és beavatkozók (sensors and actuators) „forradalma”					

Buckminster Fuller<sup>6</sup> már 1969-ben értekezett a Földről, mint „Spaceship Earth”. Az *Operating Manual for Spaceship Earth* című munkájában azt írta, hogy „One outstandingly important fact regarding Spaceship Earth, and that is that no instruction book came with it...” Gondolkodjék el a tisztelt Olvasó erről a „spaceship”-ről, mit is jelent? A bolygónk termikus egyensúlyban lebeg a napsugarak fürdőjében – némi örökölt radioaktív bomlásterheléssel. Ez az egyensúly, évmilliárd óta – viszonylag kis fluktuációkkal – fennáll. Ennél mélyebb értelműen aligha lehet megfogalmazni a homo sapiens egyelőre egyetlen szállásterületének credóját és a kapcsolódó feladatokat. Módom volt személyesen megismerni a Római Klub egyik alapítóját, Albert Rose professzort, aki – még a hetvenes években – mesélte, analizálták ezt a ma még kékeszürke, azaz eszerint abszorbeáló és emissziójú „űrhajót” a Kirchhoff-féle sugárzási törvény alapján (üvegházhatás nélkül). Kimutatták, ha az emberiség – bármilyen, akár környezetk-

mélő fúziós folyamatokkal – felszabadítja a Napból érkező energiának mindössze öt tizedrét, már az egy fok átlaghőmérséklet-emelkedést okoz! Én hiszek ennek a számításnak, legalábbis nagyságrendi érvényében, amit az üvegházhatás csak tovább ront. A fejlett országok, a területükre vonatkoztatva, már jó ideje itt tartanak. Hozzájuk nőnek fel teljes joggal a fejlődő országok. Tehát nem elég olyan energiaforrásokban gondolkodni, amelyek alig bontják meg a termikus egyensúlyt (azaz a napenergiát *real time* hasznosítók, mint a növényi élet, de legalábbis megújulók), hanem el kell érni – erre mintegy száz év tartalékidőt becsülök –, hogy ugyanazt a terméket, emberi funkciót jelentősen csökkentett energiával hozzuk létre. Azaz, a fejlett emberiség legfőbb missziója, hogy „újralátogassa” valamennyi technológiáját, hogy energia- és anyagtakarékosabb változatokat dolgozzon ki, főleg pedig zárt termelési-fogyasztási ciklusokat hozzon létre – nem az üveg-visszaváltás szintjén. Nos, ez szabja meg a következő évtizedek műszaki kutatásainak fő irányát, és kell – bármilyen áttételesen – szolgálnia a fizikának, kémiának, biológiának – benne a nanotudományoknak.

<sup>6</sup> A szén gömbszerű formációját erről az építész Fullerről nevezték el „buckyball”-nak, vagy a „fullerén”-nek.

Tisztában vagyok azzal, hogy a fejlett világ számára a mi száznegyven évig való életünk nagyobb pénzmozgósító erő, de a tízmilliárd ember víziója nekem más lözöngöt, súlypontot sugall – igaz, lehet, hogy a kutatási tematika ugyanaz, vagy ahhoz közeli.

Ennek két egyszerű, bár inkább lélegzethez jutásnak tekintendő eredményről kell szólnom. Az 1980-as évek elején zárult sikerrel az az EUREKA-program, amely – kétszázmillió akkori ECU-ból – megépített egy „egyliteres gépkocsit”, azaz, amely 100 km/h sebességgel haladva, 100 km-en 1 l üzemanyagot fogyaszt. Az már társadalmi kérdés, hogy – mondjuk – a 2–3 l-es mikor válik szériakocsivá. Az ebben a projektben is szerepet kapott magas hőmérsékletet elviselő fémkerámiaik mást is lehetővé tettek: a 60%-nál jobb termikus hatásfokú gázturbinák, azaz a Carnot-hatásfokot jobban megközelítő ciklusú hőerőgépek kifejlesztését. Ezek biztosan adnak lélegzetvételnél is időt, hogy milyen legyen, illetve lehet a közlekedés, ha már tízmilliárdan leszünk... Ezek a találmányok az energiaigény-görbének a telítődésbe hajlását is szolgálják.

Itt kell megemlíteni a szakterületen kibontakozó két „forradalmat”: az érzékelők-beavatkozók forradalma az egyik, a világításé a másik.

Kezdjük a világítással. Nem igényel bizonyítást, hogy az emberiség pazarlóan világít. Sok ötlet ismeretes, de a fehéren világító diódából (LED) – mivel csak a láthatóan sugároz – 5 W elegendő egy gépkocsi reflektorába. Vagy az organikus félvezető LED (OLED) a következő csoda, amely sugárzó falfestékként is használható? Vagy a szinte hihetetlen, ismét csak az optika csodája, amely az izzólámpát különleges, wolframrudakból álló háromdimenziós fotonikus kristállyal<sup>7</sup> venné körül, és a hőszugárzás jelentős részét fényre konvertálva, jelentős hatásfokemlést érne el [4] – megmentve ezzel az izzólámpát?

Mit is értünk az érzékelők-beavatkozók szimbiozisán? Az érzékelők – mint aktív, funkcionális elemek, anyagok – hivatottak kielégíteni a számítástechnika és az adatforgalom adatéhségét, azaz megadni annak a joysticknak, vagy a

<sup>7</sup> A fotonikus kristályok (*photonic crystal*, vagy *photonic bandgap* anyagok) olyan háromdimenziós szabályosan lyukacsos/„átlátszó” (?) szerkezetek, amelyeken – a bennük létrejövő interferencia révén – bizonyos hullámhosszak nem képesek áthaladni. Az élővilágban az irizáló, gyöngyházfényű állatok színét rendszerint ez a hatás okozza.

virtuális valóságon túli értelmét: a tízmilliárd emberrel megrakott Föld életesélyét. Ma már az egész környezetünk kiokosítása a kutatási cél. A mindent mérni, szabályozni ma perspektivikus formájának *Ambience intelligence* nevet adtak. Ez arról szól, hogy minden tele van szórva intelligens, a gépeinkkel kommunikálni képes mérő-jelző, akár csak porszemnyi autonóm eszközökkel, amelyek egyike-másika (kon)föderatív módon be is avatkozik a világunk irányításába – az élő szervezet modellje szerint.

Szívesen leközlöm időnként azt a táblázatot, amely iparáganként és anyagcsaládonként mutatja be az élvonalbeli anyagkutatásokat (*2. táblázat*) – bemutatva, hogy vannak, lesznek eszközeink mindezen terv megvalósítására. Itt lenne az ideje, hogy rákerüljenek a táblázatra az anyagcsaládok sorai közé az élő vagy biomimetic anyagok...

Igaz, az a világ aligha lesz könnyen élhető, de legalább a humánus esély megmarad a homo sapiensnek. Köztudott, hogy 2050-re a fejlődő országok fajlagos energiafogyasztása eléri a mai OECD-szintet. Az *IEEE Spectrum* 2004. októberi száma írja a kínai fejlődésről, hogy ott ma is a szén a főszereplő... Jaj! Valami olyasmit kell, még komplexebbül megismételni, mint a korábbi olajválságok idején, illetve után. Valami fényt jelent az alagút végén, hogy a DOE szerint 1 dollár GDP megtermeléséhez szükséges energia az USA-ban évi 6%-kal csökken. Tehát megindultunk. A század végéig talán még van lehetőségünk...

És ha Magyarország ott akar lenni az élbolyban, akkor az ír modellnek csak a második felét szabad, kell lemásolnunk... Az első tizenöt évet, a gazdasági romlásához vezetőt, az EU-pénzeket elpocsékolót, semmiképp.

A régi viccel: „ДумаЙ, Сержа!”...

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom mind *Dr. Wolfgang Höhnlein*nek (Infineon), mind *Prof. Dave N. Jamieson*nak, tagtársamnak a Böhmsche Physical Society-ben (Melbourne-i Egyetem, Centre for Quantum Computer, Ausztrália), hogy készségesen hozzájárultak eredményeiknek felhasználásához.

## Hivatkozások

1. J.E. LILIENFELD – US Patent No. 1,745,175; 1,877,140; 1,900,018.
2. H. WELKER – Deutsches Patentamt, No. 980084.; *H.F. Mataréval* együtt *H. Welker* 1954-ben, de 1948-as franciaországi elsőbbségi igénnyel, az USA-ban is bejelentette a tús tranzisztort, illetve az azzal konstruálható erősítőt, US Patent No. 2,673,948.
3. J.S. KILBY – US Patent No.; R.N. NOYCE – US Patent 2,981,877
4. J.G. FLEMING, S.Y. LIN, I. EL-KADY, R. BISWAS, K.M. HO – Nature, 417 (2002) 52

# FIZIKA AZ ORVOSLÁSBAN

Köteles György

„Fodor József” Országos Közegészségügyi Központ  
Országos „Frédéric Joliot-Curie” Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézete

## Közös kezdetek

Physica–physicus–medicina: a gyökerek azonosak. Crômagnoni örökségünk a környezet megismerésének kényeszerű kívánsága – a fennmaradásért, „túlélésért”. Az *Oxford Dictionary*-ban a modern *physics*, *physical science* a termé-

zet erőinek és jelenségeinek megismerésével foglalkozik, amelyek nem élők. De a *physician* mint régi elnevezés az orvost jelenti a *physicist*tel, a fizikussal szemben.

Az ókori és középkori tudományoknak nem volt szorosan a mai értelemben vett jelentésük. Az akkori „grammatika” felölelte a stilsztikát és az irodalomtudományt, a „dia-

## Néhány adat a fizikai ismeretek felhasználásáról a korai orvosi tevékenységben

kb. 400 i.e.	<i>Hippokratész</i> az <i>ésszerű</i> (racionális) orvoslás iskoláját alapítja meg.
IX–XIII. sz.	A középkori arab orvostan ( <i>Averroes</i> , <i>Avicenna</i> , <i>Maimonides</i> ) összekötő láncszem az ókori és latin középkori kultúra között. Az araboknak igen pontos mérlegeik voltak, ingát használtak időmérésre, piknometerral határozták meg a fajsúlyt, gépeket és vízi motorokat építettek a homorú, domború, gömb alakú és hengeres tükrök hatását tanulmányozva, kibővítették a fénytánban a sugárviszaverődés tanát.
kb. 1267	<i>R. Bacon</i> leírja a kb. 1250-ben feltalált szemüveg használatát a távollátás javítására.
XVII. sz.	<i>A. Leewenhoek</i> mikroszkópot szerkesztett, s megfigyelt ázálékállatkákat, emberi ondszálakat. Magyarországon <i>Paterson Hain János</i> (XVII. század második felében) eperjesi városi orvos végzett először (1671) mikroszkópos vizsgálatokat bolhán, légyen, mikroszkópját ő maga szerkesztette.
1733	<i>S. Hales</i> a vérnyomás mérésére vonatkozó vizsgálatairól ír.
1761	<i>G. Auenbrugger</i> a mellkas kopogtatását írja le a tüdő állapotának akusztikus vizsgálatára.
1819	<i>R. Laennec</i> feltalálja a sztetoszkópot a mellkasban képződő hangok észlelésére.
1847	<i>Semmelweis Ignác</i> epidemiológiai, egészségügyi statisztikai módszert alkalmaz a gyermekágyi láz okának feltárására.
1851	<i>H. van Helmboltz</i> feltalálja az első eredményes oftalmoszkópot a szem vizsgálatára.
1861	<i>C. Wunderlich</i> megállapítja a normális testhőmérsékletet.
1866	<i>Tb. Allbutt</i> feltalálja a klinikai hőmérőt.
1881	<i>S.S. von Basch</i> leírja a szfigmomanométert, az első olyan műszert, amellyel vérnyomást lehet mérni a bőr sérülése nélkül.

lektika” a logikát, a „retorika” a jogtudományt, a „geometria” a földrajzot, természetrajzot és az orvostudományt is.

Valamivel később használatos lett a *physica* elnevezés is: ezzel illették a *quadrivium*ba tartozó valamennyi tudományt (az aritmetikát, geometriát, asztronómiát, zenét) és velük együtt természetesen az orvostudományt is. És amint egy ideig a geometer névbe belefoglalták az orvosokat, úgy valamivel később a *physicus* nevet adták nekik, nyilvánvalóan szintén azért, mert éppúgy, mint a geometriában, úgy a „physicá”-ban (ti. a természetről szóló tudományban) is mindig túlsúlyban volt az orvostudomány, anyagának tömegénél, a vele való foglalkozók tekintélyénél, valamint gyakorlati értékénél fogva.

*Pápai Páriz Ferenc* nagy szótárában a „physica” a természetről írt könyveket jelenti, a „physicus” a természet vizsgáló; a régi magyarországi szóhasználatban is a *physicus* orvost jelentett. A lényeg tehát a „physis”, a természet, az élettelen és az élővilág, beleértve az ember tanulmányozását, megismerését. S ez a két út párhuzamosan futott, egymásra is hatottak és ma is hatnak.

A beteg ember nyomorult, szenved, az orvos feladata, hogy segítsen. Így az orvosi tudomány mindig kora ismereteire alapozva igyekezett új és új kórismérési módszereket (diagnosztika) és gyógyító eljárásokat (terápia) alkalmazni. Így volt ez a civilizáció előtti kultúrákban, a varázsló, a tál-tos, a sámán, a jvasasszony idejében éppúgy, mint az érzékelhető világról szóló tudás (fizika) kialakulása során.

Amikor tehát a fizika hozzájárulását kívánjuk vázolni az orvostudományhoz, akkor a fizika történetében a mindenkori felismerések alkalmazását vehetjük leltárba. A leltár természetesen koronként változik, bővül.

A fizika mint természettudomány (*natural science*-nek is hívták) bővülése során néhány fontos elv tudatosodott a mindenkori orvosokban is, nevezetesen

– a természet egészséges és kóros jelenségeinek *megfigyelésére kell alapozni* tevékenységüket,

– igyekezni kell az egészséges és a kóros közötti különbségeket *kvantifikálni*, azaz *mérni kell*, például a testsúlyt, hőmérsékletet, pulzust, majd a vérnyomást, látásélességet s így tovább egészen a szervek működése elektronikus ellenőrzéséig, a szervezetbe való beelátásig, a képpalkotó eljárásokig.

– Mindehhez eszközöket, műszereket kell fejleszteni.

– A fizikai jelenségek feltárása mint az anyag és energia megismerésének forrása számos biológiai–orvosi ismeret, tünet, folyamat értelmezését segíti.

Ma már arra a kérdésre, hogy mit adott a fizika az orvostudománynak, jelen kereteink között csak igen nagy ívű vázlatot lehet adni. Néhány példa a kultúrtörténetből, művelődéstörténetből rávilágít az egyes korok vonatkozásában a fizikatudomány alkalmazásaira.

Az 1. táblázatban néhány régi példa azt jelzi, hogy a fizika ma is ismert fő területeinek alkalmazásai – optika, hangtan, mechanika – korán szerepet kaptak az orvoslásban. De később is látjuk – például a sugárzások fizikája, az atomfizika megszületése után –, hogy a mindenkori fizikai ismeretek behatoltak az orvosi tevékenységbe. A fizika és az orvostudomány történetének tanulmányozása régen is, ma is az egyik legizgalmasabb kultúrtörténeti kalandozás.

1. ábra. Szemüveg 1375-ből [18]



## A modern fizikai felfedezések: az orvostudomány mérföldkövei

1895. november 8.	<i>Wilhelm Conrad Röntgen</i> würzburgi fizikaprofesszor felfedezi az X-sugarakat. „A XIX. század végén a fizikusok különös érdeklődéssel tanulmányozták az elektromos kisüléseket ritkított gázokban. A katódsugarakat a légritkított kisülési csőből először hazánkfiának, <i>Lénárd Fülöp</i> nek sikerült a szabad levegőre kihoznia. A kisülési cső üvegfalát <i>Lénárd</i> a megfelelő helyen átfúrta, és a nyílást olyan vékony alumíniumlemezzel fedte be, amelyen a nagy sebességű elektronok át tudtak hatolni. Röntgennek szokása volt mások kísérleteit, amelyek érdemes felfedezésre vezettek, megismételni. Ezért olyan kisülési csövet készített, amelyet <i>Lénárd</i> használt, sőt ilyet <i>Lénárd</i> -tól is kapott. 1895. november 8-án este, sötét laboratóriumában, kísérletezés közben észrevette, hogy a fekete kartonba burkolt kisülési cső közelében lévő bárium-platincianür ( $BaPt(CN)_6$ ) ernyő, valahányszor bekapcsolta kisülési csövet, zöldes fényben kezdett el fluoreszkálni. Ekkor a cső és ernyő közé deszkát, majd könyvet helyezett. Meglepetésére a zöldes fény csak gyengült, de nem szűnt meg, amint ez katódsugárzás esetében várható lett volna. Kezét helyezve az ernyő elé, megpillantotta kézcsontjainak „árnyékképét.” [4] Röntgen 1901-ben az első fizikai Nobel-díjas lett.
1896. január	Már 1896-ban, Röntgen első nyilvános előadása előtt <i>Klupathy Jenő</i> budapesti tudományegyetemi tanár és <i>Eötvös Loránd</i> jó röntgenfelvételt készítettek Eötvös kezéről. 1896 elején <i>Kiss Károly</i> egyetemi tanár a Műegyetemen állított fel egy röntgenkészüléket, majd tanműhelyét fokozatosan röntgenlaboratóriummá fejlesztette tovább.
1896. január 19.	<i>Hógyes Endre</i> az <i>Orvosi Hetülap – A hazai és külföldi gyógyászat és Kórbúvárlás Közönyében</i> felveti a sugarak biológiai hatékonyságának és orvosi terápiás hasznosításának lehetőségét: „Nem lehetetlen, hogy ezen új sugaraknak, melyeknek mechanikai tekintetben oly hatalmas szövet penetráló hatásuk van, a mellett kétségen kívül kémiai tekintetben is batnak, therapeutikai tekintetben is szerepük fog lenni a medikában.”
1896	<i>Wartba Vince</i> első közlése az X-sugarakról a <i>Természettudományi Közönyben</i> .
1896. március 1.	<i>Henry Becquerel</i> uránt tartalmazó ércben felfedezi a természetes radioaktivitást.
1898. december 26.	<i>Pierre Curie</i> és <i>Marie Sklodowska-Curie</i> a francia akadémián bejelentik a rádium és polónium felfedezését.
1901.	<i>W. Einthoven</i> kifejleszti az első megbízható elektrokardiográfot a szív elektromos aktivitásának jelzésére.
1902.	<i>A.G. Bell</i> először helyezett tokba rádiumot, hogy azt közvetlenül a testben helyezze el. Rádiumsókat vagy radongázt tűkbe, szemcsékbe vagy gyöngyökbe zárva 1905 óta alkalmaznak közelterápia céljára.
1904	<i>P. Curie</i> 1904-ben maga is megfigyelte, hogy a rosszindulatú daganatokat gyorsabban pusztítja a sugárzás, mint az egészséges szöveteket, ha azokat rádium sugárzásának teszik ki.
1903	<i>Hevesy György F. Paneth</i> -tel felfedezi a radioaktív nyomjelzéses technika lehetőségét, 1934-ben a nyomjelzéses technika „in vivo” módját.
1928	A II. Nemzetközi Radiológiai Kongresszus Stockholmban létrehozta az első nemzetközi sugárvédelmi szervezetet <i>International Committee on X-ray and Radium Protection</i> néven, melyet 1950 óta neveznek <i>International Commission on Radiological Protection – ICRP</i> -nek, Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottságnak.
1934	<i>F. Joliot-Curie</i> és <i>Irene Curie</i> felfedezi a mesterséges radioaktivitást.
1936	Budapesten megnyílik az Eötvös Loránd Rádium és Röntgen Intézet. 1937 óta az intézmény sugárfizikusa <i>Bozóky László</i> volt, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Sugárvédelmi Szakcsoportjának alapítója és tiszteletbeli elnöke.
1944	<i>W. Kolff</i> kifejleszti az első vesedializáló készüléket.
1959	<i>I. Donald</i> ultrahangot használ a magzat vizsgálatára.
1960	<i>W. Greatbatch</i> szabadalmat jelent be a szív működést szabályozó pacemakerre.
1962	Először alkalmaznak lézeres szemsebészetet.
1972	<i>G.N. Hounsfield</i> kifejleszti a számítógépes rétegfelvételezés technikáját. Ezt hamarosan követi a mágnesesrezonancia-képzés és pozitronemissziós rétegfelvételezés.
1976	Az illetékes nemzetközi szervezetek, az ICRP (ICRP 26, 1977) és az ICRU (ICRU 33, 1980) kezdeményezésére egyes dozimetriai egységek elnevezésére bevezetik a gray és a sievert elnevezéseket. <i>L.H. Gray</i> , angol sugárbiológus jelentős kutatásokat folytatott a sugárterápia tudományos megalapozása, az oxigénhatás, a sugárzások dozimetriája területén. <i>R.M. Sievert</i> , svéd sugárfizikus és sugárvédelmi szakember jelentős munkát folytatott a sugárterápia dozimetriájában és mérés technikájában.

## A nagy áttörések: modern mérföldkövek

A fizikai módszerek robbanásszerű bevonulása az orvoslásba az 1895–1896-os évek néhány hónapján belül tett két óriási felfedezést követően történt, nevezetesen *Röntgen* felfedezése az X-sugárzásról, másrészt *Becquerel* felfedezése a természetes radioaktivitásról. Érdekes meg-

jegyezni, hogy a nagy fizikusok, például Röntgen és *Curie*-ék, felfedezéseiket követően elsőként arra gondoltak, hogy az új felismerések, az azokból származó technológiák az emberiség javára válnak a betegségek felismerésében és gyógyításában. A fizikai diadalmenet néhány állomását a 2. táblázat mutatja be.

Az orvosi műszerek fejlesztésében a fizikai és mérnöki ismereteknek egyedülálló szerepe van. A szó legszoro-



2. ábra. Röntgensövek, amelyekkel Röntgen dolgozott [14]

sabb értelmében is a *leglátványosabb* a képalkotó eljárások rohamos fejlődése, és ma már mondható, sokfélesége. Az eljárások alkalmazásával bele lehet látni a szervek morfológiai szerkezetébe, sőt ma már működésébe is, elkülönítve ezáltal az egészséges, normál állapotokat a kórosaktól. A képalkotó módszerek fejlődését a berendezések technikai színvonalának fejlődése és a számítástechnikai módszerekkel való kombinálása biztosította. Az eljárások alapelve változó, így a nagy áttöréseknek jelzett felfedezések, a röntgensugárzás és a mesterséges radio-



3. ábra. Emléktábla az Eötvös Loránd Rádium és Röntgen Intézet (később Bakáts-téri Kórház) falán [12]

izotópok felfedezése és előállítása hozta az első sikereket. Ezt követték a korszerű ultrahangvizsgálati módszerek, a mágnesesrezonancia-vizsgálati eljárások, mindezek kombinálása endoszkópos vizsgálatokkal önmagukban is és egymást kiegészítve, az orvostudomány nélkülözhetetlen eszközei. A 3. táblázat néhány fontosabb eljárás lexicuszerű rövid felsorolását adja.

