

MŰHELYTANULMÁNYOK

Nukleáris tudomány és a 20. század

AGRÁRIUM

KÖRNYEZETVÉDELEM ÉS INTEGRÁCIÓ

RENDSZERVÁLTOZÁS:

PIACGAZDASÁG, TÁRSADALOM, POLITIKA

TUDOMÁNYPOLITIKA

TERÜLETFEJLESZTÉS

ÉLETMINŐSÉG

KÖZLEKEDÉS

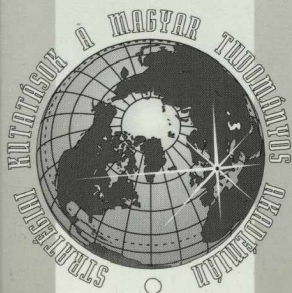
NEMZETI KULTÚRA

DUNA-VÖLGYI RÉGIÓ

TECHNOLÓGIAI FEJLESZTÉS

ÖKOLÓGIA

FÖLDTUDOMÁNYOK



Nukleáris tudomány és a 20. század

Magyar Tudományos Akadémia
Közlemények

Nukleáris tudomány és a 20. század

Magyar Tudományos Akadémia
Közlemények

1964. évi kötet
János Kádár

1964. évi kötet

Magyar Tudományos Akadémia

Magyarország az ezredfordulón
Stratégiai kutatások a Magyar Tudományos Akadémián
Műhelytanulmányok

Sorozatszerkesztő
Glatz Ferenc

Olvasószerkesztő
Péterfi András

Magyarország az ezredfordulón
Stratégiai kutatások a Magyar Tudományos Akadémián

Nukleáris tudomány és a 20. század

A kötetet összeállította
Vértes Attila

Budapest 2001
MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA

ISBN 963 508 322 X

ISSN 1419-1822

Kiadja

a Magyar Tudományos Akadémia

A kiadásért felel: Glatz Ferenc, a Nemzeti Stratégiai Kutatási Program elnöke

Nyomdai előkészítés: az MTA Történettudományi Intézetének kiadványcsoportja

Vezető: Kovács Éva

Borító: Horváth Imre

Tördelés: Csányi Attila

Nyomdai munkák: Áldási és Németh Nyomda Bt.

Felelős vezető: Áldási Pálné

Megjelent 14,3 (A/5) ív terjedelemben, 500 példányban

Tartalom

VÉRTES Attila: A nukleáris tudomány néhány csomópontja	7
MARX György: Nukleáris történelmünk	13
Megszületik az Univerzum 13 • Süt a Nap 16 • Kiformálódik a szén-atom 18 • Reng a Föld 20 • Szivárog a gáz 25 • Kivirul az élet 28 • Változik az éghajlat 30 • Épül a civilizáció 32 • Tanulság 33	
HORVÁTH Dezső: Szimmetriák az elemi részecskék világában	37
Szimmetriák és megmaradási törvények 37 • Fermionok és bozonok 37 • Részecskék és antirészecskék 38 • Leptonok és kvarkok 39 • A kvarkok színe 41 • A három fermioncsalád 42 • A kölcsönhatások 43 • A gyenge kölcsönhatás furcsaságai 45 • A Standard Modell jelene és kilátásai 47	
SCHILLER Róbert: Sugárkémia (mi az és mire jó?)	49
WOJNÁROVITS László: Izotópalkalmazás Magyarországon	55
KÖRNYEI József: <i>In vivo</i> orvosi izotópalkalmazás – radioaktív nyomjelzés az élő szervezetben	63
Radioaktív nyomjelzés 64 • Radionuklid terápia 66	
TRÓN Lajos–EMRI Miklós–MIKECZ Pál–BALKAY László–GALUSKA László–ÉSIK Olga–MÁRIÁN Teréz: Pozitronemissziós tomográfia	69
CSER László–SALMA Imre–MOLNÁR Gábor: Anyagvizsgálatok neutronokkal	75
Szórásvizsgálatok lassú neutronok segítségével 75 • Neutronaktivációs analízis 80 • Prompt aktivációs analitika hideg neutronokkal 84	
KLENCSÁR Zoltán–VANKÓ György–VÉRTES Attila: Nukleáris szerkezetvizsgáló módszerek	91
Pozitronannihilációs spektroszkópia (PAS) 91 • Mössbauer-spektroszkópia 95 • Szerkezetvizsgálat szinkrotronsugárzással 101	

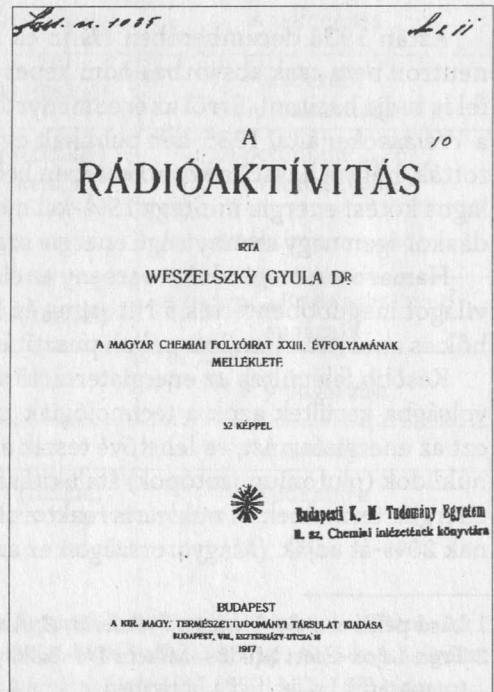
BERÉNYI Dénes: Az energiaprobléma – civilizációnk központi kérdése	109
Az energiáról általában 109 • Jelenlegi energiaforrásaink 110 • A jövő lehetőségei 114 • Megújuló energiaforrások 115 • Hogyan tovább? 117	
KATONA Tamás: Kettős szorításban – a magyar atomenergetika esélyei és lehetőségei	119
A paksi atomerőmű fő jellemzői 120 • Válasz a szakmai és társadalmi kritikára 121 • Új kihívás: a versenyképesség 124 • A közeljövő stratégiája 127 • A 21. század esélyei 129 • Zárzó 131	
SZATMÁRY Zoltán: Nukleáris technika a 21. században	133
A melegház csapdája 134 • Megtalálja-e az emberiség a megoldást? 135 • Az emberi tényező 138 • A nukleáris hulladékok 141 • Az atomerőművek új generációi 142 • Zárzó 144	
MEZEI Ferenc: A neutronforrások sokadik évezrede	145
Helyzetkép 145 • Perspektívák az új évezredben 148	
FEHÉR István–KOBLINGER László: Védekezés az ionizáló sugárzások károsító hatása ellen – Sugárvédelem	151
Visszatekintés 151 • Quo vadis, sugárvédelem? 154	
A kötet szerzői	157

VÉRTES ATTILA

A nukleáris tudomány néhány csomópontja

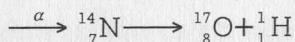
1896-ban *Becquerel* észrevette, hogy az urán közelében megfeketedik a becsomagolt fotólemez, és ez a tapasztalat a radioaktivitás felfedezését jelentette. Két évvel később *Marie Curie* (Maria Skłodowska) és *Pierre Curie* újabb két sugárzó elemet fedezett fel, a polóniumot és a rádiumot. *Rutherford* 1900-ban ki-mutatta a radon létezését és leírta a radioaktív sugárzás két töltéssel bíró komponensét, a negatív béta-sugárzást és a pozitív töltésű alfa-sugárzást. Nem sokkal később *M. Curie* és *Becquerel* detektálta a töltés nélküli gamma-sugárzást. *Rutherford* alfa-sugárzás áthatolását és szóródását vizsgálta vékony fémlemezekon 1911-ben, és e mérés eredményének feldolgozása után megértette és leírta az anyag alapvető szerkezetét: az atomoknak van egy pozitív, igen kis térfogatú, nagy tömegű magjuk és az atomtérfogat jelentős részében a kis tömegű negatív töltés oszlik el.

A magyar természettudósok is felismerték a radioaktivitással kapcsolatos kutatások jelentőségét, és a Királyi Magyar Tudomány Egyetem Tanácsa *Lengyel Béla* professzor javaslatára határozatot hozott 1911-ben a Radiológiai Intézet létrehozására. Ennek első vezetője *Weszenszky Gyula* lett, aki 1917-ben egy könyvet is publikált. Ez a könyv minden fontos eredményt tartalmazott, amit addig a nukleáris tudomány produkált. Ennek borítólapját mutatja be a mellékelt ábra.

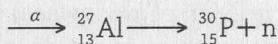


Miután kiderült, hogy bizonyos radioaktív nuklidokat nem lehet elválasztani az ólomtól, *Hevesy György* felismerte, hogy a sugárzást nyomjelzésre használva az ólom igen kis koncentrációját is észlelni lehet, és 1913-ban publikált dolgozatában leírta a természettudományokban a mai napig használt nyomjelzéstechnikát.¹ Ennek a Hevesy-féle felfedezésnek az eredménye a pozitronemissziós tomográfia is, amiről e kötet egyik dolgozata szól.²

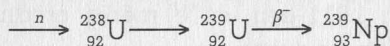
1919-ben *Rutherford* azt is felfedezte, hogy az alfa-részecske a nitrogén atommagjába hatolva oxigént és hidrogént hoz létre. Ez volt az első leírt atommag-átalakítás (magreakció).



1934-ben *Irene Curie* (*Marie* és *Pierre Curie* lánya) és *Frederic Joliot* alfa részecskék és a 27-es tömegszámú alumínium segítségével először produkált mesterséges radioaktív izotópot, a 30-as foszfort.



A neutron felfedezése (*Chadwick* 1932) után több kutató² vizsgálta a neutronok hatásait az addig ismert legnagyobb tömegszámú atommagokra. Ezzel a módszerrel az új, uránnál nagyobb tömegszámú atomok egész sorát állították elő. Például:



Aztán 1938 decemberében *Hahn* és *Strassmann* azt is észrevette, hogy a neutron nem csak abszorbeálódni képes az uránatomok magjában, hanem azt fel is tudja hasítani. Erről az eredményről világszerte értesültek a fizikusok, és a *Weizsäcker* által 1935-ben publikált egyenlet segítségével könnyen kiszámították, hogy a hasadás következtében keletkezett kisebb atommagokban a fajlagos kötési energia mintegy 15%-kal megnő, ami azt jelenti, hogy a maghasadásakor igen nagy mennyiségű energia szabadul fel.

Hamarosan megindult a verseny az első nukleáris bomba birtoklásáért és a világot megdöbbsentették a Hirosima és Nagaszaki fölött megjelent gombafelhők és az alattuk lezajlott pokoli pusztítás.

Később felépültek az energiatermelő atomreaktorok is. Ma már elérhető távolságba kerültek azok a technológiák, amelyek teljesen biztonságossá teszik ezt az energiaforrást, és lehetővé teszik az igen hosszú felezési idejű radioaktív nuklidok (plutóniumizotópok) átalakítását rövidebb felezési idejűvé, miközben energiát termelnek. A nukleáris reaktorok jelenleg a világ elektromos energiájának 20%-át adják. (Magyarországon ez az érték több mint 40%, Franciaország-

1 Lásd például a Gy. Hevesy, F. Paneth, *Z. Anorg. Chem.*, 82, 223 (1913) dolgozatot.

2 Trón Lajos–Emri Miklós–Mikecz Pál–Balkay László–Márián Teréz: Pozitronemissziós tomográfia. Ld. ebben a könyvben.

ban közel 80%.) A jövő századot illetően a Nobel-díjas Oláh György az „American Chemical Society” egy ezredfordulós kiadványában azt írja: „Akár tetszik, akár nem, hosszabb távon nincs más választásunk, mint az, hogy egyre növekvő mértékben a remélhetően tiszta atomenergiára támaszkodjunk.”³

A magreakciók tanulmányozása segített megértenünk Földünk és az univerzum kialakulását, a nukleáris medicina sok beteg életét hosszabbítja meg vagy csökkenti fájdalmát, a neutronaktivációs analitika és a neutronszórás segítségével pontosabban, részletesebben megismerjük az anyagok tulajdonságait és ezáltal intenzívebbé tehetjük felhasználásukat. Ezekről a lehetőségekről és a nukleáris tudomány perspektíváiról szólnak a következő írások.

Remélem, az e kötetbe került dolgozatok meggyőzik az olvasót arról, hogy a nukleáris tudomány motorja volt a 20. század természettudományának és – valószínűleg – jelentős hatással lesz a 21. század tudományára és ezáltal társadalmi mozgásaira is. (A 20. században mintegy 200 Nobel-díjat adtak ki a fizika és a kémia területén. Ennek 20%-ával a nukleáris tudomány terén elért eredményt ismertek el. Ez a szám bizonyítja a nukleáris tudomány kiemelkedő jelentőségét.) A következő táblázat a nukleáris tudomány legfontosabb eredményeit, művelőit és a vonatkozó Nobel-díjakat foglalja össze.

A nukleáris tudomány néhány fontosabb eredménye

A felfedezés éve	A felfedező neve*	A Nobel-díj éve	A felfedezés
1896	Becquerel	1903 (fizikai)	Az urán radioaktivitása
1898	Marie Curie Pierre Curie	1903 (fizikai) 1911 (kémiai)**	A polónium; ${}_{84}\text{Po}$ és rádium; ${}_{88}\text{Ra}$
1899 1901	Debiegne Giesel		Az aktímium; ${}_{89}\text{Ac}$
1900	Rutherford	1908 (kémiai)	A radon; ${}_{86}\text{Rn}$ és az α - és β -sugárzás
1901	Becquerel M. Curie		A γ -sugárzás
1911	Rutherford		α -szórás
1912	Wilson	1927 (fizikai)	Ködkamra

3 G. A. Olah: *Chemical Research-2000 and Beyond*, P. Barkan, ed. American Chem. Soc., Washington, DC and Oxford University Press, New York, 1998. pp. 40–54. A dolgozat magyar fordítása megjelent a *Magyar Kémiai Folyóirat* 105, 1999, 161–168. oldalain.

A felfedezés éve	A felfedező neve*	A Nobel-díj éve	A felfedezés
1913	Hevesy György	1943 (kémiai)	Nyomjelzéstechika
1913–16	Soddy	1921 (kémiai)	A radioaktív izotópok kémiai tulajdonságai
1919	Rutherford		Az első magreakció ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$
1923	Compton	1927 (fizikai)	Compton-effektus
1928	Geiger Müller		GM-számláló
1928 1932	Dirac Anderson	1933 (fizikai) 1936 (fizikai)	Pozitron e^+
1932	Chadwick	1935 (fizikai)	Neutron
1932	Cockcroft Walton	1951 (fizikai)	Az atommagok átalakítása gyorsított részecskékkel $0,4 \text{ MeV } {}^1\text{H} + {}^7\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$
1934	Fermi Pauli	(1938)(fizikai) (1945)(fizikai)	Neutrínó $n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}$ $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu$
1934	Frederic Joliot Curie Irene Curie	1935 (kémiai)	${}^{27}_{13}\text{Al}(\alpha, n){}^{30}_{15}\text{P}$
1934	Cherenkov Frank Tamm	1958 (fszikai)	Cherenkov-sugárzás
1934	Szilárd Charmers		Forróatom-kémia
1935-36	Hevesy		Aktivációs analízis
1935 1937	Yukawa Neddermeyer Anderson	1949 (fizikai)	Mezonok
1935 1966	Weizsäcker Myers és Swiatecki		Nukleonok kötési energiájának leírása
1938	Lawrence	1939 (fizikai)	Radioaktív izotópok előállítása ciklotronnal
1938	Bethe	1967 (fizikai)	Magreakciók elmélete, energia felszabadulása csillagokban

A felfedezés éve	A felfedező neve*	A Nobel-díj éve	A felfedezés
1938 dec. 17.	<u>Hahn</u> Strassman (Meitner)	1944 (kémiai)	Maghasadás neutronok hatására
1940	<u>McMillan</u> <u>Seaborg</u> Kennedy	1951 (kémiai)	⁹³ Np, ⁹⁴ Pu előállítás és kémiaja
1940-44	Rabi	1944 (fizikai)	Az atommag mágneses tulajdonságainak leírása
1940-45	Oppenheimer és munkatársai		Atombomba (20 000 t TNT)
1940-48	Blackett	1948 (fizikai)	Magfizikai kutatások
1942	Fermi		Atomreaktor (Chicago)
1944	<u>McMillan</u> Veksler	1951 (kémiai)	Szinkrotron >1000 MeV
1946-50	Powell	1950 (fizikai)	Újabb mezonok felfedezése
1949	Wigner Goeppert-Mayer Jensen	1963 (fizikai)	Az atommag szerkezete, héjmodell
1950-52	Bloch Purcell	1952 (fizikai)	Az atommag mágneses tulajdonságainak részletesebb leírása
1951-56			Első atomerőművek: Idaho (USA), Obnyinszk (Szovjetunió), Calder Hall (Anglia) 5-45 MW
1952	Teller és munkatársai		Termonukleáris reakciók. Hidrogénbomba
1953	Bohr Mattelson Reinwater	1975 (fizikai)	A kollektív részecskemozgás az atommagban
1953	<u>Reines</u> Cowen	1995 (fizikai)	A neutrínó kísérleti kimutatása
1955	Segre, Chamberlain	1959 (fizikai)	Antiproton
1957-65	Fowler	1983 (fizikai)	Magreakció elméleti és kísérleti vizsgálata
1958	Mössbauer	1961 (fizikai)	Mössbauer-effektus

A felfedezés éve	A felfedező neve*	A Nobel-díj éve	A felfedezés
1959			Lenin atomjégtörő
1960-65	Gell-Mann	1969 (fizikai)	Elemi részecskék kölcsönhatásai
1961			Félvezető detektor
1969			Takamak fúziós reaktor (Szovjetunió)
1972			300 GeV-os protongyorsító Batavia (USA)
1974			Természetes reaktor (Gabon)
1975	Richter Ting	1976 (fizikai)	Újabb, nehéz elemi részecskék felfedezése
1975-78	Glashow Salam Weinberg	1979 (fizikai)	Az elemi részecskék közötti gyenge és elektromágneses kölcsönhatások elméletének fejlesztése
1978-79	Cronin Fitch	1980(fizikai)	A K-mezonok bomlásánál felfedezett szimmetriasértés
1985-89	Friedman Kendall Taylor	1990 (fizikai)	A kvarkmodell kifejlesztése
1988-91	Charpak	1992 (fizikai)	A sokszálú proporcionális detektor kifejlesztése
1990-93	Brockhouse Shull	1994 (fizikai)	A neutronspektroszkópia és -diffrakció továbbfejlesztése
1990-95	Veltman't Hooft	1999 (fizikai)	Részecskefizika matematikai megalapozása

* Ha nem minden felfedező kapott Nobel-díjat, akkor a díjat elnyerő kutató neve van aláhúzva. A Nobel-díj hivatalos indoklása és a táblázatban szereplő szöveg nem mindig azonos.

** 1911-ben M. Curie egyedül kapott Nobel-díjat.

Nukleáris történelmünk

A relativitáselmélet és a kvantummechanika kibontakozása után, a 20. század harmincas éveiben gyűltek össze az atommagra vonatkozó ismereteink, amelyek lehetővé tették, hogy tájékozódjunk a szubatomi világban. Ezek az ismeretek nem eredményeztek olyan intellektuális tűzijátékot, mint a relativitáselmélet és a kvantummechanika, inkább empiriát. Hallgatóimnak azt szoktam mondani, hogy az atommagot megérteni egyszerűbb, mint egy váltóáramú áramkört vagy egy kis molekulát. Hogy a nukleáris történések miként formálták ki világunk mai arculatát, miként teremtettek életet és civilizációt, milyen alternatívákat kínálnak a jövőnek, csak lassan, lépésről lépésre bontakozott ki a 20. század második felében. Ezen a századfordulón már érzékelhető, hogy a nukleáris tájékozódás világunkban éppolyan fontos vagy még fontosabb, mint *Archimédész* egyszerű gépeinek mechanikája. Nukleáris vonatkozású hírek gyakoribbak a sajtóban, mint pl. egyenáramokkal kapcsolatos hírek. Egyesek ideológiai, politikai fegyverként használják ki a közönség és sajtó nukleáris analfabétizmusát. Az ezredfordulón kormányoknak és nemzetközi politikai szervezeteknek olyan kérdésekben kellene sürgősen állást foglalniuk, amelyek a magfizika egyenes következményei. Mint *Jay Orear* egyszer megjegyezte: *A magfizika kutatók számára már nem igazán érdekes. Csak emberek számára fontos.*

Megszületik az Univerzum

A kémia abból a fölismerésből bontakozott ki, hogy ólomból nem sikerült aranyat csinálni: az egyes kémiai elemek mennyisége állandó a Földön. Ma értjük, hogy ez a földi atommagok állandóságának következménye.