Az „atomkori fizika” már eddig elért eredményei, az orvosi izotópdiaosztika és terápia, ciklotrontermékek előállítása alkalmazásával, képalkotó eljárások arzenáljával, vagy a gamma-, illetve neutronsugárzással végzett sebészi beavatkozások, nyilvánvalóan mutatják, hogy mit adott a fizika az orvoslásnak, mondhatjuk az „atomkori orvoslásnak”. S nincs okunk feltételezni, hogy az eljárá-

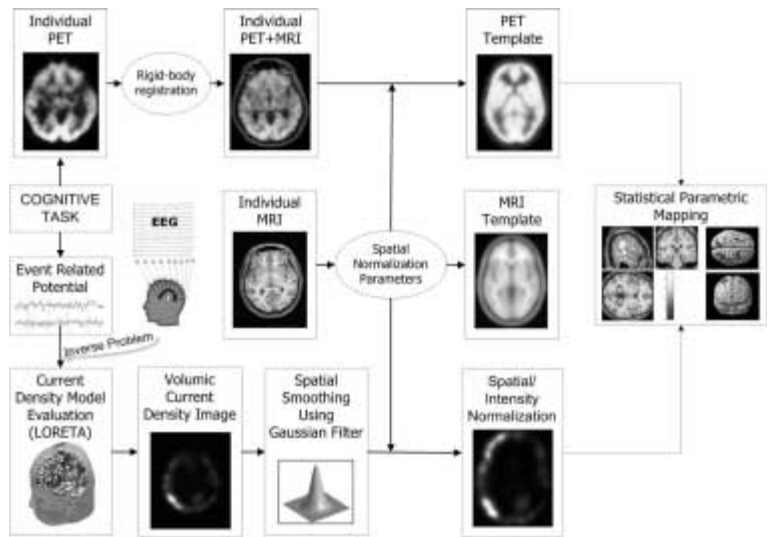
3. táblázat

**A fizikai felismerésekre alapozott egyes korszerű orvosi eljárások**

Elektrokardiográfia (EKG)	A szív elektromos aktivitását jelzi, kimutatja például a ritmuszavarokat, és jelzi a szívizom károsodását.
Elektroencefalográfia (EEG)	Az agy elektromos aktivitását jelzi. Számos agyi keringési és egyéb szervi betegségben, az agyhalál kimutatásának fő eszköze.
Endoszkópia	A test belsejébe bocsátott eszközzel, amely két száloptikapályán részben fényt enged a belső terekbe, másrészt visszahozza a látványt a vizsgálóhoz. Használata során gyógyszerek célba juttatásához, elszíváshoz, öblítéshez, kis műszerekkel diagnosztikai minták vételére vagy terápia-céllal is alkalmazzák (biopszia).
Egyfotonemissziós számítógépes rétegfelvételezés ( <i>single photon emission computer tomography</i> , SPECT)	Nagyméretű szcintillációs kristályos gamma-kamerával megfigyelt felvillanások keltése radioizotópok alkalmazásával láthatóvá teszi a véráramlást a kiserekben, leképezi az agyat, olyan betegségeket diagnosztizál, mint például az agyvérzés, epilepszia, schizofrénia, Parkinson-kór.
Termográfia	Infravörös sugárzást mér és mutat ki a szervezet egyes részeinek hőterképezésével, kóros felmelegedés, vagy éppen lehűlés esetén (pl. gyulladások, ill. elhalások).
Ultrahangvizsgálat, szonográfia	Rendszerint 1 MHz tartományban bocsát ultrahang-frekvenciájú hanghullámokat a testbe. A visszhangot számítógépes képalkotó formálja. Jól alkalmazhatók a terheségi vizsgálatoknál, kiváltotta a röntgenvizsgálatokat, de számos szerv helyzete, mérete, vagy daganata észlelhető általa.
Röntgenvizsgálat	A legrégebbi és legszélesebb körben használt képalkotó eljárás. Számos alkalmazási területei közül az orvosi alkalmazáson belül a számítógépes rétegfelvételezés (Computer tomography) rohamosan terjed, nélkülözhetetlen eljárás. Érdekes megemlíteni, hogy a korszerűség nem jelentett sugárterhelés-csökkenést a beteg számára, hiszen egy-egy vizsgálatnál 10–100 mGy is érheti a beteget.
Orvosi izotópdiaosztika – nukleáris medicina	A megfelelő gamma-sugárzó radioizotópok ( $^{99m}\text{Tc}$ , $^{131}\text{I}$ , radiojóddal jelzett vegyületek, $^{201}\text{Tl}$ , $^{67}\text{Ga}$ ) szervezetbe juttatásával számos szerv vagy éppen daganat helye, nagysága tehető láthatóvá gamma-kamerával.
Pozitronemissziós tomográfia (PET)	Ciklotronnal rövid felezési idejű izotópokat gyártanak, és így válik lehetővé olyan radiofarmakonok (radioaktív izotópokkal jelzett vegyületek) előállítása, például a glukóz, amely daganatok elhelyezkedését jelzi azok fokozott cukorfelvétele révén PET-kamerák segítségével.
Radioizotópos terápia	Radioizotópok bejuttatása a daganathoz és ezáltal közvetlen besugárzása.

sok nem fognak finomodni, érzékenyebbé válni, de azt is érzékelnünk kell, hogy minden új fizikai felfedezés megtalálja útját az orvosi gyakorlathoz. Ezt a tehetséges fizikusok, orvosok, mérnökök segítik, biztosítják.

Az ionizáló sugárzások biztonságos alkalmazásához megfelelő sugárvédelmi ismeretek, szerveződés és szabályok szükségeltetnek. Elsősorban azonban olyan mérőműszerek, amelyek a sugárzás jellegétől függően megfelelően mérik a dózisteljesítményt, szennyezettséget, az ember munkahelyi és környezeti viszonyai között. Magyarországi viszonylatban a sugárvédelem mindig is igyekezett a legkorszerűbb szinten működni, s megfelelni az iparilag fejlett országokban kialakult szintnek.



4. ábra. PET+MRI+EEG komplex vizsgálat

## Fizika a biológiában, orvosi kutatásban

Amikor orvoslásról van szó, bele kell érteni az arra való felkészülést. A fizika szerepének néhány példán való felvillantása egyértelművé teszi, hogy ezt az orvostanhallgatóknak és orvosoknak folyamatosan tanulniuk, alkalmazniuk kell. Egyrészt számos életjelenség fizikai értelmezésében, kutatásában, másrészt mérésében. Az orvosi biofizika mint tudományág és mint tantárgy ezeket a célokat szolgálja. A magyar érdeklődő közönség különösen előnyös helyzetben van, mert igen jó biofizikai könyvek állnak rendelkezésére, mint például *Rontó Györgyi és Tarján Imre A biofizika alapjai* című (tan)könyve, amely immár 10 kiadást ért el. Bemutatásképpen csak néhány a gondolatkör jellemzésére:

- az anyagszerkezet,
- fény- és röntgensugárzás,
- mikroszkópos és szubmikroszkópos módszerek a biológiai struktúrák vizsgálatában,
- orvosi elektronika,
- az ingerületi folyamatok biofizikája,
- a biokibernetika alapjai.

## Sejtések a jövőről

Számos közlemény és futurológiai vízió sejteti, hogy a fizika tudományának fejlődése folytatódik az anyag és energia mélyebb részleteinek megismerésében. Ugyanakkor az is nyilvánvaló, hogy az eddigi kultúrtörténeti tapasztalatok – például éppen az orvoslás segítségével – a fizikusokat arra fogja ösztönözni, hogy fokozottan törődjenek a fizikai ismeretek alkalmazásával, az alkalmazott kutatással. A biológiában és orvostudományban nagy kihívás a sejtek, komplex molekulaszervezetek, gének struktúrájának és mikrokörnyezetének vizsgálata nagy térbeli (1–10 nanométer) és időbeli (1–1000 mikroszekundum) felbontással. A mikroelektronika, a számítógép-technológia, a szuperkonduktivitás kutatásának fejlesztése egyre több információt fog szolgáltatni az egészséges és a károsodott élő sejt anyagcseréjéről, állapotáról, alkalmazkodó képességéről. Mindazonáltal, nemcsak a mikrotartomány-

ban távol szemléletünk a végtelen irányába, hanem a makrovilágban is: a fizikának segítenie kell, hozzá kell járulnia az ember és a világ holisztikus szemléletének kialakításához, a „bio–psziho–szociális” összefüggések megértéséhez. Ezzel remélhetjük, hogy a fizika a tudomány mindenkor állása szerint továbbra is nagy támasza lesz az emberi tevékenységnek, ezen belül az orvoslásnak is.

## Irodalom:

1. BERÉNYI D.: *Atomkorban élünk* – Akadémia Kiadó, Budapest, 1977
2. BÍRÓ T., BOZÓKY L.: *A radioaktív izotópok hazai hasznosításának három évtizede* – Fizikai Szemle 36 (1986) 241–245
4. BISZTRAY-BALKU S., BOZÓKY L., KOBLINGER L.: *A sugárvédelem fejlődése Magyarországon* – Akadémia Kiadó, Budapest, 1982
5. *Fejezetek a magyar fizika elmúlt 100 esztendejéből* – szerk. Kovács L. – Eötvös Loránd Fizikai Társulat, Budapest, 1992
6. FÖLDES I.: *Nukleáris medicina az új évezred kezdetén* – Fizikai Szemle 51 (2001) 175–178
7. A.S. HORNLEY: *Oxford Advanced Learners's Dictionary* – Oxford Univ. Press, 2000
8. HÖGYES E.: *Csontváz-photographálás testen keresztül Röntgen szerint* – Orvosi Hetilap 40 (1896) 33–35
9. KLUPATHY J.: *Röntgen-sugarakról* – Matematika–fizikai Lapok 5 (1965) 4–11
10. KÖTELES GY.: *1895: Kezdődik a XX. század. Feljegyzések a Röntgen-centenáriumhoz* – Egészségtudomány 39 (1995) 1–7
11. KÖTELES GY., JÁNOKI GY., FÖLDES I.: *Nyomjelzéstechika és izotópal-kalmazás az orvostudományban* – Fizikai Szemle 51 (2001) 173–175
12. KÖTELES GY.: *Sugáregészségtan* – Medicina Kiadó, Budapest, 2002
13. KÖTELES GY.: *Sugárvédelem az orvosi izotópal-kalmazás során* – in *A nukleáris medicina tankönyve*, szerk. Szilvási István, B+V Kiadó, Budapest, 2003
14. W. PANOFKY: *Deutsches Museum München* – Peter-Winkler-Verlag, München, 1984
15. PÁPAI PÁRIZ F.: *Dictionarium* – Cibinity (Szeben), 1767
16. RONTÓ GY., TARJÁN I.: *A biofizika alapjai* – Semmelweis Kiadó, Budapest, 2002
17. SÓS J.: *Rektori megnyitó beszéd* – A Budapesti Orvostudományi Egyetem Radiológiai Tanszékének emlékkönyve, Budapest (1965)
18. SZUMOWSKI U.: *Az orvostudomány története* – Magy. Orvosi Könyvkiadó Társulat, Budapest, 1939
19. TARJÁN I.: *Fejlődésünk néhány mozzanata* – Izotóptechnika 22 (1979) 281–286
20. TRÓN L.: *Pozitronemissziós tomográfia* – Fizikai Szemle 51 (2001) 178–182
21. WARTHA V.: *A Röntgen-féle újfajta fotográfiákról* – Természettud. Közl. 1896/317 (1896) 53–54

# AZ ENERGIÁKÉRDÉS MA – A FIZIKUS SZEMÉVEL

Berényi Dénes  
MTA ATOMKI, Debrecen

## Az energiáról általában

Az energia fogalma nemhogy a fizikusok, de már az általános iskolások számára is jól ismert. Egyszerű megfogalmazásban azt mondjuk, hogy az energia munkavégző képesség, pontosabban pedig az energia a fizikában munka jellegű mennyiség. Munkáról pedig akkor beszélünk, ha az erő egy bizonyos úton hat egy tárgyra. Egy tárgynak akkor van energiája, ha munkát tud végezni. Az is jól ismeretes, hogy az energiára (pontosabb megfogalmazás szerint: az anyagra és az energiára együttesen) megmaradási törvény érvényes.

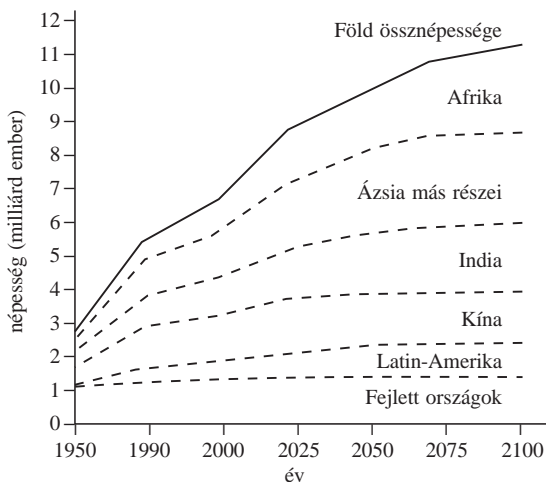
Mindezt azért kellett felidézni, hogy ebbe a képbe illesszük be az olyan mindennap használatos kifejezéseket, mint energiatermelés, energiaveszteség, energiatakarékosság stb. Kérdezhetné ugyanis valaki például, hogy veszhet el az energia, amikor az energiamegmaradás törvénye érvényes. Hasonlóan talán meg lehetne lepődni azon is, hogy hogyan is termelhetjük az energiát és hogyan takarékoskodhatunk vele.

Ezek a „rejtélyek” mindjárt megoldódnak, ha a fenti kifejezésekben nem általános értelemben használjuk az energia fogalmát, hanem úgy értjük, hogy a *számunkra hasznos munkát végző* energiáról van szó.

## Az „energiakérdés”

Mindenekelőtt hangsúlyoznunk kell, hogy amikor az energiáról, pontosabban az energiakérdésről beszélünk, akkor mai civilizációnk egyik központi problémájáról van szó. Gondoljuk csak meg, ha nem állna rendelkezésre energia, egész mai, mindennapi életünk, civilizációnk leállna. Nem lenne közlekedés, nem lenne hírközlés, nem lenne világitás, nem termelnének a gyárak, nem működne otthoni háztartásunk.

1. ábra. A népesség számának változása a Földön 1950 és 2100 között [1]



De mit is értünk tulajdonképpen az energiakérdésen. Röviden megfogalmazva: *növekvő népesség* (az előrejelzések szerint 2050-re a Föld lakossága 10 milliárd körül alakul) és *igény, valamint fogyó konvencionális energiaforrások mellett környezetkímélően és minimális kockázattal látni el energiával a társadalmat*.

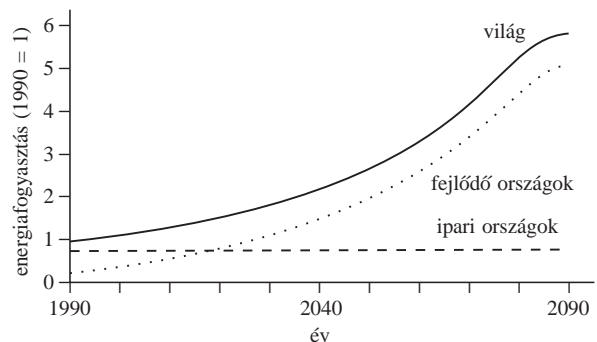
A növekvő népességet az idő függvényében az 1. ábra mutatja, az energiafogyasztás alakulását pedig a 2. ábra. Láthatjuk, hogy a növekedés elsősorban a fejlődő országok régióiban jelentkezik, amely viszont a Föld népességének 3/4-ét – 4/5-ét jelenti. Ugyanakkor az energiafogyasztás a fejlett országokban már alig nő (de azért ott is nő kis mértékben), de az igazi növekedés a fejlődő országokban következik be, hiszen természetesen nekik is megvan az igényük arra, hogy hasonló életszínvonalon éljenek, mint a mai fejlett országokban. Hogy ez mennyi problémát jelent, és hogy valójában a fejlett országok igényeinek csökkentésére volna szükség a Föld és az emberiség jövője érdekében, arra most itt nem tudunk kitérni, az egy másik külön tanulmányt igényelne.

Visszatérve viszont az energiakérdésre, a lényeg megfogalmazásán túlmenően egy egész sor részletprobléma vár ezen belül megoldásra. Így – a teljesség igénye nélkül – az energiatermelés kérdései: az energiaforrások megválasztása, a termelés optimalizálása stb., továbbá a veszteségmentes vagy kisveszteségű energiaátvitel megvalósítása, az energiaelosztás változatai, az energia tárolásának problematikája, az energiaátalakítás módjai, az energiatakarékosság különböző formái stb.

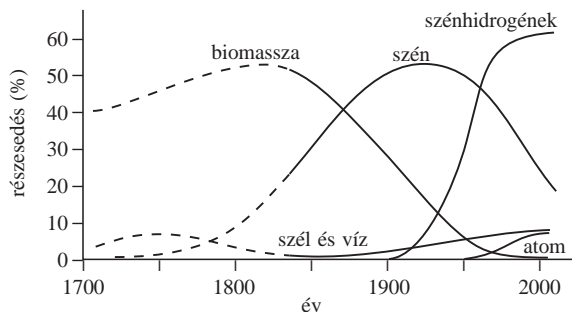
Ez a rövid felsorolás is mutatja, ha belegondol az ember, hogy mindezek mögött a kérdések mögött hatalmas kutatási feladatok vannak, amelyek nélkül ezek a problémák nem oldhatók meg.

Mindenesetre azt is hangsúlyozni kell, hogy a megoldásokhoz általában interdiszciplináris megközelítésre van szükség. Tudniillik a kérdések egy része *műszaki-termesztudományos jellegű*, de nem elég, hogy valami műszakilag, természettudományos alapon megoldható-e, mert meg kell vizsgálni azt is, hogy *gazdaságos-e ez a bizonyos megoldás*, s ennek a vizsgálata pedig gazdaságtudományi kérdés. Mindezekon túlmenően felmerül az is,

2. ábra. Az energiafogyasztás változása a Földön 1990 és 2090 között [1]







3. ábra. A különböző energiahordozók felhasználásának aránya 1700 és 2000 között (C. Marchetti nyomán [1])

hogy a szóban forgó megoldást elfogadja-e majd a társadalom, sőt azt a kérdést is fel lehet tenni, hogy ha elfogadja, miért fogadja el, és ha nem fogadja el, miért nem, továbbá mit lehet tenni egy műszaki–természettudományosan megalapozott és gazdaságos megoldás társadalmi elfogadtatása érdekében. Így kifejezetten a *társadalomtudományok* közreműködésére is szükség van.

## Jelenlegi energiaforrásaink

### Osztályozásuk

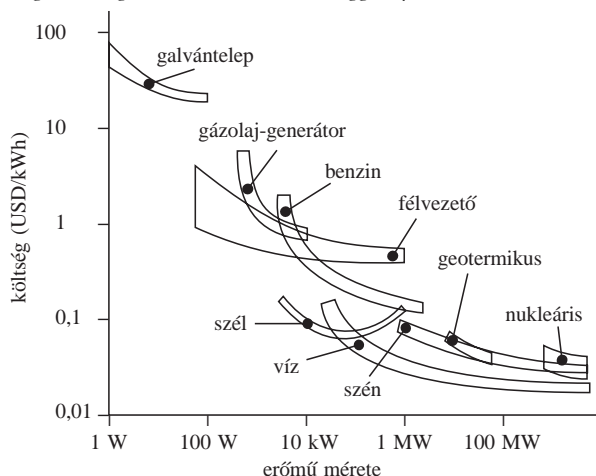
Jelenlegi energiaforrásaink döntő részben fosszilis (konvencionális) energiahordozók felhasználásából kerülnek ki (lásd a 3. ábrát), ezek a kőolaj, a földgáz és a szén. A nukleáris energia is, éspedig a hasadási nukleáris energia, viszonylag jelentős szerepet tölt be, különösen a villamos energiatermelésben, a fúziós energiatermelés még csak a jövő reménye.

A megújuló energiaforrások listája nagyon hosszú: hidroeletromos, szél, napsugárzás, árapály, hullámzás, biomassa, geotermikus, de ezek közül jelenleg jelentős szerepe csak a hidroeletromos erőműveknek van.

### Készletek

Az egyes energiaforrások értékelésénél nagyon fontos, hogy milyen készletek állnak rendelkezésünkre. Az alábbiakban nagyon durva, nagyságrendi becslést adunk arra

4. ábra. Az egyes energiahordozók felhasználásával termelt villamos energia költsége az erőmű méretének függvényében [1]



1. táblázat

Az energiahordozók készleteire vonatkozó nagyságrendi becslések		
energiahordozó		hány évre áll rendelkezésre
fosszilis	kőolaj, földgáz	~ 10 év
	szén	~ 100 év
nukleáris	hasadási fúziós	~ 100 év gyakorlatilag kimeríthetetlen
megújuló		kimeríthetetlen

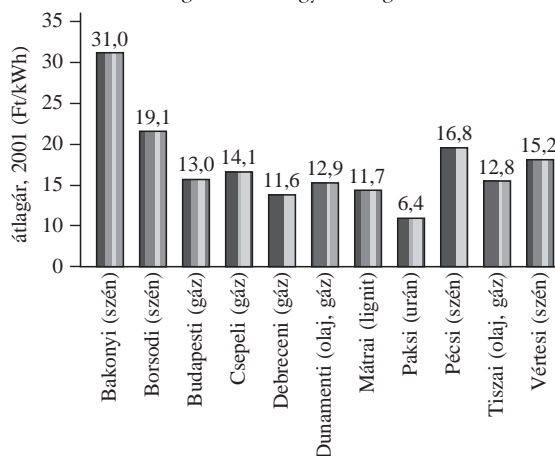
vonatkozólag, hogy a jelenlegi egyes energiaforrások milyen időtávra elegendők. Ezek a becslések nagyon durva, tájékoztató jellegűek, hiszen a konkrét körülményektől, hogy például a nukleáris erőművek milyen típusúak, vagy milyen hasadó anyagot használnak fel, attól nagyon sok függ, bizonyos esetekben nagyságrendi változások is előfordulhatnak (1. táblázat).

Itt kell megemlítenünk, hogy az egyes energiahordozó készleteknél nemcsak arról van szó, hogy mikor merülnek ki, hanem arról is, hogy akkor, amikor még ugyan nem merülnek ki, kitermelésük egyre drágább, és amint fogyatkoznak, egyre elkeseredettebb a küzdelem a lelőhelyek birtoklásáért. Mindennek már tanúi vagyunk napjainkban is, amikor egyre feljebb kúszik a kőolaj ára, és véres háborúk okai között is jelentős szerepet játszik. Ismeretes ugyanis, hogy mint a Föld más kincsei, a kőolaj sem egyenletesen oszlik el a Földön, hanem nagyon is koncentráltan található, fő lelőhelyei a Közel-Keleten vannak.

### Gazdaságosság

Amit a készletekre vonatkozóan elmondtunk, legalább annyira érvényes arra is, hogy az egyes energiaforrásokból milyen költséggel nyerhetünk energiát. A konkrét körülményektől – tehát például, hogy milyen a szén fajtája vagy az erőmű technikai megoldása, mérete stb. – nagyon sok függ (4. ábra). Általában azt lehet mondani, hogy – legalább is jelenleg – a megújuló források drágábbak, sőt egyes esetekben jelentősen drágábbak. A hazai helyzetet a különböző erőművek esetében az 5. ábra mutatja.

5. ábra. A villamosenergia-árak a magyarországi erőművek esetében [3]



Az elektromos energiatermelés járulékos költségei (eurocent/kWh)\* [4]

ország	szén, lignit	kőolaj	nukleáris	hidroelektromos	fotoelektromos	szél
Belgium	4–15		0,5			
Németország	3–6	5–8	0,2		0,6	0,05
Dánia	4–7					0,1
Franciaország	7–10	8–11	0,3	1		
Görögország	5–8	3–5		1		0,25
Hollandia	3–4		0,7			
Portugália	4–7			0,03		
Svédország	2–4			0–0,7		
Egyesült Királyság	4–7	3–5	0,25			0,15

\* Közegészségügyi, foglalkozási ártalmak, károsodások a környezeti anyagokban, klímaváltozás stb.

Az árak kiszámításánál általában csak a közvetlen költségekkel szoktak foglalkozni, de a közegészségügyi, foglalkozási ártalmakat, a környezeti anyagokban jelentkező károsodást, a klímaváltozást stb. nem veszik figyelembe, pedig ezek is megfogalmazhatók a gazdaság nyelvén. Erre vonatkozólag lásd a 2. táblázatot.

#### Technikai megfontolások

Részletes tárgyalásra nem törekedhetünk itt, csak utalunk arra, hogy a technika állandóan változik, fejlődik, és konkrét döntésnél az adott helyen rendelkezésre álló technikai színvonalat kell figyelembe venni. Ide számíthatók például az olyan körülmények, hogy az adott helyen vagy annak közelében (az adott országban) milyen minőségű szén áll rendelkezésre.

Másrészt nem hagyhatjuk figyelmen kívül, hogy például a szél, a napsugárzás stb. intenzitása földrajzilag és helyi adottságoknak megfelelően változó, ugyanakkor időleges, mert a szeles helyeken sincs állandóan szél, és a napsugárzás is változik, nemcsak földrajzi tényezők és az évszakok változásának megfelelően, de az aktuális meteorológiai helyzet következtében is. Viszont a nukleáris erőművek állandó terhelést kívánnak, tehát gondoskodni kell arról, hogy a változó fogyasztás valamiképpen kiegyenlítésre kerüljön.

#### Kockázatok, környezetszennyezés

Az energiaforrások értékelésénél nagyon fontos szempont, hogy felhasználásuk a természeti környezetre és az emberi társadalomra nézve milyen káros hatással, illetve milyen kockázatokkal jár.

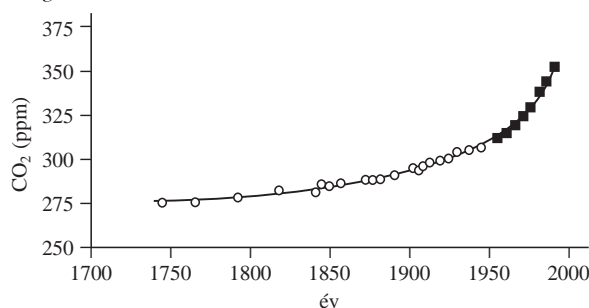
A fosszilis energiahordozók esetében a legnagyobb probléma a szén-dioxid keletkezése, amely a 6. ábra szerint állandóan növekszik a Föld légkörében, és ez ismeretesen melegbírással jár a Földre nézve, melynek következtében jelentős változások következhetnek be például a tengerszint emelkedésében, a földi klíma megváltozásában stb. Ennek mértéke – és egyes szakértők szerint egyáltalán a hatás jelentkezése is – vitatott. A szóban forgó energiahordozók ugyanakkor káros kén- és nitrogénvegyületeket is bocsátanak ki a légkörbe, amelyeknek megkötése az erőművekben nagyon nehéz és

költséges. Az viszont alig kerülhető el, hogy ezeknek az erőműveknek (szénerőművek!) a salakanyagai ne vigyenek jelentős mennyiségű, de általában nem mindig könnyen kimutatható rákkeltő anyagokat, nehéz fémeket a környezetbe. Fontos megemlíteni azt is, hogy számos szénfajta esetében jelentős radioaktivitás is kerül a környezetbe. Az egyes szénfajták között itt több tízszeres vagy akár százszoros különbség is lehet.

A nukleáris (hasadási) energiatermelés esetében a legnagyobb problémát a kiégett fűtőelemek, a keletkező radioaktív hulladék jelenti. Szakemberek szerint ez a kérdés tulajdonképpen megoldott, mert megfelelő geológiai rétegekbe helyezve a földtörténeti tapasztalatok szerint akár hosszú évmilliókig is annak veszélye nélkül tárolhatók a radioaktív hulladékok, hogy a természet körforgásába kerüljenek. Tény viszont, hogy ezen anyagok egy részének lebomlása valóban évmilliókig eltarthat. Ezért folynak a kísérletek olyan nukleáris berendezésekkel kapcsolatban, amelyekben a hosszú radioaktív felezési idejű hulladék rövid felezési idejűvé alakítható át, és így a hosszú idejű raktározás nem jelent már problémát.

A nukleáris erőművek esetében a társadalmi félelmek másik oka a nukleáris balesetek előfordulása. Csernobil után ez érthető, de tudni kell, hogy a csernobili erőmű olyan típusú volt, hogy a fejlett nyugati országokban ezt a típust, pláne védőburok nélkül nem is engedték volna üzembe helyezni. Továbbá, a szóban forgó baleset óta igen nagy mértékben tovább nőtt a nukleáris erőművek biztonsága.

6. ábra. A szén-dioxid mennyisége a légkörben az 1700-as évektől 2000-ig [1]



3. táblázat

Különböző nukleáris cselekedetek révén szétszórt radioaktivitásból származó, az emberiséget ért/érő sugárdózisok (1000 sievert/fő) [5]	
1945 Hiroshima, atombomba	1
1961 Novaja Zemlja, légköri hidrogénbomba-kísérlet	1000
1969 Harrisburg, atomerőmű-üzemzavar	0,04
1986 Csernobil, atomerőmű-baleset	600
1945–1980 összes légköri atombomba-kísérlet	30000
repülőutazások	évente 10
orvosi sugárdiagnosztika	évente 1600
orvosi izotópdiagnosztika	évente 160
orvosi sugárterápia	évente 1500
szénipar	évente 110
atomipar lakosságot érő dózisa	évente 10
atomipari dolgozók dózisa	évente 20
természetes háttérsugárzás	évente 7000

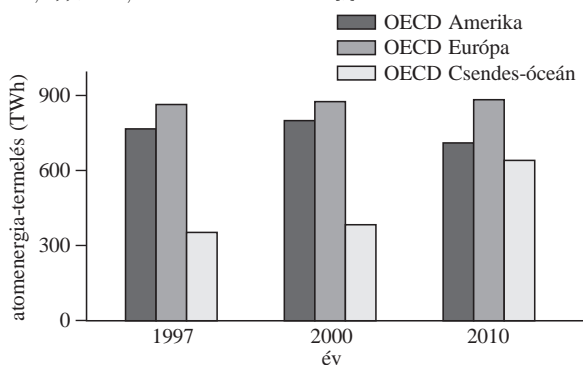
Végül meg kell jegyezni, hogy a nukleáris erőművek esetében a levegőszennyezés teljesen elhanyagolható (különösen, viszonyítva a fosszilis energiaforrásokkal működő erőművekhez, és ez a szennyeződés, tudniillik a radioaktivitás könnyen mérhető, ellenőrizhető).

A 3. táblázatban az ENSZ adatai alapján mutatjuk be, hogy az atomerőművi balesetek, illetve különböző emberi tevékenységek következtében az emberiség mekkora sugárdózist kapott. Vannak arra vonatkozó számítások is, hogy a különböző energiaforrások segítségével folytatott energiatermelés milyen halálozás/év kockázattal jár (lásd a 4. táblázatot).

### Társadalmi elfogadottság

Társadalmunkban közkeletű egy olyan hiedelem, hogy a fejlett országok elutasítják a nukleáris energiát. Ez még Európára sem teljesen igaz, hiszen Franciaországban a villamos energiaellátás mintegy 80%-át nukleáris erőművek szolgáltatják, és semmiféle jelentős, ez ellen tiltakozó mozgalomról nem lehet hallani, Finnországban pedig most is épül nukleáris erőmű. Egyébként azok az országok is, mint Svédország vagy Németország, amelyek

7. ábra. Energiatermelés nukleáris erőművekkel az OECD három régiójában, 1997-ben, 2000-ben és 2010-ben [7]



4. táblázat

Halálozás/év 1000 MW-ra és 75%-os terhelésre számítva [6]		
szén	kőolaj	nukleáris
0,47–2,13	0,1–1,28	0,05–0,43

konkrét dátumot tűztek ki a nukleáris erőművek felszámolására, bajban vannak, keresik a megoldást, mert egyelőre nem látszik tényleges lehetőség az így kieső energiaszolgáltatás pótlására.

A nukleáris energia még inkább előtérben van a Távol-Keleten, hiszen Japánnak gyakorlatilag semmilyen más energiaforrása nincs, és Kínában is feltétlenül szükség van a nukleáris energia felhasználására (lásd a 7. ábrát).

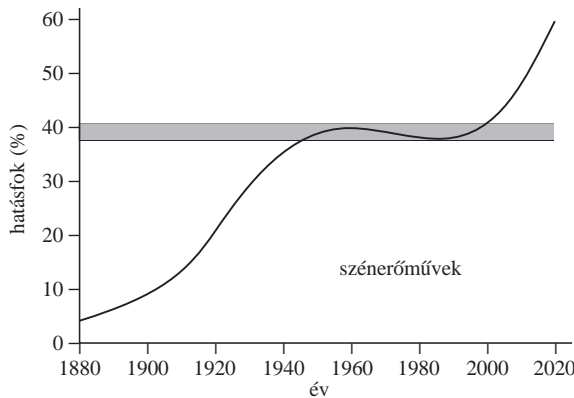
A különböző energiaforrások alkalmazásával kapcsolatban vannak, és feltétlenül kell is, hogy legyenek racionális megfontolások a környezeti károkról és a társadalom fenyegető különböző veszélyekre vonatkozólag. A helyzet azonban az, hogy sok esetben az irracionális félelmek sokkal inkább befolyásolják az emberek magatartását. Helyesen állapította meg *Maurice Tubiana*: „A mindennapi magatartást elsődlegesen a szokás, a hiedelmek, a félelmek és a mítoszok befolyásolják, nem az információk adatszűrűségeinek logikája.”

Egyébként is a megújuló energiaforrásokkal kapcsolatban – amelyek különben nélkülözhetetlenek, és minden bizonnyal még többet kellene, hogy áldozzon a társadalom ezek kutatására és fejlesztésére – sok megalapozatlan optimizmust táplál a közvélemény. Ezzel kapcsolatban érdemes idézni *Vajda Györgyöt*, egyik legkitűnőbb energetikai szakemberünket. „A megújuló energiafajták közvetlenül alig szennyezik a levegőt, de a közvetett szennyezés jelentős, elsősorban a nagymennyiségű szerkezeti anyagszükséglet miatt (egy naperőmű például fajlagosan hatszor annyi betont és 30–150-szer annyi fémot igényelne, mint egy hagyományos hőerőmű).” „... fajlagosan a legtöbb veszélyes hulladék a napelemek anyagából kerül ki, de a szénbamu is tartalmaz néhány száz t/GW-a veszélyes nehézfém-vegyületet.”

### Etikai megfontolások, felelős döntések

Amikor egy-egy energiaforrás felhasználásával kapcsolatban döntést hozunk, soha nemcsak a pillanatnyi igényeket és veszélyeket kell számba venni, hanem azt is, hogy ezek mit jelentenek a jövő szempontjából, milyen károkat, veszélyeket okoznak a jövő nemzedékeknek.

Mindenesetre, mint már az előbbiekben többször is céloztunk erre, mindig figyelembe kell venni az adott lokális feltételeket, például, hogy egyáltalán milyen energiaforrások állnak rendelkezésre az adott környezetben. Van-e például elegendő széles nap, és elég erős-e ez a szél, vagy ha szén áll rendelkezésre, akkor az milyen szén, milyen szennyezések – például mennyi benne a radioaktivitás – kerülnek végül is a környezetbe. Egyáltalán figyelembe kell venni, hogy ki tudjuk-e elégíteni a társadalom jogos energiaigényeit az adott környezetben. És ebben a vonatkozásban világosnak látszik, hogy a nukleáris energiát aligha nélkülözheti a társadalom.



8. ábra. A szénerőművek hatásfokának változása 1880 és 2020 között (L.M. Torrens nyomán [1])

Nagyon fontos, hogy ezekben a döntésekben ténylegesen racionális érvek döntsenek, és az irracionális félelmek visszaszoríthatók legyenek. Ebben viszont nagy szerepe van a társadalomtudományoknak.

## A jövő – lehetőségek és feladatok

### A jelenleg használatos energiaforrásokat illetően

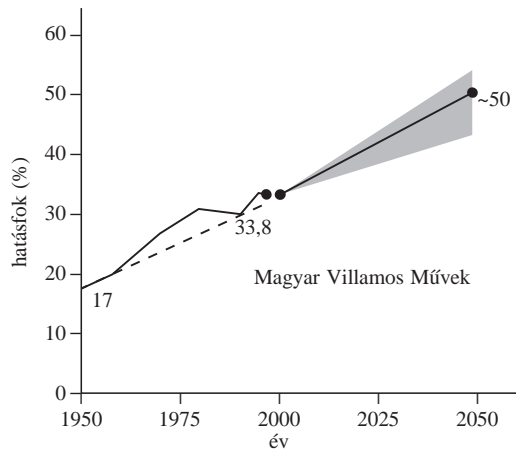
Nagyon fontos, hogy az egyes energiahordozók felhasználásánál minél több energiát vegyünk ki belőlük, azaz *növeljük a hatásfokot*. Előrejelzések szerint a szénerőműveknél például sok az ez irányú tartalék (8. ábra). Ebből a szempontból érdemes megnézni a magyar villamos erőművekben a hatásfok változását az évek függvényében (9. ábra). 1950-ben ez a szám 20% alatt volt, most pedig már 30% fölött járunk, és nem látszik elképzelhetetlennek, hogy ez a továbbiakban akár 50% közelébe is elérhet.

Allandó a törekvés az energiatakarékosság növelésére és a környezeti ártalmak csökkentésére is. Mint sok más esetben, itt is további kutatásokra, fejlesztésekre, de a társadalmi magatartás megváltoztatására is szükség van.

### A nukleáris energiára vonatkozóan

Már az előbbi megfontolásokból is látjuk, hogy az emberiség aligha engedheti meg magának azt a luxust, hogy a nukleáris energiát ne vegye figyelembe energiaszükségletének kielégítésében. Természetesen itt is további kutatásra, fejlesztésre van szükség, és folyik is új reaktor-típusok kifejlesztése, a biztonságosság növelése, a baleset-elhárítás fokozottabbá tétele. Folynak a kísérletek például egy gyorsítóval kombinált reaktorral, amelynél a reaktor azonnal leáll a gyorsító kikapcsolásával.

A kiégett fűtőelemek, a felhalmozódó radioaktív salak kérdésének megoldása a legfontosabb. Itt az első lépés a



9. ábra. A villamosenergia-termelés hatásfoka Magyarországon 1950 és 2050 között [8]

rövid és hosszú felezésű radioaktív hulladék gondos szeparációja. Amennyiben a hosszú felezési idejűek elválasztásra kerülnek a rövid felezési idejűektől, az előbbieket térfogata, tömege összehasonlíthatatlanul kisebb, mint a teljes radioaktív hulladékmennyiségé, és így kezelésük is ennek következtében sokkal könnyebb. Franciaországban évenként és fejenként 1 kg radioaktív hulladék keletkezik, és ebből a hosszú felezési idejű 1 g (összehasonlításképpen: a háztartási és ipari hulladék körülbelül 5 tonna/év/lakos) [12]. Egy másik, nagyon fontos megoldási lehetőség megvalósítására irányulnak a transzmutációra vonatkozó kutatások – amelyre már céloztunk korábban. Ebben az esetben megfelelő reaktorban, gyorsítóban a hosszú felezési idejű izotópokat rövid felezési idejűekké alakítják át, és így a raktározás lényegesen kisebb gondot jelent. Mindenesetre a jelenleg legköltségesebbnek látszó megoldás, hogy a radioaktív anyagokat megfelelő formában (üvegszerű anyagba beépítve) geológiai rétegekbe temetik, ahol akár évszázmillióig lehetnek anélkül, hogy a természeti körforgásba bekerüljenek.

Az energiaellátás terén az igazi remény a *fűzési energiatermelés*. Erre vonatkozóan van európai program (JET) és van az egész világra kiterjedő nemzetközi program (ITER). Ennek a részleteibe nincs módunk itt belemerülni, csak annyit jegyzünk meg, hogy az eddigieknél talán több erőfeszítést kellene az emberiségnek tenni ebben az irányban, hiszen a tét olyan nagy. Hogy hol tart ma ez a kutatás, az 5. táblázatot közöljük, amelyben láthatjuk, hogy hány megawatt termelést sikerült eddig elérni különböző berendezésekben. Sajnos azonban az, hogy a legutolsó esetben is kevesebb energiát sikerült visszanyerni, mint amennyit be kellett táplálni.

### Megújuló források

Kétségtelen, hogy az emberiség az utóbbi évtizedekben, de különösen az utóbbi években egyre többet igyekszik tenni a megújuló energiaforrások felhasználására. Ezeket már korábban felsoroltuk. Az EU tervei szerint 2010-re a villamos energiaszükséglet 12%-át megújuló forrásokból kellene fedezni. A továbbiakban röviden igyekszünk szólni arról, hogy az egyes megújuló forrástípusokkal kapcsolatban mi a helyzet. Bevezetőben megjegyezzük, hogy a hidroelektromos, vagyis a víz esését

*5. táblázat*

**A fűzési energiatermelés helyzete (trícium–deutérium) [9]**

Berendezés	év	MW
JET (Európa)	1991	1,7
TFTR (USA)	1994	10,7
JET (Európa)	1997	16,1

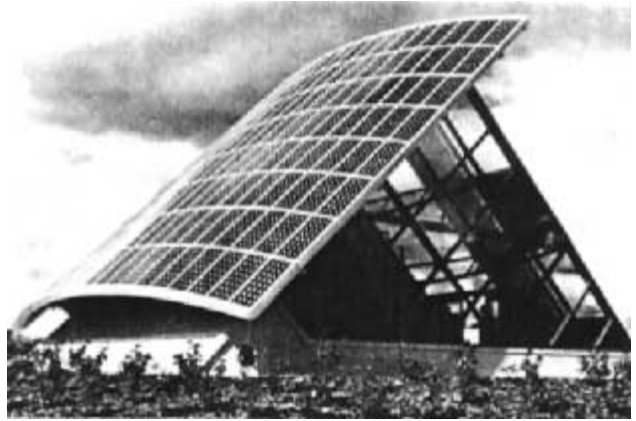


10. ábra. Naperómű White Cliffsben (New South Wales, Ausztrália) [8]

felhasználó források tekintetében nem várható már a Földön komoly bővülés, mert az ilyen irányú lehetőségek gyakorlatilag már most is felhasználásra kerülnek.

A napenergia használatát illetően mindenekelőtt azt jegyezzük meg, hogy ez meglehetősen „híg” forrás, 1 négyzetkilométerre átlagosan 1,6 Watt jut a Föld felszínén, aminek nyilvánvaló következménye a nagyterületek építése. Mindenesetre a felhasználásnak két fő formája van, az egyik a gyűjtőtükrökkel a fókuszba összegyűjtött hőenergia és ennek további felhasználása. Ilyen példát lehet említeni Franciaországban (Odeillo), ahol 1000 kW-os erőmű működik. A 10. ábránk egy másik ilyen naperóművet mutat, amelyik Ausztráliában épült fel. A másik út a fotoelektromos cellák alkalmazása. Egy ilyennek fényképét láthatjuk a 11. ábrán. Nem térhetünk itt ki a különböző megoldásoknál jelentkező összes előnyre és hátrányra, csak annyit jegyezzük meg, hogy például a gyűjtőtükrös megoldásnál a hatalmas tükrök felszerelése sok problémával, balesettel jár, továbbá a tükrök egy idő után lemattulnak, és ezek újracsiszolása nem kis problémát jelent. A fotoelektromos cellák pedig egyelőre meglehetősen drágák, előállításuk pedig jelentős környezetszennyezéssel és relatíve nagy energiabefektetéssel jár. Érdekességképpen bemutatunk egy debreceni újságban megjelent hirdetést (12. ábra), amely egy olyan céget reklámoz, amelyik Debrecenben székel, és a napenergia felhasználását vállalja meglévő biztosítására és fűtési kiegészítésre.

12. ábra. Egy debreceni cég hirdetése a napenergia felhasználására



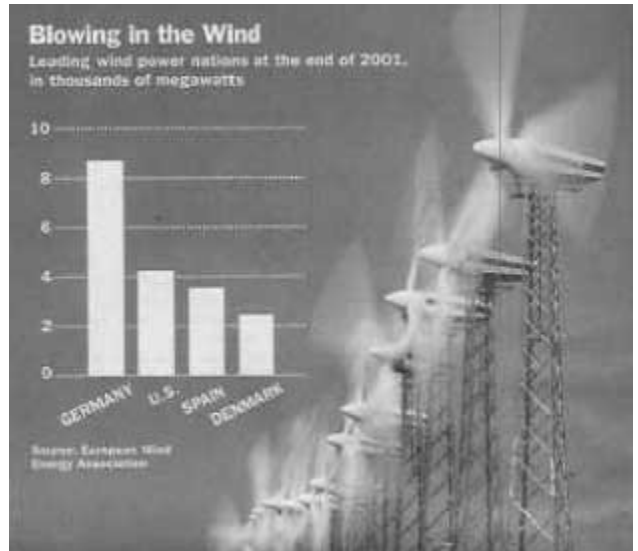
11. ábra. Fotoelektromos cellák egy birminghami épület tetején [9]

A szélenergiát az emberiség korábban nagymértékben használta (vitorlás hajók, szélmalmok), később azután mintha feledésbe ment volna. Ma ez egyre jobban előtérbe kerül ismét, és a szélenergia világon történő felhasználásának 90%-a Európában történik. Érdemes ezzel kapcsolatban megnézni a 13. ábrát.

Az árapály energiájának felhasználására is történnek kísérletek. Itt azt kell megemlítenünk, hogy az árapály mértéke nagyon különbözik az egyes tengerpartokon: van, ahol csak néhány centiméter, de van, ahol viszont jelentős. Az egyik ilyen kísérleti erőmű 240 MW-os a Rance folyó torkolatánál Franciaországban.

A biomassza, biogáz, bioüzemanyag felhasználása különböző megoldásokat foglal magába. A legősibb a fa el-tűzése. Jelenleg viszont komoly kísérletek folynak, hogy a háztartási hulladékból biogázt termeljenek, és hogy ezt a gázt éppen úgy használják a gyakorlatban, mint a földgázt. További lehetőség, hogy egyenesen olyan növényeket termeljünk, amelyekből azután alkoholt állíthatunk elő, és az alkoholt használjuk mint energiaforrást. E téren is komoly kísérletek, sőt eredmények vannak már. Kérdéses persze, hogy a termőföldből az emberiség mennyit szánhat ilyen célra. Megjegyzem, hogy erre vonatkozó

13. ábra. Egyes országok részvétele a szélenergia kihasználásában [10]



kísérletek már jóval korábban is voltak, ezt az üzemanyagot *motalkónak* nevezték, amely szóban az „alko” jelzi, hogy az üzemanyag egyik alkotórésze alkohol volt.

A *tenger hullámvázásának vagy a geotermikus energiának* a felhasználását is kutatják, de azt mondhatjuk, hogy ezek még eléggé „gyermekcipőben” járnak, bár az utóbbival 1997-ben már 34 TWh elektromos energiát termeltek a Földön [12] és legkézenfekvőbb felhasználása a melegvízes gyógyfürdőkben történik.