Az a tapasztalat azonban, hogy az atommagok tömege a legkisebb atommagnak (közel) egész számú többszöröse, azt a gyanút ébresztette *Rutherford*-ban, az atommag fölfedezőjében, hogy minden atommag a legkönnyebb atommagból épül föl. Ezért kapta a hidrogénatom magja a proton (azaz ősi) elneve-

zést. A hipotézis elméleti végiggondolása és tapasztalati ellenőrzése végül is arra a felismerésre vezetett, hogy az atommagok kétfajta részecskéből épülnek föl: a pozitív elektromos töltésű *protonból* és az elektromosan semleges *neutronból*. A két részecske tömege százaléknyi pontossággal egyezik, elektromos tömeg-egységekben kifejezve

$$M_p = 1835,11 m_e, \quad M_n = 1839,65 m_e.$$

Az atommagban lévő protonok számát jelölje Z , a neutronok számát N , a magrészecskék (protonok és neutronok, közös néven *nukleonok*) együttes számát $A = Z + N$. Ezek szerint az atommag elektromos töltése $+Ze$, tömege kb. $M \cong AM_p$. A pozitív elektromos töltésű protonok szétaszítanak egymást. Az atommagok földi stabilitásához szükséges, hogy a protonokat és neutronokat az elektromos erőknél intenzívebb vonzás tartsa együtt: a *magerő*. Nukleonokat ütköztetve azt tapasztalták, hogy a magerő

- a) *vonzó*, intenzitása az elektromos erőknél mintegy százszorosa,
- b) *töltésfüggetlen*, nem tesz különbséget proton és neutron között,
- c) *rövid hatótávú*, elenyészik $b = 1,4 \cdot 10^{-15}$ m távolságon túl.

Az atommag méretének nagyságrendje 10^{-15} m, fizikusok körében ennek neve hivatalosan femtométer, jele fm, beceneve fermi, az egységet már az 1930-as években kiterjedten használó *Enrico Fermi* emlékezve. Az atommagok térfogata a tapasztalat szerint jó közelítésben arányos a nukleonok A számával, amiből következik, hogy a gömbölyű atommagok sugara arányos A köbgyökével. ($R = R_0 A^{1/3}$, ahol az arányossági tényező $R_0 = 1,2$ fm.) Eszerint az ólomatommag ($A = 206$) egy olyan állandó sűrűségű golyó, amelynek átmérője $2R = 2R_0 \cdot 206^{1/3} = 14$ fm, ami messze nagyobb a magerők $b = 1,4$ fm hatótávolságánál. Egy magrészecske tehát nem érezheti az atommagban lévő összes többi részecske vonzását, csak közvetlen szomszédait. Hasonló a helyzet egy vízcsepp esetében: a vízmolekula is csak szomszédaihoz kötődik. A víz forráshője nem függ attól, hogy 1 cm³ vizet egy pohárból vagy egy fazék-ból akarunk elforralni.

Geometriai szemléletünkből következik, hogy az atommaggolyó felszínén lévő nukleonnak kevesebb az öt vonzó szomszédja, mint az atommag belsejében lévő nukleonnak. A felületen lévő részecskék kevésbé kötöttek, a negatív térfogati kötési energiát gyöngíti a pozitív felületi energia. (Ez a felületi feszültség jól ismert a vízcsepp vagy higanycsepp esetében. Egyben higanycseppek és atommagok esetén megmagyarázza azok minimális felületét, gömbalakját.)

A cseppmodell két energiatagjához még a $+Ze$ töltésű atommag (protonok elektromos taszításáról számot adó) elektromos energiája is hozzájárul, ami $(Ze)^2/R$ -rel arányos.

Az E kötési energia egy nukleonra jutó E/A átlaga azt jelzi, hogy a nukleon „milyen szívesen” tartózkodik valamelyik atommagban. Ezt szemlélteti az áb-

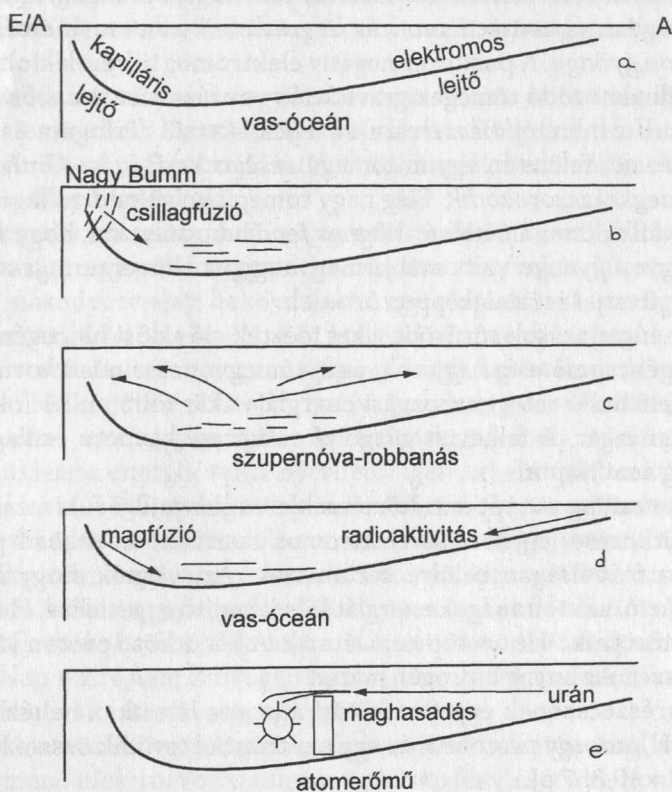
rán mutatott Nukleáris Völgy, ami A növekedtével lejt, hiszen kötési energia szempontjából előnyben vannak a nagyobb atommagok, mert azokban a részecskék kisebb hányada szorul ki a felületre. (Ez megfelel annak a tapasztalatnak, hogy higancseppek az összfelület csökkentése érdekében szívesen egyesülnek nagyobb cseppekké.) Könnyű atommagok fúziója az összfelület csökkenésével, tehát energiafelszabadulással jár. Nagy atommagoknál azonban a sok proton elektromos taszítása jut érvényre: Z és A nagy értékeire az atommag széthasadása járna energianyereséggel.

Egy egyensúlyban lévő univerzumban a nukleonok a Nukleáris Völgy legmélyebb helyén lévő középnehéz atommagokban volnának. Ez (konkrét kötési energia-adatokat használva) a vasatomok magját jelenti, mert az egy nukleonra jutó átlagos kötési energia vas esetében ($A = 56$) a legmélyebb: $-1,37$ pJ. ($1 \text{ pJ} = 10^{-12}$ joule, ami atomfizikusi gyakorlatban elterjedt egységben kifejezve kb. 6 millió elektronvolt.) (Ezt jelképezi az $1/a$ ábra.)

A mi Univerzumunkban a vas átlagos koncentrációja alacsony, alig 0,006%. Univerzumunk anyagának túlnyomó része, közel 75%-a hidrogén

1. ábra

A nukleáris völgy



($A = 1$), ami a legkisebb atommag. Ebből a tapasztalatból 1940 táján *George Gamow* és doktorandusza, *Ralph Alpher* arra következtettek, hogy a *korai Univerzum nagyon forró volt*. Az Univerzum kezdete, a Nagy Bumm után az első másodpercben a milliárd fokot meghaladó magas hőmérsékleten élénk hőmozgás, nagyenergiájú ütközések megakadályozták összetett atommagok létét. Azóta az Univerzum tágulás folytán hűl, de még messze nem elég öreg ahhoz, hogy nukleáris anyaga elérje legmélyebb energiájú állapotát, amit a vas táján lévő elemek jelentenének. Úgy tűnik, Univerzumunk még fiatal (1/b ábra).

Süt a Nap

A forró Nagy Bummtól örökölt protonok és elektronok tették ki Univerzumunk anyagának javarészét. (Idéztük, hogy a magános neutron tömege nagyobb, mint egy proton és egy elektron együttes tömege, ezért a szabad neutronok néhány percen belül protonná és elektronná estek szét: $n \rightarrow p^+ + e^-$.) A táguló Univerzum hőmérséklete egymillió év alatt 1000° alá csökkent, protonokból és elektronokból hidrogénatomok alakultak ki.

Két proton közt az elektromos taszítás 10^{36} -szorta erősebb, mint ugyanakora távolságban a gravitációs vonzás. *A gravitáció az atomi mértékskálán nagyon-nagyon gyönge*. A pozitív és negatív elektromos töltések kioltják egymás hatását. Fölhalmozódó tömegek gravitációs vonzása viszont erősíti egymást. Ha egy gömb r méretét *tízszerezre növeljük*, $4\pi r^3/3$ térfogata és M tömege *ezerszeresre nő*, felületén egy m tömegű részecske $E_{grav} = -GmM/r$ helyzeti energiája *megszázszorozódik*. Elég nagy tömegű golyókat (csillagokat) véve a gravitáció válik domináló erővé. *Wigner Jenő* hangsúlyozta, hogy a gravitáció *nagyon-nagyon gyenge volta szabja meg*, hogy az Univerzum gravitáció által kiformált égitestjei szükségszerűen óriásiak.

Véletlen ingadozások sűrűsödéseket idéztek elő az ősi hidrogénfelhőkben. Ha a hidrogéncsomó *elég nagy* volt, saját tömegvonzása miatt tovább sűrűsödött. A befelé hulló rétegek mozgási energiája akár több millió fokra felhevítette azok anyagát. A felhevült gázgolyó világitani kezdett: csillag született. Ilyen csillag a mi Napunk is.

Amikor a csillag középponti hőmérséklete több millió fokra emelkedett, a protonok ütközése legyőzte az elektromos taszítást, az ütköző protonok a magerők hatótávolságán belülre kerülhettek. Azt várnók, hogy megindul a nukleáris fúzió, az atommagok energiát felszabadító egyesülése, $H+H \rightarrow He$.

Nem ez történik. ${}^2\text{He}$ -izotóp nem létezik. A két ütköző proton változás nélkül pattan szét. Az anyag hidrogén marad.

Két magrészecskének egyetlen kötött állapota létezik: a nehézhidrogén, a *deuteron*, ${}^2\text{H}$, ami egy protonból és egy neutronból tevődik össze. Mért kötési energiája $E = -0,357$ pJ.

Számoljunk egy kicsit. Ha b a magerők hatótávolsága, akkor a két kötött magrészcseke egymástól nem lehet ennél távolabb: $\Delta x \leq b$. A határozatlansági összefüggés szerint $\Delta x \Delta p \geq h$. Eszerint az atommagban a mozgási energia $E_{mozg} \cong \Delta p^2 / 2M_p \geq h^2 / 2M_p b^2 \cong 60 \text{ pJ}$. Ez az érték nagyságrenddel nagyobb a mért $0,357 \text{ pJ}$ kötési energiánál. A deuteronot összetartó potenciális energia $E_{pot} \cong 60,357 \text{ pJ}$ sokmilliószorosa az atomburkot összetartó elektromos energiának. De még ez a nagy magerő-potenciál is éppen hogy ellensúlyozni képes a rövid hatótávolság okozta lokalizáltság következményeként föllépő $E_{mozg} \cong 60 \text{ pJ}$ mozgási energiát: a deuteron majdnem kiugrik a potenciálgödörből! *A proton-neutron-rendszer nagyon gyöngén kötött rendszer.* Ezt a következtetést az is bizonyítja, hogy a deuteronnak nincs gerjesztett állapota: a legkisebb forgás vagy rezgés esetén szétesik. Proton-proton kötött rendszer már nincs, ami legegyszerűbben a csekély elektromos taszítástöbblet számlájára írható. (Megjegyezzük, hogy a természet még a két részecske spinjének relatív helyzetével is bűvészkedik, de ennek tárgyalásába itt nem megyünk bele.)

Hát akkor hogyan termeli a Nap a napsugárzás fedezéséhez szükséges nukleáris fúziós energiát?

Ha két proton fúziója stabil kötött rendszert adna, ha ${}^2\text{He}$ léteznék, akkor a forró hidrogéngolyó hidrogénbombaként milliomod másodperc alatt héliummá fuzionálna. Nem volna évmilliárdokon át tartó napsütés, nem léteznék földi élet.

Ha két nukleáris részecske egyáltalán nem alkotna kötött rendszert, akkor a csillagok nem tudnák kiszabadítani a Nukleáris Völgy baloldali csúcsán lévő hidrogénben lehetőségként rejlő nukleáris energiát, nem lennének az éjszakában tartósan fénylő csillagok.

Ha az aktuális univerzumban, a Nap centrumában 15 millió fokon összeütözik két proton, egy pillanatig mintha ${}^2\text{He}$ -atommag volna. Ha ez alatt a rövid milliomod másodperc alatt bekövetkezne egy radioaktív β -bomlás, akkor pozitron kibocsátásával ${}^2\text{He} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+$ átalakulás történne, ami deuteronot produkálna. A stabil deuteron-atommag már tovább fuzionálna: ${}^1\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$, majd ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{H} + {}^1\text{H}$. Így (vagy valami hasonló úton) ${}^4\text{He}$ atommag keletkezne, ami nagyon stabil, kötési energiája mély, $-4,52 \text{ pJ}$, tehát ezúton sok nukleáris energia volna nyerhető. Igen ám, de a radioaktív β -bomlás igen kis valószínűségű, *gyenge folyamat*. Ezért a Nap centrumában egyetlen protonnak másodpercenként sokszor, átlagosan mintegy tízmilliárd éven át kell próbálkoznia, hogy más protonnal ütközve épp az ütközés pillanatában szerencsésen átéljen egy β -bomlást. A Napban a $\text{H} \rightarrow \text{He}$ fúziót egy közbeiktatódott szűk *radiaktív szelep* húzza szét milliomod másodpercről milliárd évekre. A Nap ezért nem hidrogénbomba, nem is fekete felhő, hanem egünkön megbízható kitarással ragyogó égitest.

Az élet keletkezése, a biológiai fejlődés atomok násztáncából évmilliárdok alatt végbemenő *elektrokémiai* folyamat. A Nap fénylését a radioaktív β -bom-

lást irányító *gyenge kölcsönhatás* prolongálja évmilliárdokra. Érdeemes elgondolkozunk a két időskála egybeesésén, amit az elektromos (biokémiai) és gyenge (asztrofizikai) erők produkálnak a természetben. Mert ennek köszönhetjük, hogy itt vagyunk, hogy ezen az összjátékon elcsodálkozhatunk.

Martin Rees, angol királyi csillagász a deutronra mint az Univerzum történetének egyik kulcsszereplőjére tekint. A deutron kötési energiája (hogy ti. az nem zérus, de kicsi a magerő potenciális energiájához képest) a Mindenség életét megszabó nagyon fontos adat. Ha a magerő tíz százalékkal gyöngébb volna, nem volna kötött ^2H . Ha tíz százalékkal erősebb volna, ^2He is létezne. Mi viszont egyik esetben sem volnánk jelen, hogy gyönyörködjünk az Isteni Színhátékban...

Kiformálódik a szénatom

A Nagy Bummban született Univerzum 15 milliárd éves, benne ma 73,5% a H, 26,4% a He, de ez csupán a periódusos rendszer első két eleme, a Nukleáris Völgy baloldali lejtőjének indulása. (Az összes többi elem alig tesz ki egy ezreléket.) Márpedig hidrogén- és héliumgázból nem lehet komplex molekulákat, szilárd anyagokat, élőlényeket, műtárgyakat formálni.

Az atommag legalsó energiaszintjén a *Pauli-elv* szerint legfeljebb két proton és két neutron foglalhat helyet, ez épp a He-atommag, ahol mindegyik nukleont másik három vonz, egymást a magerők hatótávolságán belül tartván. *Wigner Jenő* mutatott rá arra, hogy a héliumatommag (deutronhoz képest) nagy kötési energiája az intenzív magerő rövid hatótávolságának szép kifejeződése.

Ha a ^4He be akarna fogni egy ötödik részecskét, annak a *Pauli-elv* szerint már csak az első gerjesztett nívón jutna hely, ahol a mozgási energia négyszeres lenne, amit a potenciális energia nem tudna ellensúlyozni. Öt részecskét tartalmazó atommag (^5Li és ^5He) nem létezik. A csillagokat alkotó H és He nem fuzionálhat egymással!

Két He-atommag egyesüléséből ^8Be atommag keletkezne (4 nukleon a „földszinten”, további 4 az „első emeleten”), de ez az atommag sem létezik stabilan: keletkezése után rögtön szétesik két ^4He -ra. (A „emeletre szorult” négy nukleon inkább leköltözik egy másik ház „földszintjére.”) Magfizikai tény tehát, hogy a világ 99,9%-ban H- és He-atommagokból áll, és ekkor STOP! A lehetséges $\text{H} + \text{H} \rightarrow ^2\text{He}$, $\text{H} + \text{He} \rightarrow ^5\text{Li}$, $\text{He} + \text{He} \rightarrow ^8\text{Be}$ fúziós folyamatok föltételezett ^2He , ^5Li , ^8Be végtermékei nem fordulnak elő a természetben. De mi létezőnk! Honnan erednek az élő anyagot fölépítő C-, O-, N-atommagok?

Ilyen atomokat számottevő gyakoriságban észleltek a Napnál nagyobb vörös óriáscsillagok színképében. Ezek belső hőmérséklete a százmillió fokot is eléri, bennük jóval vehemensebbek és gyakoribbak az atommag-ütközések.

A C keletkezését megmagyarázandó *Fred Hoyle*, a vad fantáziájáról híres brit csillagász a következő föltevést tette: Néha előfordul, hogy a ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be}$ ütközésben keletkezett átmeneti ${}^8\text{Be}$ atommagot egy harmadik ${}^4\text{He}$ atommag is telibe találja, mielőtt az szétmenne. Tételezzük föl, hogy a ${}^4\text{He} + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ folyamatban keletkező C-atommagnak éppen ennél az energianál van egy magasan lévő (virtuális) energianívója, ami a ${}^{12}\text{C}$ kialakulás valószínűségét nagymértékben megnöveli. A ${}^{12}\text{C}$ gerjesztett atom ezután foton kibocsátásával alapállapotba mehet: stabil ${}^{12}\text{C}$ -atommag születik, ami a szerves kémia alapja. Hoyle-nak ezen energianívó létezésére vonatkozó kétségbeesett jóslatát az amerikai William Fowler magfizikai kísérletekkel igazolta. Így *vörös óriáscsillagokban történő hármas ütközésekkel* megindulhat a periódusos rendszer benépesülése: He és C ütközése oxigént, H-atommagok és C ütközése nitrogént, O és He ütközése neont, Ne és He ütközése magnéziumot, Mg és He ütközése szilíciumot adhatott, és így tovább. Ezekből az elemekből később pedig cukor, hús, dolomit és kavics is képződhetett...

A periódusos rendszer benépesüléséhez a kulcs a ${}^{12}\text{C}$ gerjesztett energianívója volt, aminek *pontosan a szükséges helyen kellett lennie*. Mostanában elvégzett számítások szerint az atommagokat kialakító magerők intenzitásának 1-2 ezreléknyi módosítása ezt az energianívót már úgy elcsúsztatná, hogy hármas He-ütközésben nem keletkezne C-atommag. Ez a kedvező pontosság még meglepőbb, mint a deuteron esete. Az asztrofizikusok elcsodálkoznak: mi állíthatta be úgy ezt az energiaszintet, hogy lehetővé váljék a C-N-O biokémia kibontakozása, az élet megszületése?

Mindez másként is megfogalmazható. Ha a ${}^{12}\text{C}$ virtuális energiaszintje ezreléknyivel odébb volna, az ilyen világban nem lennének asztrofizikusok, akik elcsodálkoznak a nívó szerencsés beállításán. Mi nem *ok* vagyunk, hanem *következmény*. De nehéz megállni, hogy gondolkodásunk itt leálljon.

Az Univerzum anyagában ma 0,06% az O, 0,026% a C, 0,023% a Ne, 0,007% a N, 0,006% a Si, ezek az Univerzum leggyakoribb elemei a H és He után. Vörös óriások mélye formázta őket 100 millió fokon. De ez a hőmérséklet még nem elég nehéz atommagok kialakításához. Pl. két ${}^{28}\text{Si}$ atommag ütközésénél két +14e töltés taszítja egymást, tizenhatszor akkora erővel, mint az oxigén-atommagot termelő +2e töltésű He és +6e töltésű C ütközésekor. Ehhez sokkal magasabb hőmérséklet kívánatik, ami még a vörös óriásokban sincs.

Amikor kimerül egy Nap-típusú csillag He-ot termelő H-készlete, belsejét a gravitáció összehúzza és tízszeresen fölhevíti: vörös óriás lesz, ami már He-atommagok fúziójával C, O, Ne, Mg, Si ... magokat termel.