### Közlekedés

Jelenleg a kőolaj jelentőségét – többek között – az adja meg, hogy szinte kizárólag – nem tekintve a földgáz ilyen jellegű felhasználását – ez használható a közlekedési eszközök energiaforrásaként. Éppen ezért manapság nagyon nagy reményeket fűznek a *hidrogénhez mint üzemanyaghoz*, amely oxigénnel egyesülve a környezetre egyáltalán nem káros vizet eredményez mint hulladékot, miközben energiát szolgáltat. Ennek a kérdésnek egyre hatalmasabb irodalma és pozitív kísérleti eredményei vannak. A fűtőanyagcellának is számos típusa, amelyben az a bizonyos energiát szolgáltató hidrogén–oxigén egyesülés megtörténik. Úgy tűnik, hogy jelenleg az ilyen üzemanyaggal hajtott közlekedési eszközök kérdése műszakilag teljesen megoldott, kísérleti példányok rendelkezésre állnak, csupán arra volna szükség, hogy hidrogéntöltő állomások hálózata álljon rendelkezésre az utak mentén. Meg kell azonban említeni, hogy a hidrogén tulajdonképpen másodlagos energiaforrás, amelyet nagy energiabefektetéssel kell előállítani. Ez pedig vagy elektrolízissel, vagy magas hőmérsékleten (>1000 °C) szénhidrogénekből történik, mely utóbbi során hidrogén és szén-dioxid képződik (lásd részletesebben [11]). A hidrogén üzemanyag jelentősége tehát elsősorban az, hogy azokat az energiaforrásokat, amelyeket a közlekedésben nem lehet használni, *transzformálja* a közlekedésben használható energiaforrássá.

Meg kell még említenünk az *elektromos autót*, amely akkumulátorokkal működik, de van „hibrid” változata is, amely részben akkumulátor meghajtású, részben benzint is használó üzemanyagként. A fő probléma itt a megfelelő akkumulátorok megtalálása, amelyek általában nagy térfogatot igényelnek, súlyosak és drágák. Ehhez járul még az a tény, hogy ez is csak másodlagos megoldás, mert az akkumulátorokat fel kell tölteni, és ehhez is hiányzik a feltöltő állomások út menti hálózata.

### Hogyan tovább?

Ha végig tekintjük mindazt, amit az eddigiekben próbáltunk összefoglalni, nem lehet eléggé, és újra és újra hangsúlyozni a kutatás fontosságát mind az alap kutatások, mind az alkalmazott kutatások és a fejlesztések területén az energiakérdés megoldásában. Nem lehetetlen, hogy a megoldás most is, mint oly sokszor az emberiség és a tudomány története folyamán onnan fog jönni, olyan felfedezésekből, amelyeket ma nem is látunk előre. Ugyancsak újra kell hangsúlyozni az egyes döntések során a racionális megfontolásokat, hogy a veszélyeket se le ne becsüljük, se el ne túlozzuk, hanem reálisan vegyük figyelembe.

Végül nagyon fontos, hogy ne pazaroljuk az emberi kreativitást, a kutatási tehetséget és kapacitást. Vagyis ne

6. táblázat

### Az energiafogyasztás hatása a Földön „nap” egységekben [13]

$10^{-4}$	jelenlegi (az egész Földre vonatkoztatva)
$10^{-3}$	jelenlegi (az USA-ra vonatkoztatva)
$10^{-2}$	1 °C átlaghőmérséklet-emelkedés a Földön
$10^{-1}$	testhőmérsékletnek megfelelő az átlagos hőmérséklet
1	a forró víznek megfelelő az átlagos hőmérséklet

felcsigázott luxusigények kielégítésére törekedve pazaroljuk el kutatóintézmények és kutatók értékes energiáit. Még fontosabb, hogy csökkentsük a katonai kutatásokra fordított összegeket a Földön, amelyek végül is nem az építésre, hanem a pusztításra koncentrálnak. Egyébként közgazdászok kimutatták, hogy – a közhiedelemmel ismét csak ellentétben – ha a katonai kutatások végül hasznosulnak is a polgári életben, ezek a polgári problémák megoldása szempontjából nagyon költséges megoldást jelentenek. Ha ugyanezeket az összegeket és kutatási kapacitást közvetlenül a polgári problémák, az emberiséget ténylegesen érintő feladatok megoldására fordítanánk, az sokkal gazdaságosabb volna.

### Korlátaink

Nem lehet eléggé hangsúlyozni végül, hogy bármilyen energiaforrást is választunk, távolról sem lehet a végtelenségig növelni az energiafelhasználást a Földön. A 6. táblázatunk mutatja, hogy az egyre nagyobb energiafelhasználás milyen hatással, illetve kockázatokkal jár az emberiség szempontjából. Egységnek itt azt tekintettük, hogy összesen mennyi energia jut bizonyos idő alatt a Föld teljes felületére. Vagyis, ha az egész Földön mindenki annyi energiát fogyasztana, mint az USA-ban, akkor már a Földön az átlag hőmérséklet körülbelül 1 °C-kal emelkedne. Ennek káros, helyenként katasztrofális hatását a CO<sub>2</sub> légköri felgyűlésével kapcsolatosan tanulmányozzák.

Láthatjuk tehát, hogy vannak korlátaink, és igényeinket ezeknek a korlátoknak a figyelembe vételével kell alakítanunk annak tekintetbe vételével, hogy minden embernek egyformán van joga ahhoz, hogy emberhez méltó életet éljen.

### Irodalom

1. D.R.O. MORRISON: *World Energy in the Next Century* – 43rd Pugwash Conference, 9–15 June 1993, Rasse-ludden, Sweden, Working paper No. 197
2. BERÉNYI DÉNES – Debreceni Szemle 7(2000) 495
3. MAYER GYÖRGY – Magyar Nemzet, 2001. dec. 10. szám
4. RTD Info-Magazine for European Research No. 35, Oct. 2002
5. MARX GYÖRGY – Debreceni Szemle 5(1997) 163
6. IAEA Bulletin 22/5–6 127
7. NEA Annual Report, Paris, 1997
8. BÜKI GERGELY – magánközlés
9. *Energy, the Environment and Sustainable Development, Key Action 21* alapján
10. J. AUDOUZE – The UNESCO Courier, May 1998, p. 8
11. RTD info, February 2000, p. 33
12. A.R. KATZ – The Wall Street Journal Europe, May 17–19, 2002. p. A12
13. RTD info, August 2004
14. J. AUDOUZE – UNESCO, CIP/BIO/CMECST/Rep. 1, Paris, 19 Dec. 1997
15. KESZTHELYI LAJOS – magánközlés

# AZ ATOMENERGIA HASZNOSÍTÁSA ÉS A FIZIKA

Szatmáry Zoltán  
BME Nukleáris Technikai Intézet

A tudomány és technika számos ágáról mondogatjuk, hogy többek között a fizikának is alkalmazási területe. Kevés terület van azonban, amely olyan mély és szerteágazó kapcsolatban lenne a fizikával, mint az atomenergia hasznosítása. Ha az alapvető jelenséget, a maghasadást más történelmi korban fedezték volna fel, az egész még hosszú ideig a fizikai laboratóriumok csöndjében fejlődött volna tovább, és csak lassan keresték volna meg a gyakorlati alkalmazásokat. A döntő felfedezésről szóló közlemény azonban 1939 elején jelent meg, így a II. világháború első éveiben rögtön keresni kezdték, és meg is találták az első kézenfekvő alkalmazást, az atomfegyvert. Annak is megvolt az oka, hogy a háború befejezését követően azonnal megvalósult a jelenség békés célú alkalmazása, az atomerőmű. Ennek okaival és következményeivel, gondoljaival és előnyeivel sokan sokat foglalkoztak már – többek között a *Fizikai Szemle* hasábjain is. Az alábbiakban az atomerőműveket nem ebből a szempontból tárgyaljuk, hanem inkább azt tekintjük át, milyen szerepet játszott a fizika ezen a fontos területen.

Az alaptudomány esetünkben nyilvánvalóan a *magfizika*. Kezdetben az atomenergia gyakorlati hasznosítását a magfizika egyik fejezetének tekintették. Az alkalmazás azonban visszahatott az alapokra, és a fizikának (részben a kémiának is) új ágait hozta létre: reaktorfizika, radiokémia stb., de hatására a fizika egyes, korábban is létező ágai új fejezetekkel gazdagodtak: sugárvédelem, áramlás- és hőtan, szilárdságtan, mérés-technika stb. Közbevetőleg megjegyezzük, hogy a technikának van olyan ága, amely eredetileg a felsorolt tudományoknak köszönheti a létét: ez a számítástechnika. Közismert, hogy az első számítógépeket a kezdeti mag- és reaktorfizikai kutatások számára építették. Messze vezetne, ha a fizikának ezt az áldásos hatását is ki kívánnánk fejteni, ezért megmaradunk az atomenergiánál.

## A magfizika szerepe

Az atomenergetika a *maghasadás* felfedezésével indult 1939-ben. Ehhez kellett a neutron felfedezése 1932-ben, amihez viszont szükség volt a magreakciók és a radioaktivitás felfedezésére (1919, illetve 1896). *Szilárd Leó* ismerte fel és szabadalmaztatta a maghasadások láncreakcióját mint azt a módot, amelyen a maghasadásban felszabaduló energiát makroszkopikus léptékben fel lehet szabadítani.<sup>1</sup> Mai szemléletünk szerint a láncreakció egy új tudomány, a *reaktorfizika* tárgya, mint ahogy a reak-

torfizika részének tekintjük a neutronok lassulásának *Fermi* által kidolgozott elméletét is, hiszen enélkül nem érthetjük meg magát a láncreakciót sem. Ez természetesen nem lehet akadálya annak, hogy számos, magfizikáról szóló könyv röviden összefoglalja a láncreakció és a lassulás lényegét. Ugyanakkor a reaktorfizikusok a magfizikát olyan alaptudománynak tekintik, amely a reaktorok működésének a megértéséhez szükséges alapadatokat szolgáltatja. Emiatt a reaktorfizikával foglalkozó kézikönyvek többnyire szentelnek két-három bevezető fejezetet a magfizikának. A két tudományágnak ebben a szövevényes kapcsolatrendszerében úgy tehetünk rendet, ha köztük a magfizikai adatok szintjén képzeljük el az elválasztó síkot. Nézzük tehát, milyen adatokról van szó.

Mindenekelőtt szükség van a reaktort alkotó izotópok hatáskeresztmetszeteire, hiszen segítségükkel számítjuk ki a reaktorban lejátszódó magreakciók számát. A hatáskeresztmetszetekből nukleárisadat-könyvtárakat állítanak össze. A bennük szereplő izotópok száma meglehetősen nagy. Az urán izotópjain kívül a következők hatáskeresztmetszeteire van szükség: moderátoranyagok (könnyűvíz, nehézvíz, grafit, berillium), szerkezeti anyagok (vas, nikkel, cirkónium, nióbium, alumínium stb.), neutronabszorbensek (bór, kadmium, gadolínium, eurórium stb.), szennyezők (hafnium, nátrium, lítium, kobalt stb.), transzurán elemek (plutónium, neptúnium, amerícium, kúrium stb.), végül hasadási termékek. Csak az utóbbi csoportban több száz izotóp hatáskeresztmetszeteit kell ismerni. Fajtajukat tekintve minden izotópra ismerni kell az összes szóba jövő hatáskeresztmetszetet a magreakciót kiváltó neutron energiájának a függvényében: befogás, hasadás, rugalmas és rugalmatlan szórás,  $(n,2n)$  stb.

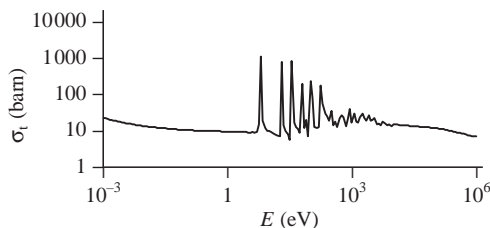
A magfizika egyik alkalmazott ága az úgynevezett *evaluált nukleárisadat-könyvtárak* összeállítása. A szükséges adatokat magfizikai laboratóriumok folyamatosan mérik, a tudományos sajtóban közölt adatokat pedig erre specializálódott központok értékelik, átlagolják, szórást és korrelációt becsülnek, egyszóval: *evaluálják*. A gyakorlat embereinek (elsősorban a reaktorfizikusoknak) óriási az adatigénye. Időről időre *request listek* (kívánságlisták) készülnek, hogy orientálják a magfizikusokat, mire van szükség. Ennek ellenére a könyvtárak mindig hiányosak. A hiányzó adatokat magmodelleken alapuló számítások alapján pótolják. Látjuk, hogy az evaluáció alapos ismereteket (és természetesen sok szorgalmat) igénylő tevékenység. Jelenleg három közhasznú nukleárisadat-könyvtár létezik: ENDF,<sup>2</sup> JEF,<sup>3</sup> JENDL.<sup>4</sup> Jóllehet hatalmas értéket

<sup>1</sup> A vetélkedők kedvelt kérdése, hogy ki szabadalmaztatta a láncreakciót, amire a helyes válasz Szilárd Leó. Helyenként arról is lehet olvasni, hogy az ötlet akkor született meg a fejében, amikor London egyik útkereszteződésében a zöld lámpára várt. Mikor a dologról Teller Edét személyesen megkérdeztem, Szilárd Leó szerzőségét nem vitatta, viszont a körülményeket kizártnak tartotta: „*Szilárd soba semmiféle piros lámpánál nem állt meg.*”

<sup>2</sup> Evaluated Nuclear Data File (evaluált nukleárisadat-könyvtár). Az Egyesült Államokban szerkesztett könyvtár „B” változata szolgál reaktorfizikai célokra. Az „A” változat az egyéb alkalmazások számára készült (például sugárvédelem).

<sup>3</sup> Joint European File (közös európai könyvtár)

<sup>4</sup> Japanese Evaluated Nuclear Data Library (japán evaluált nukleárisadat-könyvtár)



1. ábra.  $^{238}\text{U}$  hatáskeresztmetszete a neutron energiájának a függvényében

képviselnek, ingyen hozzáférhető a felhasználók számára (kivéve természetesen a súlyos politikai embargó alá eső országokat). Az Olvasóban nyilván felmerül a kérdés, hogy miért nem egyetlen, mindenki által elfogadott adatkönyvtár van. A kérdésre még visszatérünk.

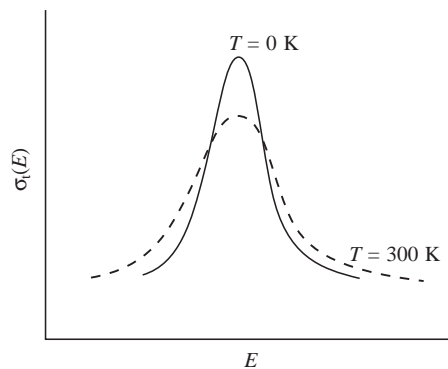
Amikor hatáskeresztmetszetekről beszéltünk, elnagyolva fogalmaztunk. Az izotópok nagy részére vonatkozóan elegendő a hatáskeresztmetszeteket a magreakciót kiváltó neutron  $E$  energiájának a függvényében kellően sűrű energiaértékekre megadni, mint az 1. ábra mutatja. Bizonyos energiákra azonban ez nem célszerű: ha az izotópnak vannak *rezonanciái*, mint például az ábrán mutatott  $^{238}\text{U}$  esetében, akkor az ilyen görbe megadása kevés. Az egyes rezonanciákat a

$$\sigma_t(E) = \frac{\sigma_0}{\left(\frac{E - E_0}{\Gamma/2}\right)^2 + 1} + \sigma_p \quad (1)$$

*Breit-Wigner-formulával* lehet leírni, amelyben  $E_0$  a rezonancia energiája,  $\Gamma$  a szélessége,  $\sigma_0$  a hatáskeresztmetszet értéke  $E = E_0$  esetén, végül  $\sigma_p$  a potenciális szórás hatáskeresztmetszete.<sup>5</sup> Az elméleti magfizika, így az (1) képlet is a tömegközépponti rendszerben kifejezett neutronenergia függvényében adja meg a hatáskeresztmetszeteket. A reaktorfizikában viszont mindig a laboratóriumi rendszerben mért neutronenergiát használjuk. A kísérleti magfizika is ez utóbbi függvényében adja meg a hatáskeresztmetszeteket. Tekintve, hogy az atommag hőmozgást végez, a gyakorlatban egy *effektív hatáskeresztmetszetet* kell használnunk, amely az elméleti hatáskeresztmetszet átlaga:

$$\sigma_{\text{eff}}(v) = \frac{1}{v} \int v_r \sigma(v_r) P(\mathbf{V}) d\mathbf{V}, \quad (2)$$

ahol  $v_r = |\mathbf{v} - \mathbf{V}|$  a neutron és az atommag relatív sebessége,  $\mathbf{v}$  és  $\mathbf{V}$  rendre a neutron és az atommag sebességvektora a laboratóriumi rendszerben,  $P(\mathbf{V})$  az atommag sebességének valószínűségi sűrűségfüggvénye. Mivel az atommag hőmozgásának az energiája  $kT$  nagyságrendű, körülbelül ekkora a  $P(\mathbf{V})$  eloszlás szélessége is. Érdekes megjegyezni, hogy a  $T \rightarrow 0$  K határesetben  $\sigma_{\text{eff}}(v) \rightarrow \sigma(v)$ , vagyis az effektív hatáskeresztmetszet csak viszonylag magas hőmérsékleteken tér el az elméletitől. Két esetben kapunk lényeges eltérést: egyrészt termikus neutronenergiákra, vagyis amikor  $E$  és  $kT$  összemérhető, másrészt olyan gyorsan változó hatáskeresztmetszetek esetében, amelyekre egy  $\Delta E \approx kT$  energiaintervallumban  $\sigma(E)$  szá-



2. ábra. Doppler-effektus: az (1) képlet szerinti rezonanciagörbének ( $T = 0$  K) a (2) képlet szerint szobahőmérsékleten ( $T = 300$  K) megfelelő effektív hatáskeresztmetszet kiszélesedik.

mottevően megváltozik. Mivel a rezonanciák  $\Gamma$  szélessége és  $kT$  összemérhető, ilyenek az (1) képlet által adott rezonancia-hatáskeresztmetszetek. A 2. ábrán mutatunk egy példát: összehasonlítjuk a Breit-Wigner-képlettel számolt görbét ( $T = 0$  K) és a szobahőmérséklethez tartozó effektív hatáskeresztmetszetet ( $T = 300$  K). Látjuk, hogy az utóbbi szélesebb.<sup>6</sup> Ezt a jelenséget nevezzük *Doppler-effektusnak*, amelynek a reaktorok biztonsága szempontjából alapvető jelentősége van. A hatáskeresztmetszet-könyvtárakra visszatérve ebből az következik, hogy azoknak nem a hatáskeresztmetszeteket, hanem a rezonanciák paramétereit ( $E_0$ ,  $\Gamma$  stb.) kell tartalmazniuk, mivel a felhasználók így tudják a legkönnyebben az effektív hatáskeresztmetszeteket a számukra érdekes  $T$  hőmérsékletekre kiszámolni.

A hatáskeresztmetszeteken kívül a könyvtáraknak tartalmazniuk kell egy sor egyéb adatot is. Közülük a legfontosabb a *hasadási termékek gyakorisága*, továbbá ezek és a transzurán elemek radioaktív *bomlási sémája*, valamint az emittált  $\gamma$  és  $\beta$ -részecskék energiaspektruma, illetve *átlagenergiája*. Ezeknek az adatoknak a felhasználása sokrétű. Mindenekelőtt szükségesek a reaktor működésének nyomon követéséhez, de alapvetők a radioaktív hulladékok kezelése szempontjából is. Speciális szerepet játszanak azok a hasadási termékek, amelyek bomlási sémája során neutron is keletkezik. Ezek termelnek ugyanis a reaktorok szabályozását lehetővé tevő *késő neutronokat*. Esetükben nemcsak a bomlási séma adataira, hanem a keletkező neutronok energiaspektrumára is szükség van.

Befejezésül még egy speciális hatáskeresztmetszetről kell szólnunk: ez a *szórási magfüggvény*. Tekintsük a 3. ábrát: miután egy  $E$  energiájú neutron atommagon szóródik,  $E'$  energiával halad tovább. Sebességének irányvektora az ütközés előtt és után  $\Omega$ , illetve  $\Omega'$ . Annak a szórásnak a hatáskeresztmetszetét, amelyben a neutron szóródás utáni energiája az  $(E', E' + dE')$  intervallumba, sebességének iránya az  $\Omega'$  körüli  $d\Omega'$  kúpszögbe esik, a következőképpen jelöljük:

$$\sigma_s(E \rightarrow E', \Omega \rightarrow \Omega') dE' d\Omega'.$$

<sup>5</sup> A képletben szerepel még egy további tag is, de azt az egyszerűség kedvéért elhagytuk.

<sup>6</sup> A 2. ábrán látható két görbe alatti terület megegyezik, ezért a szélesebb görbe maximuma kisebb.





3. ábra. Neutron szóródása atommagon

Ez a *rugalmas* szórási magfüggvény. Kivételes esetektől (például egykristályon való szóródástól) eltekintve nem külön-külön függ a két szögiránytól, hanem csak az általuk bezárt szögtől, pontosabban annak  $\mu_0$  koszinuszától (vö. 3. ábra):

$$\begin{aligned} \sigma_s(E \rightarrow E', \Omega \rightarrow \Omega') &= \sigma_s(E \rightarrow E', \Omega \Omega') = \\ &= \sigma_s(E \rightarrow E', \mu_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Hasonló módon definiáljuk a *rugalmatlan* (inelasztikus) szóráshoz tartozó magfüggvényt, amely izotróp, vagyis független a szóródási szögtől<sup>7</sup>:

$$\sigma_{in}(E \rightarrow E', \Omega \Omega') = \frac{\sigma_{in}(E \rightarrow E')}{4\pi}.$$

A szórás izotrópiája egyáltalán nem érvényes a rugalmas szórásra: erre vonatkozóan a szórási szögtől való függés jelentős effektus. Leírását egyszerűsíti, hogy a magfüggvény csak látszólag függ három változótól. Egyszerű belátni, hogy az energia és az impulzus csak úgy maradhat meg az ütközés során, hogy  $E$ ,  $E'$  és  $\mu_0$  között egyértelmű kapcsolat van. Mivel az ütközés előtti energia ( $E$ ) adott, a magfüggvényt a szórási szög ( $\mu_0$ ) függvényének tekinthetjük, és a következő alakba írjuk át:

$$\sigma_s(E \rightarrow E', \mu_0) = \frac{1}{2\pi} \sigma_s(E) \chi(E, \mu_0).$$

A  $2\pi$ -vel való osztás azt fejezi ki, hogy a 3. ábrán látható szóródás forgási szimmetriát mutat az eredeti neutronirány ( $\Omega$ ) körül. A  $\chi(E, \mu_0)$  függvény  $\mu_0$  valószínűségi sűrűségfüggvénye. A Legendre-polinomok szerint haladó sorba szoktuk fejteni:

$$\sigma_s(E \rightarrow E', \mu_0) = \frac{1}{4\pi} \sigma_s(E) \sum_{\ell=0}^{\infty} \omega_{0,\ell}(E) P_{\ell}(\mu_0).$$

A hatáskeresztmetszet-könyvtárak a  $\sigma_s(E)$  szórási hatáskeresztmetszetek mellett az  $\omega_{0,\ell}(E)$  együtthatókat tartalmazták az  $E$  neutronenergia függvényében.<sup>8</sup> Vannak izotópok, amelyekre vonatkozóan akár  $\ell = 6$ -ig el kell menni a sorban (sőt néha még tovább is). Reaktorok leírásában az  $\ell = 1$ -nél magasabb rendű tagok nem játszanak jelentős szerepet, de például biológiai védelmi falakon áthatoló neutronsugárzás esetében ezek a tagok a meghatározók.