Amikor kimerül a vörös óriás He-készlete, belsejét a gravitáció összerántja, a hőmérséklet ismét tízszeresre (milliárd fokra) hevül. Végbemeget akár a ${}^{28}\text{Si} + {}^{28}\text{Si} \rightarrow {}^{56}\text{Ni}$ reakció is. Az ${}^{56}\text{Ni}$ azután két β -bomlással ${}^{56}\text{Fe}$ atommaggá alakul, ami a legstabilabb atommag, a Nukleáris Völgy legmélyebb pontja.

A vas valóban a leggyakoribb fém Univerzumban: 0,006%. Egy aranygyűrűért lehajolunk az utcán, de egy rozsdás vasszögért nem.

Az egy nukleonra jutó kötési energia E/A a vasban a legnagyobb: $1,37 \text{ pJ}$. Ennek a nukleáris energiának 80%-a $H \rightarrow \text{He}$ fúziók során szabadul föl Nap-típusú csillagokban. További 10% $\text{He} \rightarrow \text{O}$ fúzió során szabadul föl vörös óriásokban. A fennmaradt 10% termelődik ki a késői csillagfejlődés során, a vas kialakulásakor. Ez utóbbi már csak rövid ideig tudja táplálni a fényesen forró csillagot (a kvazárt), az néhány év vagy évtized során minden nukleáris üzemanyagát fölemészti. A kvazár ritka átmeneti tünemény az égbolton. Aktív léte utolsó másodperceiben a belső, milliárd fokos gáz nyomása már nem tud ellenállni a fölfokozott gravitációnak: a csillagóriás egyetlen hatalmas atommagga (1-2 km átmérőjű *neutroncsillaggá*) roskad össze. A behulló rétegek fölforrósodnak az ütközésben: az atommagok „forrni” kezdenek, neutronokat és α -részeket párologtatnak el. Ezeket más atommagok elnyelik. Így a csillag pár perces haláltusájában benépesül a periódusos rendszer, egészen az uránig, sőt még azon is túl. A fölforrósodott neutroncsillag felszínéről kiinduló hősugárzás lefújja a csillag legkülső rétegeit. A kiterjedő forró burok hirtelen fölfényesedést okoz: a csillagászok *szupernóva-kitörést* észlelnek ($1/c$ ábra). A szupernóva színeképében még uránon túli elemek (pl. kalifornium, $Z = 98$) színeképvonalai is megjelennek, tanúsítván a fölforrt atommagok neutrongőzéiben végbemenő pokoli alkímiát. A csillag aktív élete véget ér.

Szupernóva-kitörések szennyezik be a világűr a periódusos rendszer százféle elemével.

Reng a Föld

Lord Kelvin a 19. században megkísérelte, hogy a Napot egyre hűlő gázgolyónak, a Földet egyre hűlő kőgolyónak tekintve megbecsülje azok életkorát. Föltételezte, hogy a Nap által szétsugárzott energiát fokozatos lehűlés és gravitációs összehúzódás fedezi. Ily módon a Nap maximális életmúltjára 20 millió évet, a Föld életkorára 75 ezer évet adott. Darwinnak viszont a fajok evolúciójának tudományos magyarázatához 320 millió évre lett volna szüksége. De Kelvin által meggyőzetvén, a fizikai időskála rövid voltát látván *Darwin* 1860-ban késznek mutatkozott evolúciós elméletének visszavonására.

Számszerűen elsőként *Hevesy György* mutatott rá 1923-ban, hogy a radioaktivitás új helyzetet teremt a kozmikus időskálára vonatkozóan. A ^{238}U bomlássora ^{206}Pb -ba torkollik, a ^{235}U bomlássora ^{207}Pb -ba, a ^{232}Th bomlássora ^{208}Pb -ba. Föltételezve, hogy az urán- és tóriumércekben kezdetben semmi ólom nem volt, a megfigyelt ólom/urán és ólom/tórium arányból *Hevesy* 6 milliárd évet kapott a Föld maximális életkorára, illetéknépp közel 100 000-szeresére tágítván az időskálát. Ebbe már belefért a biológiai evolúció időigénye.

Hevesy tudatában volt módszere gyöngéjének: az urán és tórium bomlás-sorozatában van egy nemesgáz is, a radon, amelyik elszállhat, meghamisítván a radonból képződő ólomra alapozott kormeghatározást. Ezért tulajdonított fontosságot a szamárium általa 1927-ben fölfedezett radioaktivitásának. A szamárium (Sm) és bomlásterméke, a neodimium egyaránt ritka földfémek, ezért kémiailag nem különülnek el. A Sm-óra 4 milliárd évnél mutatja a földkéreg életkorát.

A Nap fényében a vas színkép vonalai is láthatóak, ezért a Nap nem lehet elsődleges, tiszta hidrogénből tömörült csillag. A Galaktikának ezen a táján a Naprendszer születése előtt be kellett következnie egy szupernóva-robbanásnak. Az akkor kivetett csillaganyag elkeveredett az ősi hidrogénfelhővel. Űtközésük során sűrűsödések támadtak. Ilyen poros hidrogénfelhőből formálódott ki a Naprendszer. Közepén a hidrogént több millió fokra hevítette az összesűrűsödés során végzett gravitációs munka. Megszületett a mi Napunk, amelynek energiaforrása a hidrogént héliummá alakító magfúzió. Hasonló a külső óriásbolygók összetétele, ezek tömege azonban nem volt képes annyi gravitációs energiát szolgáltatni, hogy kellően fölmelegítve lehetővé tegye az egymást taszító atommagok fúzióját. A Naphoz közelebb eső langyos tájakon a hidrogén, hélium elillant, kristályos porszemekből pedig szilárd égitestek álltak össze: a Merkúr, a Vénusz, a Föld, a Hold, és a Mars.

A szupernóva által kidobott nehéz atommagokban a nukleonok túlnyomó hányada belül van, mellettük elhanyagolható a felületre szorult részecskék száma, ezért fúziójuk nem járna energiafölszabadulással. Sőt, a legnehezebb atommagok sok protonja közt fellépő és atommagot átérő elektromos taszítás a legnehezebb atommagok földarabolódását teszi kívánatosszá (α-bomlás). A Föld belső energiáját a radioaktivitás szolgáltatja: csúszás lefelé – a közép felé – a Nukleáris Völgy jobboldali lejtőjén. A földi természetes radioaktivitás a szupernóva poklában keletkezett nehéz, instabil, „forró” atommagok lassú kihűléseként fogható föl. (Lásd az 1/d ábrát.)

A legrégebb meteorok és holdközvetek radioaktív órája a Naprendszer legrégebb égitestjeinek kialakulását 4,5 milliárd évvel ezelőttre teszi, az nem sokkal a szupernóva-robbanás után megtörtént. A Nap közelében fagyos porszemekből összeállt fiatal Földön még sok megvolt a szupernóvában keletkezett radioaktív elemekből. Periódusos rendszerünk véget ér a 92 rendszámú uránnal, a Földön csak milliárd évnél hosszabb felezési idejű radioaktív elemek maradtak meg. Bomlásuk hatására a földkéreg tonnánként 6 mikrowatt hőt termel, bolygónk felszíne 10 kW/km² intenzitással sugároz (infravörösben), a Föld-erőmű 5 billió watt teljesítménnyel működik. Egy halovány infravörös „csillag” felszínének lakói vagyunk.

A radioaktív ⁴⁰K-t Hevesy György azonosította. A hajdanvolt szupernóvában – akárcsak Univerzum-szerte – viszonylag sok volt a ⁴⁰Ca atommag, mert bennük mind a 20 proton, mind a 20 neutron zárt héjat (1s², p⁶, 2s², d¹⁰) alkot. Belőlük szupernóva-robbanáskor $n + {}^{40}\text{Ca} \rightarrow {}^{40}\text{K} + p$ reakció hozta létre a

^{40}K -ot, ami lassú β -bomlással visszaalakul ^{40}Ca -má vagy elektronbefogással ^{40}Ar -t termel.

Amikor 4,5 milliárd évvel ezelőtt a Föld kialakult, kétszer annyi volt benne a ^{238}U , tízszer annyi a ^{40}K , százszor annyi a ^{235}U , mint ma. A hidegen összeállt bolygót megolvasztotta a mainál nagyságrenddel intenzívebb radioaktivitás. Ekkor süllyedtek a mélybe a nehézfémek, kialakítva a vas-nikkel belsőt. (A szupernóvában sok vas keletkezett, mert a vas-atommag van a Nukleáris Völgy legmélyebb pontjában.) A salak (fémoxidok és fémszilikátok formájában) a felszínre úszott. A fölhevült bolygóról elillant az eredeti (apoláros H_2 , He , CH_4 , nemesgáz összetételű) atmoszféra. A vörös óriáscsillagokban $^4\text{He} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$ reakcióban keletkezett neon az Univerzum egyik leggyakoribb eleme (kozmoszus koncentrációja 10^{-4}), a Földről viszont megszökött (földi koncentrációja alig 10^{-10}).

A legnehezebb elemek radioaktív felezési ideje			
Z = 100	^{253}Fm	fermium	3 nap
99	^{254}Es	einsteinium	276 nap
98	^{251}Cf	kalifornium	800 év
97	^{247}Bk	berkelium	1400 év
96	^{247}Cm	curium	16 millió év
95	^{243}Am	americium	7000 év
94	^{244}Pu	plutónium	80 millió év
93	^{237}Np	neptunium	2 millió év
92	^{238}U	urán	4,5 milliárd év
91	^{232}Pa	protaktinium	32 ezer év
90	^{232}Th	tórium	14 milliárd év
89	^{227}Ac	aktínium	22 év
88	^{226}Ra	rádium	1600 év
87	^{212}Fr	francium	20 perc
86	^{222}Rn	radon	4 nap
85	^{210}At	asztatin	8 óra
84	^{212}Po	polónium	45 másodperc
83	^{209}Bi	bizmut	stabil

Radioaktív elemek a mai Földön			
^{232}Th	12 milliárd év	20 g/tonna	6,7 pJ/atom
^{238}U	4,5 milliárd év	4 g/tonna	8,3 pJ/atom
^{40}K	1,3 milliárd év	30 g/tonna	2,2 pJ/atom
^{235}U	0,7 milliárd év	0,03 g/tonna	8,8 pJ/atom

Amint a radioaktivitás alábbhagyott, a Föld kérge megdermedt, a Sm-óra és a ^{40}K -óra szerint 4 milliárd évvel ezelőtt. A belső radioaktivitás azonban tovább működött, táplálván a vulkanizmust. Az eredeti kristályporra fagyott poláros molekulák (H_2O , CO_2 , H_2S , NH_3) leolvadtak és a belső melegtől hajtva kipöföttek. CO_2 légkör és H_2O óceán alakult ki. Az első üledékes kőzetek 3,9 milliárd évesek.

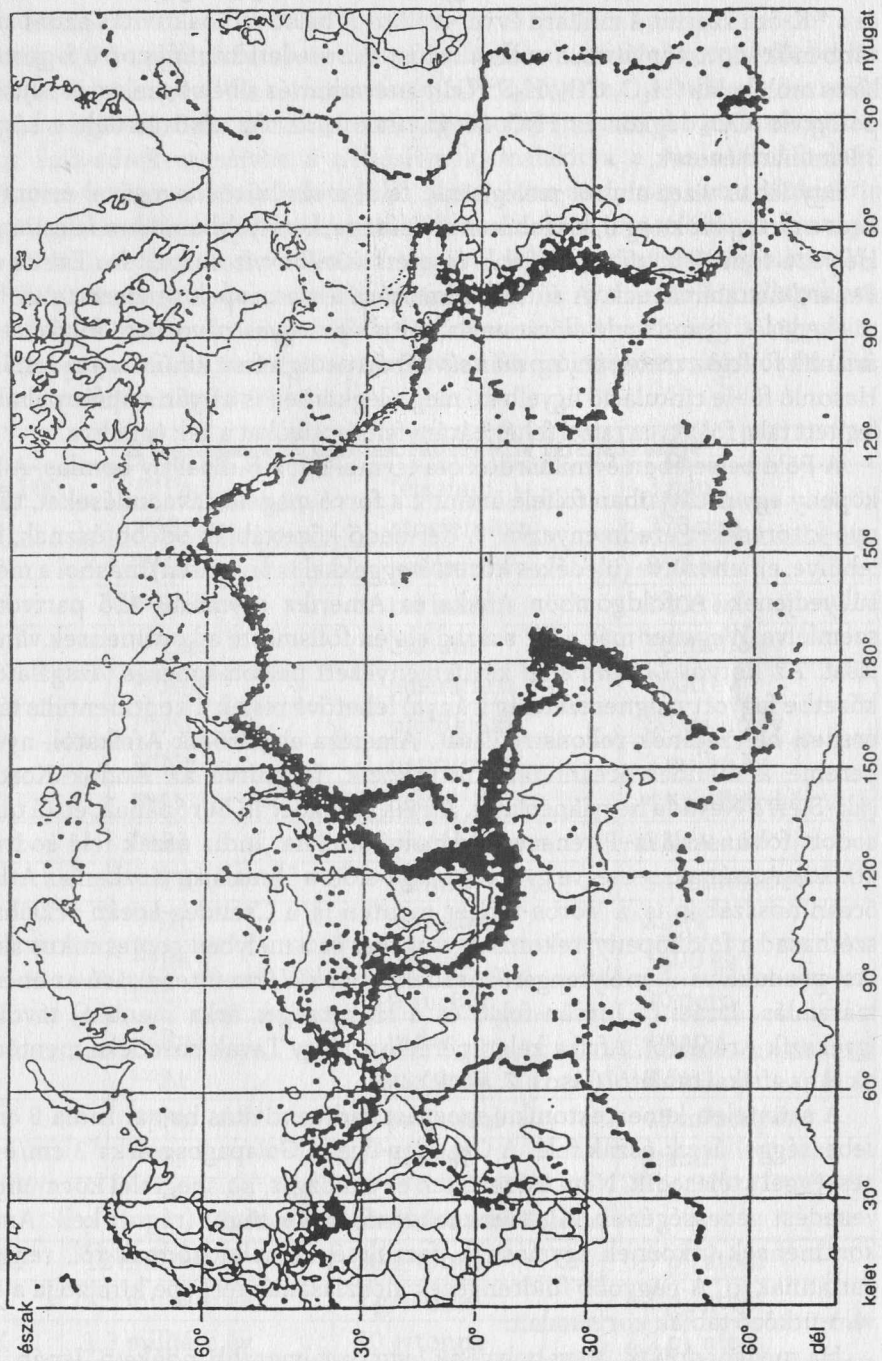
Egy lábas vizet alulról melegítünk; felül a víz hűvös levegővel érintkezik. Lent a meleg víz kitágul, kisebb lesz a sűrűsége, könnyebbé válik, a felszínre tör. Helyébe fönről kihűlt, hidegebb és ezért sűrűbb víz süllyed le. Ezt nevezik *Benard*-instabilitásnak. A sűrűlő hatására a vízcseppek rendszertelen föl-le tülekedését állandósuló köráramlás váltja fel: egyes sávokban folyamatosan áramlik fölfelé a meleg anyag, más sávokban pedig a fent kihűlt anyag lesüllyed. Hasonló föl-le cirkuláció figyelhető meg a légkörben is a nyári napfény által melegített talaj fölött: ez rajzol fehér bárányszerű csíkokat a kék égboltra.

A Föld belsejében évmilliárdok óta termel hőt a radioaktív bomlás. A földköpeny egyes sávjaiban fölfelé áramlik a forró magma, lávaömléseket, tűzhányó-kitöréseket eredményezve. A dermedő kőzettáblák odébb úsznak, hogy lehülve, elnehezülve (üledékes kőzetrétegekkel is terhelten) máshol a mélybe süllyedjenek. A földgömbön Afrika és Amerika egymásba illő partvonalát szemlélve *Wegener* már a 20. század elején fölismerte a kontinensek vándorlását. Az *Eötvös Loránd* által kezdeményezett paleomágneses vizsgálatok (a kőzetbe fagyott mágnesezettség iránya) lehetővé teszik a kontinentális táblák eredeti helyzetének rekonstruálását. Amerika elsodródik Afrikától, nyugati pereme a csendes-óceáni táblába ütközik, fölgyűrve az Andok–Kordillerák–Sierra Nevada hegyláncolatát. Afrika nekikoccan Európának, ettől tarajosodott föl az Atlasz–Pireneusok–Alpok vonulata. India észak felé sodródva ütközik Ázsiának, recsegve gyűrven maga előtt a Himaláját. Közben az Atlanti-óceán hosszában is, a Vörös-tenger mentén is, a Csendes-óceán árkaiban is széthasad a földköpeny, rekordmélységeket és a mélyben geotermikus aktivitást produkálva. A mélytengeri hasadékokból kW/km intenzitású az energia-kiáramlás. Izrael (a Jordán-folyó és a Holt-tenger árka mentén) távolodni igyekszik Arábiától. Afrika keleti pereme a Nagy Tavak hasadéka mentén válik el az afrikai táblától (lásd a 2. ábrát).

A szüntelen lemeztektónikai mozgást radioaktivitás hajtja. India 5 cm/év sebességgel úszik észak felé. A Csendes-óceán Galapagosz-árka 3 cm/év sebességgel szélesedik. Nem észrevétlen ez a mozgás, kb. megfelel körmünk növekedési sebességének. Körmünket időről időre vágni (rágni) kell. Amikor kontinensek ütköznek egymásnak, feszültségek halmozódnak föl, rengések pattannak ki. A nagyobb földrengések eloszlásának térképe kirajzolja a szétváló-ütköző táblák körvonalait.

Ha meggondoljuk, hogy bolygónk legmozgalmasabb vidékein, Japán, Kína és a Fülöp-szigetek vonalában emberek ezreit-millióit érinti egy-egy földren-

2. ábra Földrengés-gyakoriság és ütköző kontinentális táblák



gés, tisztelni tanuljuk a radioaktivitás által táplált erőket. Érdeemes megismer-
ni bolygónk belső dinamikáját, hogy földrengéses sávra ne építsünk völgyzáró
gátat, atomerőművet, hogy a lakóházak rengésállók legyenek.

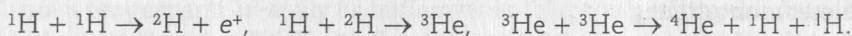
A magyar föld sem dermedt mozdulatlanságba. Amikor a Hévízi-tó vagy a
Rudas-fürdő természetes melegét élvezzük, amikor Balatonfüred vagy Eger
szénsavas víze bizsergeti bőrünket, tudatosulhat bennünk az alattunk húzódo
geológiai törésvonal. A Hévízi-tó gyógyító melege voltaképp az egykori szu-
pernova nukleáris palackokból lassan kiszivárgó hője! Magyarország nyugod-
tabb ugyan, mint Görögország vagy Japán, de a geológiai térkép elárulja, hogy
világok ütköznek egymásnak talpunk alatt: a Nagyalföld az Eurázsiai Lemez
része, de a Kisalföld az Afrikai Lemez leszakadt darabja. Egymásnak torlódó
lemezek magasították föl a Kárpátokat és a Dinári Hegyláncot, körülölelve és
kontinentálisan napos éghajlatúvá varázsolvá kicsi hazánkat. (1986-ban ez a
hegykoszorú tartotta távol tőlünk a Csernobil felől fúvó szeleket.) A Várpalota-
Csepel-Mátra-Eger vonal mentén az elmúlt években is érzékelhetően
mozdult a föld. A föld mélye pedig – a föláramló magma ércesedése folytán –
bányakincseket kínál. Recsknél található bolygónk egyik legnagyobb mélységi
rézérc-tömbje, a szomszédos Lahóca-hegy pedig kibányászásra érdemes
aranykincset rejt.

Akit elvarázsol aktív bolygónk csodája, Olaszországba vagy Hawaiiiba hajó-
zik füstölgő-szikrázó tűzhányókat csodálni, az amerikai Yellowstone-parkba,
Izlandra vagy Új-Zélandra utazik, hogy gejzírek játékában gyönyörködhesen.
De ha értő szemmel nézünk körül, hazánkban is átélhetjük annak a nukleáris
laboratóriumnak a tüneményeit, amit úgy hívunk: Föld.

Ha pedig valakit riaszt az a szó, hogy *radioaktivitás*, játsszon el azzal a gon-
dolattal, hogy kiküszöböli azt. Ha a Földre koncentrálja szimulációs játékát,
kialudnának a tűzhányók, kihűlnének a hévizek, soha nem is lett volna lemez-
tektonika. Nem lennének hegyek, kontinensek, mindet rég elmosta volna az
erózió. Egész bolygónkat kilométer mély óceán borítaná. Még antinukleáris
barátunknak is kopolyúja nőne. Hogy tetszik?

Szivárog a gáz

A stabil ^3He izotóp fontos állomás a csillagokban végbemenő fúziós láncban:



Kevés ^3He van az Univerzumban, mert rögtön tovább fuzionál ^4He -má. Pe-
dig a stabil ^3He ideális üzemanyag volna energiatermelő fúziós erőművek szá-
mára, hiszen $^2^3\text{He} \rightarrow ^4\text{He} + ^2^1\text{H}$ a könnyű atommagok egyetlen *tiszta* ener-
giatermelő fúziós reakciója, amelynek során sem neutron, sem más radioaktív
anyag nem keletkezik. A földi héliumnak mindössze 0,00013%-a ^3He . A Föld

számottevő héliumot tartalmaz, ami tiszta ${}^4\text{He}$. Ennek csak az lehet a magyarázata, hogy a földi légkör eredeti héliumtartalma elillant, a fölgázban lévő hélium a Föld mélyén végbemenő α -bomlások terméke. Ami kevéske ${}^3\text{He}$ a légkörben van, azt a napszél sodorhatta felénk. Éppen ezt megértve hatott meglepetés erejével, hogy 1995-ben Szibériában olyan nagy mélységből származó magmakiömlést találtak, amelyben a zárványként jelenlévő hélium rekordértékű 0,0016% ${}^3\text{He}$ -koncentrációt tartalmaz. Ennek magyarázata, hogy ez a mélységi hélium a Naprendszer eredeti anyagából származik: a ${}^3\text{He}$ -nak még nem volt módja arra, hogy a felszínre törjön és elillanjon. Legfrissebb becslések szerint (elsősorban a mélytengeri árkokból) ma is évente több kg ${}^3\text{He}$ szökik ki a légkörbe. Ezek a megfigyelések bizonyítják, hogy a Föld mélye még őrzi a hidegen összeállt ősi anyag emlékét.

A földi légkör 1%-a argon nemesgáz. Ami meglepő: ez nem a legstabilabb (zárt $N = 20$ neutronhéjú) ${}^{38}\text{Ar}$ izotóp, hanem ${}^{40}\text{Ar}$. *Niels Bohr* panaszkodott is: „*Ez rossz argon!*” *Hevesy György* magyarázta meg neki, hogy a földi argon atommagok nem csillagban, szupernóvában formálódtak, hanem itt keletkeznek a Földön, a radioaktív ${}^{40}\text{K}$ bomlásából. (A zárvány ${}^{40}\text{K}$ és ${}^{40}\text{Ar}$ arányának összehasonlítása kőzetek kormeghatározásának gyakorlatilag hasznosított módszere.) A földi radioaktivitás nem csupán stabil héliumot és argont termel, hanem radont is, ami radioaktív nemesgáz. A ${}^{232}\text{Th}$ bomlássorozatában ${}^{220}\text{Rn}$ keletkezik, aminek felezési ideje 1 perc. A ${}^{235}\text{U}$ bomlássorozatában ${}^{219}\text{Rn}$ keletkezik, felezési ideje mindössze 4 s. A ${}^{238}\text{U}$ bomlássorozatában ${}^{222}\text{Rn}$ keletkezik, felezési ideje 4 nap. Közülük csak a ${}^{222}\text{Rn}$ él elég soká ahhoz, hogy a földből a felszínre diffundáljon, és hírt hozzon a felszín alatt lefolyó jelenségekről. Budapesten tektonikai törés vonul át a Duna mentén. A Lukács-fürdőt vízzel tápláló Molnár János barlang vízalatti Diogenész-kürtőjének levegőjében például *Marx Tamás* köbméterenként 88 000 Bq radon-aktivitáskoncentrációt talált. (1 Bq = 1 becquerel = 1 radioaktív bomlás másodpercenként.) Nagyobb földrengések előtt a sziklában feszültségek épülnek ki, mikrorepedések támadnak, ami megnöveli a radon felszínre áramlását. Kína és India földrengés által veszélyeztetett területein megfigyelték, hogy a radon mennyisége a talajban, talajvízben többszörösére szökik föl egy-két nappal a rengés kipattanása előtt. Különösen Kínában próbálják meg, hogy a Rn és CO_2 kiáramlásának folyamatos figyelésével előre jelezzék a környéken várható nagyobb rengéseket. Már volt rá példa, hogy egy nappal korábbi riadó és kitelepítés sok ezer emberéletet mentett meg.

Az a körülmény, hogy a földben végbemenő nukleáris bomlások radioaktív nemesgázt (radont) termelnek, egészségi kockázattal is járhat. A földgáz a kémiaileg legtisztább fosszilis tüzelőanyag, de a földből kitermelt földgáz aktivitása a kitermelés helyén a $10\,000\text{ Bq/m}^3$ értéket is meghaladhatja. Ha a gázt közvetlenül vezetik a fogyasztóhoz, benne a radon aktivitása 1000 Bq/m^3 -nél nagyobb lehet, ami a gáz elégetésekor a konyha légterébe juthat. A radon fele-

zési ideje 4 nap, tehát hosszabb tárolás-vezetés esetén mód van az elbomlására. Budapesten a városi gáz aktivitása elhanyagolhatóan kicsiny, kevesebb, mint 100 Bq/m^3 .

Környezetfeltők kedvenc jelszava a geotermikus energia hasznosítása. Az elmondottak után nem kell bizonygatni, hogy ez végső soron a nukleáris energia egyik jelentkezési formája. Mint a Fülöp-szigeteken tapasztalták, a gőzzel felszínre jutó savas anyagok (H_2S , H_2SO_4) a környéken súlyos mezőgazdasági károkat okoznak. 1 GW-év villamos energia előállításánál a geotermikus erőmű 10^{14} Bq-nél nagyobb aktivitást (elsősorban radont) emittál a környezetbe. Ez a hirosimai bombarobbanás által szétszórta aktivitás 1%-a, több, mint egy hasonló teljesítményű atomerőmű által a lakosságnak okozott kollektív dózis! (Figyelembe véve a teljes nukleáris gyártási ciklust.)

A talajból kiszivárgó radon földúsulhat lakóházban, különösen a télen fűtött és kevésbé szellőztetett szobákban. A kéményen, ablakréseken kiszökő meleg levegő alulnyomást idéz elő a lakószobában, így a földszintes, alápincézetlen szobák különösen szívják a talaj-radont. Hazánkban ilyen szobákban a radon-koncentráció éves átlagban 120 Bq/m^3 közéértékű.¹ Ez a radont a mérsékelt és hideg égöveken az embereket érő legnagyobb dózisterhelés forrásává teszi. Magyarországon néhány település házaiban 1000 Bq/m^3 -t meghaladó radonaktivitás-koncentráció mérhető. Aki itt él, saját lakásában – esetleg mit sem sejtve – nagyobb sugárterhelésnek teheti ki magát, mint ami a paksi atomerőmű munkahelyein megengedhető. (Az Európai Közösség régi házaiban 400 Bq/m^3 éves átlagot, újonnan épült házaiban 200 Bq/m^3 -t tekint elfogadhatónak. A Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság $200\text{--}600 \text{ Bq/m}^3$ közt javasol intézkedési határt. A magyar Népjóléti Minisztérium ilyen radonkorlátot még nem ismer.) Hogy a legaktívabb és legismertebb esetet megértsük, jobban el kell mélyülnünk a lemeztektonika és radioaktivitás Mátraderecskén megmutatkozó összjátékában.

A földtörténeti harmadkorban drámai események játszódtak le a Mátra vidékén. A triász tenger mészkő-üledékére vastagon andezit-magma ömlött, paleontológiai és radiometrikus kormeghatározás szerint a felső eocén korban, mintegy 40 millió évvel ezelőtt. Működő vulkánok, köztük a Lahóca, szigetként álltak ki az eocén tengerből. A tűzhányók által kidobott anyagból levegőben megszilárdulva tufa, vízben megszilárdulva tufit képződött. A rétegvulkán peremén foltokban fölismerhetők ezek az eocénkori üledékek. A vulkáni tufitból a tengerparti ár-apály és hullámverés felaprózó, könnyebb összetevőket kimosó hatására nehézfémek (köztük urán) ásványaiban földúsult torlatok jöttek létre. Az egykori partvonal mentén a felső tufitsáv $30\text{--}50 \text{ g/tonna}$ értékű urándúsulása végigvonul a községen. A közvetlenül ráépült házaiban kiemelkedően magas a radonkoncentráció.

1 *Fizikai Szemle* 1999/2.

A torlatok maradványait részben elfedte az oligocén korban, 30 millió éve leülepedett agyag. A rideg vulkáni andezitot a geotektonikai táblák nyomása megrepesztette, földarabolta. A mélyben geotermikusan hevített mészkőből töréseknél, méginkább ezek kereszteződésénél szén-dioxid áramlik föl, szénhidrogénnel elegyedve. Ilyen törésvonalak találkozása fölött feszik Mátraderecske. A felszínre hulló esővíz – levegő jelenlétében – uranilsók formájában oldhatja az uránt, ami leszivárog. Alulról a törések mentén szén-dioxid áramlik föl, ami a vízben szénsavként oldódik. A Fe^{+++} -ionok által pirosra színezett oxidáló réteg és a Fe^{++} -ionok által zöldre színezett redukáló réteg hatásán, a felszínre hulló oxigéntartalmú vízben oldott UO_2^{+} uranil-ionok és a redukáló réteg vizében oldott CO_3^{-} szénsav-ionok találkozásánál oldhatatlan uránsó csapódik ki. A külső levegő, a leszivárgó víz és az alulról fölszálló szén-dioxid összjátékának eredménye a felszín közeli (agyag alatti) urán-földülés. Mindez Mátraderecskét egy szabadtéri geofizikai-geokémiai múzeumá teszi, izgalmas geológiai keresztrejtvényé, ahol egymással szomszédos házakban mért radonaktivitások vadul eltérhetnek egymástól.

Kivirul az élet

Klasszikusnak számító kísérletében *Stanley Miller* lombikba helyezte H_2O , CH_4 , NH_3 és H_2S elegyét, majd a lezárt lombikot ultraibolya sugárzásnak tette ki. (Egy másik kísérletben elektromos szikrakisüléseket alkalmazott.) Az energiaközlés hatására telítetlen $\text{H}_2\text{C}=\text{O}$, $\text{HC}=\text{N}$ molekulák képződtek, melyek a lombiknyi Éden vizes oldatában szénhidrátokká, aminosavakká (polipeptidekké) és nukleinsavakká polimerizálódtak. *Oparin* föltevése szerint ilyen folyamat mehetett végbe az ősi Föld hidrogénben gazdag, redukáló légkörében. Szerinte az akkor kialakuló molekulák energiagazdagságát fölhasználva önmásoló strukturák képződhettek: a korai Föld Édenkertjében megszülethetett az élet.

Mai földtörténeti tudásunk szerint azonban akkor, amikor a földi óceánok kialakultak, bolygónkon nem redukáló, hanem oxidáló légkör volt. Márpedig a CO és CO_2 inkább ellenséges, mint barátságos közeg. Így az élet földi eredetének eme egyszerű magyarázatát fel kellett adni.

Egy merész hipotézis szerint az élet a nagy üstökösökben keletkezhetett. Az üstökösök hatalmas hólabdák, amelyek anyagát hidrogéndús szerves vegyületek szennyezik be. Egyes kozmikus hólabdák belsejét megolvaszthatta a korai időkben intenzívebb radioaktivitás. (Erre egyik számításba jövő jelölt a rövid, 74 ezer éves felezési idejű ^{26}Al .) A hó és jég jó hőszigetelő, így egyes üstökösök belsejében, többszáz m^3 térfogatú minioceánban akár millió éven át kedvező feltétel lehetett az élet kibontakozására. A Naprendszer peremén megvalósult Éden számára a radioaktivitás szolgáltathatta a szabad energiát.

Egy másik égitest megzavarhatta az üstökös mozgását, az a Napot megközelítő ellipszispályára térhetett és egy földi óceánban landolhatott, étellel oltva be és élelemmel dúsítva föl annak vizét. A Földön azután az algáknak meg kellett tanulniuk a fotoszintézist, hogy energiaigényüket napfényből elégítsék ki. A szemet a CO₂-ből vonták el, minek folytán fokozatosan oxigénnel töltötték föl a légkört.

Darwin utazása óta híresek a Galapagos-szigetek. Mellettük húzódik egy lemeztektonikai árok. 1977-ben az Amerikai Tengerészeti Hivatal az *Alvin* nevű mélymerülésű tengeralattjárót küldte ennek geotermikus-geokémiai földérítésére. Az *Alvin* 24 merülést hajtott végre egészen 2,5 km mélységig. A tengeralattjáró utasai meredek hőmérséklet-emelkedést, a geotektonikus árok mélyén húzódó repedésekből szénhidrogénekben, kénhidrogénben gazdag, nyomelemeket, hidrogént, héliumot hozó víz kiáramlását figyelték meg. Legmeglepőbb azonban a mélyben, *teljes sötétségben* talált élővilág volt. Algák hasznosították a szénhidrogénben-kénhidrogénben gazdag (redukáló) mélységi víz és az oxigénben gazdag tengervíz találkozásánál létrejött kémiai potenciált: $2\text{H}_2\text{S} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{SO}_2$. A kemoszintézist folytató algákkal pedig nagy, közel méteres, kígyószerű állatok táplálkoztak, teljesen függetlenül a fotoszintézisen alapuló földfelszíni étlettől. Fontos tapasztalat a mélyből föláramló tengervíz magas élőanyag-tartalma (literenként 1 g, ami 10¹² baktériumot jelent). Ebből született meg a fölismerés, hogy a nagy hőmérsékleti gradiensű mélységi repedések meleg vizében intenzív szerves élet folyik redukáló (Stanley Miller kísérletére és a Naprendszer eredeti kémiájára emlékeztető) közegben. Megtalálható a montmorillonit, ez az agyag pedig a polimerizáció közismerten jó katalizátora. A mélytengeri expedíció egyik résztvevője, *Jack Corliss* az Eötvös Egyetem Atomfizikai Tanszékén dolgozva fejlesztette ki azt a hipotézist, hogy *az élet a Földön a kéreg tenger alatti hasadékaiban keletkezhetett. Indulásához nem napfény, hanem a földi radioaktivitás szolgáltatott szabad energiát.* Lehet, hogy az Éden mégis a Földön volt, sőt itt van ma is? Galapagos mellett az egyik mélytengeri hévforrás Édenkert néven került a térképre.

Nem mindnyájan szállhatunk le a Csendes-óceán mélytengeri árkába. Ha élményt kívánunk szerezni azokról a komponensekről, amelyek az élet keletkezéséhez szükségesek (termálvízű strand, CO₂, CH₄, H₂S kiáramlás, montmorillonit üledék, no meg felszíni uránföldúsulás és radon-exhaláció), akkor a Mátraaljára érdemes kirándulni. Parádfürdő szénsavas, Parádsasvár kénhidrogénes gyógyforrásokra települt. A fölgyűrt gerincek közt völgyben meghúzódó palóc Mátraderecske csevicéjét és büdösvizét sokan élvezik. Az egyik gazda a kútjából kiáramló földgázt konyhájába vezette, hogy azzal főzzenek. Hóborította földekre és zsendülő vetésre szeszélyes mintákat rajzol a mélyből szivárgó szén-dioxid. 1952-ben kútásáskor, az 1970-es években pincékben szedett áldozatokat beszivárgó szén-dioxid. (A legutóbbi eset 1995-ben kö-

vetkezett be.) De a község a szén-dioxidot hasznára is fordítja: 1994-ben itt épült meg hazánk első természetes szén-dioxidos szárazfürdője, ahol 90% koncentrációjú gázban „fürödve” élvezhető az erek tágulása, a vérellátás fokozódása. (Ilyen mofettákat Olaszországban, Ausztriában, Erdélyben régóta hasznosítanak a fürdőorvosok.) Meglehet, az Édenkerthez hazánkban Mátra-derecske esik legközelebb.

A radioaktivitás fölfedezésekor, 100 évvel ezelőtt, hittek a radioaktivitás jótékony hatásában: radioaktív fürdőket, gyógyvizeket, szappanokat reklámoztak. Hazánk egyik legmagasabb radioaktivitású vize a budai Iuventus gyógyforrásból jön. Ez a forrás feltételezett fiatalító hatásáról kapta a nevét egykoron. Később uránbányászoknál azt tapasztalták, hogy radioaktivitás (radon, radioaktivással szennyezett por) belégzése növeli a tüdőrák gyakoriságát. Ezért egyre szigorúbb korlátozásokat vezettek be a megengedhető radioaktív terhelésre, olyan alacsony dózisok tartományában is, ahol nem volt meggyőző bizonyíték a rákkockázat növekedésére. *„Minden radioaktivitás veszélyes”* lett a jelszó.

Kézenfekvő törekvés, hogy minél alacsonyabb dózisteljesítményeknél megvizsgálják, mekkora a rákkockázat. A tapasztalat Amerikában, Kínában és hazánkban is azt a nem várt eredményt adta, hogy *a rákkockázat minimuma nem a legkisebb dózisteljesítménynél van, hanem egy olyan tartományban, ami magasabb, mint az átlagos természetes sugárterhelés.* (A szignifikáns kockázatminimum olyanoknál jelentkezik, akik lakásában a radon aktivitáskoncentrációja 100 és 200 Bq közé esik légméterenként. Ez Mátra-derecske asszonyainál határozottan mutatkozik!)

Az a tézis, hogy egy bizonyos (nem túl nagy) radioaktivitás véd a rák ellen, egyesekben meghökkenést kelthet. De nem szabad elfelejtenünk, hogy a földi élet akkor fejlődött ki, amikor az aktivitásszint még magas volt, és a szervezet immunrendszere megtanult ellene védekezni. Sejt szinten elvégzett orvosi kísérletek mutatják, hogy *mérsékelt dózis fokozza a hibajavító enzimek termelését a sejtben. Az a fölismerés bontakozik ki, hogy mérsékelt radioaktív dózissal olyan hatása van, mint más területeken a védőoltásnak: az immunvédelmet aktiválva védettebbé teszi a szervezetet rákkeltő (kémiai, fizikai, biológiai) támadásokkal szemben.* Ezen eredményeket látva a Francia Tudományos Akadémia határozatban foglalt állást az ellen, hogy a törvényes dóziskorlátot olyan alacsony szintre szorítsák le, ahol nincs bizonyíték rákkeltő hatásra (1997).

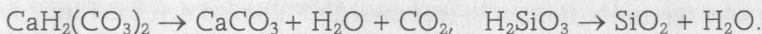
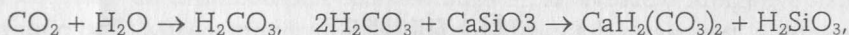
Úáltozik az éghajlat

A Nap keletkezésekor anyagának 75%-át tette ki a magfúzió alapanyaga, a hidrogén. A 4,5 milliárd éves működés során ebből sok elhasználódott. Ma a Nap centrumában legfeljebb 50% lehet a hidrogén koncentrációja, ezért a

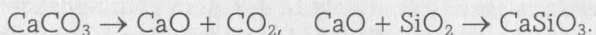
Nap-erőmű önként mind magasabb hőmérsékletű üzemmódra kapcsol, hogy fedezni tudja a sugárzás okozta veszteséget. Következésképp a Nap milliárd évenként mintegy 5%-kal fényesebb lesz. Induláskor a Földet érő napfény a mainak csak 70%-a lehetett. A földi élet fejlődéséhez azonban 4 milliárd éven át olyan állandósult hőmérséklet volt szükséges, amely lehetővé tette folyékony óceán és a benne fejlődő élet fönmaradását. Mi lehetett az a légkondicionáló berendezés, ami ilyen hatékonyan stabilizálta bolygónk hőmérsékletét?

A Föld kialakulásakor a légkör főleg CO₂-tartalmú volt. A CO₂ átengedi a látható napfényt, de nem engedi át, hanem elnyeli a talaj infravörös sugárzását, mert annak rezgésszáma épp megegyezik az O=C=O molekula kémiai vegyérték-kötéseinek sajátfrekvenciájával. Ezért a CO₂-légkör (akárcsak a kertész üvegháza) melegíti az alatta lévő talajt. A földi légkör CO₂-tartalma az idők folyamán fokozatosan (a jelenlegi 1/3 ezrelékre) csökkent. A vékonyodó üvegház kompenzálta a Nap fokozatos fényesedését.

A lemeztektonikai cirkuláció szilikátokat (pl. CaSiO₃, ami a bazalt egyik alkotórésze) hoz a felszínre. A légköri CO₂-t szénsavvá oldja az esővíz. A H₂CO₃ megtámadja és oldja a szilikátokat, tengerbe mosván a kőzetmállás termékét. A tengeri állatok páncéljuk fölépítéséhez CaCO₃-at választanak ki. Elpusztulásuk után mészkő ülepedik a tengerfenékre.



A növekvő súly alatt a mészkő mind mélyebbre süllyed, részeként a lemeztektonikai körforgásnak. A mélységben a geotermikus meleg megbontja a mészkövet, a felszabaduló CO₂ hasadékokon át kiszivárog, a kőzetek pedig szilikátmagmaként ömlenek ki a felszínre.



Bezárult a lemeztektonikai ciklus. Lerövidítve:

FELSZÍNI MÁLLÁS: CaSiO₃ (bazalt) + CO₂ → CaCO₃ (mészkő) + SiO₂ (homok).