<sup>7</sup> Ez az állítás a tömegközépponti rendszerben vett szórási szögre igaz. A mag visszalökődése miatt a laboratóriumi rendszerben csak közelítőleg érvényes.

<sup>8</sup>  $\omega$  mellett a „0” index arra utal, hogy a sorfejtés a laboratóriumi rendszerben vett szórási szög szerint halad. A magfizikusok általában a tömegközépponti rendszerben vett szórási szöget részesítik előnyben. A kétfajta szórási szög szerinti eloszlások egymásba átszámolhatók.

Az eddigiekben a szórási magfüggvényeket a hőmozgás energiáját jóval meghaladó  $E$  neutronenergiákra vonatkoztattuk. Amikor az energia eV-nál kisebb, két újabb effektus lép fel: a kémiai kötés hatása és a szóró atommag hőmozgása. Kristályos anyag esetében a kristályrács is befolyásolja a szóródás lefolyását. Ebben az energiatartományban – megkülönböztetésül – *termalizációs* magfüggvényről szoktunk beszélni. Ha a szóró atom egy szabad gázatom, csak a hőmozgását szükséges figyelembe venni. Molekulában kötött atom esetében a neutron nem egymagában az atommaggal lép kölcsönhatásba, hanem az egész molekulával: gerjeszti annak rezgési és rotációs kvantumállapotait, kristályrácsok esetében pedig a fononokat. A termalizációs magfüggvény meghatározása tehát nemcsak a magfizika, hanem a szilárdtestfizika és a kvantumkémia eszközeit is igényli. Az 1960-as és 1970-es években önálló tudományággá fejlődött a termalizációs magfüggvény elméleti és kísérleti meghatározása. Tekintve, hogy a gyakorlatban csak néhány anyag van, amelyeket moderátorként használnak, és az ezeken való neutronszórást alaposan megvizsgálták, a termalizációs magfüggvény problémája egyelőre megoldottnak tekinthető. Messze vezetne a kérdés további elemzése, de megjegyezzük, hogy a jövőben épülő reaktorok számára a problémát két okból is újra elő kell majd venni: egyrészt új anyagok (például sóoldadék) alkalmazása várható, másrészt folyamatosan növelik az egységnyi hasadóanyagból kivett energiát, és emiatt növekedni fog a reaktorban felhalmozódó transzuránok (főleg a plutónium) mennyisége.<sup>9</sup>

## A reaktorfizika szerepe

A magfizikai adatoknak az eddigiekben áttekintett könyvtárai elméleti és kísérleti magfizikusok százainak több évtizedes munkáját igényelték, és ez a munka még nem zárult le. Érdekes lenne egyszer megbecsülni, mennyi pénzt emésztettek fel azok a kutatások, amelyek a ma használt adatkönyvtárakat megalapozták. Valószínűleg dollármilliárdok jönnének ki. Itt logikusan felmerül a kérdés, hogy a magfizikusok viszont mennyi pénzt takarítanak meg a nukleáris energetikának. Erre még visszatérünk, de előbb áttekintjük, mire használják a magfizikai adatokat a reaktorfizikusok.

A reaktorfizika alapegyenlete a *transzportegyenlet*, amelynek régóta ismert a fizikai tartalma, hiszen az alapfogalom már a statisztikus fizika kezdetén megszületett. Erre való tekintettel sokan *Boltzmann-egyenlet*nek is nevezik. Fizikai tartalma rendkívül egyszerű. Legyen  $n(\mathbf{r}, E, \Omega, t)$  a neutronok sűrűsége a  $t$  időpillanatban a hely ( $\mathbf{r}$ ), energia ( $E$ ) és sebességirány ( $\Omega$ ) szerint. A transzportegyenlet a következőt fejezi ki:

$$\frac{\partial n(\mathbf{r}, E, \Omega, t)}{\partial t} = \text{neutrontermelés} - \text{neutronfogyás}. \quad (4)$$

<sup>9</sup> Az elmúlt 40 év tapasztalata azt mutatta, hogy annál pontosabb termalizációs magfüggvényekre van szükség, minél nagyobb mennyiségben kerülnek a reaktorba neutronabszorbensek, amilyen például a plutónium is.

A jobb oldalon természetesen idő- és térfogategységre, továbbá egységnyi energiatartományra és kúpszögére vonatkozó reakciógyakoriságok állnak. Minden, a továbbiakban felírt mennyiség idő- és térfogategységre stb. fog vonatkozni, de az ezt kifejező körülményes jelzőket az egyszerűség kedvéért elhagyjuk. Nem kívánjuk az egyenletet teljes részletességgel felírni, csupán néhány tagot adunk meg illusztrációképpen. A neutronok két módon tűnhetnek el: kifolyás és magreakciók révén. Ezek száma:

$$\text{neutronfogyás} = \Omega v \nabla n(\mathbf{r}, E, \Omega, t) + \Sigma_i(\mathbf{r}, E) v n(\mathbf{r}, E, \Omega, t). \quad (5)$$

Itt  $v$  az  $E$  energiájú neutron sebessége,  $\Sigma_i$  pedig a teljes makroszkopikus hatáskeresztmetszet.<sup>10</sup> Az első tag jelenti a kifolyást: a térfogategységből időegység alatt kidiffundáló és az oda bediffundáló neutronok számának a különbsége. A második tag pedig az összes magreakciók számát adja meg. Úgy tekintjük, hogy minden neutron eltűnik, amely magreakciót vált ki. Ezt fejezi ki (5) jobb oldalának második tagja. Helyettük azonban a magreakció termelhet egy vagy több, más energiával és más irányban repülő neutronot. Ezek alkotják a (4) transzportegyenletben „neutrontermelés” kifejezéssel jelölt tag egy részét. Példák: maghasadás, rugalmas vagy rugalmatlan neutronszórás,  $(n, 2n)$  reakció stb. Rajtuk kívül ebben a tagban vesszük még figyelembe a spontán hasadások vagy a korábbi hasadások termékei által termelt késő neutronokat és hasonlókat. A példa kedvéért felírjuk a rugalmas szóródásoknak megfelelő tagot:

$$\int_0^\infty dE' \int_{4\pi} d\Omega' \Sigma_s(E' \rightarrow E, \Omega\Omega') v' n(\mathbf{r}, E', \Omega', t), \quad (6)$$

ahol felhasználtuk a (3) alatt definiált rugalmas szórási magfüggvényt. Hasonló integrálokkal fejezhető ki a maghasadás, rugalmatlan szórás stb.

A neutronokra vonatkozó transzportegyenlet lényegesen egyszerűbb, mint például a töltött részecskékre vonatkozó hasonló egyenlet, mert nem kell figyelembe venni a neutronok közötti kölcsönhatást. Emiatt az egyenlet lineáris. A kvantummechanikán nevelkedett fizikusok számára viszont szokatlan, hogy a benne szereplő operátorok nem önadjungáltak. Ez különösebb matematikai nehézséget nem okoz, legfeljebb annyit, hogy a transzportegyenlet adjungáltját is meg kell oldani. Lényeges bonyodalom azonban, hogy az egyenletben szereplő hatáskeresztmetszetek és magfüggvények, valamint maga az egyenlet megoldása bizonyos energiákra és a reaktor bizonyos helyein  $E$ , illetve  $\mathbf{r}$  nagyon gyorsan változó függvénye. Ilyen jelenséget idéznek elő például a rezonanciák.

A transzportegyenlet – típusát tekintve – integro-differenciálegyenlet, hiszen egyesek fordulnak elő benne integrál- és differenciáloperátorok. Az utóbbiak helyettesíthetők integráloperátorokkal, tehát az egyenletnek van egy tisztán integrális alakja, de a fordított állítás nem igaz:

a transzportegyenletnek nincs tisztán differenciális alakja. Ennek oka abban rejlik, hogy a neutronszórásból és a maghasadásból kilépő neutronok energiája ugrásszerűen eltér a szóródó, illetve a hasadást kiváltó neutron energiájától, és ezt csak a (6)-hoz hasonló szerkezetű integráloperátorokkal lehet leírni. Amikor a szóró atommag tömege tart a végtelenhez, az energiaugrás zérushoz tart, így az integráloperátor jól közelíthető differenciáloperátorral. Ez azonban csak elvi lehetőség, mivel a reaktorban mindig vannak nagy szórási hatáskeresztmetszetű könnyű atommagok (például a víz hidrogénje).

A reaktorfizika alapfeladata a transzportegyenlet megoldása. Mivel a hatáskeresztmetszetek kísérletileg meghatározott, tehát csak numerikusan ismert függvények, a transzportegyenlet megoldására is csak numerikus módszerek jönnek szóba.<sup>11</sup> A korszerű számítógépek tulajdonképpen már lehetővé tennék a transzportegyenletnek minden lényeges matematikai közelítés nélkül való numerikus megoldását. Egy kis jóindulattal kijelenthetjük, hogy ilyen program létezik is: ez az MCNP nevű Monte Carlo program, amely számítógépen szimulálja a neutronoknak a reaktor belsejében való véletlenszerű mozgását. Ha elegendően sok neutron mozgását, eltűnését, keletkezését követjük nyomon, bármilyen kívánt pontossággal előállíthatjuk az egyenlet megoldását. (Legfeljebb hónapokig kell futtatni a programot.) A reaktorfizika számos feladatát megoldhatjuk ezen a módon – különösen akkor, ha nem szeretünk sokat gondolkodni. A gyakorlatban azonban nem nélkülözhetjük azokat a megoldási módszereket, amelyek a transzportegyenlet *közelítő megoldására* törekednek. Vannak ugyanis problémák, amelyek csak nagyon körülményesen vagy egyáltalán nem kezelhetők Monte Carlo szimulációval.

A reaktorfizika első évtizedeiben (az 1950–1970-es években) a számítógépek teljesítménye messze elmaradt attól, hogy a transzportegyenletet eredeti alakjában tudjuk megoldani. Emiatt a neutronoknak a keletkezéstől az eltűnésig terjedő élettörténetét szakaszokra bontottuk, és mindegyikre külön (közelítő) elméletet és számítógépi programot hoztunk létre. Így születtek meg a reaktorfizika egyes fejezetei: *neutronlassulás, termalizáció, diffúzióelmélet, szabályozórudak elmélete*. Ezekről külön tárgyaltuk az időfüggő jelenségeket (*reaktorkinetika*), valamint a *kiégést*, vagyis az urán fogyását és a transzuránok, meg a hasadási termékek felhalmozódását. Mindegyik részfeladatra külön számítógépi programok születtek, és a konkrét feladatokat ezek sorozatban való futtatásával oldottuk meg. Ahogy a számítógépek kapacitása nőtt, a programok sorozatban való használatát automatizáltuk, de a programrendszer alapelve hosszú ideig alig változott.

A részfeladatokra való bontás a *reaktorfizikai alaptételek* nevezett megfigyelésen alapult: a transzportegyenlet megoldása homogén reaktorban és időtől független esetben a hely- és a többi változó szerint szeparálható:

$$n(\mathbf{r}, E, \Omega) = n(\mathbf{r}) \psi(E, \Omega). \quad (7)$$

<sup>10</sup> A transzportelmélet makroszkopikus hatáskeresztmetszetekkel dolgozik, amelyek a mikroszkopikus hatáskeresztmetszetek és a térfogategységben található atommagok számának a szorzatai.

<sup>11</sup> Analitikus megoldása csak kivételesen egyszerű, idealizált esetekben ismert.

Kritikus állapotban levő reaktorokban kísérletileg részletesen igazolták, hogy ez homogén tartományokon belül, határfelületektől elegendően távol érvényes. A  $\Psi(E, \Omega)$  energiaspektrum meghatározására szolgál a lassuláselmélet és a termalizáció. Mivel a (7) összefüggés a határfelületektől távol, aszimptotikusan érvényes, ezek az elméletek az *aszimptotikus* jelzőt viselik. Kiküszöbölik a helyváltozót ( $\mathbf{r}$ ) és a neutronirányt ( $\Omega$ ), így az energiaspektrumot az egyedül maradt  $E$  változó finom beosztású értékeire ki tudjuk számítani. Ehhez szükség van a hatáskeresztmetszetek energiafüggésének részletes ismeretére. Az  $n(\mathbf{r}, E, \Omega)$  neutronirányúságnak a helyváltozótól való függését viszont az  $E$  változónak csak meglehetősen durva beosztása mellett tudjuk meghatározni: a (0–20 MeV) intervallumot legfeljebb négy (esetleg hat) részre oszthatjuk fel. Egy ilyen részintervallumba eső neutronok összességét *neutroncsoportnak* nevezzük. Rájuk vonatkozóan átlagoljuk a hatáskeresztmetszeteket:

$$\Sigma_k = \frac{\int_{E_k}^{E_{k-1}} \Sigma(E) \int_{4\pi} \Psi(E, \Omega) d\Omega dE}{\int_{E_k}^{E_{k-1}} \int_{4\pi} \Psi(E, \Omega) d\Omega dE}, \quad (8)$$

amelyeket *csoportállandóknak* nevezünk ( $k = 1, 2, 3, 4$ ). A  $\Sigma$  jelölés tetszőleges fajta hatáskeresztmetszetet jelenthet (abszorpció, hasadás stb.). A

$$\Phi_k = \int_{E_k}^{E_{k-1}} \int_{4\pi} v n(\mathbf{r}, E, \Omega) d\Omega dE$$

*csoportfluxusokra* vonatkozóan a transzportegyenlethez – bizonyos elhanyagolások árán – le lehet vezetni a *diffúzióegyenletet*, amelyet (elvileg) tetszőlegesen bonyolult geometriájú reaktorra numerikusan meg lehet oldani. A megoldás ismeretében kiszámíthatjuk a reaktorban lejátszódó valamennyi reakció gyakoriságát, tehát nyomon követhető a transzuránok és a hasadási termékek felhalmozódása.<sup>12</sup>

Az elmondottakból következik, hogy a neutronlassulás és -termalizáció aszimptotikus elmélete szolgál a diffúzióegyenletben felhasznált csoportállandók számítására. Itt rögtön látszik egy ellentmondás: a diffúzióegyenlet éppen arra szolgál, hogy az aszimptotikus elmélettől való eltéréseket leírjuk, viszont benne az aszimptotikus elmélettel számolt csoportállandókat használunk fel. Ennek ellenére már az 1970-es években meglepően pontos eredményeket szolgáltató programrendszerek voltak használatban. Természetesen a reaktorfizikusok igyekeztek ettől az ellentmondástól megszabadulni, amint egyre nagyobb számítógépek álltak rendelkezésre. Például a Magyarországon kifejlesztett programrendszer a határfelületek közelében tértől füg-

gő csoportállandókkal dolgozik. A megnyugtató megoldás persze az lenne, hogy a diffúzióegyenletet sok energiacsoporttal oldanánk meg, hiszen ekkor a lassulást és a termalizációt ugyanaz a program írná le, amely a diffúzióegyenletet is megoldja. Ilyen hatalmas program még nem létezik, bár a modern számítógépek már azon a határon vannak, hogy ezt lehetővé tegyék. Nem lehet kétséges, hogy egy ilyen „szuperprogram” legkésőbb egy évtizeden belül meg fog születni. Az is bizonyos azonban, hogy csak lassan fog tudni a jelenlegi programrendszerek helyébe lépni. Ennek oka a gyakorlati alkalmazások természetében rejlik. E cikk befejezéséül ezt vizsgáljuk meg közelebbről, és ebből az is ki fog derülni, merre kell a mag- és reaktorfizikának továbbfejlődnie – legalábbis e sorok írója szerint.

## A továbblépés problémái

Egy reaktorfizikai számítás pontossága három dolog pontosságától függ:

- a transzportegyenlet megoldására használt *program*,
- a számításban felhasznált *magfizikai adatok*,
- *technológiai adatok*.

Az első két dologról már volt szó, de a technológiai adatokról még nem. A számítás bemenő adatai a reaktor anyagi összetételére és geometriai szerkezetére vonatkozó adatok. A nukleáris üzemanyag dúsítása, sűrűsége, a fűtőelempláncák méretei, egymástól való távolságuk, a vízben oldott bórsav koncentrációja és sok hasonló dolog gyári, illetve üzemviteli adat. Mindennek a pontosságára a reaktorfizikusnak nincs befolyása.<sup>13</sup> Hasonlóan nincs befolyása a magfizikai adatok pontosságára sem. A magfizikusok szolidárisabbak, mint az üzemanyaggyárok: ha szükséges, az adatokat időnként újra megméri, és így egyre pontosabb adatkönyvtárak jelennek meg. A reaktorfizikában természetes törekvés, hogy a programok számítási hibája lényegesen kisebb legyen, mint a másik két bizonytalanságnak a hatása. A számítási hiba ugyanis *szisztematikus*, viszont a magfizikai és a technológiai adatok bizonytalansága *statisztikus* természetű. Mindkét fajta hatást számszerűsíteni kell, különben a számítások a gyakorlatban használhatatlan eredményeket adnak. Ezt a kérdést közelebbről is megvizsgáljuk.

Tekintve, hogy az atomerőművek tervezése és üzemvitelének számításokon alapul, a biztonság mindent megelőző követelményéből következik, hogy mind a számításra felhasznált eszközöket (programokat és adatkönyvtárakat), mind magukat az egyes számításokat ellenőrizni kell. Ez azt jelenti, hogy csak *validált* eszközök használata jöhet szóba. A „validálás” az utóbbi időben divatba jött szó. Mivel értelmét sokan félreértik, érdemes pontosan megmondani, mit értünk validáláson: *a használt eszközök megfelelő voltának hatósági érvényű igazolása*. A validálásnak természetesen része az eredmények pontosságá-

<sup>12</sup> Ezeknek az izotópoknak a megjelenése megváltoztatja a makroszkopikus hatáskeresztmetszeteket, tehát visszahat a transzportegyenletre, amely ettől kis mértékben nemlineárisá válik. Helyhiány miatt további részleteit nem tárgyaljuk.

<sup>13</sup> Legfeljebb zúgolódhat, hogy – például – miért nem kisebbek a fűtőelemgyár tűrései.

nak a becslése is. Az erőmű üzemeltetőjének nincs joga más eszközt használni, mint amelyet a biztonságot felügyelő hatóság validáltnak ismer el.<sup>14</sup> A dolgnak van egy másik oldala is: a hatóságnak nincs joga a használt eszközöket vitatni, legfeljebb azok helyes használatát ellenőrizheti. Miután a validált eszközökkel egy művelet megterveztek (például az üzemanyag átrakását és a reaktor újraindítását), még mindig marad egy hibaforrás: a reaktor nem felel meg annak, amit a tervezéskor feltételeztek. Ennek kiszűrésére szolgálnak az *üzemviteli mérések*. Egy sor számolt mennyiséget a működő atomerőműben megmérnek, és ha a mért és számított mennyiségek eltérése a számítási pontosságon kívül esik, a művelet nem folytatható tovább. Hangsúlyozzuk: a számított és a mért adatok összevetésének nem a számítási modell ellenőrzése a célja, hanem itt már magát a reaktort ellenőrzik, megfelel-e annak, amit a tervezők feltételeztek. Például elvileg előfordulhat, hogy két fűtőelemköteget összecserélnek. Az ilyen természetű hibát az üzemi mérések ki tudják mutatni, ha a tervezésben validált eszközöket használtak.

Egy programrendszer és adatkönyvtár validálása költséges és bonyolult feladat. Először a *számítási hibát* kell ellenőrizni: a validálandó programok eredményeit nagy pontosságú, úgynevezett *precíziós programok* eredményeivel vetik össze. Ha mindkét számításban azonos magfizikai adatokat használtak fel, az eltérések felvilágosítást adnak a számítási hibáról. Ez az oka annak, hogy a gyakorlati célokra szolgáló programoknál lényegesen pontosabb reaktorfizikai programokra is szükség van. Tulajdonképpen erre a célra jöttek létre a Monte Carlo módszeren alapuló programok. Sokan ma is úgy gondolják, hogy a precíziós programokat minden feladatra fel lehet használni. Ez két okból sincs így: egyrészt a számítási idő nagyon hosszú, másrészt a precíziós programok csak idealizált, a gyakorlat igényeitől messze eső problémákra használhatók. Talán az egyetlen kivétel a már említett MCNP, amelynek kitűnő, professzionális szerzői a gyakorlati felhasználás igényeit is képesek voltak figyelembe venni.

A validálás másik fázisa a *reaktorfizikai kísérletek* eredményeivel való összevetés. Erre a célra az elmúlt évtizedekben kisebb-nagyobb kísérleti programokat hajtottak végre, amelyek célja az elképzelt reaktortípusok reaktorfizikai modellezése volt. Tulajdonképpen minden, ma alkalmazott erőműtípushoz tartozott egy modellkísérlet. Mivel a méréseket olyan kis teljesítményen végezték el, hogy elhanyagolható legyen az üzemanyag felaktiválódása, ezeket a berendezéseket *kritikus rendszereknek* vagy *zérusteljesítményű reaktoroknak* nevezzük. A mérések célja olyan kísérleti adatok létrehozása, amelyek alkalmasak az adott típushoz használt számító programok és adatkönyvtárak validálására. A dolog lényegéből következik, hogy a kritikus rendszerek általában nagy gonddal megépített berendezések, hiszen csak így lehet biztosítani, hogy a rajtuk kapott mérési eredmények bi-

zonytalanságát a lehető legkevésbé befolyásolják a kritikus rendszer technológiai bizonytalanságai. A validálás azt igényli, hogy a méréseket ne csak azon a fűtőelemrácson végezzék el, amely az adott típusú atomerőműben meg fog valósulni, hanem attól eltérőkn is. Így lehet a számítási modell érvényességi határait megbízhatóan kijelölni. Emiatt e modellkísérletek némelyike meglehetősen nagyszabású és költséges volt.

A kritikus rendszereken kapott mérési eredményeket összevetjük azok számított értékeivel. Az üzemviteli mérésekkel szemben most a feladat a számítási modell ellenőrzése. Ha ismert a számítás hibája, az elemzés ki tudja mutatni a magfizikai adatok pontatlanságainak a hatását is. A gyakorlatban a rendelkezésre álló adatkönyvtárak közül így tudjuk azt az egyet kiválasztani, amellyel az adott reaktortípusra a legpontosabb eredményeket lehet kapni. Ha a mért és számított eredmények eltérése a kívánt határokon belül marad, a modell validáltnak tekinthető – a vizsgált mennyiségek számítására.<sup>15</sup>

Ezen a ponton tudunk a korábban feltett kérdésre válaszolni. A validálás során feltártul bizonytalanságok miatt az atomerőművek teljesítménye nem érheti el a biztonságos felső határt. A tényleges teljesítmény úgy adódik, hogy a biztonságos felső határt elosztják egy biztonsági tényezővel, amely a következő négy dolog bizonytalanságát fejezi ki: 1) reaktorfizikai számítások és magfizikai adatok; 2) a biztonságos felső határ ismerete; 3) technológiai adatok; 4) üzemviteli mérések. Amikor a paksi atomerőmű 1982-ben elindult, ez a tényező 1,5 volt, amelyen belül az 1) szerinti bizonytalanságot egy 1,10 értékű tényezővel vették figyelembe. Azóta a paksi reaktorok 7–8%-kal nagyobb teljesítményen járnak, amit az tett lehetővé, hogy a hazai kutatások a fentiek közül az 1), 2) és 4) hibaforrás hatását csökkentették. Nagyon durva becsléssel ez évi 20–30 milliárd forint értékű többlet villamos energiát jelent, amiből a magfizikai adatok pontosságának a javulása körülbelül 2–3 milliárd forintot hozott. Aki ismeri, mibe kerültek a hazai atomenergia-kutatások, könnyen beláthatja, hogy ezek költségei egy-két év alatt megtérültek Pakson.<sup>16</sup> Ha pedig azt kérdezzük, hogy a magfizikusok erőfeszítései világszinten mit hoztak, a megtakarítás évente körülbelül egy milliárd dollárra becsülhető.

Egy évtizeden belül várhatóan új típusú atomerőművek fognak épülni, amelyekhez – a korábbiakhoz hasonlóan – szükség lesz validált számítási programokra és adatkönyvtárakra. Az elmúlt ötven évben több száz kritikus rendszeren folytak mérések, amelyek validálásra alkalmas mérési adatokat szolgáltatottak. Ezek a kísérleti programok többnyire a vezető országok nemzeti laboratóriumaiban történtek, tehát az általuk felemésztett hatalmas költségeket a *kormányok* fedezték. Ha a jövőben ilyen kísérleteket végeznek, azokat elsősorban a *magántőkének* kell majd finanszíroznia, ugyanis az új

<sup>14</sup> Belső használatra természetesen azzal dolgozik, amit jónak lát, de a hatóságnál előterjesztett elemzések csak validált eszközökkel készülhetnek.

<sup>15</sup> Amit itt a validálásról leírtunk, egy idealizált követelmény csupán, ritkán valósul meg ebben a formában.

<sup>16</sup> A hazai kutatások a nemzetközi erőfeszítéseken alapulnak, tehát nem mindent mi találtunk ki, amit Pakson alkalmaztunk, de azért elég sok mindent kitaláltunk!

reaktorokat már magánvállalatok fogják tervezni és építeni. Eszerint aligha valószínű, hogy sor fog kerülni a korábbiakhoz hasonló számú és léptékű kísérletekre. Valószínűleg csak kivételesen lesz ilyesmire szükség. A korábbi kísérleti programok ugyanis olyan nagy mennyiségű kísérleti adatot produkáltak, hogy az esetek többségében az új típusok validálási igényeit is ki tudják elégíteni. Ez persze csak akkor lesz így, ha ezek a mérési eredmények kellő részletességgel dokumentálva rendelkezésre fognak állni. Sajnos nem ez a helyzet. Az elmúlt ötven év a katonai szembenállás és titkolódzás korszaka volt, amikor az ilyen természetű adatokat nem hozták nyilvánosságra. Az 1990-es években indult egy nemzetközi összefogás abból a célból, hogy a korábbi kísérleteket értékeljük, és a kellően jól dokumentált, valamint kielégítő pontossággal elvégzett kísérletek eredményeit a jövőben várható felhasználásuk érdekében megőrizzük. Öröndetes, hogy itt már nyoma sincs a korábbi titkolódzásnak. A tapasztalat azt mutatta, hogy a kísérleteknek egy jelentős részéről dokumentációs vagy minőségi kifogások miatt le kell mondani. Körülbelül 250 kísérleti program ütötte meg a kívánt szintet, és folyamatban van eredményeik értékelése. A programok zöme az Egyesült Államokban, Franciaországban, Japánban, Nagy-Britanniában, Oroszországban és Magyarországon történt. Mi magyarok az 1972 és 1990 között a KFKI-ban működő ZR-6 kritikus rendszeren nemzetközi keretek között végrehajtott kísérleti programra való tekintettel kaptunk meghívást ebbe a munkába. Talán nem érdektelen a magyar olvasó számára, hogy a többiekkel összehasonlítva kiderült, hogy ez a mérési program a többi országok programjai közül mind az eredmények minőségét, mind a megvizsgált reaktorkonfigurációk számát tekintve kiemelkedő.

## Egyéb feladatok

Az eddigiekben áttekintettük az atomerőművek által igényelt mag- és reaktorfizikai feladatokat. Ezek természetesen csak a feladatok egy részét jelentik. Befejezésül még kettőt említünk meg, amelyek mindegyikéről egy-egy hasonló cikket lehetne írni.

- A reaktor kielégítő hűtése a reaktorbiztonság legkritikusabb feltétele. Amikor egy reaktort megterveznek, először a hűtését optimalizálják, és csak ezt követheti a reaktorfizikai tervezés. Az itt felhasznált alaptudomány az áramlás- és hőtan speciális ága, a termohidraulika. Az atomerőmű teljesítményének fent említett biztonságos felső korlátját elsősorban termohidraulikai elemzéssel lehet meghatározni. A reaktorfizikához hasonlóan szükség van egy validált termohidraulikai számítógépi programrendszerre is, amellyel igazolni lehet, hogy a reaktor mind normálüzemben, mind baleseti körülmények között eleget tesz a biztonsági követelményeknek. E programok validálásához szintén modellkísérleteket kellett végezni. Ezek bonyolultsága és költségei felülmúlták a reaktorfizikai kísérletekét. A termohidraulika jelentős részben már a műszaki tudományok területére esik. Mindenesetre a reaktorfizikai és a termohidraulikai számítási modell csak kompromisszumok árán választható szét egymástól, hiszen bizonyos problémák tárgyalásához (például egyes balesetek elemzéséhez) csatolt reaktorfizikai-termohidraulikai programra van szükség.

- A reaktor üzemének a biztonságát egyértelműen minősíti a reaktorban dolgozó személyzetet és a környező lakosságot érő sugárzás dózisa. Az ezzel foglalkozó sugárvédelem tudománya a fizika és a biológia határterületére esik. Sajnos – helyhiány miatt – az itt felmerülő problémák áttekintésétől is le kellett mondanunk.

## FIZIKA ÉS A MINDENNAPI ÉLET

Jéki László  
KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

Mit köszönhetünk a fizikának a mindennapokban? A tömör és nem is nagyon túlzó válasz az lehetne, hogy életünk alapvetően más lenne, ha nem használhatnánk a fizikai felismerésekre alapozott eszközöket, módszereket. A részletes érdemi válasz, a fizikatörténet egészének áttekintése viszont köteteket töltene meg. Marad a közbenső megoldás, csak a XX. század fizikai felfedezéseinek hatásaiból mutatunk be példákat, a teljességre törekvés nélkül. Választásunk mellett szól, hogy a XX. századot joggal szokták a fizika századának nevezni. Csak itt emlékeztünk rá, a példánknál már nem térünk ki arra, hogy milyen szerepet játszottak más tudományok, a műszaki fejlesztés abban, míg egy fizikai törvényre alapozva új eszköz született, terjedt el. Természetes, hogy az eszközzé formálásban döntő volt a mérnöki tudományok szerepe, és esetenként az eredmény elválaszthatatlan a matematika, a kémia és más tudományok közrehatásától. Egyetemista korunkban azzal bosszantattuk a kémia szakos hallgató-

nőket, hogy nem az övék az elemek periódusos rendszere, mert atomfizika nélkül nem érhető meg a felépítése. Az ilyen vitákat itt elkerüljük, amelyek különben „gyerekesnek” tekinthetők.

Új eszközök és eljárások úgy is születtek, hogy a műszaki csúcsteljesítménynek a fizikai kísérletek voltak a „megrendelői”, ez is a XX. század újdonsága volt. Elegendő itt a részecskefizikai kutatásokat szolgáló gyorsítók és detektorok kapcsán felmerülő igényekre (mágneses tér, vákuum, adatgyűjtés és feldolgozás stb.) vagy az űrkutatás különleges követelményeire emlékeztetni. A NASA amerikai űrügynökség közel 30 éve minden évben kiadványt jelentet meg a legújabbban „földre hozott” kutatás-fejlesztési eredményekről. Néhány példa a 2002-es kötetből: szívátültetéskor használható pumpa, csontritkulást mérő műszer, levegő- és víztisztító berendezések, új számítógépes eljárások és szoftverek, megnövelt határfokú napelemek, környezetbarát légyirtó szer.

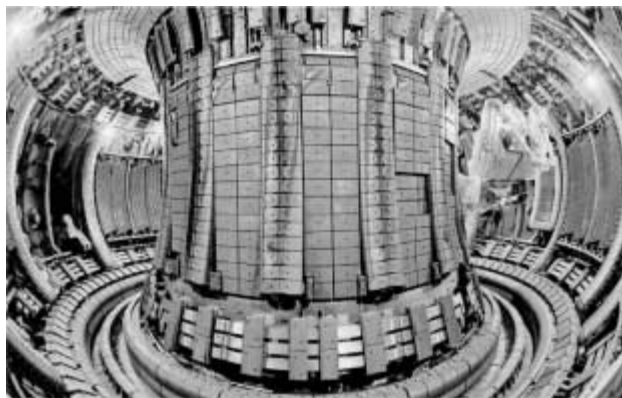
Három területről hozunk példákat: energiaellátás, egészségünk, elektronika. A lézer példáján mutatjuk meg, hogy egyetlen eszköz milyen széles körben fejt ki társadalmi hatást. Végül kísérletet teszünk arra, hogy a közeljövő néhány eseményét előre jelezzük.

## Energiaellátás

A modern élet jelentős energiafogyasztással jár együtt. Egyre újabb és újabb energiafogyasztó eszközök szolgálnak bennünket. A fejlett világban ma már minden háztartásban van fűtés, világítás, tűzhely, hűtőszekrény, mikrohullámú sütő, rádió, televízió, telefon, videó, ezek mindmind energiát fogyasztanak. Az újabb készülékek ugyan kevesebbet fogyasztanak, mint a régebbiek, de összességében az energiafogyasztás nő. Óriási új igényt támaszt a fejlődő országok felzárkózása. A háztartások elsősorban villamos energiát fogyasztanak. A villamos energia felhasználása a XX. században terjedt el, de az alapeszközök (gőzturbína, turbógenerátor), a létrehozásukat megalapozó fizikai felfedezések a XIX. században születtek meg, így kívül esnek írásunk keretein.

A világ villamosenergia-termelésének 15–17%-át *atomerőművek* szolgáltatják, Magyarországon az arány közel 40%. A fejlődés üteme szédületes volt: 1938-ban fedezték fel az atomenergia felszabadításának lehetőségét, az atommaghasadást, 1942-ben elkészült az első atomreaktor, az 1950-es évektől sorozatban épültek az ipari atomerőművek. A tájékozatlan közvélemény később az atomerőművek ellen kezdett fordulni, ehhez hozzájárult két komoly baleset is (Three Mile Island és Csernobil). (Ügyes szélhámósok olyan atomáram-szeperátort árusítottak, amely a konnektorból nem enged ki az atomerőművekből származó áramot, a más eredetűt viszont igen!) Az atomenergia-ipar rengeteget tett az atomerőművek biztonságának fokozásáért, továbbra is épülnek új erőművek, elsősorban Ázsiában. Európában és Észak-Amerikában egyelőre sorra meghosszabbítják az atomerőművek élettartamát, a közvélemény hangulata is kezd megfordulni. A globális klímaváltozás veszélye felértékeli az atomerőműveket, mivel egyáltalán nem bocsátanak ki üvegházhatást okozó gázokat.

A nukleáris energiatermelés, az uránciklus legkevésbé megoldott eleme az erősen radioaktív hulladékok kezelése. Az atomerőművek kiégett fűtőelemei jelentős mennyiségű plutóniumot, transzurán elemeket és más, a környezetre veszélyes hosszú élettartamú hasadási terméket tartalmaznak. Intenzív neutronnalábbal besugározva ezek elhasadnak, átalakulnak, a hosszú felezési idejű izotópok rövidebb felezési idejűvé alakulnak át, ezzel lényegesen csökkenthető a nukleáris hulladékoktól származó környezetszennyezés veszélye. Neutrontermelésre a spallációs folyamat használható fel, lineáris részecskegyorsítóban nagy energiára felgyorsított protonokkal bombázott nehézfémek sok neutronot bocsátanak ki. A laboratóriumi kísérletek sikeresek voltak, ipari méretű alkalmazás a 2010-es években várható. Lézerekkel is valósítottak meg transzmutációt, a 15,7 millió éves felezési idejű jód-129 izotópot 25 perc felezési idejű jód-128 izotóppá alakították



1. ábra. A JET toroidja

át. A radioaktív bomlás ütemét, a felezési időt is sikerült már megváltoztatni, a berillium-7 izotóp felezési idejét 1%-kal csökkentették. Az elektronbefogást követő bomlás üteme függ az atomi elektronok atommagon belüli sűrűségétől. A kísérletben 60 atomos szénmolekulába (buckminsterfullerén) zárták a berillium-7 atomokat. Egyelőre nyitott kérdés, hogyan lehetne nagyobb változásokat előidézni a felezési időben, elképzelhető, hogy rendkívül nagy nyomás is felgyorsítaná az elektronbefogást.

Az atomenergia felszabadításának másik lehetősége a *könnyű elemek szabályozott fúziójának megvalósítása*, ennek kutatása már több mint ötven éve folyik. Ezalatt kikristályosodtak a legígéretesebb technikai megoldások: a tokamakban mágneses térrel tartják össze a plazmát, a lézeres fúziónál parányi üzemanyagcseppeket robbantanak fel lézernyalábokkal. Az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb tokamakokat építettek, fokozatosan közelítenek az erőművi reaktor méreteihez. 1991-ben a közös európai tokamaknál (JET) valósítottak meg először szabályozott fúziót (1. ábra). A fejlesztőmunka olyan költségessé vált, hogy világméretű nemzetközi összefogásra van szükség. Az ITER nemzetközi termonukleáris kísérleti reaktor megépítését jelenleg a helyszín körüli politikai viták hátráltatják. A tengervíz deutériumtartalma beláthatatlan távlatokra, évmilliárdokra biztosíthatja a világ energiaellátását.

A *megújuló energiaforrások* között fontos szerepe van a napenergia hasznosításának. A fényelektromos jelenséget hasznosító szilícium napelemek még nem játszanak meghatározó szerepet az energiaellátásban. Elterjedésük ugrásszerűen megnöhetne, ha új anyagokkal sikerülne az átalakítást a mainál jobb hatásfokkal megoldani. Az űrkutatásban használt napelemtáblák anyaga más (germánium), ezek hatásfoka jobb, viszont jóval drágábbak.

Az erőművekben megtermelt villamos energia csak komoly hálózati veszteséggel jut el a fogyasztókhoz. Megoldást jelenthet a szintén a XX. században felfedezett *szupravezetés*. A széles körű gyakorlati alkalmazásnak egyelőre az szab határt, hogy az eddig megismert szupravezető anyagok csak alacsony hőmérsékleten szupravezetők. A jelentős hűtésigény miatt a szupravezetés csak különleges alkalmazásokra talált: erős mágneses tér előállítására alkalmazzák nagy részecskegyorsítóban, a kísérleti lebegő mágnesvasútakban. A hétköznapi életben az orvosi diagnosztikában, az MRI-berendezésekben találkozhattunk szupravezetővel.

## Egészségünk

Az orvostudományhoz adott legnagyobb, felbecsülhetetlen értékű hozzájárulásnak a *röntgensugárzás* felfedezését tarthatjuk. Először nyílt lehetőség arra, hogy az élő szervezet belsejéről kapjunk képet, kihasználva azt, hogy a különböző szövetek eltérő mértékben nyelik el a röntgensugarakat. Az évtizedek során kis lépésekben sokat fejlődött a röntgentechnika, a korszerűsített gépekkel egyre kisebb sugárterhelés mellett készültek a felvételek. Nagy áttörést jelentett a röntgentechnika és a számítástechnika összeházasítása, a *komputeres tomográfia* (CT) megalkotása. Az új eljárás megkönnyítette a test belsejében való térbeli tájékozódást, a korábbi képalkotó eljárások számára elérhetetlen területeket is vizsgálhatóvá tett.

Különleges eljárás a *magrezonanciás képalkotás* (MRI), az alapjául szolgáló fizikai jelenség, a nukleáris mágneses rezonancia (NMR) hosszú ideig a fizikusok, kémikusok egyik vizsgálati módszere volt. Az MRI erős mágneses térben rendezett állapotba juttatott protonok energiaállapotuk megváltoztatása, majd a külső hatás megszüntetése után energiát sugároznak ki, ebből a szövetek kémiai összetételére, mindenekelőtt víztartalmára lehet következtetni. Az MRI-ben, a CT-hez hasonlóan, számítógép dolgozza fel az adatokat. Jól elkülöníthetők a gyulladáshoz, daganatos vagy más, nem egészséges szövetek. Ma az MRI a legalkalmasabb az agy és a gerincvelő rendellenességeinek kimutatására.

A röntgen- és MRI képalkotó eljárások mellett a *fizika a radioaktív sugárzások felfedezésével, alkalmazásával adott jelentős segítséget az orvostudománynak*. Diagnosztikai és terápiás célokra egyaránt alkalmazzák a sugárzásokat. Nyomjelzéses technikával, a sugárzó izotópot megfelelő molekulákhoz kötve gamma-kamerával kimérhető az izotópok testen belüli eloszlása. Különleges képalkotási eljárás a *pozitronemissziós tomográfia* (PET). Rövid felezési idejű, rendszerint a vizsgálat helyszínén, ciklotronban előállított pozitronsugárzó izotópot juttatnak a szervezetbe. Ahol a pozitron elektronnal találkozik, onnan két gamma-kvantum repül szét, ezt detektálják. Daganatok, szívizombetegségek, az agyműködés felderítésében játszik fontos szerepet.

A radioaktivitás felfedezése után hamar nyilvánvaló vált, hogy a sugárzások károsítják a szervezetet, ma már tudjuk, hogy az örökítő anyagban, a DNS-ben okoznak elváltozásokat. A *sugárzásokat ezért már régóta sikeresen alkalmazzák rosszindulatú daganatok elpusztítására*, az 1920-as években már kiterjedten alkalmazták a rádium erős gamma-sugárzását. A terápiás célra alkalmazott sugárzás származhat röntgensugárból, részecskegyorsítóból, sugárzó izotópból (kobaltágyú). Széles körben röntgen-, gamma- és elektronbesugárzást alkalmaznak. Előrehaladott kutatások folynak nehezebb részecskék (felgyorsított protonok, atommagok) felhasználására, ezek a daganatos szövetek hatékony elpusztítása mellett kevésbé károsítják az egészséges szöveteket.

*Radioaktív sugárzásokkal csírámentesítenek élelmiszereket*, elsősorban trópusi gyümölcsöket, halakat, de kiterjedten alkalmazzák a mérsékelt égövben is fűszerek, húsok baktériumszennyezéseinek elpusztítására. Az eljárás-

rással javul az élelmiszerek eltarthatósága, nő az élelmszerbiztonság. Az élelmszerbiztonság témájához tartozik a *hűtőszekrények, mélyhűtők* megjelenése a háztartásokban, a mélyhűtött élelmiszerek kereskedelmének elterjedése.

*Sugárzással sterilizált hím rovarok kibocsátásával* sikeresen küzdöttek le olyan gyümölcslegy és húslégy kártevőket, amelyek komoly károkat okoztak a melegabb égöv országainak állat- vagy növényvilágában. Ugyanezzel a módszerrel küzdenek Afrikában az álomkört terjesztő cecelegyek ellen is.

## Elektronika

A XX. század elejéig az információtovábbításra két bevált eszköz állt rendelkezésre, a levél és az újság. Ezek ma is léteznek, de van már *rádió, televízió, hanglezem (CD), magnetofon, videó (DVD), telefon (mobil), internet*. A távközlésben egyre nagyobb szerepet kapnak a műholdak, terjednek a vezeték nélküli információtovábbítási megoldások. A XX. századnak ezek a termékei elválaszthatatlanok a század fizikájától, a korszerű eszközök elterjedése mindenekelőtt a kvantumfizikának köszönhető.

Tévénézés közben bizonyára nem gondolnak arra, hogy a képcső őse, a katódsugárcső a XIX. század végén, a XX. század elején a fizikusok kedvelt kísérleti eszköze volt. Katódsugárcső-kísérletek során fedezték fel például az elektront és a röntgensugárzást. A gázkisülések tanulmányozása vezetett el a *fénycsövek* megalkotásához. Ezek a reklámfeliratok mellett mostanában a háztartásokban kapnak szerepet, mert sikerült nagyon energiatakarékos megoldásokat kifejleszteni. Az *elektroncsövek* megszületése is ebbe a körbe tartozik. Megalkották a két-elektrodás diódákat, a háromelektrodás triódákat, elkezdődhetett az elektronikai eszközök építése. A hétköznapi szempontjából a legfontosabb a rádió megjelenése volt. Az 1950-es évektől megjelenő *félvezető eszközök* a képcsövek kivételével kiszorították a hétköznapiakból az elektroncsöveket, de különleges alkalmazásaik megmaradtak. Ilyen alkalmazások a mikrohullámú csövek, a magnetron a mikrohullámú sütő lelke.

A XX. század második fele hozta el a félvezető eszközök megjelenését, diadalmas térhódítását. 1948-ban született meg a *tranzisztor*. A fizikai kutatás rohamléptekkel tárta fel a félvezető anyagok, mindenekelőtt a szilícium tulajdonságait. Kidolgozták a félvezető eszközök gyártásának technológiáját. Hatalmas lépésekkel haladt előre a miniatürizálás, adott nagyságú felületre egyre bonyolultabb, egyre több funkciót ellátó áramköröket építettek. Ma is érvényes a mikroáramkörökre 1964-ben kimondott Moore-törvény: másfél év alatt továbbra is megduplázódhat az adott nagyságú felületre építhető mikroelektronikai elemek száma. Még legalább 10 évig biztos a jövője a szilíciumalapú chipgyártásnak.

Közben megszületett a *számítógép*, az elektroncsövek szerepét itt is hamar átvették a félvezető eszközök. Megindult a méretek csökkenése, a számítási teljesítmény pedig ezzel párhuzamosan növekedett. A közelmúlt eseménye a *személyi számítógépek* (PC) hétköznapivá válása, elterjedése. Hétköznapivá vált a számítógépeket összekö-

tő világbáló, az internet is. Első változatában csak elektronikus levelek és adatok továbbítására volt alkalmas. Az áttörés, a multimédiás, az információkeresést lehetővé tevő *world wide web* egy részecskefizikai kutatóközpontban, a CERN-ben született meg. A CERN-ben épül a világ legnagyobb energiájú részecskegyorsítója, a Nagy Hadronütköztető (LHC). A részecskefizikai folyamatok részleteit rögzítő óriás detektorrendszerek a világon keletkező információ 1%-át kezelik majd! Ez az irdatlan információ-tömeg már nem kezelhető a jelenlegi módszerekkel, ezért dolgoznak a több ezer PC együttes munkáját lehetővé tevő GRID-rendszer megalkotásán. Előbb-utóbb valamilyen módon ez is hatással lesz majd hétköznapjainkra.

A felvevő eszközök miniaturizálása, a *programozható felvevő eszközök* megszületése, a számítógépek elemeinek a legkülönbözőbb eszközökbe való beépítése minőségi átalakulást hozott a használati tárgyakban. Jó példája ennek az egyre többre képes mobiltelefon, amely a hang- és szövegtovábbítás mellett már fényképez, küld és fogad képeket, rákapszolódik az internetre. Már körvonalazódik az „intelligens” ház lehetősége is. Hazafelé tartva távirányítással bekapcsolható a fűtés, elindítható a videó, a mikrosütő. Az intelligens hűtőszekrény számon tartja a benne tárolt élelmiszereket, önállóan rendel, ha valami fogytán van, és figyelmeztet a szavatossági idő lejártára. Intelligens robot intézi a takarítást, a mosógép is jóval okosabb lesz a maiaknál. A WC-ben automata elemzi a vizeletet, és figyelmeztet, ha orvoshoz kell fordulni. Egyetlen egységgel, kábeles összeköttetés nélkül vezérelhető lesz a ház valamennyi elektronikus eszköze. Szakértők szerint ez a jövő. Az a kérdés, hogy ebben a kényelmesebbé tett házban mire fordítjuk a felszabaduló időt, mit választunk ki a felénk áramló információözbönből.