MÉLYSÉGI BOMLÁS: CaCO₃ (mészkő) + SiO₂ (homok) → CaSiO₃ (bazalt) + CO₂.

Nos, a légköri CO₂ elnyeli a talaj infravörös sugárzását, ezért több CO₂ magasabb légköri hőmérsékletet jelent. *Melegebb éghajlat* alatt viszont fölgyorsulnak a felszíni kémiai reakciók, sebesebb lesz a mállás, több CO₂-t vonva ki a légkörből, ami a klíma lehűlését eredményezi. *Lehűlés esetén viszont lassul a mállás*, több CO₂ marad a légkörben, erősödik az üvegház-fölmelegedés. (A mélységi reakciókat állandó hőmérsékleten tartja, változatlan sebességgel

futtatja a Föld belső radioaktív melege.) Végeredményben a *lemeztektonikai cirkuláció légkondicionálóként működik a Földön*: a Nap fényesedésével fokozatosan csökkenti az atmoszféra CO₂-tartalmát, stabilizálva bolygónk hőmérsékletét. A milliárd évek óta sikeresen működő, biológiailag létfontosságú földi légkondicionálás motorja a mélységi radioaktivitás.

A Naphoz közelebb eső Vénuszon elforrt az óceán, nem működik a mállás, nincs szénsav: 400 °C felszíni hőmérsékleten nem létezik élet.

A Mars tízszerese kisebb a Földnél, radioaktivitás termelte belső melege hamar elszökik a felszínen át. A Marson (akárcsak a Holdon) nem működik lemeztektonika. Valamikor folyók folytak a Marson, de a CO₂ légkör elvékonyodása fagyos sivataggá tette a bolygót.

Mindezt végiggondolva megtanuljuk tisztelni a Földet, amiért éppen a megfelelő helyen és méretben született meg. Kevésbé tekintjük ellenségünknek a természet erőit, köztük a radioaktivitást. Csak azért kell aggódnunk, mert ezt a stabilitást a legutóbbi évtizedekben a fosszilis tüzelők használata miatt meredeken felszökő légköri CO₂-koncentráció veszélyezteti. A geológiai reguláció ilyen rövid időskálán nem hatékony. Az Egyesült Nemzetek 1998. évi kyotói klímakonferenciája felszólította a kormányokat a szén- és olajtüzelés mérséklésére, amit azonban azok nem nagyon tartanak be. Mit lehet tenni?

Épül a civilizáció

Tavaszi zápor után leszalad a víz a domboldalról. A völgy mélyén folyó patak tovább szállítja a vizet a folyó, a tenger felé. Okos emberek gátat emeltek a víz útjába, hogy a megnövelt szintkülönbséget kihasználva a víz sodra és esése vízimalmot hajtson. Érzelmes környezetvédők meg is dicsérik az ilyen „megújuló energiaforrást.” (Amit természetesen a Nap mélyén működő fúziós atomreaktor táplál.)

Ennek teljes analogonja az a *Szilárd Leótól* származó gondolat, hogy a Nukleáris Völgy szintkülönbségét is hasznosítani kell. Az urán még őrzi a szupernóva melegét. A Nukleáris Völgy jobboldali lejtőjén lassan csordogál lefelé, radioaktív α -bomlások egymásutánja során évmilliárdok alatt szivárog ki belőle a nukleáris energia. *Szilárd* azt javasolta – és részt is vett ennek megvalósításában –, hogy az urán-atommagot atomreaktorban egyből két részre hasítva gyorsan és szabályozottan nyerjük ki a nukleáris energiát. *Az atomreaktor éppúgy természeti folyamatot hasznosít az ember számára, mint a vízimalom.* (1/e ábra) Hazánkban a villamos energia 40%-át szolgáltatja (olcsón és tisztán) a paksi atomerőmű. Egy kilowattóra vonatkoztatott radioaktivitás-ki-bocsátása sokszorta kisebb, mint a dunántúli szénerőművéké. Amikor a környezetfeltű hirdetésekkel olvassuk: „*Hagyd otthon az autód, szállj villamosra!*”, akkor ez fosszilis tüzelés helyett nukleáris energia hasznosítására buzdít.

A Földben egyetlen olyan izotóp maradt, amit lassú neutron hasítani képes, miközben 2-3 új gyors neutron keletkezik: ez a ^{235}U . A világ legtöbb atomerőműve a neutron-lánreakciót urán hasadóanyaggal valósítja meg, a neutronok lelassítására (Wigner Jenő nyomán) vizet használva. A víz kismértékben neutronelnyelő ($n + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H}$), az uránban 3%-ra kell dúsítani a ^{235}U izotópot. Dúsított uránnal és vízlassítással működik a világ legtöbb erőművi reaktora, köztük a paksi atomerőmű is. A földi uránban ma 0,7% a ^{235}U -tartalom. De a ^{235}U felezési ideje 0,7 milliárd év, tehát 2 milliárd évvel ezelőtt 3% volt a ^{235}U -koncentrációja. Milyen könnyű lett volna akkor atomreaktort csinálni. A természet csinált is! Közép-Afrikában egy uránbányában olyan uránt találtak, aminek ^{235}U -koncentrációja jóval kisebb, mint a ma általánosan tapasztalt 0,7%. Ez csak úgy lehetséges, hogy itt egykoron természetes atomreaktor működött, ami önmagát szabályozta: talajvíz szolgált neutronlassítóként. Túlhevülés esetén elforrt a víz, a reaktor neutronlassítás hiányában leállt. Lehűlés után visszafolyt a talajvíz, a reaktor újra működni kezdett. *Az atomreaktor tehát éppúgy természeti jelenség, mint a zápor és a patak.*

Gondolkozzunk el egy pillanatra. 2-3 milliárd évvel ezelőtt primitív népek is használhatták volna az atomenergiát – ha már éltek volna. Ha viszont a civilizáció csak 2-3 milliárd év múlva bontakozna ki, magas technika birtokában sem tudnának atomreaktort építeni, mert addigra szinte minden ^{235}U elbomlik. Milyen érdekes: az uránizotópok felezési ideje és az evolúció időigénye azonos nagyságrendű. Mire a modern természettudomány kibontakozott, a szupernóva által 4,5 milliárd éve termelt ^{235}U javarésze elbomlott, de annyi még maradt, hogy csúcstechnikával fölszabadítható az atomenergia. Felelős gondolkodással megakadályozható lehet a széntüzelés fenyegetése: a globális klímakatasztrófa.

A nukleáris energia műszaki hasznosítása ellen hallható érvelés azt hangoztatja, hogy a széntüzelés vagy vízienergia természetes, tehát ártatlan, míg az atomenergia természetellenes, tehát veszélyes energiaforrás. Ennek oka a felnöttek egy részének még meglévő nukleáris tájékozatlansága. A fiatalok az itt elmondottakat már az iskolában megtanulhatják. Ők megértik, amit *James Lovelock*, a földi természet önmagára gondot viselő Gaia-modelljét megalkotó légkörkémikus mondott:

- Az Univerzum természetes energiája nukleáris energia, ez táplálja a csillagfényt az égen. Ha pedig így van, ha Isten univerzumát ma is atomenergia működteti, akkor miért tüntetnek sokan az ellen, hogy mi is atomenergiából nyerjünk elektromosságot?

Tanulság

Az ezredfordulóra fokozatosan leomlanak a diszciplináris korlátok. A Természetet (atommagtól galaxisokig) és a Civilizációt (embertől csúcstechnikáig) egységes képben látjuk. Ez a kép fenséges és gyönyörű.

Kibontakozik előttünk, hogy a Természetet mély erők működtetik: az égitesteket formáló *gravitáció*, az égitesteket szabadenergiával tápláló *magerő*, a biológiai organizációt és evolúciót vezető *elektromosság*, mindehhez az idő múlását beszabályozó gyenge β -*radioaktivitás*. A négy erő összjátéka legszebb gyümölcsének magunkat érezzük: az Isteni Színjátékot megérett és megcsodáló *embert*.

Mint arra több ponton céloztam, úgy látszik, hogy a Természet alapvető állandói (legfőképp e négy erő intenzitása) finoman úgy vannak összehangolva, hogy az emberi létet lehetségessé tegyék. Ennek megfogalmazása a *Tipler* által bevezetett *Antropikus Elv*: a Természet több állandója levezethető abból az empirikus tényből, hogy mi *vagyunk*. Innen elménknek már nem esik nehezebbre, hogy eljártsszék a gondolattal: a Természet kvantitatívan bizonyítani látszik, hogy benne egy *terv* öltött testet. Az Alkotó úgy választotta meg a Teremtett Világ szabad paramétereit, hogy évmilliárdok alatt kifejlődhessen Ádám és Éva, akik elcsodálkoznak a Gondviselés munkáján.

Mielőtt folytatnánk a gondolati kalandozást, fölmerül egy racionalista kérdés: ezek az „összehangolt adatok” valóban függetlenek egymástól? Száz esztendeje sok jelenséget függetlennek ítéltünk, amiket azóta a modern természettudomány sikeresen *levezetett*. Lehet, hogy a 21. század eljövendő Szuperelméletében kiderül majd: ezek az „összehangolt adatok” valójában egymás következményei. Így visszajutunk az einsteini kérdéshez:

– *Egy dolog foglalkoztat leginkább: vajon a Teremtő tudott volna egy másmilyen világot alkotni, ha nagyon akart volna?*

A modern természettudomány talán legmélyebb kihívása: a Nagy Bumm: mennyire önkényes? Volt-e előzménye?

Az einsteini általános relativitáselméletet követvén, amint visszafelé megyünk a múltba és közeledünk a kezdeti idősingularitáshoz, egyre inkább elmosódnak a részecskék különbségei, az erők intenzitáseltérései. Mindinkább a gravitáció válik dominálóvá, ami nem más, mint a dinamikusán viselkedő tér-idő-geometria. Ezt nemlineáris egyenletek írják le, amelyek mindig tartogathatnak (struktúrát formáló vagy káoszba sodró) meglepetéseket. Egy mind divatosabb modell szerint a legkorábbi időkben (a gravitáció kezdeti dominanciáját jelző *Planck*-féle 10^{-38} s időhatáron belül) a téridő egy összegyűrt spongya volt. Később az egész tágulásnak indult. Minden kis buborékából egy olyan univerzum fejlődhetett ki, aminek sorsa és állandói függetlenül a többikétől. Különböző dimenziókba különböző univerzumok tágulnak be, végtelen a választék. Egyes univerzumok csak szempillantásig élnek, azután ponttá zsugorodnak. Mások oly sebesen tágulnak, hogy a struktúrátlanul szétszóródó anyagnak nincs ideje és módja összetömörülni és formát ölteni. De a végtelen választékban akadhat egy (vagy néhány), amelyben az állandók úgy fagytak be, hogy azok atomok, atommagok, csillagok, bolygók, molekulák kialakulását teszik lehetővé, amikből végül értelmes lények alakulnak ki, és el-

csodálkoznak: – *Jé, minden úgy volt beállítva, hogy mi megszülessünk és mindent megértsünk!*

Ez a Multiverzum-modell azt tételezi föl, hogy mi csak egy vagyunk a végtelen sok világ közül. Ez kiküszöböli a tervet és tervezőt, de ettől saját világunk nem lett kevésbé antropikus. Legutóbb *Martin Rees* írt erről egy briliáns művet: *Csak Hat Szám!* (Just Six Numbers.) De hogyan lehetne megtudni, melyik modell igaz: az egyedi antropikus Univerzum vagy a buján kimeríthetetlen Multiverzum? És erre, sajnos, nem tudunk válaszolni: a Multiverzum többi variációja számunkra elvileg megfigyelhetetlen. Márpedig Planck már száz évvel ezelőtt fölemelte óvó szavát:

– *Amit mérni tudok, csak az létezik.*

Itt tartunk 2001-ben. Happy end nincs? De azt hiszem, az új évszázadba átlépett fiatalokat az fogja lelkesíteni, hogy vannak nagyon mély és nagyon izgalmas kérdések, amelyekre ők kereshetik a választ. Az *Euklidesszel*, *Ptolemaiossal*, *Kopernikusszal*, *Newtonnal*, *Maxwellel*, *Einsteinnel*, *Rutherforddal*, *Heisenberggel* elindult történet még nem ért véget.

Szimmetriák az elemi részecskék világában¹

Szimmetriák és megmaradási törvények

A szimmetriák a részecskefizikában még fontosabb szerepet játszanak, mint a kémiában vagy a szilárdtestfizikában. Amíg az utóbbiakban az anyagok fontos tulajdonságai vezethetők vissza a különböző atomi, molekula- és kristályrács-szimmetriákra, a részecskefizikában gyakorlatilag minden a szimmetriákból (vagy azok sérüléséből) származik: a megmaradási törvények, a kölcsönhatások, sőt a részecskék tömege is.

Szimmetriák vezetnek megmaradási törvényeinkhez. Az energia- és impulzusmegmaradás levezethető abból a kézenfekvő szimmetriából, hogy a fizikai törvények nem függhetnek attól, hol vesszük fel időskálánk és koordináta-rendszerünk kezdőpontját, az impulzusmomentum megmaradása (amely többek között egyenesen tartja menet közben a biciklinket) pedig koordináta-rendszerünk tetszőleges szögének következménye. Az elektrodinamika egyenletei, a Maxwell-egyenletek *mértékszimmetriája* – amely az elektrosztatikus tér esetében a potenciál zéruspontjának szabad választását jelenti – vezet az elektromos töltés megmaradásához, a fermionok mozgását leíró *Dirac-egyenlet* hasonló szimmetriája pedig általában a fermionok számának megmaradásához. A legtöbb szimmetria valamilyen megmaradási törvényhez vezet, a vonatkozó megmaradási törvények pedig a kölcsönhatások fontos jellemzői, ezért is olyan fontos a szimmetriák felderítése.

Fermionok és bozonok

Az elemi részecskéket különféle szempontok szerint osztályozzuk. A legfontosabb a spin (saját impulzusmomentum) szerinti osztályozás: a feles spinű ($S = \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; \frac{5}{2} \dots$) *fermionok* és az egész spinű ($S = 0; 1; 2 \dots$) *bozonok* szimmet-

¹ A bölcsész olvasóknak talán nehéz olvasmány lesz ez a dolgozat. Mégis ajánlom, hogy szánjanak időt és energiát az írás befogadására. Ígérem, különleges élményben lesz részünk. (Vértés Attila megjegyzése.)

ria- és egyéb alapvető tulajdonságai erősen különböznek. A fermionok száma megmarad, míg bozonokat *büntetlenül* kelthetünk vagy elnyelhetünk: egy lámpa akárhány látható bozon (fotont) kisugározhat és egy vevőantenna akárhányat elnyelhet, csak az energia- és impulzusmegmaradást kell biztosítanunk. Ugyanakkor a televízió képernyőjét felvillantó elektront, amely fermion, valahonnan oda kell vinnünk és dolga végeztével valahová el kell vezetnünk. Érdekes, és a fizika szempontjából igen lényeges különbség az is, hogy adott állapotban akárhány bozon lehet egyidejűleg, de fermionból csak egy (*Pauli-elv*). Ennek következtében töltenek az atomi elektronok egyre növekvő energiájú *energiahéjakat*, és ez akadályozza meg azt, hogy az atomok az anyagban és a nukleonok az atommagban egymásba hatoljanak; az utóbbi biztosít makroszkopikus formát tárgyainknak.

A feles és egész spinű részecskék alapvetően különböző szimmetriájúak: a fermionok fizikai viselkedését leíró hullámfüggvény két azonos fermion felcserélésekor előjelet vált, szemben a bozonokéval, amely nem vált előjelet, és a korábban tárgyalt fermion-bozon különbség innen vezethető le. A részecskék spinje is furcsa szerzet; habár hozzáadódik a részecskék hagyományosabbnak tekinthető pályamomentumához, amely a különböző atomi pályákon elhelyezkedő (de nem igazán keringő) elektronok alapján kapta a nevét, az elektron esetében csak két fizikai sajátállapota van: vagy jobbra forog (azaz a spinje felfelé mutat) vagy balra (lefelé), és ez vezet a spin igencsak különös szimmetria-tulajdonságaihoz.²

Részecskék és antirészecskék

A részecskéknek általában van *antirészecskéjük*, amely azonos tulajdonságú, de ellentétes töltésű, és kölcsönhatásuk *annihilációt*, sugárzásos megsemmisülésüket eredményezi. A részecske-antirészecske aszimmetria oka a világegyetemben, azaz az, hogy miért nincs a mi világunkkal egyenértékű, de antianyagból álló *antivilág*, a fizika nagy kérdései közé tartozik. Ha lennének ugyanis antianyagból álló csillagrendszerek, azok antirészecskéket sugároznának. A galaxisok és antigalaxisok határán, ahol az egyik galaxis kibocsátotta részecskék a másik anyagával szétsugároznak, erős sugárzási zónát kell látnunk, de a csillagászok sehol sem észlelnek ilyen jelenséget.

Az antirészecskék érdekes tulajdonsága, hogy matematikailag úgy kezelhetők, mintha azonos tömegű, azonos nagyságú és ellentétes előjelű töltéssel rendelkező, *térben és időben ellenkező irányban haladó* részecskék volnának.

2 A megfelelő szimmetriacsoport az $SU(2)$, a 2×2 -es speciális (egységnyi determinánssal) unitér ($U^\dagger U = 1$, a mátrix transzponált konjugáltja egyenlő az inverzével) komplex mátrixok csoportja. Ha a szabadsági fokok számát növeljük, hasonló tulajdonságú, magasabb szimmetriacsoportokat kapunk, a $SU(3)$ elő is fordul majd a későbbiekben.

Ez a természet fontos szimmetriája: a töltés, a tér és idő egyidejű tükrözésétől a fizika törvényei nem változnak meg. A három tükrözési művelet angol rövidítése nyomán (*charge, parity, time*) ezt *CPT*-szimmetriának hívjuk. Az elektron és pozitron ütközésekor végbemenő folyamatokat tehát úgy írhatjuk le, mintha egy elektron bejönne a képbe, valamit csinálna, aztán dolga végeztével térben és időben ellenkezőleg kihátrálna; az elektromágneses áram analógiájára ezt *részecskeáramnak* nevezzük.

Egyszerű részecskeütközés esetén egy ilyen oda-vissza menő részecskeáram kölcsönhatási bozont cserél egy másik hasonló árammal. Ezt *Heisenberg határozatlansági relációja* teszi lehetővé, amely kimondja, hogy értelmében egészen rövid időtartamokra ill. távolságokon megengedett az energia-ill. impulzusmegmaradás sérülése: $\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$ és $\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}$, ahol Δ az utána álló mennyiség (kis) változását jelöli, E , p , t , x a szóbanforgó részecske energiáját, impulzusát, az eltöltött időt és a megtett úthosszat. A 2π -vel osztott Planck-állandó, $\hbar = 1,055 \cdot 10^{-34}$ J/s kicsinysége biztosítja, hogy a makrovilágban a megmaradási törvények pontosan teljesüljenek. A cserebozon lehet tehát valódi vagy virtuális aszerint, hogy teljesül-e rá az energia- és impulzusmegmaradás, azaz ténylegesen (kísérletileg megfigyelhetően) létrejön-e vagy sem.

A *CPT*-szimmetria annyira alapvető a térelméletben, hogy sokak szerint nem is lehet kísérletileg vizsgálni; látszólagos kis eltérések megfigyelése esetén inkább hihetünk valamelyik megmaradási törvény sérülésében, mint a *CPT*-szimmetriában. Ennek ellenére komoly kísérleti erőfeszítés irányul ellenőrzésére. Legfontosabb tesztje a semleges K-mezon és antirészecskéje relatív tömegkülönbsége, amely a mérések szerint $< 10^{-18}$. A CERN-ben 1999 végén megépült *Antiproton-lassító* berendezés fő célja *antihidrogén*-atomok (antiproton és pozitron kötött állapota) előállítása, hogy a hidrogénatommal összehasonlítva a *CPT*-szimmetriát ellenőrizzék. Az antiproton tömegét például két különböző kísérlet eredményéből sikerült nagy pontossággal meghatározni: mágneses csapdában keringő antiproton *ciklotronfrekvenciája* a (töltés/tömeg) arányt, az elektron helyén atomi pályára fogódott antiproton atomi átmeneteinek energiája pedig a (töltés-négyzet/tömeg) arányt határozta meg.

Leptonok és kvarkok

A részecskék másik osztályozási szempontja az, hogy a jelenleg ismert négy alapvető kölcsönhatás, a gravitációs, elektromágneses, gyenge és erős közül melyekben vesznek részt. Mivel a gravitáció szerepe csak csillagászati szinten jelentős, habár valamennyi részecskére hat, laboratóriumi szinten elhanyagolhatjuk. Ugyancsak minden részecskére hat a gyenge és minden töltéssel vagy mágneses momentummal rendelkezőre az elektromágneses köl-

csönhatás. Az erős kölcsönhatásban résztvevő részecskéket *hadronoknak*, közöttük a fermionokat *barionoknak*, a bozonokat pedig *mezonoknak* hívjuk. Az erős kölcsönhatásban részt nem vevő részecskék a *leptonok*. A nevek a kezdetben megfigyelt részecskék tömegéből erednek: a leptonok (pl. az elektron) könnyűek, a mezonok (pl. a pion, $m_\pi \sim 139 \text{ MeV}$,³ elektron tömegének, $m_e = 0,511 \text{ MeV}$, 273-szorosa) közepes tömegűek, míg a barionok (proton, neutron) nehéz részecskék ($m_p = 938 \text{ MeV}$ $1836 m_e$).

Az egyik legkorábbi megfigyelés, amely az elemi részecskék lehetséges belső szerkezetére mutatott, a proton és a neutron hasonlósága volt: csaknem azonos a tömegük és azonosan hat rájuk az atommagot összetartó *erős kölcsönhatás*, csak a töltésük különbözik. Bevezették tehát a *nukleon* fogalmát, amelynek két állapotát, a neutront és a protont az *izospin kvantumszám*⁴ különbözteti meg. Az izospin a spinhez hasonló vektor: a nukleon két állapottal rendelkezik, a felfelé mutatót rendeljük a protonhoz, a lefelé mutatót a neutronhoz. A spinhez csak annyi köze van, hogy azonos szimmetriacsoport, az SU(2) írja le a tulajdonságait. Az izoelótag magfizikai eredetű: adott protonszámú elem különböző neutronszámú izotópjai, illetve az adott tömegű, tehát azonos teljes nukleonszámú, de különböző protonszámú *izobár*-állapotok az izospin segítségével azonosíthatók.

A kísérleti technika javulásával egyre több erős kölcsönhatásban résztvevő elemi részecskét, *hadront* fedeztek fel, és valamennyi rendelkezett izospinnel. A nukleon izospinje $I = \frac{1}{2}$, a harmadik komponense $I_3 = \pm \frac{1}{2}$ lehet a két állapotnak megfelelően. A legkönnyebb hadron, a π -mezon vagy pion izospinje 1, a három lehetséges sajátállapotnak ($I_3 = -1, 0$ és $+1$) megfelelően háromféle töltésű pion létezik, pozitív, semleges és negatív. Az izospin tehát az elemi részecskék osztályozásának alapvető kvantumszáma lett.

Amikor azután felfedeztek egy újabb kvantumszámot, a *ritkaságot* (angolul *strangeness*, furcsaság), amely szabadon kombinálódik az izospinnel újabb és újabb hadronokban, *Gell-Mann* és *Zweig* bevezették a hadronok kvarkmodelljét. Három kvark feltételezésével sikerült leírni az összes addig megfigyelt részecskét. Az első két kvark az $I_3 = \pm \frac{1}{2}$ izospin sajátértékének megfelelően az *up* (fel) és *down* (le) nevet kapta, a harmadik pedig a *strange* nevet. Jelölésük ennek megfelelően u, d és s. A kvarkmodell szerint a kvarkok kétféleképpen kapcsolódhatnak össze: három kvark bariont (és három antikvark antibariont) illetve egy kvark és egy antikvark mezont formál. A kvarkok

3 Az Einstein-féle tömegformula, $E = mc^2$, értelmében a részecskék tömegét energiával fejezzük ki. 1 eV az a mozgási energia, amelyet egységnyi töltésű részecske 1 V potenciálkülönbség átszelése során szerez; nagyobb egységei a $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$ és a $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$.

4 Kvantumszám: a mikrovilág olyan fizikai jellemzője, amely csak bizonyos meghatározott adagokkal, *kvantumokkal* változhat; ilyen pl. az elektromos töltés és az impulzusmomentum.

spinje feles (1. táblázat), tehát fermionok. Három kvark kötött állapota is fermion lesz tehát, míg a kvark + antikvark rendszer bozon. A kvarkok töltése $+\frac{2}{3}$ és $-\frac{1}{3}$, így adja ki pl. a $p = (uud)$ állapot a proton pozitív és az $n = (udd)$ a neutron zérus töltését. Az izospin harmadik komponense tehát az u és d kvark töltésével van szoros összefüggésben, egységnyi növelése ugyanis azt jelenti, hogy az adott részecskében egy d-kvarkot u-kvarkra cserélünk, tehát a töltését egységgel növeljük ($+\frac{2}{3} - (-\frac{1}{3}) = 1$). A barionokhoz bariontöltést rendelünk, amely barionokra +1, antibarionokra -1, más részecskékre pedig zérus. A kvarkok bariontöltése $\frac{1}{3}$ (az antikvarkoké $-\frac{1}{3}$); a bariontöltés reakciók során mindig megmarad.

A kvarkok színe

A kvarkmodell, habár sikeresen megmagyarázta az összes megfigyelt részecske tulajdonságait, azonnal komoly ellentmondásokba keveredett. Nem volt érthető, például, miért csak a fenti két állapot jöhet létre belőlük, miért nincsenek szabad kvarkok, és hogyan lehetnek egy barionban azonos fizikai állapotú kvarkok, holott a Pauli-elv ezt fermionokra határozottan tiltja. A részecskefizika fejlődése során, ha valami érthetlennel találkoztunk, gyakran bevezettünk egy új kvantumszámot. Ez történt most is: három lehetséges állapotot kellett leírunk, a színlátás három alapszínének analógiájára az új kvantumszámot színnek hívjuk.

1. táblázat

Az alapvető fermionok három családja

	1. család	2. család	3. család	töltés	T_3
Leptonok	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	0 -1	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$
Kvarkok	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$

T_3 a gyenge izospin harmadik komponense, a többi jelölést a szövegben fokozatosan ismer-tjük

A kvarkok három színének bevezetése az erős kölcsönhatás töltéseként az összes fenti problémát egyszeriben megoldotta: az újabb kvantumszám feloldotta a Pauli-tiltást, és annak posztulálása, hogy a természetben csak fehér (azaz a három színt meghatározott módon tartalmazó) részecskék létezhetnek, mert a szín-szín vonzás annál erősebb, minél inkább távolodnak egymástól a színek hordozói, megmagyarázta, miért csak a 3-kvark és kvark + antikvark állapotok megengedettek, csakis ezek fehérek ugyanis a lehetséges kombinációk közül.

A három fermioncsalád

A kvarkmodelltől a részecskefizika *Standard Modellje* felé az egyik legnagyobb lépést *Glashow*, *Iliopoulos* és *Maiani* (az utóbbi jelenleg éppen a CERN főigazgatója) tették 1970-ben a róluk elnevezett GIM-mechanizmus bevezetésével. Különböző kísérleti megfigyeléseken alapuló elméleti megfontolások alapján kimondták, hogy a kvarkok párokban léteznek, a három addig ismert kvark mellett tehát létezni kell egy negyediknek, az u-kvarkhoz hasonlóan $+\frac{2}{3}$ töltéssel. A negyedik *c* (*charm*) kvarkot 1974-ben sikerült két csoportnak is kísérletileg megfigyelnie (az újonnan megfigyelt $c\bar{c}$ kötött állapotot a két csoport különbözőképpen jelölte, így máig J/ψ részecskének hívjuk), és ezért *Richter* és *Ting* 1976-ban megkapták a fizikai Nobel-díjat.

A párokba rendeződött kvarkok mellett ugyanannyi leptonpárnak kell lennie, különben elromlik az elmélet belső rendje, *anomáliák* lépnek fel, amikor a részecskereakciók valószínűségét számítjuk. Az anomáliák kiküszöbölése megköveteli, hogy a leptonok és kvarkok összes töltése zérus legyen, és a kvarkok háromféle színével ez a feltétel családonként teljesül: $0 - 1 + 3 \cdot (\frac{2}{3} - \frac{1}{3}) = 0$. Amikor tehát *Perl* csoportja 1975-ben felfedezett egy harmadik leptont, a τ -t (Nobel-díj, 1995; ami késik, nem múlik), azonnal feltételezték újabb kvarkpár létezését. Így alakult ki az 1. táblázat menaszériája; azóta mindkét új kvarkot megfigyelték. A fermionok helyét a párokban a nukleonok izospinjének mintájára bevezetett *gyenge izospin* (*T*) jelzi: a *felső* részecskére a gyenge izospin harmadik komponense $T_3 = +\frac{1}{2}$, az *alsókra* $T_3 = -\frac{1}{2}$. A párok *gyenge-izospin-dublettek*.

Ezen a ponton joggal vetődik fel a kérdés, vajon hány hasonló kvark-lepton családot rejteget még a Természet. A választ a CERN és Stanford nagyenergiájú e^-e^+ ütközőnyalábjai⁵ adták meg csaknem tíz éve: semennyi, csak három család létezik. A fenti gyorsítókön előállított *Z-bozon* ugyanis sokféleképpen elbomolhat, és a Standard Modell valamennyi bomlási csatornát pontosan leírja; az egyetlen ismeretlen tényező a neutrínók száma; mivel a hagyományos detektorok a neutrínót nem észlelik, ezek *láthatatlan* bomlási módusok. A teljes bomlási élettartam és a látható módusok mérésével tehát csak a már meglévő három leptoncsalád létezik (egy esetleges nehezebb, tehát a töltött leptonokéval vagy a mezonokéval összemérhető tömegű neutrínóhoz nem okvetlenül tartozna új család).

Az 1. táblázat tehát a Standard Modell által jelenlegi tudásunk szerint megengedett összes alapvető fermiont tartalmazza. A kedves olvasót ne rémítse

⁵ A hagyományos gyorsítók részecskenyalábja álló céltárgyba ütközik, úgy hoz létre új részecskéket. Sokkal tisztább körülmények között, sokkal nagyobb energiákat lehet elérni, ha két részecskenyalábot gyorsítanak egymással szemben és egy észlelőrendszer közepén ütköztetik.

meg a fenti kijelentés látszólag túlzott óvatossága. A Standard Modellt sokféle módon sikerült elméletileg kiterjeszteni, ami számos (sőt időnként rengeteg) új hipotetikus (azaz egyelőre csak a fizikusok képzeletében élő) részecske megjelenéséhez vezetett. Bár semmiféle kísérleti bizonyítékot nem találtunk sem a Standard Modell teljeskörű érvénye ellen, sem a kiterjesztések jósolta új jelenségek, ill. részecskék mellett, az utóbbiakat teljesen kizárni sem lehet.

A kölcsönhatások

Mint említettük, a gravitációt nem számítva, a részecskefizikában három kölcsönhatásról szoktunk beszélni, alapvető tulajdonságaikat a 2. táblázatban összegezzük.

A Standard Modell szerint a kölcsönhatások helyi szimmetriákból erednek, forrásuk valamilyen töltés, és bozonok közvetítik őket. Ezek a bozonok nemcsak a kölcsönhatások hordozóiként, hanem önállóan is léteznek, ugyanolyan elemi részecskék tehát, mint az 1. táblázat fermionjai, és kísérletileg is észlelhetők. Egy fermion részt vesz egy kölcsönhatásban, ha rendelkezik annak töltésével: a gyenge kölcsönhatás valamennyi fermionra hat, az elektromágneses az elektromosan töltöttekre vagy mágneses momentummal rendelkezőkre, az erős pedig a színes kvarkokra.

Az elektromágneses kölcsönhatás hordozója a foton (jele γ), a gyengéé a három gyenge bozon (W^+ , W^- és Z^0). Az erős kölcsönhatás során a két kvark színt cserél, hordozójának, a *gluonnak* (*glue* angolul ragasztó) egy színt és egy *antiszínt* kell hordoznia. Ez nyolc különböző gluont jelent, mert a $3 \cdot 3$ lehetséges szín-antiszín kombinációból létrehozható egy olyan, a $R\bar{R} + G\bar{G} + B\bar{B}$, amely fehérből fehérbe vinne át, tehát nem jelentene szín-cserét.

Az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás összehasonlítására kitűnő példa a pionbomlás. Tipikus elektromágneses folyamat a semleges pion bomlása két fotonra: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $8 \cdot 10^{-17}$ s élettartammal. A negatív pion ugyanakkor csak gyenge kölcsönhatásban tud bomlani müonra és antineutrínóra, $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$, és az élettartama ennek megfelelően $26 \text{ ns} = 2,6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$, nyolc nagyságrenddel nagyobb a semleges pionénál. Vegyük észre, hogy az utóbbi reakcióban a bozon eltűnt, de a lepton egy antilepton társaságában keletkezett: a fermionok száma megmarad, a bozonoké nem.

Az elektromágneses kölcsönhatás tulajdonságait régen ismerjük: forrása az elektromos töltés, közvetítő bozonja a foton helyi szimmetriája, amelyből származtatható a Maxwell-egyenletek *mértékszimmetriája*.⁶ Ez a szimmetria az elektromágneses potenciál nullpontjának szabad választásával kapcsola-

6 Az unitér ($U^\dagger U = 1$) 1×1 -es mátrixok (azaz komplex számok) U (1) szimmetriacsoportja.

Kölcsönhatás	Relatív erősség	Potenciál	Élettartam	Közvetítő bozon	M GeV/ c^2
Erős	1	$\sim r$	10^{-23} s ($\Delta \rightarrow p\pi$)	8 gluon	0
El.-mágn.	10^{-2}	$\sim \frac{1}{r}$	$10^{-20} - 10^{-16}$ s ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)	foton	0
Gyenge	10^{-7}	$\sim \frac{1}{r} e^{-\frac{r}{R}}$ $R \sim \frac{\hbar}{M_{Wc}}$	$> 10^{-12}$ s ($\pi^{-12} \rightarrow \mu^{-}\bar{\nu}$)	W^{\pm} Z^0	80 91

A harmadik oszlopban r a távolság, R pedig a hatótávolság. A negyedik oszlopban a tipikus élettartamok alatt, zárójelben egy-egy jellegzetes reakciót is felsoroltunk. Az utolsó oszlopban a közvetítő bozon nyugalmi tömege szerepel.

tos: a fizikai erő potenciálkülönbség következménye, ezt a madarak bizonyítják, amikor nyugodtan üldögélnek a nagyfeszültségű vezetéken. Mint említettük, globális érvénye eredményezi a töltésmegmaradást. Az elektromágneses kölcsönhatást úgy származtatjuk, hogy a szabad fermiont leíró Dirac-egyenletől megköveteljük, hogy helyről helyre változó mértéktranszformációval szemben legyen invariáns; ettől fellép egy vektortér, amelyet könnyű⁷ az elektromágneses vektorpotenciállal azonosítani.

Mivel a foton tömege zérus, az elektromágneses kölcsönhatás végtelen hatótávolságú: potenciálja a töltések távolságával fordítottan arányos. A fotonokat mindennapi életünk során szemünkkel és televíziós vevőkészülékünkkel is észleljük, létezésükhöz tehát nem férhet kétség.

Az erős kölcsönhatás forrása a színtöltés, közvetítője a nyolc gluon, helyi szimmetriája pedig a három színnek megfelelően az SU(3)-szimmetria.⁸ A gluonok tömege is zérus, tehát az erős kölcsönhatás is végtelen hatótávolságú, potenciáljuk viszont közelítőleg a színes részecskék távolságával egyenesen arányos. Ez annak a következménye, hogy – a fotonnal ellentétben – a gluonok maguk is hordozzák a színt, a kölcsönhatás forrását, tehát saját magukkal is kölcsönhatnak. Ha tehát két kvarkot megpróbálunk egymástól elválasztani, a terük energiája a távolsággal nő, mert a gluonok egyre több újabb gluont és kvark-antikvark párokat keltenek közöttük, a kvarkok pedig hadronokká alakulnak, amíg az összes szín el nem tűnik; ezért nem észlelünk szabad kvarkot (*kvarkbezárás*).

⁷ Főleg, ha nagyon akarjuk.

⁸ 3×3 -as speciális (egységnyi determinánsú) unitér-mátrixok szimmetriacsoportja.

A kvarkokat mégis észleljük kísérletileg, nagyenergiájú részecskeütközések során keletkező, közel egy irányba kirepülő részecskenyalábok, *hadronzaporok* formájában. Elektron-pozitron ütközésnél például keletkezhetnek kvark-antikvark párok, és a megmaradási törvények miatt, tömegközépponti rendszerben, ezeknek a 180° alatt kell kirepülniük. Ahogy egymástól távolodnak, az állandóan növekvő térerő addig kelt gluonokat és újabb kvark-antikvark párokat, amíg valamennyi részecske szintelen nem lesz. Nagyobb energiákon ez akkora részecskesokaságot jelent (10-20 részecskét egy záporban), amely semmilyen más fizikai folyamattal nem értelmezhető. A gluonok létezését a 3-hadronzaporos események észlelése bizonyította, ezek ugyanis csak úgy jöhetnek létre, ha egy kvark-antikvark pár egyik tagja kibocsát egy gluont, minden más folyamatot tiltanak a megmaradási törvények.

A kvarkbezárás következményeként az erős kölcsönhatás hatótávolsága gyakorlatilag igencsak véges; mintegy 1 fm azaz 10^{-15} m, az atommag méretéhez közeli. Az atommagot tehát az erős kölcsönhatásnak a nukleonokból kilógó része tartja össze, hasonlóan a kémiai kötéshez, amely a semleges atomokból kilógó elektromágneses potenciál következménye.

A gyenge kölcsönhatás furcsaságai

A gyenge kölcsönhatás származtatására a gyenge izospin $SU(2)$ -szimmetriája szinte tálcán kínálja magát. A dolog azonban ennél sokkal érdekesebb: az elmélet a három közvetítő részecske, a W^+ , W^- és Z^0 *gyenge bozonok* tömegére is zérus tömeget jósol, noha a gyenge kölcsönhatás igen rövid hatótávolságából nagy tömegek következnek. A Heisenberg-féle határozatlansági reláció ugyanis, mint korábban említettük, lehetővé teszi, hogy egy M tömegű részecske $\hbar/(Mc^2)$ ideig sértse az energiamegmaradást (itt $\hbar = h/(2\pi)$ a Planck-állandó és c a fénysebesség vákuumban); így képes a 80 GeV tömegű W^+ bozon közvetíteni a neutronbomlásnál, $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$, felszabaduló 1,3 MeV (csaknem 5 nagyságrenddel kevesebb!) energiát. A gyenge kölcsönhatás hatótávolsága $R = \hbar/(M_W c) \approx 2 \cdot 10^{-3}$ fm, közel 3 nagyságrenddel kisebb, mint az atommag átmérője.

Ezt az ellentmondást oldotta fel a *spontán szimmetriasértés* elmélete (fel-fedezőjéről *Higgs-mechanizmusnak* hívjuk), amely a Standard Modellt mai formájára hozta. A Higgs-mechanizmus feltételezi egy olyan négykomponensű függvény (komplex izospin-dublett) létezését, amely hozzáadódik a fermionokat leíró függvényhez, mintha a fermionok ebben a térben mozognának. Az egyébként tömeg nélküli fermionok a Higgs-térrel kölcsönhatásban tömeget nyernek, hasonlóan ahhoz, ahogy egy töltött részecske folyadékban sokkal nehezebben mozog, mint vákuumban, mert az elektrosztatikus vonzás következtében magával kell hurcolnia a környezetében levő polarizált molekulákat.

A Higgs-tér sérti az $SU(2)$ -szimmetriát, és ezzel, a szilárdtestfizika kvázi-részecskéihez hasonlóan olyan új részecskéket hoz létre, amelyek közül három az elmélet zérus tömegű közvetítő részecskéinek tömeget teremt, és létrehozza a három áhított, nehéz gyenge bozont. A negyedik komponense, melléktermékként, újabb nehéz részecskét hoz létre, a *Higgs-bozont*. A Higgs-mechanizmusnak még számos jótékony hatása van, amelyek teljesen kezelhetővé teszik az addig ellentmondásokkal terhes modellt: lehetőséget teremt arra, hogy kiszámoljuk a folyamatok valószínűségeit; nélküle az egyenletekben végtelen tagok lépnek fel, hatására azonban kölcsönösen kiejtik egymást.

Adósok vagyunk még az 1. táblázatban szereplő két jel, az L index és a kvarkok jele melletti aposztróf magyarázatával: mindkettő a gyenge kölcsönhatás különlegessége.

Az egyik a *paritássértés*. Ha egy karórát úgy építünk meg, hogy a tervrajzát tükörben nézzük, azaz tükrözzük, valószínűleg pontosan jár majd, legfeljebb a mutatója forog majd ellenkező irányban és a számai-betűi lesznek az általunk megszokottak tükörképei. Sokáig azt hittük, hogy a fizika valamennyi törvénye tükörszimmetrikus, amíg *C. S. Wu* asszony kísérlete meg nem mutatta, hogy mágneses térben a kobaltatommag gyenge bomlása során a térrel ellenkező irányban bocsátja ki bomlási elektronjait.