## Lézerek mindenütt

Csak a szakemberek tudják felidézni, hogy ez a mindennapivá vált szó mit is jelentett eredetileg: fényerősítés a sugárzás indukált emissziójával. Még nincs ötven éve, hogy megalkották az első rubinlézert. Azóta a lézercsalád rendkívül sok taggal gazdagodott, színekben az elektromágneses spektrum széles tartományát fogják át a távoli infravöröstől a láthatón át az ultraibolyáig. Vannak folyamatos és impulzus üzemműek, fantasztikus rövid, femtoszekundumos impulzusokat is képesek már előállítani. A kibocsátott teljesítményben is széles a skála. A nagy választék sokféle alkalmazásra talált. Említettük már a jövő ígéretes energiatermelési módját, a lézerekkel kiváltott magfúziót. Alkalmazzák anyagok megmunkálására, vágásra, lyukasztásra, hegesztésre. Szembetegségeket kezelnek, műtenek vele, bőrdaganatokat és más bőrbetegségeket gyógyítanak lézerral. A távközlésben az optikai kábelekben lézerefény továbbítja az információt, ilyenek hozzák lakásunkba a telefont, az internetet. Sokféle mérőberendezés része, használják iránykitűzésre, fényselejtésre, nyomtatásra. Lézeres sebességmérő leplezi le a gyorsan hajtó autóst. A kis hordozható CD-lejátszóban éppúgy lézer működik, mint a boltokban a vonalkód-leolvasóban. A CD-íráshoz is lézert használnak. A fúzió-

hoz (és a katonai alkalmazásokhoz) szükséges igen nagy teljesítményű lézerek mellett készülnek egyre kisebbek is, a lézerek is megjelentek a nanotechnológia fejlesztési eredményei között.

## A közeljövő ígéretei: nanotechnológia, kvantumszámítógép

Ha a XX. század a fizika százada volt, akkor milyen szerep jut a fizikának a XXI. században? Valószínűleg nem kevésbé fontos. A kémia, a biológia, az orvostudomány, a mérnöki tudományok egyre nagyobb mértékben alkalmazzák a fizika módszereit, kutatási eszközeit. Az eredmények pedig egyre kevésbé lesznek egyetlen tudományághoz köthetők. Jó példa erre az alább röviden bemutatandó nanotudomány.

A közeljövőben várhatóan jelentős társadalmi hatást kiváltó eredmények közül önkényesen kettőt emelünk ki, a nanotechnológiát és a kvantumszámítógépet. Közös jellemzőjük, hogy megoldásaik a makro- és a mikrovilág határán mozognak, kvantumjelenségeket is hasznosítanak. A bemutatandó konkrét eredményeket nagyon rövid időszakból válogattuk, csak az elmúlt másfél évben született eredményekből idézünk. Ebből a néhány példából is látható, milyen fantasztikus tempóban születnek korábban elképzelhetetlennek vélt megoldások.

A *nanotechnológia*, a nanotudomány a XX. század végén bevezetett új fogalom. A 100 nm alatti mérettartományban az anyag megismerésére, a különleges tulajdonságok hasznosításával nanoméretű eszközök létrehozására és alkalmazására törekszik. Mélyreható technológiai forradalom indult meg, egyes atomokból, molekulákból építik fel a szerkezeteket. A pásztázó alagútmikroszkópok különböző típusai lehetővé teszik a nanovilág vizsgálatát, a felszíni atomok egyenkénti mozgatását. Nanoméretű szemcsékben arányaiban jóval több a felületen elhelyezkedő atomok száma, mint nagyobb méretekben. A 10 nm körüli méretek összemérhetőek az elektronok szabad úthosszával, ezért kvantumfizikai jelenségek lépnek fel. A nanométeres mérettartományban a fizika, a kémia és biológia határai egybemosódnak. A jelenlegi szakaszban a vizsgálati és előállítási módszerek fejlesztése zajlik, később mód nyílik néhány tízezer atomból álló, meghatározott feladatra megtervezett szerkezetek létrehozására. A legtöbb ismeret eddig a fullerénekről, közülük is a buckyballról és a nanocsövek tulajdonságairól gyűlt össze.

A *kvantumszámítógép* kvantumfizikai jelenségek felhasználásával működő új típusú számítógép, egyleg csak tervezet. Az információ alapegysége a qubit (quantum bit), állapotai kvantumállapotok, értéke 0 és 1 között bármi lehet, nemcsak egyetlen érték, hanem értékek szuperpozíciója. A számítások elvégzésére és az információ továbbítására több megoldást próbáltak ki: összecsatolódott fotonpárok, összecsatolódott Josephson-átmenetek, molekulák (pl. kloroform) mágneses térrel befolyásolt spinállapotai, láncmolekulák fényel befolyásolt spinállapotai. Összecsatolódott állapotba hoztak már egy iont és egy fotont, a párban az ion a helyhez kötött, számítást végző, a memória szerepét betöltő, míg a foton az információtovábbító. Meg-





2. ábra. Nanocsövek HRTEM képe

valósulása esetén különleges alkalmazási területeken érvényesülhetnek a kvantumszámítógép előnyei: keresés nagy adatbázisokban, információk titkosítása (kriptográfia). Megvalósíthatósága még kérdéses, legkorábban a 2010-es években várható. Problémát jelenthet többek között a mikrovilágban működő gép és a makrovilágban élő felhasználó között kapcsolat megvalósítása.

A kvantum-teleportálás elméletileg régóta ismert lehetőségét 1997-ben valósították meg először. Összecsatolódott részecskepárokat hoztak létre, például fotonokat keltettek lézerrel különleges kristályban. Sikeres kvantum-teleportálást valósítottak meg azonos részecskékként (két foton, két ion, két atom). Nagyobb tárgyak teleportálása, a sci-fi-történetek egyik kedvenc megoldása, ma megvalósíthatatlannak látszik.

Fontos lépés a kvantumszámítógép és a kvantuminternet létrehozásához: megoldották egyetlen foton szabályozott kibocsátását. Lézeres hűtéssel annyira lelassítottak egy kalciumiont, hogy mozgása mindössze egy 40 nanométer átmérőjű térrészre korlátozódott két erősen visszaverő tükrök között. Lézerrel gerjesztették az iont, amely erre egyetlen, 866 nm hullámhosszú fotont bocsátott ki. Egy nagy távolságot átfogó kvantumtávközlési rendszerben a helyi adatfeldolgozó optikai rendszereket optikai csatorna köti össze, a végpontokon ionok indítják, illetve fogadják a fotonokat, megvalósulhat az internet kvantumváltozata.

A mágneses rezonancia képalkotás és az atomerő-mikroszkóp kombinálásával technikai áttörést értek el: szilíciumminta belsejében észlelték egyetlen (!) elektron spinjét. A megoldás elvezethet a molekulák háromdimenziós szerkezetének feltárására képes mikroszkóp megépítéséhez, alkalmazást nyerhet kvantumszámítógépekben is.

Megoldották egyetlen, egy szigetelő felületén elhelyezkedő fématom töltésének a megváltoztatását. Feszültségimpulzussal a semleges atomból negatív töltésű iont csináltak, a folyamat megfordítható. Atomi kapcsolóként adattárolásra lehet majd használni.

Elektromossággal vagy fénnel mozgatható nanoszerkezeteket hoztak létre. A nanoszerkezet egyetlen fémkarborán-molekula, amely külső hatásra megváltoztatja az alakját. (A karboránok olyan boránok [bór-hidrogének], amelyekben két bóratomot szénatomok helyettesítenek.) A középpontban levő nikkelatom töltésállapotának megváltozására az egyik bórgyűrű elfordul. Az alkalmazási kör széles lehet: egyszerű ki/bekapcsoló, szelep, molekuláris memória.

Élő baktériumok is segítenek nanoáramkörök gyártásában. Egy hőtűrő baktérium egyik genetikailag módosított fehérjéje 10–20 nanométer átmérőjű, hatszögletes gyűrűkbe rendeződik. A szilíciumlapkára felvitt fehérjét kristályosítva méhsejtszerű mintázat alakul ki. A rácsba rendeződött fehérjék csak a gyűrű belsejében aktívak, ott kötik magukhoz a nanoméretű, jól vezető aranszemcséket. Az így kialakított mintázat jóval finomabb, mint a mai mikroelektronikai eszközökben. Ígéretes alkalmazási területek: számítógép-memória, érzékelők, logikai eszközök.

Megszülettek az első *nanolézerek*. Szilícium-chipre szerelhető kompakt félvezető lézert építettek, a kadmium-szulfid nanolézer kékeszöld fényt bocsát ki. Már a teljes, az ultraibolyától az infravörösre terjedő optikai tartomány átfogható nanolézerekkel. A kompakt nanolézerekből kémiai és biológiai érzékelők készíthetők.

Elkészült az első szilíciumlézer, a lézerrel pumpált új eszköz működésének alapja a szilícium rácsrezgéseit felhasználó Raman-szórás. Az optikai számítógépben számíthat alkalmazásra, elsőként szilícium-chipre építését tervezik megvalósítani.

Szén nanocsövekből (2. ábra) fénysugarak vételére alkalmas antennát hoztak létre. Az 50 nanométer széles csövekben az elektronok szabadon mozoghatnak, a cső jó vezető. A csöveget megvilágítva áramot észleltek. Később különböző méretű nanocsöveket építettek egymás mellé, a különböző hosszúságú nanocsövek más-más hullámhosszú fényre reagáltak, így a teljes látható színek tartományt átfogta a nanocsövekből álló antennarendszer. Szeretet kaphatnak a fénnel való információátvitelre alapozott optikai számítógépekben. Nagy táblákba rendezett nanocsövek áramtermelő napelemként működhetnek.

## A beláthatatlan jövő

A sok siker mellett szerencsére rengeteg még a nyitott kérdés a fizikában. Sikerül-e vajon megalkotni az alapvető kölcsönhatások egységes elméletét? Összehangolható-e egymással a kvantumfizika és a relativitáselmélet? Beigazolódik-e a szuperhúrelmélet, van-e a ma ismert részecskéknél szuperszimmetrikus párja? Megtaláljuk-e a Higgs-részecskét? Valóban gyorsulva tágul a Világegyetem? Miért? Mik alkotják a sötét anyagot, mi a sötét energia? Csak az általunk megismert Univerzum létezik?

Ha ezekre a kérdésekre egyszer választ kapunk, nyilván újabb, ma elképzelhetetlen problémák vetődnek fel. A megválaszolt kérdésekkel bővülnek ismereteink a világról és a válaszok előbb-utóbb valahol, valamikor alkalmazásra is találnak. Ezekre is igaz lesz, hogy egyszer majd adót lehet kivetni rájuk.

# PÁLYÁZAT A »FIZIKA ÉVE« MEGÜNNEPLÉSÉRE

„Nem élhetünk fizika nélkül”

Csatlakozva az UNESCO által meghirdetett *Fizika Éve 2005* világméretű mozgalomhoz, a Magyar Nukleáris Társaság pályázatot hirdet a magyar középiskolák számára a *Fizika Éve* méltó megünneplésére.

A pályázatra 2004. december 31. és 2005. május 31. között lehet jelentkezni.

A pályamunkák beadásának határideje: 2005. október 15.

A pályázat fővédnöke *Kroó Norbert*, a Magyar Tudományos Akadémia főtitkára. A pályázatban részt vehet minden magyar középiskola (gimnázium, szakközépiskola) kollektívája. A pályamunkákat egyetemi vezetőoktatókból, valamint az oktatással kapcsolatban álló tudományos–műszaki szakemberekből álló zsűri fogja értékelni.

A pályázat díjai:

I. díj: 150 000 Ft

II. díj: 100 000 Ft

III. díj: 50 000 Ft

A pályázaton nyert összegeket a nyertes iskolákban a fizika oktatásának fejlesztésére (pl. szertárfejlesztés) kell fordítani. A pályázatot támogató intézmények különdíjakat is adhatnak. A különdíjak elnyeréséről is a zsűri dönt.

## A pályázat célja

Annak elősegítése, hogy az iskolák olyan rendezvényeket szervezzenek a nemzetközileg is meghirdetett *Fizika Éve* kapcsán, amelyek a fiatalok (és rajtuk keresztül szélesebb társadalmi rétegek) figyelmét jobban ráirányítják a fizikára. Cél az, hogy a fiatalok a fizikában ne kötelezően előírt, megtanulandó, unalmas képlethalmazt lássanak, hanem ismerjék fel a fizika – és különösen a modern fizika – érdekességét, hasznát és szükségességét a mindennapi életben, és értsék meg, hogy környezetünk mindennapi jelenségeinek megismerése, és még inkább a 21. század előttünk álló nagy kérdéseinek megoldása elképzelhetetlen a tudomány legújabb vívmányainak segítségül hívása nélkül.

## A pályázat végrehajtása

A pályázat az iskolák kezdeményező készségére és kreativitására támaszkodik, és nagy szabadságot ad az iskoláknak. A 2005 októberében beadásra kerülő pályamunkának annak a dokumentációját kell tartalmaznia, hogy az iskola milyen módokon, milyen rendezvényekkel próbálta megvalósítani a pályázat által kitűzött célokat. Egy

iskola egyetlen pályamunkát adhat be. Célszerű a zsűrit az év során tartott rendezvényekről előre értesíteni, hogy a zsűri megfigyelőt küldhessen a rendezvényre – ha azt szükségesnek tartja. A pályamunkában csak olyan rendezvény(ek)e)t lehet szerepeltetni, amely(ek) a pályázatra történt jelentkezés és 2005. október 14. között zajlott(ak), továbbá amely(ke)t a pályázó iskola kifejezetten a *Fizika Éve* megünneplésére szervezett, és amely(ke)n a *Fizika Éve 2005* logó – letehető a *Fizikai Szemle* honlapjáról ([www.kfki.hu/fszemle](http://www.kfki.hu/fszemle)) – szerepelt. Egy iskola több ilyen jellegű rendezvényt is szervezhet a fenti időintervallumban, és ezek mind egyikét szerepeltetheti a pályamunkájában. A pályamunka – a szokásos szöveges leíró részen túl – tartalmazhat elektronikus adattárakat (videoszalag, CD, DVD stb.), amelyek segítik a zsűrit a pályamunkában dokumentált rendezvények megítélésében és az alábbi szempontok szerinti elbírálásában.

## A pályamunkák bírálati szempontjai

- a rendezvények szakmai színvonala
- a rendezvények általános hatása (a résztvevők száma, internetes megjelenés stb., külön fel kell tüntetni, ha iskolán kívüli – esetleg nemzetközi – hatása is volt a rendezvénynek)
- a rendezvények ötletessége, újszerűsége, kreativitása, figyelemfelkeltő hatása.
- Különösen bátorítjuk az olyan rendezvényeket,
  - amelyeknek olyan eredménye (terméke) is van, amely más iskolákat is segíthet a pályázat által kitűzött célok elérésében;
  - amelyek a részt vevő tanulókat aktívan bevonják (pl. tanulókísérletek, tanulói projektek stb.);
  - amelyek a fizika kísérletes oldalát hangsúlyozzák;
  - amelyek a modern (20–21. századi) fizikával és annak hatásaival foglalkoznak;
  - amelyek az atomenergiával kapcsolatos téveszmék és indokolatlan félelmek eloszlatására irányulnak;
  - amelyek a 21. század globális problémáival és az azokra adható válaszokkal foglalkoznak.

## Az eredmények közzététele

A pályázat eredményéről 2005 novemberében az iskolák írásban kapnak tájékoztatást. Az eredményt megjelentetjük az interneten is, a Magyar Nukleáris Társaság honlap-



ján (<http://nukinfo.reak.bme.hu>). A díjakat 2005 decemberében, a Magyar Nukleáris Társaság 2005. évi Közgyűlésén adjuk át a nyerteseknek.

A nyertes iskolák pályázatot készítő tanárai meghívást kapnak a 2005. évi Nukleáris Technikai Szimpóziumra, hogy ott az oktatási szekcióban 20 perces előadás (prezentáció) keretében számoljanak be a *Fizika Évének* megünnepléséről az iskolájukban.

## Jelentkezés a pályázatra

A pályázaton való részvétel ingyenes. A pályázatra a részvételi szándékot az iskola igazgatója vagy a fizika munkaközösség vezetője legkésőbb 2005. május 31-ig levélben

jelentheti be a Magyar Nukleáris Társaság titkáránál (postacím: *Szieberth Máté*, BME NTI, 1521 Budapest). Csak a jelentkezés után szervezett rendezvények számíthatók be a pályázat értékelésébe. Ezért minél korábbi jelentkezés ajánlott.

A *Fizika Éve* alkalmat kínál arra, hogy a magyar társadalom figyelmét ismét felhívjuk a természettudományok oktatásának, valamint a tudományos kutatásnak szükségességére. Legyen ez társadalmi megmozdulás, és legyen ez a pályázat is ennek a része!

Minden Pályázónak nagyon jó munkát és sok sikert kívánok!

*Sükösd Csaba*

a Magyar Nukleáris Társaság elnöke

## MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

A *Fizikai Szemle* Főszerkesztője és Szerkesztőbizottsága az Eötvös Loránd Fizikai Társulat vezetőségével egyetértésben úgy határozott, hogy egy új rovatot indít a Szemlében: *Mindentudás az iskolában* címmel. A rovatban egyoldalas cikkek formájában általános érdeklődésre számot tartó olyan eszközökről írunk, amelyek még nincsenek benne a középiskolás fizika tananyagban. Az eszközök működésének fizikai alapjait közérthető módon, a matematikai részleteket mellőzve ismertetjük. Néhány példa a sorozat első témái közül: különböző orvosi eszközök vagy eljárások, például a lézer orvosi alkalmazása vagy a különböző tomográfikák, olyan modern gépek, amelyek a XX. századi fi-

zika bizonyos eredményei felhasználásával készültek (mikrohullámú sütő, DVD, mobiltelefon, üzenetküldés számítógépen, hogyan találja meg a levél a címzettet stb.). Az egyes cikkek írására a témák szakértőit kérjük fel (*Bor Zsolt, Szabó Gábor, Mihály György, Faigel Gyula, Papp Gábor, Hártnlein Károly* akadémikusok, egyetemi tanárok). 2005 a fizika éve, s egyben a rovat indításának kezdete – ezzel is a fizika éve jelentőségét szeretnénk hangsúlyozni. Kérjük kedves Olvasóinkat, a rovatval kapcsolatos megjegyzéseiket vagy javaslataikat juttassák el hozzánk.

*Faigel Gyula* GF@szfki.hu

*Németh Judit* Judit@dnj.elte.hu

## LEVELE ÉRKEZETT

„Levele érkezett”, olvassuk a számítógép képernyőjén. De mi is történt valójában attól kezdve, hogy a feladó nekilátott a levél megírásának, egészen addig, amíg azt elolvassuk?

A feladónak először is tudatnia kell a számítógéppel, hogy levelet szeretne írni. Ehhez vagy az egérrel rákattintunk a levelezőprogram megfelelő ikonjára, vagy begépeljük a parancsot, mely elindítja a levelezőrendszert. Ennek elindítása során a számítógép (pontosabban az operációs rendszer) először megnézi, hogy futtatjuk-e nemrég ezt a programot, azaz benn van-e a memóriában. Ha nincs, akkor azt betölti a merevlemezzel a memóriába, és elkezd futtatni.

Ákár az egérrel, akár a billentyűzetről indítottuk a programot, valamit csinálunk a számítógép *perifériáján*, amit annak észre kell vennie.

A modern számítógépek egyszerre sokféle feladatot végeznek. Ezt azonban nem úgy érik el, hogy párhuzamosan

hajtják azokat végre, hanem úgynevezett *időosztásos* módon, azaz egy kis ideig az egyik feladattal foglalkozik, majd a következővel, és így tovább. Az egyszerre egy feladatra fordított idő valóban nagyon kicsi, a másodperc törtrészig tart. Ezzel lehet biztosítani, hogy az egér vagy a billentyűzet lenyomására elég gyorsan reagáljon a számítógép, és mi emberek – felhasználók – ne is vegyük észre, hogy esetleg közben mást is csinál a gép. Ugyanez a mechanizmus biztosítja azt is, hogy a különböző feladatokhoz különböző fontosságot tudjunk hozzárendelni: a fontosabb feladatok nagyobb időseleteket kapnak a számítógéptől.

Tehát az egyik ilyen feladat dolga, hogy állandóan figyelje, hogy lenyomta-e a felhasználó a billentyűt, mozgatta-e az egeret. Általában ez a célprogramunktól (pl. levelezőrendszer) független program, mely az egér-, illetve a billentyűzeteseményeket eltárolja egy átmeneti tárolóban, ahonnan aztán a célprogram kiolvassa ezt az információt.

Érdekes kérdés, hogy miként kerül egy szám a billentyűzet lenyomásából ebbe az átmeneti tárolóba. A billentyűzetek zömének működési alapja egy vezetékekből álló háló, melynek megfelelő vízszintes és függőleges szárait az éppen lenyomott billentyű összeköti, rövidebbre zárja. Így a billentyűzetben működő processzor egy egyedi kóddal, számpárral jelöli az adott billentyű lenyomását. Ez az úgynevezett billentyűzetkód, amelyből a számítógépen futó billentyűzetfigyelő program létrehozza a lenyomott betű kódját. Ez igen fontos mozzanat, mivel többféle nyelvű billentyűzetet is használhatunk, melyek eltérő billentyűzetkódokat generálhatnak. A billentyűzetfigyelő programnak az a feladata, hogy az adott gombnyomásnak megfelelő információt egységes betűkódra alakítsa át.

Így most a levelezőprogramunk megkapja a billentyűzeten beadott betűket, illetve hasonlóképpen, az egérrel végrehajtott műveleteket. Ahhoz, hogy lássuk is azt, amit gépelünk, a programnak meg kell jelenítenie az eredményt a képernyőn. Az operációs rendszer egy másik programja felelős azért, hogy a kiadott grafikus parancsok eredménye megjelenjen a képernyőn: ez rajzol például egy adott méretű kék téglalapot, ír ki egy betűt vagy villant fel egy püspöklila pontot. Egy másik speciális program, az ablakkezelő gondoskodik arról, hogy a futó programunk kapjon egy ablakot a képernyőn, legyen ennek kerete, és megjelenjenek azok a gombok, amelyek a program bezárását, az ablak kicsinyítését stb. biztosítják – az ablakon belüli területet a program maga kezeli. A levelezőprogram egyszerűen csak kiadja ezeket a grafikus parancsokat ahhoz, hogy a billentyűzeten lenyomott betűk megjelenjenek a képernyőn, a többiről a grafikus alrendszer gondoskodik. Természetesen a levelezőprogramnak is van feladata: többek között ez végzi a levél tartalmának és címzésnek az összeállítását.

Ha már megírtuk a levelet, akkor megadjuk a címzettet, és elküldjük a levelet. Számunkra ez ismét csak egy gomb lenyomása vagy kattintás az egéren, de a számítógép ilyenkor is egész sor műveletet hajt végre. Először is kiszedi a címből a megcímzett gép nevét, majd egy speciális hálózati géptől, a tartománynév-kiszolgálótól megkérdezi, hogy kinek kell küldeni az oda szóló leveleket (a számítástechnikában igen gyakori a „postafiók” használata, amikor más gép kezeli le ki a másiknak érkező levelet). A tartománynév-kiszolgálók egymás közt állan-

dóan frissítik a hálózati információkat, és mindjárt az elérendő gép IP (*internet protocol*) címét is visszaadják. Számítógépünk ezután hálózati kapcsolatot létesít a levelezésért felelős géppel, és ezen a kapcsolaton át jelzi a túloldali gépnek, hogy ki óhajt levelet küldeni kinek. A túloldali gép levélkezelő programja ennek alapján eldönti, hogy fogadja-e a levelet: ha igen, akkor gépünk elküldheti magát a levelet is.