A másik két kölcsönhatás megőrzi a rendszerek paritását, azaz *emlékszik* rá, jobbra vagy balra (azaz mozgásirányba vagy azzal ellenkezőleg) volt-e polarizálva, míg a gyenge maximálisan sérti azt. Ez abban nyilvánul meg, hogy a gyenge kölcsönhatás során a részecskék inkább balra, az antirészecskék inkább jobbra polarizálva keletkeznek, amennyire azt a megmaradási törvények engedik: ezt jelképezi az 1. táblázat dublettjei melletti L (angolul *left* = bal). A neutrínó esete extrém: ha zérus a tömege, a neutrínó csak balra polarizálva, az antineutrínó csak jobbra polarizálva létezhet. Az elmélet, természetesen, tartalmazza a nem zérus tömegű fermionok jobbkezes változatát is, izospin-szingulettként.

A paritássértés felfedezése után sokáig azt hitték, hogy a CP -szimmetria, tehát a fizikai törvények változatlanlansága, a töltés és paritás egyidejű tükrözésével szemben, általános érvényű; egészen 1964-ig, amikor *Cronin* és *Fitch* (Nobel-díj, 1980) felfedezték, hogy a gyenge kölcsönhatás azt is sérti, ha nem is maximálisan, mint a paritást, csak valamicskét. Mint említettük, a CPT -szimmetriát abszolútnak tartjuk. A CP -sértés elvi lehetőséget nyújt arra, hogy megkülönböztessük a világot és antivilágot, és valószínűleg kapcsolatban van az anyag-antianyag aszimmetriával. Visszatérve a karóra példájára, a térbeli (P) tükrözés a jobb-bal cserét jelenti, a töltéstükrözés (C) azt, hogy az órát antianyagból csináljuk, az időtükrözés (T) pedig azt, mintha az óra mozgását rögzítő videofelvételt ellenkező irányban játszanánk le.

A gyenge kölcsönhatás a kvarkok fajtáját sem tiszteli, ellentétben a másik kettővel: az erős kölcsönhatásban keletkezett kvarkok a gyenge kölcsönhatás

szempontjából a három családból vett állapotok keverékei.⁹ Praktikus szempontból elég vagy az alsó vagy a felső típusú kvarkokat keverteknek feltételeznünk; megállapodás szerint az alsókat keverjük, és erre utal az alsó kvarkok jelei feletti vessző. Ha a neutrínóknak tényleg nullától különböző a nyugalmi tömege, amire mutatnak kísérleti jelek, akkor a leptonállapotok is keveredhetnek.

A részecskeállapotok keveredését *keveredési szögekkel* jellemezzük. A három alsó kvarkot egy háromdimenziós tér koordinátatengelyeinek képzelve, a rendszert három szöggel kell elforgatnunk a három tengely körül, hogy megkapjuk az összes lehetséges kvarkkeveredést. A három szögből pedig megkapjuk a (d,s,b) vektort (d',s',b') -be transzformáló *Cabibbo-Kobayashi-Maskawa* mátrixot. A *CP*-sértés a három keveredési szög mellett negyedik paraméterként egy fázisszöget visz a CKM-mátrixba.

Egy másik nevezetes keveredés a gyenge és elektromágneses kölcsönhatás egyesítésekor (*Glashow, Weinberg és Salam: Nobel-díj 1979*) fellépő *gyenge keveredés*. A részecskefizikában, ha két állapot keveredését nem tiltja valamilyen törvény, akkor keverednek, azaz a természetben előforduló állapotok a kiindulók lineáris kombinációi lesznek. Ez történik a gyenge kölcsönhatás semleges árama és az ugyancsak semleges elektromágneses áram között. Az utóbbi semlegessége viccesen hangzik, hiszen az elektromos áram elektromos töltések árama, viszont mint áram semleges, mert a foton nem hordoz töltést, tehát a kölcsönhatás folyamán a rendszer töltésállapota nem változik meg. A foton és a semleges gyenge bozon keveredésekor csak egy szög lép fel, a *Weinberg-szög* (vagy *weak = gyenge keveredési szög*), amelyet így két okunk is van Θ_W -vel jelölni. A gyenge keveredés miatt lesz a gyenge bozonok tömege különböző: a Z^0 valamivel nehezebb a W^\pm -nál, mert a foton *besegít*.

Valamennyi keveredési szög szabad paraméter, tehát nem elméletileg megjósolható, hanem kísérletileg megállapítandó érték.

A Standard Modell jelene és kilátásai

A Standard Modell alapvető alkatrészei tehát a kétszer három fermioncsalád és a három helyi szimmetria, amelyből a három kölcsönhatás és $1 + 3 + 8$ közvetítő bozonja származtatható a szimmetriasértő Higgs-tér áldásos közreműködésével, amely utóbbi melléktermékeként megjelenik a Higgs-bozon. Nem tudjuk, miért éppen az említett három szimmetria hozza létre a három kölcsönhatást, de azt igen, hogy az elektromágneses kölcsönhatás $U(1)$ szimmetriája az elektromos töltés skalár (azaz egykomponensű) voltával, a gyenge kölcsönhatás $SU(2)$ szimmetriája a kétkomponensű gyenge izospinével, az erős kölcsönhatás $SU(3)$ szimmetriája a háromféle színével van összefüggésben.

⁹ Precízebben fogalmazva: a kvarkok erős kölcsönhatás szerinti sajátállapotai nem egyeznek a gyenge kölcsönhatás szerintiekkel.

A Standard Modell helyességét számtalan kísérleti megfigyelés igazolja. Mindjárt születésekor számszerűen megjósolta a gyenge bozonok tömegét és más tulajdonságait, amit a kísérlet később teljes mértékben igazolt (*C. Rubbia* és társai, Nobel-díj 1987). A létrehozása óta eltelt csaknem 30 év alatt a kísérlet minden jóslatát teljes mértékben igazolta, semmiféle olyan megfigyelésünk nincs, amely ellentmondana neki. A Higgs-bozon kivételével valamennyi alkotórészét megfigyeltük, utoljára a t -kvarkot, és a Természet vakon engedelmesskedni látszik neki. Még az az új megfigyelés sem mond igazán ellent a Standard Modellnek, hogy a neutrínónak lehet némi (igen kicsi) tömege.

Vannak jelei annak, hogy a Standard Modell mögött egységes, mélyebb elmélet lehet. Erre vall az a megfigyelés, hogy a három kölcsönhatás erőssége, azaz *csatolási állandója* az energia növelésével hasonló érték felé tart, tehát mintha egy univerzális kölcsönhatásra lennének visszavezethetők. Kiküszöbölendő a fenti problémákat, az elmúlt 3 évtizedben a Standard Modellnek számos kiterjesztése született, és a jövő kísérleteinek kell döntenie, melyik írja le közülük helyesen a mikrovilágot. Közülük ma a *szuperszimmetria* (SUSY) a legnépszerűbb, bár igazát egyelőre semmiféle kísérleti megfigyelés nem bizonyítja. Szimmetriát feltételez a fermionok és bozonok között, tehát azt, hogy minden ismert fermionnak és bozonnak van szuperszimmetrikus partnere: a feles spinű leptonoknak és kvarkoknak zérus-spinű *szeleptonok* (szelektron, szmüon, sztáur és sneutrínóik) és *szkvarkok*, a kölcsönhatásokat közvetítő, egyes spinű bozonok (foton, W^\pm , Z^0 és a 8 gluon) szuperpartnerei a feles spinű fotínó, wínó, zínó és a gluínók, a zérus-spinű Higgs-bozoné pedig az ugyancsak feles-spinű higgszínó.

A Standard Modell lehető legegyszerűbb szuperszimmetrikus kiterjesztése, a *Minimális Szuperszimmetrikus Standard Modell* (MSSM) az elmélet csaknem valamennyi problémáját tetszetősen megoldja, de igen nagy áron: a rengeteg új részecske mellett igen sok új paraméter bevezetésével. Az utóbbi években érdekes versenyfutásnak vagyunk tanúi a kísérleti és elméleti kutatók között: a kísérletiek hiába igyekeznek megfigyelni a megjósolt új szuperpartnereket, és eközben mind nagyobb részeket zárnak ki a lehetséges paraméterértékek terében; eközben az elméletiek számításaik, modelljeik finomításával egyre növelik az elméleti alapon megengedett és kísérletileg még nem tanulmányozott paramétertartományokat.

Ajánlott irodalom

Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*, Gondolat, Budapest, 1986: 5.5. fejezet.

Leon Lederman: *Az isteni aom, avagy mi a kérdés, ha a válasz a Világegyetem*, Typotex, Budapest, 1996 (Fordította: Vassy Zoltán).

Kiss Dezső, Horváth Ákos, Kiss Ádám: *Kísérleti atomfizika*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 1998.

Rengeteg közérthető információ található a CERN honlapján: <http://www.cern.ch>.

Sugárkémia

(mi az és mire jó?)

A zárójelbe tett első kérdésre látszatra elég könnyű válaszolni – éppen olyan kémia, mint a többi. Hiszen kémiai reakciók csak nagyon ritkán mennek végbe „önmaguktól”. Ha azt akarjuk, hogy egy többféle anyagból álló rendszerben: oldatban, gázelegyen, esetleg szilárd testben kémiai átalakulás játszódjék le, kezdetben mindig energiát kell a rendszerbe juttatnunk. Például meg kell melegítenünk az oldatot. Kivételek vannak ugyan, de természetesen ritkák. Hiszen ha egy elegendő reakció spontán meg tud indulni, akkor rögtön át is alakulnak az anyagok, amint összekevertük őket. Van persze ilyen folyamat is, az például, amikor égetett mészre vizet öntünk. Ilyenkor nincsen szükségünk melegítésre ahhoz, hogy oltott mész keletkezzék. A gyakoribb folyamat azonban olyan, mint a víz keletkezése hidrogénből és oxigénből. A két gáz elegye szobahőmérsékleten akármeddig eláll átalakulás nélkül. Egy elektromos szikra azonban megindítja a reakciót, olyan hevesen, hogy robbanást hallunk, majd vízcseppek gyűlnek össze az edényben. Ezt a folyamatot a 18. század végén már *Lavoisier* is ismerte.

Kissé szakszerűbben szólva, a reakcióra képes anyagok energetikai tekintetben általában *metastabilis* állapotban vannak. Ahhoz, hogy ebből az állapotból kimozdítsuk őket, és így az elegendő energiát *labilissá* tegyük, energiát kell nekik adni. *Aktiválási energia* a neve ennek a fegyver ravaszaként működő energiának. (A hagyományos mechanikai kép, amely segít megérteni ezeket a viszonyokat, a hegytetőn ásott lyukban nyugvó golyóé. A golyót ki kell emelni a lyukból, vagyis egy kevés helyzeti energiát kell vele közölni ahhoz, hogy aztán a hegyről legurulva az aktiváló energiánál jóval többet alakítson mozgási energiává.)

A sugárkémia azoknak a vegyi átalakulásoknak a tudománya, amelyekben radioaktív (más néven: ionizáló) sugárzások elnyeléséből származik az aktiválási energia. Akkor talán nincs is itt szó semmi különösről, hiszen a hegytetőről leguruló golyó sorsát sem befolyásolja nagyon, hogy pusztá kézzel vagy golfütővel emeltük-e ki a gödörből. Messziről nézve a dolgot talán ez is a helyzet. Tekintsük meg ezért őket közelebbről!

Tudjuk jól, radioaktív atommagok háromféle sugárzást tudnak kibocsátani: nehéz α -részeket (He-ionokat), könnyű β -részeket (gyors elektronokat) és γ -sugarakat (nagy energiájú elektromágneses sugárzást). Ezek nagyon eltérnek egymástól abban, ahogyan az anyagokon át tudnak hatolni, de mindhárom eltérnek a látható fénytől; átlátszatlan anyagokat is át tudnak járni. *Becquerel* éppen így figyelte fel rájuk. Sötét papírba csomagolt fotolemezei megfeketedtek az uránszurokérc sugárzásától. Vagyis ezeknek a sugaraknak a hatására az előhívatlan lemezben levő ezüst-bromid színezüstté alakult. A sugárzás tehát egy kémiai reakciót váltott ki. A radioaktivitást egy sugárkémiai átalakulás jóvoltából fedezték fel.

Azt írtuk az előbb, ionizáló sugárzásoknak is hívják a radioaktív sugarakat. Legszembeötlőbb, már felfedezésük idején felismert tulajdonságuk ugyanis az, és ebben (ebben is) hasonlítanak a röntgensugárzáshoz, hogy szigetelő anyagokat, például a levegőt, nemesgázokat, olajokat és egyes kristályokat elektromosan vezetővé tudnak tenni. Ez nagyon fontos volt a sugárzások mérésének korai (és mai) praxisában, az elektromos vezetőképesség ugyanis függ az elnyelt sugárzás teljesítményétől, az időegységre jutó sugárdózistól. Az anyag felépítéséről alkotott elképzeléseink szerint a megnövekedett vezetőképesség egyedüli oka az lehet, hogy a sugárzás mozgékony, elektromosan töltött, atomi-molekuláris méretű részecskéket: ionokat hoz létre. Hasonlókat ahhoz, amilyenek az elektromosan jól vezető, ún. elektrolit-oldatokban találhatóak, amelyek tulajdonságait az elektrokémia tudománya tanulmányozza. A korai időkben ezért természetesnek vélték, hogy a sugárkémia jelenségeire elektrokémiai magyarázatokat keressenek. Hamar kiderült azonban, hogy a kapcsolat elég távoli. Másról van itt szó.

A radioaktív sugárzások egy-egy részecskéje hatalmas adag energiát szállít. Százazerszer-milliószor akkora, mint amekkora energia az atomokat molekulákká egyesíti, mint amekkora ahhoz szükséges, hogy egy atomról, molekuláról leszakítsunk egy elektront, más szóval ionizáljuk őket. Ennek az energiának természetesen egy csekély részét tudja egyetlen molekula felvenni, éppen annyit csak, vagy alig valamivel többet, mint amennyi a kémiai kötés felszakításához vagy a molekula ionizációjához kell. (Ahogyan egy szőlőfürt sem kaphat sokkal több energiát a jégesőtől, mint amennyi leszakítja a szemet a fűrtről.) A maradék energián a radioaktív részecske és a kiütött elektron osztozik. Két dolog következik ebből.

Az egyik: egyetlen radioaktív részecske nagyon sok iont és elektront hoz létre, amint áthalad az anyagon. Az energia bősége miatt ezek az ionok nemcsak sokan, hanem sokfélék is lesznek; abban az értelemben, hogy a bennük tárolt energia dolgában egymástól nagyon eltérő állapotban lehetnek. Tehát a sugárzás különféle gerjesztett állapotú ionokat hoz létre. Ezen felül az is meggesik, igen gyakran méghozzá, hogy egy molekula kevesebb energiát nyel el, mint amennyi egy elektron leszakításához kell. Ilyenkor a molekulának egy

semleges, de energiában gazdag, gerjesztett állapota alakul ki. Ezekben az állapotokban a molekulák vagy ionok általában készen állnak mindenféle kémiai átalakulásra. A sugárzás tehát a labilis, reaktív állapotoknak hatalmas választékát hozza létre. Melegítéssel ennyi energiát soha nem tudunk egy molekulának kölcsönözni, ennyiféle állapotot soha nem tudunk létrehozni.

Hát fénnyel? Ha egy anyag fényt nyel el (minden színes anyag ezt teszi), egy-egy molekulájára sokkal több energia jut, mint amennyit bármilyen magas hőmérséklet beléjük kényszeríthet. A fotokémia, a fény hatására végbemenő vegyi átalakulások tudománya, éppen ezt az energiagazdagságot aknázza ki. Ennyiben hasonlít is egymáshoz a sugárkémia és a fotokémia. Az eltérés abban áll, hogy míg a fény (legalábbis az egyetlen hullámhosszúságú, *monokromatikusnak* nevezett fény) csak egyetlen fajta gerjesztett vagy ionizált állapotot hoz létre, addig a radioaktív sugárzás hatalmas választékot kínál. A gyakorlat szempontjából ez néha előnye, néha hátránya a sugárkémianak. Előny, mert nem csak fényelnyelő anyagok esetén alkalmazható és a sokféle állapot sokféle reakciót enged meg; hátrány, mert fény segítségével esetenként kiválaszthatunk egyetlen kívánatos reakciót az elegendően lehetséges sok közül.

Az energiaátadás módjának másik következménye, hogy ionok, gerjesztett molekulák csak ott keletkeznek, ahol a sugár részecske áthalad. Ezek a reaktív részek kirajzolják a részecske pályáját. Nagyon régi észlelet ez is, ezt használja ki a *Wilson*-féle ködkamra meg az újabbban elterjedt buborékkamra arra, hogy feltérképezze az ionizáló részecskék útját. Ezekben az eszközökben az ionizáció nem kémiai átalakulást vált ki, hanem folyadékcseppeket vagy gőzbuborékokat hoz létre. A vegyész számára ez a geometriai tény nehéz, tehát vonzó teoretikus problémát vet fel. A kémiai reakciók legnagyobb és elméletileg is, kísérletileg is legkönnyebben vizsgálható része olyan rendszerekben megy végbe, amelyeknek minden pontjában azonos az anyagok koncentrációja: homogének az oldatok. A sugárkémiai reakciók szemmel láthatóan nem ilyenek, hiszen a reaktánsok nem oszlanak el egyenletesen a besugárzott rendszerben, hanem csak arrafelé találhatók, amerre egy-egy sugár rész jár. Ha tehát meg akarjuk érteni, matematikai eljárások segítségével le akarjuk írni ezeknek a folyamatoknak a sebességét (*kinetikáját*), tekintettel kell lennünk arra is, hogy az ionok és gerjesztett molekulák keletkezésük helyéről az oldat sugárzás nem járta tájai felé is elmozdulnak. Az ugyanis általános törvény, amit egyébként egy csésze teában oldódó kockacukor esetén mindig tapasztalunk, hogy az oldott anyagok a töményebb oldatból a hígabb tartományok felé *diffundálnak*. A sugárkémiai reakciók kinetikai leírásában a kémiai átalakulások mellett a diffúzióról is számot kell adnunk.

„Ez a sok szépség mind mire való?” – idézte *Babits Mihályt* a szerves kémia egy izgalmas fejezetének közepén *Bruckner* professzor úr. A sugárkémiai folyamatok intenzív kutatása a háború alatt kezdődött meg; ez is, mint annyi más, az atomenergia-programokkal kapcsolatban kapott lendületet. A *Man-*

hattan Project keretében azt is megvizsgálták, hogy a sugárzás hogyan hat a legkülönbözőbb anyagokra. Mindenekelőtt a vízre és vizes oldatokra; ez fontos volt a vízhűtésű atomreaktorok működése szempontjából, és fontosnak látott – a korábbi röntgenológiai tapasztalatok alapján – az élő szervezetek sugárérzékenységének, általánosságban szólva, a sugárbiológiának a tekintetében is. A háborús körülmények némi publikációs furcsaságokat eredményeztek: az amerikai csoportok csak az ötvenes évek elején írhatták le azt, amit már nyolc-tíz évvel korábban tudtak, és amit angol kutatók már sokkal korábban közöltek is. Ennek később persze nem volt jelentősége. Nagyon sok oldat vizsgálatáról számoltak be; általában azt találták, hogy vízből mindig hidrogén-gáz és hidrogén-peroxid fejlődik, a benne oldott anyagok pedig változatos oxidációs-redukciós átalakulásokat szenvednek.

Az eredményekre ipari kémikusok is felfigyeltek, hiszen a vizes oldatok mellett természetesen sok más, iparilag fontos vegyületet is megvizsgáltak. Az energiamérlegek szinte kivétel nélkül arra mutattak, hogy energiaigényes folyamatokat sugárzások segítségével kár lenne végrehajtani: a sugárzás energiája rossz hatásfokkal alakul kémiai energiává. Néhány esetben azonban, ahol a sugárzások könnyen szabályozható behatolási mélysége fontos: felületi bevonatok, vékonyrétegek átalakításában; vagy más módon nehezen megindítható és szabályozható reakcióknál, amelynek például egyes műanyagok előállítására szolgáló polimerizációs folyamatok, a sugárzásos eljárások fontos szerepet kaptak, kapnak ma is. Magyarországon *Hardy Gyula* és *Dobó János* vezetésével kezdődtek meg ezek az ipari vizsgálatok. Mai állásukról köteünk egy másik tanulmánya számol be.

A sugárbiológia és sugárterápia kérdéseit, azok biokémiai vonatkozásait nem tárgyalhatjuk itt. A vegyészek és biológusok közötti állandó információcsere sok kérdésben hozott már hasznos eredményeket. A malignus daganatok radioterápiájának körülményeit éppúgy sikerült sugárkémiai megfontolások alapján javítani, ahogyan a sugárvédő gyógyszerként adagolt szerves kénvegyületek hatása is sugárkémiai folyamatokban találja meg a magyarázatát. Ilyen vizsgálatok természetesen Magyarországon is folynak.