Az adatok átvitele a hálózaton darabokban történik: az egymással kapcsolatban álló két végponthoz tartozó gépeken futó hálózati szoftver felszabdálja az adatfolyamot egyforma méretű kicsi csomagokra. Ezeket aztán a hálózati célgépek, az útválasztók (*routerek*) adják kézre az egyik végponttól a másikig, miközben megállapítják azt is, hogy milyen útvonal a pillanatnyilag optimális az egyik géptől a másikig és vissza.

A csomagok egy része elveszhet (pl. kikapcsolják az éppen továbbító útválasztót, megszakad a vonal stb.), de az is lehet, hogy a csomagok megelőzik egymást: éppen ezért a küldő végpont ellátja őket sorszámokkal. A túloldali gép minden megérkezett csomagot nyugtáz. Ha a nyugta nem érkezik vissza, számítógépünk újból elküldi a nem nyugtázott csomagot. A túloldali gép feladata, hogy a csomagokat a helyes sorrendbe visszaállítsa, azaz „kicsomagolja”. Két gép között a csomagok általában 5–6 útválasztón mennek keresztül, de egy „hálózati mérték” szerint távoli gép esetén ez akár 20–30 is lehet. Az átlag az internet méretétől függ!

A túloldali gép, miután észlelte, hogy az egyik perifériáján – a hálózati kártyán, modemen – információ érkezik, elindítja azt a programot, mely fogadja a hálózaton érkező levelet. Ezek után – beállítástól függően – elvégezhet rajta például egy előfeldolgozást (ahol például megpróbálja eldönteni, hogy szemérről – úgynevezett „spam”-ről – van-e szó, van-e a levélben ismert vírus stb.), és ha értékes/érdekes a levél, kézbesíti a címzett postafiókjába (azaz beleírja egy a merevlemezen található állományba).

A levelek itt gyűlnek a postafiókban, de ha akarjuk, akkor a levelezőprogram bizonyos időközönként (pl. fél perc, vagy 30 perc) megnézi, hogy a legutolsó ellenőrzés óta megváltozott-e a postafiók tartalma, s ha igen, akkor büszkén kiírja a képernyőre, hogy

*Levele érkezett*

## TÁRSULATI ÉLET

### A FIZIKAI SZEMLE OLVASÓIHOZ

A magyar fizikusok és fizikatanárok lapjának 2005. évfolyamát indítjuk. Köszönjük az érdeklődést, támogatást, előfizetést. A *Fizikai Szemle* továbbra is havonta jelenik meg, egy év alatt mintegy 1000 oldalas könyvnek megfelelő terjedelemben.

Az egyéni előfizetők és iskolák mérsékelt előfizetési díját a lapot kiadó intézmények, továbbá alapítványok támogatása mellett olvasóink 1%-os adófelajánlása tette lehetővé. Kérjük, hogy 2005-ben is támogassák ezzel Társulatunkat, adószám: 19815644-2-41. A 2005. évi

megrendelést kérjük minél hamarabb küldjék el. Pénzük többet ér a lapnak, ha előbb érkezik!

#### 2005. évi előfizetési díjak

Egyéni előfizetők	6.000 Ft
Közületi előfizetők	12.000 Ft
Általános és középiskolák	7.000 Ft

## A PET ÉS A KÖRNYEZET

Az egészségügyi kormányzat tisztán látja a pozitronemissziós tomográfia (PET) módszerrel végzett vizsgálatok jelentőségét, és ezért növelni szándékozik a hazai PET-vizsgálatok számát. A döntés eredményeképpen konkrét előkészítő munkálatok kezdődtek több új PET-program elindítása érdekében, és erről az utóbbi időben számos híradás jelent meg a médiában. E közlemények olyan megállapításokat is tartalmaztak, amelyek félreérthetőek, illetve amelyek kiegészítésre szorulnak annak érdekében, hogy a közvélemény a valóságnak megfelelően tudja megítélni a módszerrel kétségkívül együtt járó, bizonyos mértékű kockázatot és környezetszennyezést.

Mint ismeretes (lásd *Fizikai Szemle* 1995. XLV. évf. 5. szám), a PET-módszerrel a szervezetben lejátszódó szöveti-biokémiai folyamatokról lehet információt szerezni. Ez azon alapul, hogy az élő szervezetbe bejuttatott, meghatározott anyagcsere-folyamatokban részt vevő és alkalmasan megválasztott molekulák egy viszonylag rövid, úgynevezett ekvibrációs idő után az anyagcsere-folyamatok regionális eloszlásától és pillanatnyi intenzitásától függő módon oszlanak el a szervezetben. A bejuttatott molekulákat pozitronbomló radioaktív izotópokkal szokás megjelölni a szervezet funkcionális állapotára jellemző eloszlás meghatározásához.

A nukleáris medicinában általános adatgyűjtés a radioágyszerrel injektált vizsgálati személy közelébe helyeztetve detektorrendszerrel történik. A mért adatok rendszerezésével elő lehet állítani a vizsgálat tárgyát képező háromdimenziós radioaktivitás-eloszlás különböző irányú vetületi képeit. Ez utóbbiakból megfelelő rekonstrukciós szoftverek háromdimenziós adathalmazt generálnak, amelyből a radioaktivitás-eloszlás jellemzői meghatározhatók.

A PET-vizsgálatok során elkerülhetetlen, hogy a vizsgálati személy szöveteit sugárterhelés ne érje. A kérdés megítéléséhez tekintettel kell lenni arra, hogy bizonyos mértékű kockázat minden diagnosztikai kivizsgálással együtt jár. Teljes biztonsággal állítható, hogy a PET-vizsgálattal nyerhető információ az esetek meghatározó hányadában más módszerrel nem pótolható, és a módszerrel együtt járó kockázat sem haladja meg az egyéb kivizsgálásokhoz rendelhető rizikó mértékét. Ez magyarázza, hogy a PET-vizsgálatok egyre nagyobb szerepet kapnak az orvosi diagnosztikában.

A fentiek szerint a PET-módszerrel kapcsolatos környezetszennyezés két összetevőből áll. Számolni kell

egyrészt a vizsgálatban részt vevő személyeket érő sugárterheléssel, másrészt, végig kell gondolni azt is, hogy a módszer által megkövetelt radioaktivitás előállítására mennyire terheli meg a környezetet. Az alábbiakban külön-külön taglaljuk röviden ezt a két komponenset.

A kivizsgált betegek sugárterhelése szempontjából kiemelkedő jelentősége van a PET-kamerák nagy érzékenységének, ami több tényező együttes eredménye. Az alternatív lehetőséget kínáló, SPECT (*Single Photon Emission Computer Tomography*) módszer alkalmazása során a szervezetben lejátszódó radioaktív bomlások gamma-fotonjait egy vagy több, 40–60 cm méretű, a vizsgált testrész közelében elhelyezett szcintillációs kristály(ok) detektálja (detektálják). Ez az elrendezés egy adott geometriában egyidejűleg csak egy (illetve számban a szcintillációs kristályok számával azonos) irányú vetületi kép elkészítését engedi meg, így a detektorrendszert a vizsgálat során a beteg hossz tengelye körül körbe kell forgatni. A PET-kamerák detektorrendszere több ezer szcintillációs kristályból áll, amelyek gyűrűszerű elrendezésben veszik körül a vizsgált személyt. A detektálás koincidencia üzemmódban történik, hiszen a pozitronbomlást követő, annihilációs kölcsönhatásokból származó, 511 keV energiájú, összetartozó fotonok néhány nsec-on belül azonos időben érik el a detektorrendszer két elemét (a bomlásból származó pozitronoknak a biológiai szövetekben mért 0,5–1,5 mm-es hatótávolsága miatt az annihilációk hely szerinti eloszlása ilyen pontossággal egyezik meg a bomló atommagok térbeli eloszlásával, ami a PET-képalkotás 3,5–5 mm-es felbontóképességére való tekintettel teljesen elfogadható). A koincidenciaesemények megfelelő rendszerezésével a különböző irányú vetületi képek egyidejűleg készíthetők el, így az adatgyűjtés lényegesen rövidebb idő alatt elvégezhető, illetőleg csökkenthető az injektált radioaktivitás mennyisége.

Hasonlóképpen fontos a beteget érő sugárterhelés alacsony szinten tartása szempontjából, hogy a PET-vizsgálatokban rövid felezési idejű izotópokat alkalmaznak. A PET-vizsgálatok időtartama 10–90 perc, a leggyakrabban alkalmazott izotópok felezési ideje pedig 2–110 perc közé esik. Így a szervezetbe bejuttatott radioaktivitásnak igen nagy hányada közvetlenül „felhasználásra kerül” a képalkotáshoz. A PET-vizsgálatokban leggyakrabban egy <sup>18</sup>F-izotóppal jelölt, cukoranalóg készítményt (FDG-t) alkalmaznak. Egy-egy vizsgálatához 5–10 mCi FDG-t injektálnak, egy ilyen vizsgálat 5–11 mSv abszorbeált dózist jelent. Az aminosavtranszport és fehérje-anyagcsere vizsgálatára szolgáló <sup>11</sup>C-izotóppal jelölt metioninból átlagosan 30 mCi-t injektálnak vizsgálatonként, ami 6 mSv sugárdózist eredményez. A szöveti vérátfolyás-vizsgálatokat általában <sup>15</sup>O-izotóppal jelölt víz segítségével végzik, egy-egy vizsgálat során az abszorbeált dózis 2 mSv, ha az

2004. nyár végén látott napvilágot a hír, hogy PET-centrumot szeretnének telepíteni Budapesten, Zuglóban, az Amerikai-úti Idegsebészeten. Néhány „környezetvédő” önkormányzati képviselő a polgármesterrel karöltve meg akarja akadályozni ezt, hivatkozva a PET-centrum szerves részeként felépítendő ciklotron balesetveszélyességére (KUN J. VIKTÓRIA: *PET vagy matt?* – Népszabadság, 2004. szeptember 20.). A szerkesztőség szakember véleményét kérte ki a tisztánlátás végett.

átlagosan injektált 50 mCi aktivitással számolunk. Az összehasonlítás kedvéért jegyzem meg, hogy egy-egy CT-vizsgálat során a berendezés típusától és a vizsgálati protokolltól függően a kivizsgált személyt 5–20 mSv sugárdózis éri. A PET-vizsgálattal járó kockázat megítélését segíti az is, ha figyelembe vesszük, hogy a környezetből származó, ionizáló háttérsugárzás miatti dózis 2,4 mSv/év, és a különböző mesterséges radioaktív és egyéb (röntgen, repülőút stb.) forrásokból származó sugárterhelés pedig átlagosan 1,1 mSv/év.

A PET-módszerben felhasznált, pozitronbomló radioaktív izotópok a könnyű elemek neutrondeficités nuklidjai közül kerülnek ki. Az ilyen izotópokat természetesen nem atomreaktorokban állítják elő, erre a célra ciklotronok szolgálnak. Ennek megfelelően a PET-központoknak sűrűn lakott településeken való elhelyezése sugárvédelmi szempontból viszonylag könnyen megoldható feladat. Az alacsony rendszámok miatt a radioaktív izotópokat előállító magreakciók külsőenergiája alacsony, és a megfelelő hatáskelesztészetek maximumértékét már viszonylag alacsony bombázó energiák mellett el lehet érni. A PET-gyakorlatban felhasznált gyorsítók úgynevezett kompakt ciklotronok. Az alacsony energiák, valamint az egyetlen felhasználós üzemmód miatt ezeknek a berendezéseknek igen egyszerű a konstrukciója (emellett a szervizigénye is nagyon alacsony). A  $^{11}\text{C}$ -,  $^{13}\text{N}$ -,  $^{15}\text{O}$ - és  $^{18}\text{F}$ -izotópok előállítására használt, „dedikált” gyorsítók kivétel nélkül negatív ionokat gyorsítanak. Az ilyen gyorsítóknál a gyorsított részecskék belső nyálábjának a kivonásához egy lefosztó fóliát helyeznek a nyáláb útjába. A gyorsított részecskék a nagyon vékony fólián való áthaladás közben energiát alig veszítenek, de elveszítik elektronjainkat. Az eredetileg negatív töltésű részecskék nettó töltése ezután pozitív lesz, ennek megfelelően a lefosztás előtti Lorenz-erő is irányt vált, ezért a részecskék görbülete a vákuumkamrát határoló fal felé irányul. A magas (95% körüli) kihozatali hatásfok miatt a gyorsító falának a felaktíválódása csak töredékét teszi ki annak, amellyel a pozitív részecskéket gyorsító berendezéseknél számolni kell.

A gyorsító üzemeltetésével együtt járó sugárzás intenzitása nagyon erős, ezért hatékony sugárárnyékolásról kell gondoskodni. A hagyományos módszer szerint telepített ciklotronokat 1,5–2 méter falvastagságú betonbunkerben helyezik el. Alternatív lehetőséget kínál, ha a berendezést úgynevezett önárnyékoló (*self-shielded*) köpennyel veszik körül. Az ilyen megoldásnak az az előnye, hogy a bunkerek helyigényéhez képest jóval kisebb alapterületen is megoldható. A soktonnányi moderátorközeget befogadó árnyékoló elemek mozgását légpárnás megoldással szokás biztosítani. Az ilyen módon árnyékoló ciklotronokhoz ugyanakkor nehezebb hozzáférni, általában igen kicsi a hely az árnyékoló köpeny és a gyorsító között, ezért a gyorsító falára szerelt targetkamrákat, valamint az azokhoz csatlakoztatott berendezéseket lényegében csak a gyártóktól lehet beszerezni.

A debreceni PET Centrum új, kompakt ciklotronja a GE gyártmányú, PETtrace típusú berendezés. Ezzel a gyorsítóval 16,5 MeV-es protonnyalábot és 8 MeV-es deutériumnyalábot lehet előállítani. A maximális ionáramok

100  $\mu\text{A}$ , illetve 50  $\mu\text{A}$ . A 170 cm falvastagságú betonbunker külső oldalán mért dózisintenzitás 75  $\mu\text{A}$  protonnyalábrám mellett 0,1–0,2  $\mu\text{S/h}$ . Ilyen intenzitású sugárzási térben az éves háttérdózissal azonos sugárterheléshez 10–20 ezer óra (1,15–2,3 év) expozíciós idő tartozik.

A közelmúltban *Teller Ede* a Paksi Atomerőműben tett látogatásának kapcsán készített televíziós interjúban jelentette ki, hogy megfelelő biztonságtechnikai rendszerek alkalmazásával a nukleáris energia tekinthető a legtisztább, legkevésbé környezetszennyező energiafajtának. Az állítás kétségbe vonására semmilyen ok nem létezik. Tekintetbe véve az energiatermelő reaktorokban elhelyezett, illetve felhalmozódó radioaktivitások és a PET-módszer során felhasznált radioaktivitások mennyisége közötti sok nagyságrendnyi különbséget, valamint – és ez még az előzőnél is nagyobb súlyú érv – a hasadványok és a „PET-izotópok” felezési ideje közötti akár 3–8 nagyságrendnyi különbséget, a PET-technikával kapcsolatos környezetszennyezés tényleg elhanyagolható, ha a környezetvédelmi és sugárvédelmi előírásokat betartják. Egy-egy ilyen program elindításának engedélyezéséhez a környezetvédelmi és sugárvédelmi hatóság pozitív szakhatósági hozzájárulása szükséges. E szakhatóságok által előírt feltételek között szerepel, hogy igen precíz kimutatást kell végezni az előállított radioaktivitások fajtájáról és mennyiségéről. További követelmény, hogy a környezetbe kibocsátott folyadék és légnemű radioaktív anyagok mennyiségét a ciklotront és a radiokémiai laboratóriumot magába foglaló épületben (kémények és közműhálózat), valamint az épülettől 0,5–1 km távolságban folyamatosan regisztrálni kell. Az éves emisszió maximális értékét a hatóságok határozzák meg, és rendszeresen ellenőrzik azokat.

A fenti érvek alapján bátran ki lehet jelteni, hogy a PET-technika és az ahhoz szükséges részecskegyorsító, valamint radiokémiai laboratórium a környezetre nézve elhanyagolható veszélyforrás. A pozitronemissziós tomográfia segítségével viszont olyan diagnosztikai információhoz lehet jutni, amely más módszerrel nem pótolható. A PET-módszerrel nyert adatok lehetővé teszik számos kóros folyamat nagyon korai fázisban történő diagnosztizálását. A pontos diagnosztika jelentősen hozzájárul ahhoz, hogy a leghatékonyabb terápiás eljárást lehessen alkalmazni (a PET-vizsgálatok az esetek közel egyharmadában módosítják az anélkül kiválasztott terápiás protokollt). Mindezen tényeknek, továbbá a módszer költség-hatékonyságának (a PET-re fordított költségek négyszeresen megtérülnek!) természetes következménye, hogy a PET-kamerák száma világszerte rohamosan nő. Az Egyesült Államokban 2003-ban 58%-kal nőtt az elvégzett PET-vizsgálatok száma az előző évihez viszonyítva, és így több mint 700 ezer beteg PET-vizsgálatát végezték el. Ilyen vizsgálatokat az USA-ban jelenleg több mint 1500 kórházban végeznek, és a szükséges izotópokat sok száz ciklotronnal állítják elő. A berendezéseket sűrűn lakott településeken üzemeltetik, teljes összhangban azzal, hogy az a helyi lakosság és a környezet számára számottevő kockázatot nem jelent.

*Trón Lajos*  
Debreceni Egyetem, PET Centrum

# GÁBOR DÉNES-DÍJ 2004

A kimagasló szellemi alkotásokat létrehozó és az új ismereteket a gyakorlatba átültető szakemberek tevékenységének elismerésére átadták a 2004. évi Gábor Dénes-díjat Budapesten, 2004. december 16-án.

*Bor Zsolt* akadémikus, tanszékvezető egyetemi tanár, Bolyai-díjas kutató felterjesztése, *Somlyódy László* akadémikus, tanszékvezető egyetemi tanár, *Pakucs János* elnök, korábbiakban Gábor Dénes-díjjal kitüntetett szakemberek és *Palkovics László* fejlesztési igazgató ajánlása, valamint a NOVOFER Alapítvány kuratóriumának döntése alapján – Gábor Dénes-díjban részesült

SZABÓ GÁBOR fizikus, a fizikai tudomány doktora, az MTA levelező tagja, a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék egyetemi tanára, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat főtitkára az alkalmazott kutatás, az ipari termékfejlesztés, nevezetesen az ultrarövid fényimpulzusok, a lézeres fotoabláció, a nagyfeloldású fotolitográfia, a kvantumrendszerek optimális szabályozása, a lézerek orvosi-biológiai alkalmazása és a fotoakusztikai spektroszkópia területén elért kimagasló és interdiszciplináris jellegű eredményeiért, áldozatos tudomány- és innovációs szervező közéleti tevékenységéért, sikeres felsőoktatási munkásságáért.



Fotó: Kálmán Tamás

Szabó Gábor, az Eötvös Társulat elnökeként a Fizika Nemzetközi Éve 2005 magyar eseményeiről tartott sajtótájékoztatón.

A díjat *Garay Tóth János*, a NOVOFER Alapítvány kuratóriumi elnöke és *Kovács Kálmán* informatikai és hírközlési miniszter adta át.

Az idei Gábor Dénes-díjat még további hat mérnök, illetve orvos nyerte el kiemelkedő munkássága elismeréseként.

## KÖNYVESPOLC

# Kovács László: NEUMANN JÁNOS ÉS MAGYAR TANÁRAI

Studia Physica Savariensia X., Szombathely, 2003, 122 o.

2003 a Mars-közelség éve, s egy „marslakó” születésének 100. évfordulója. Ez alkalomból jelent meg *Kovács László: Neumann János és magyar tanárai* című könyve a Studia Physica Savariensia sorozat X. köteteként. A mű a szerző *László Rátz and John von Neumann – A Gifted Teacher and his brilliant Pupil* (University of Manitoba, Faculty of Education Winnipeg, Manitoba, Canada, 2003) című könyvének módosított, magyar változata, melyhez *Arthur O. Stinner*, a Manitobai Egyetem professzora írt előszót.

A kiadvány követi a sorozat korábbi, *Wigner Jenőt* bemutató kötetének felépítését. Az első 57 oldalon megismerhetjük azt a környezetet és azokat a hatásokat, amelyek szerepet játszottak az ifjú *Neumann* alakításában: a budapesti Fasori gimnáziumot és annak szellemét, matematikatanárai *Rátz László* és *Sulek József*, valamint az iskola igazgatója, *Mikola Sándor* működését. A műben helyet kapott még olyan matematikusok életrajza, mint *Szegő Gábor*, aki Budapesten, majd Berlinben látta el Neumann tanácsokkal, a magányos *Fekete Mihály*, akivel közös dolgozata jelent meg, valamint *Pólya György*, aki zürichi egyetemi éve alatt tanította.

A fentiek kiegészítéseként egy 18 képből álló sorozat bemutatja a legjelentősebb magyar természettudósok és tanárok portréját *Jedlik Ányostól Kármán Tódoron keresztül Vermes Miklósig*, valamint egy budapesti térképábrázlatot is találunk a magyar „zsenik” lakóhelyeinek és iskoláinak elhelyezkedéséről.

A könyv második része már csak Neumann Jánossal foglalkozik, melyből nemcsak a zseniális tudós képe rajzolódik ki előttünk, hanem a mindig segítőkész, gyakran tréfálkozó, anekdotázó hús-vér emberé is.

Az életrajzi vázlatát, tanulmányait, életútját és tudományos munkásságát követi a Neumann János emlékeket összegyűjtő gazdag fejezet, majd a 210 tételt tartalmazó Neumann-bibliográfia.

A *New York Times* és a *Physics Today* gyászjelentései, valamint a pályatárs és jó barát, *Wigner Jenő* megemlékezése a függelékben kapott helyet. Itt olvashatjuk még Neumann János *A matematikus* című esszéjének magyar fordítását, mely 1947-ben a *The Work of the Mind* című kötetben jelent meg, az University of Chicago Press kiadásában.

Kovács László könyvét gazdagon illusztrálta korabeli dokumentumokkal, idézetekkel. Olyan nehezen hozzáférhető, eredeti szövegeket, fotókat közöl, melyekkel nyomtatásban eddig még nem találkozhattunk. Sok felvételt a szerző maga készített az eredeti helyszíneken, mint például Göttingenben, Zürichben, Washington D.C.-ben vagy Princetonban (NJ). Külön érdekesség Neumann János egy előadásán rögzített hangfelvétel részletének digitális lenyomata.

Hudoba György

BMF, Kandó Kálmán Vill.ip. Főiskola



**MINDENTUDÁS  
EGYETEME**



# Legyen ismét a Mindentudás Egyeteme hallgatója!

Szeretettel várjuk a Mindentudás Egyetemén minden hétfőn 19.30-kor,  
a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Kozma László előadóijában!

**A Mindentudás Egyeteme a Fizika évének jegyében indítja tavaszi programját!  
Jöjjon el a 6. szemeszter nyitóelőadására!**

**2005. január 24.**

**Szabó Gábor – fizikus**

**Milyen messzire esett Newton almája? -  
A fizikai gondolkodásmód és a természettudományok**

Jelentkezés és regisztráció:  
[www.mindentudas.hu](http://www.mindentudas.hu) vagy a 06-30-3030310-os telefonszámon.

A belépés díjtalan.

Válassza újra az értéket!



Magyar  
Tudományos  
Akadémia