A mezőgazdaság és az élelmiszeripar egyre többször fordul segítségül a sugárzásokhoz. Talán még mindig nem elégszer. Gabonák féregmentesítése, tárolásra váró termékek csírázóképeségének csökkentése, élelmiszerek tartósítása mind megoldható besugárással. A gazdasági mérleg általában pozitív. A lélektani ellenállást azonban nehéz leküzdeni, hiszen „senki nem akar atomot enni!” Néha az ellenvetés kissé tanultabban van megfogalmazva, a sugárzásoktól való félelem azonban mindig tetten érhető. Pedig tudnivaló: *az ionizáló sugárzás nem teszi az anyagokat radioaktívvá!* Az ilyen besugárzások hatására nem játszódnak le magfizikai folyamatok. Kémiai átalakulások persze igen. Ezek hatásait, esetleges nemkívánatos termékeit meg kell ismerni. Ezek éppen olyan veszélyeket rejthetnek, mint a kémiai tartósítószeres vagy

az ősi füstöléses eljárások. Ami ez utóbbiakat illeti, bőven adagolunk rákkeltő anyagokat füstölés közben a sonkába. A félelmek ellenére Magyarországon működnek mezőgazdasági és élelmiszeripari célokat szolgáló besugárzó berendezések. Ahogyan az egyszer használatos fecskendők sterilizálását is elektronbesugárzás segítségével végzik ma már nálunk.

A közvetlen ipari hasznon kívül a sugárzások kémiaja nagyon is terméke-nyítően hatott az egész fizikai kémiára. Az előbb írtunk azokról a különleges kinetikai feladatokról, amelyeket a sugárzások tűztek ki a vegyészek elé. Fontosabb talán ennél az a módszertani újdonság, amely közel negyven éve jutott a vegyészek birtokába. Ha egy kémiai reakció sebességét, tehát az anyagok fogyásának vagy keletkezésének az ütemét meg akarjuk határozni, úgy az egyik legfontosabb és legnehezebb feladat, hogy a reakciót hirtelen indítsuk meg, sokkal gyorsabban, mint amennyi idő alatt a reakció aztán végbemegy. Az első bekezdésekben írtak nyelvén: a reakciót pillanatszerűen kell aktiválni. Erre a negyvenes években *Porter* és *Norrish* ajánlott egy szellemes megoldást, a villanófény-fotolízist. Egy nagyon rövid ideig felvillanó lámpa fényével váltottak ki kémiai folyamatokat. Ezzel persze csak fotokémiai reakciókat lehetett vizsgálni, a „nagyon rövid idő” pedig kezdetben 1 ms, tehát a másodperc ezred része volt. Ezt a Nobel-díjjal elismert gondolatot ültették át az elektronsugárzások területére. Olyan elektrongyorsítókat építettek, amelyek kezdetben 1 μ s (egymilliomod másodperc) alatt bocsátottak ki magukból egy elektronnalábot, majd ezt az időt lerövidítették az ezredrészére, majd megint az ezredrészére; most tehát az 1 ps (picosec = 10^{-12} s) táján járunk. Ennek az impulzus-radiolízisnek nevezett eljárásnak két előnye is van a villanófény-fotolízissel szemben. Gyorsabb és – ami lényegesebb – nem korlátozódik fényelnyelő anyagokra és fotokémiai reakciókra, hanem a folyamatok rendkívül széles körét lehet vele vizsgálni. Nagyon gyors reakciókat, tehát nagyon labilis, csak igen rövid ideig megfigyelhető anyagok jelenlétét, tulajdonságait tárták fel a segítségével.

Ma már gyorsaság dolgában a fotolízis megelőzte a radiolízist, megint ezredrészére rövidítették a reakció kiváltásának idejét, így most már az 1 ps ezredrészénél, 1 fs (femtosec = 10^{-15} s) táján járnak. Ez nem öncélú sportteljesítmény, amint azt *Ahmed Zewail* nemrég elnyert Nobel-díja is bizonyítja. A kémiai reakcióknak olyan részleteit sikerült ezzel a módszerrel feltárni, amelyekről elméleti számításaink voltak csak eddig, vagy azok sem. Meg lehet mondani, hogy a reagáló molekulák milyen módon, mekkora energiával, mennyi időre találkoznak össze, mielőtt a végtermékek kialakulnának. Az első bekezdésekben írt mechanikai analógiára utalva: meg lehet mondani a hegytetőn lévő gödör alakját, és azt is, hogy milyen módon jut a széléig a golyó.

Az impulzus-radiolízis segítségével sok szép és például az atomreaktorok technológiájának szempontjából hasznos reakciókinetikai eredményt értek el. A módszer azonban ezen felül sok fontos észlelettel gazdagította az egyete-

mes kémiát. Az egyik ezek közül az én szememben a sugárkémiai kutatásoknak talán legfontosabb felfedezése. Kimutatták ugyanis, hogy a sugárzás hatására szabaddá váló elektronok egymagukban is megélnek; nem kötődnek molekulákhoz, atomokhoz, hanem – mint akármilyen más reaktáns, stabilis töltött részecske, például egy kloridion – hosszabb-rövidebb ideig beágyazódnak a folyadék molekulái között, majd reagálnak az oldat valamelyik komponensével. Ezeket a *szolvatált elektronnak* vagy *felesleg-elektronnak* nevezett képződményeket, *Platzman* és a magyar *Stein Gábor* elméleti várakozásai nyomán, először vízben észlelte *Boag* és *Hart*, utóbb azonban számtalan folyadékban kimutatták a jelenlétüket, meghatározták fizikai és kémiai tulajdonságaikat. Sok érdekes, hasznos kémiai reakciót lehet velük végrehajtani. Viselkedésük részletei iránt a villamos szigetelők szakemberei éppen úgy érdeklődnek, mint az elemi részecskék detektálásával foglalkozó kísérleti fizikusok. De elméleti fontosságuk talán még nagyobb, mint a gyakorlati hasznuk. Jóvoltukból a folyadékok és a bennük oldott ionok közti kölcsönhatásokat a legtisztább és bizonyos tekintetben legegyszerűbb módon lehet tanulmányozni, megérteni.

Talán nem túlzom el ezeknek az eredményeknek a fontosságát, ha azt mondom, a felesleg-elektronok felfedezésével a sugárkémia az anyag egy új megjelenési formájával ajándékozta meg a természettudományt.

Izotópalkalmazás Magyarországon

A II. világháborút követő hidegháborús években az atomenergiát és az izotópokat meglehetősen titkolódzás vette körül. A jég az 1950-es évek közepe felé kezdett olvadozni. Az atomenergia békés felhasználását célzó első genfi konferencia (1955) után Magyarországon is sokan keresték a radioizotópok felhasználásának különböző módjait. Erre kiváló lehetőséget nyújtott az 1959-ben Csillebércen beindított kísérleti atomreaktor. Ugyanebben az évben határozta el az Országos Atomenergia Bizottság, hogy a hazai izotóp-előállítás, az izotópok alkalmazásának támogatására, ilyen irányú tudományos kutató, fejlesztő és szolgáltató tevékenység végzésére intézetet hoz létre mely az Országos Atomenergia Bizottság Izotóp Intézete néven kezdte meg működését. Az Intézet 1967-ben kormányhatározat alapján a Magyar Tudományos Akadémia felügyelete alá került, 1989-től pedig a Magyar Tudományos Akadémia Izotópkutató Intézete néven működött tovább.

Az Intézet több évtizeden keresztül meghatározó szerepet töltött be a hazai izotóp-előállításban, forgalmazásban, az izotóp-alkalmazásban és az izotópokkal végzett kutatómunkában. A kezdeti izotópalkalmazási feladatokat elsősorban az orvosi pajzsmirigy-diagnosztikában és a daganatos terápiában végzett kísérletek jellemezték. Az iparban a radiográfia és a méréstechnika (vastagság-, sűrűségmérés), míg a mezőgazdaságban a tápanyagcsere-kísérleti alkalmazások váltak egyre elterjedtebbekké a tudományos alapkutatási feladatok mellett. A kezdeti izotópalkalmazások szakaszában számos más országban előfordult sugárbaesetek elemzése alapján ma már meggyőződéssel állíthatom, hogy a biztonságos munkahelyek kialakítása, a sugárzó anyagot felhasználók személyi sugárterhelésének csökkentése érdekében és a környezet védelmében az intézet szakemberei által végzett szaktanácsadási tevékenység felbecsülhetetlen értéket képviselt.

Az alapkutatás és a radioizotóp-alkalmazások mellett a hazai sugárzóanyag-igények ellátásával járó feladatok meghaladták egy kutatóintézet lehetőségeit. 1983-ban IZINTA néven (kb. 50 dolgozóval) Izotóp-kereskedelmi Leányvállalatot alapítottunk, mely 1993-tól IZINTA Kft. néven folytatja tevékenységét.

Az intézeti munka jellegzetessége az volt, hogy egyes osztályok túlnyomórészt kutatást, míg más részlegek szinte kizárólag csak fejlesztést, szolgáltatást végeztek. „Köztes” helyzetet foglalt el a termelés, amely szorosan összekapcsolódott a szerves- és szerveskémiai, radiokémiai, később biokémiai és biotechnológiai kutatásokkal. Ez az egyre nagyobb méretűre növekedett gyakorlati tevékenység vezetett ezen feladatkörök szervezeti szétválasztásához. Így 1993. január 1-jével a kétféle tevékenység kettévált és az elsősorban alapkutatásokat végző Intézet mellett létrejött az egyértelműen nyereségorientált, izotópkészítmények fejlesztésével, gyártásával és forgalmazásával foglalkozó Izotóp Intézet Kft. A korábban 430 fővel intézetből a szétváláskor 190 fővel Izotóp Intézet Kft. és 167 fővel Izotópkutató Intézet alakult. 1998. január 1-jével az MTA intézetkonszolidációs programjának keretében megalakult a Kémiai Kutatóközpont, melynek az intézet Izotóp- és Felületkémiai Intézet néven vált részévé. Konzolidációs létszámunk 109 fő lett, melyből 19 a Központ apparátusához tartozik.

Az intézeti munka még igen vázlatos „felsorolásjellegű” ismertetése is messze meghaladná egy ilyen jellegű írásmű optimális vagy még elviselhető kereteit, ezért a továbbiakban az intézeti munka egy, már a kezdetektől is fontos, de talán kevésbé ismert eleméről, az ionizáló sugárzások fizikai és kémiai hatásaival, a sugártechnikával, technológiával és a nagy aktivitású sugárforrások gyártásával kapcsolatos kutatásokról számolok be. Említést teszek a Magyarországon más helyütt folytatott hasonló jellegű tevékenységekről is. Az intézeti munka néhány más területéről a jelen kötetben szereplő egyéb írásokban történik említés. Így Környei József az Izotóp Intézetben elkezdett, majd az Izotóp Intézet Kft-ben tovább folytatott radiofarmakon-kutatásokról és fejlesztésekről számol be. Molnár Gábor és munkatársai írásában pedig az intézetben folytatott prompt-gamma-aktivációs-analitikai vizsgálatokról is olvashatnak.

Az atomenergia békés felhasználásának klasszikus területe a sugárzások alkalmazása. Becquerel 1896-ban az uránszurokérc γ -sugárzása révén fedezte fel a radioaktivitást azáltal, hogy az a fényzáró fekete papírba csomagolt fénypépszerű lemezt megsötétítette, hiszen az emulzióban lévő ezüstvegyületből ezüstöt választott ki. A sugárzások széles körű hasznosítására azonban csak alig fél évszázada nyílt lehetőség, amikor megkezdődött a mesterséges sugárforrások előállítása. Így elkezdődött a nagy radioaktivitású, 60 tömegszámú kobaltot tartalmazó (^{60}Co) sugárforrások termelése, nagy mennyiségben és viszonylag olcsón, másrészt pedig megindult a több millió elektronvolt energiájú elektronokat előállító ún. elektrongyorsítók gyártása. Az ipari gyakorlatban az elmúlt években a gyorsítók alkalmazása vált meghatározóvá.

A radioaktív kobalt forrást inaktív fémkobalt célananyag atomreaktorban történő besugárzásával, ún. felaktiválásával, állítják elő $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ reakcióval. Célananyagként általában néhány mm átmérőjű, illetve magasságú, termé-

szetes-izotóp-összetételű kobalt hengereket, korongokat alkalmaznak, melyeket kettős tokozással kapszulákba zárnak. A felaktiválás általában nagy neutronfluxusú reaktorcsatornát igényel és a fluxus nagyságától függően 1-4 évig tart. Ezt rövid idejű pihentetés követi, melynek során a védőtokokban (nikkel, saválló acél) keletkező rövid felezési idejű izotópok lebomlanak. A kapszulákat méteres vastagságú beton-, acél-, vagy ólomvédelemmel ellátott ún. forrófülkékben bontják fel. A felaktivált hengereket, korongokat a végleges tárolókapszulákba helyezik és lehegesztik azokat. Itt ismét kettős tokozást alkalmaznak. A radioaktív kobalt fajlagos aktivitása általában mindössze $0,1-12 \text{ PBq kg}^{-1}$ ($\text{P}(\text{peta}) = 10^{15}$, $\text{Bq}(\text{Becquerel}) = 1$ bomlás másodpercenként), míg ha valamennyi ^{59}Co -atomot ^{60}Co -atommá alakítanánk át, ez $42,6 \text{ PBq kg}^{-1}$ fajlagos aktivitásnak felelne meg. Az elméleti érték a felaktiválás során is fellépő bomlás, illetve az általában viszonylag kicsi neutronfluxus miatt még meg sem közelíthető. Sugársterilizálás, vagy más sugártechnikák esetén a $0,2-5 \text{ PBq kg}^{-1}$ fajlagos aktivitás elegendő. Ezzel szemben a sugárterápiában, radiográfiában és egyes kutatásoknál a nagy ($2-12 \text{ PBq kg}^{-1}$) fajlagos aktivitás igen fontos lehet.

A ^{60}Co bomlása során 5,3 év felezési idővel, kisenergiájú β -sugárzással (maximális energia $0,312 \text{ MeV}$) erősen gerjesztett ^{60}Ni -ná alakul, melyet $1,17 \text{ MeV}$ és $1,33 \text{ MeV}$ γ -sugárzás kibocsátása követ. A gyenge β -sugárzás már magában a sugárforrásban, illetve a tokozásban elnyelődik. A radioaktív bomlás miatt a ^{60}Co források aktivitása évenként mintegy $12,5\%$ -kal csökken. Az aktivitás csökkenését időről időre kompenzálni kell. Különösen a tumorterápiás kezeléseknél szükséges gyakori utántöltés, hiszen a csökkenés miatt a beteg besugárzási ideje ugyanilyen mértékben megnövekszik, ami a beteg mozgátlanságából eredő nagyobb igénybevétellel és a kezelhető betegszám csökkenésével jár. Ipari besugárzásoknál általában a felezési időnek megfelelően mintegy 5 évenként az eredeti aktivitásnak megfelelő utántöltést végeznek. A sugárforrások tipikus mérete orvosi, radiográfiai és laboratóriumi alkalmazásoknál $10-100 \text{ TBq}$ ($\text{T}(\text{tera}) = 10^{12}$), míg ipari jellegű félüzemi, vagy üzemi besugárzóberendezéseknél $1-30 \text{ PBq}$.

Magyarországon az első igazi nagy, kutatási és félüzemi jellegű besugárzásokra is alkalmas besugárzó berendezés 1968-ban létesült intézetünkben 3 PBq tényleges aktivitással. Ez akkor Közép-Európa legnagyobb aktivitású ^{60}Co - γ besugárzóberendezése volt. Az itt szerzett tapasztalatokkal indult el a hazai ipari besugárzástechnika, melynek története jól példázza azt, hogy érdemes a tudományra, műszaki fejlesztésre költségeket fordítani, az ilyen „beruházás” közvetve majdnem mindig, de az esetek jelentős részében közvetlenül is, megtérül. Ma az országban két nagy ipari besugárzóberendezés működik, melyeket orvosi eszközök sugársterilizálására, élelmiszeripari csomagolóanyagok, ill. élelmiszerek sugárkezelésére használnak (Debrecen, Medicor és Budapest, Agroster, mindkettő 10 PBq). Ezenkívül az Izotóp Intézet Kft. nagy

aktivitású ^{60}Co γ -sugárforrásokat gyárt és besugárzó berendezéseket exportál. Továbbá elvégzi az országban a sugárforrások cseréjével, tárolásával kapcsolatos, nagy tapasztalatot és szakértelmet igénylő műveleteket. Azt hiszem, túlzás nélkül elmondhatjuk, hogy az elmúlt évtizedek fejlesztéseinek eredményeképpen az ipari sugártechnika, sugártechnológia területén Magyarország – legalábbis regionális szempontból – nagyhatalommá vált. Ezt támasztják alá a hazai tervezéssel és kivitelezéssel Ghánában, Vietnamban, Törökországban, Romániában és Jordániában létesített, a gyógyászati eszközök sugársterilizésére, ill. élelmiszerek sugártartósítására szolgáló besugárzó üzemek.

A sugártechnológiához kapcsolódik a sugárdózis-mérési fejlesztő munka. Technológiai szempontból rendkívül fontos az anyagban elnyelődött sugárenergia nagysága, a sugárdózis ismerete. Ehhez a sugárzás által keltett fizikai hatásokon (például hőhatás) alapuló mérések mellett, ill. helyett leggyakrabban a kémiai változások mérését alkalmazzák. Az intézet hírnevét jelentősen öregbítette a horvát eredetű alkoholos klórbenzol doziméterrel kapcsolatos fejlesztés. Klórbenzol alkoholos oldatának besugárzásakor nagy hozammal képződő sósav koncentrációjának mérése képezi a dozimetria alapját. A koncentrációt korábban titrálással határozták meg. Magyar gyártmányú mérőberendezést, ún. oszcillotitrátort használva olyan módszert fejlesztettünk ki, amelynél a dózismeghatározás nagyfrekvenciás vezetőképességi méréssel a leforrasztott üvegampullák felnyitása nélkül elvégezhető. A módszert a világ sok nagy besugárzóberendezésénél alkalmazzák.

Régóta ismert, hogy a természetben található kristályok egy részének besugárzását követő kimelegítésekor lumineszcenciás fénysugárzás, ún. *termolumineszcens* (TL) fény keletkezik. A jelenséget annak tulajdonítják, hogy sugárzás hatására a szigetelő sávból kiszabaduló és a vezetési sávba átkerülő elektronok „befogódnak” a kristályhibákon. Onnan a fellemelegítéskor szabadulnak ki. A töltések semlegesítődésekor felszabaduló energia fénykibocsátáshoz vezet. A vulkáni kőzetek keletkezésekor, vagy az agyagedények kiégetésekor – nagy hőmérsékleten – a kristályos szemcsék „TL órája nullázódik”, majd a környezet ionizáló háttérsugárzásának hatására a „TL kronométer újra járni kezd”. Az elvet intézetünkben személyi dozimetriai célra használjuk. Munkatársaink Al_2O_3 -alapú dozimétert fejlesztettek ki és szabadalmaztattak. A doziméter érzékenységét és méréstartományát a megfelelően adagolt aktívátorokkal széles határok között lehet változtatni. Dózismérő rendszereinket a MIR űrállomáson és a NASA űrhajóin is használják. A saját fejlesztésű Al_2O_3 dózismérő számos hazai és külföldi felhasználója között megemlítjük a paksi atomerőművet, ahol jelenleg a primerkörben helyeztünk el több száz dózismérőt.

A régi kerámiák termolumineszcenciáját először 1960-ban detektálták. Egyik munkatársunk 1976-tól régészekkel együttműködve vizsgálta a legna-

gyobb magyarországi rézkori temető (Tiszapolgár) TL-időrendjét, továbbá öt hazai és egy horvátországi lelőhelyről származó egyes kerámiákat. A vizsgált korok idősámításunk előtt 2960–4920 év közötti időknek adódtak és hibahátáron belül egyeztek más mérési módszerekkel és a régészeti becslésekkel. A módszer lényege, hogy a kerámiatárgyból kis kvarcsezemcséket gyűjtenek össze, melyeket a TL-berendezésben kimelegítenek és mérik a termolumineszcens fény integrált intenzitását. Majd, kalibrálás céljából, a szemcséket ismert dózissal besugározzák és újra meghatározzák a termolumineszcens intenzitást. Még egy harmadik mérés is szükséges, a tárgy megtalálási helyén valamilyen pontos és nagy érzékenyséű módszerrel meghatározzák a háttérsugárzás értékét. Az idő a három adatból számítható ki.

Elektrongyorsítók segítségével az izzókatódból (mint az elektroncsöveknél) vagy izzó oxidkerámiából kilépő elektronok kinetikus energiája növelhető meg. Az elmúlt több mint fél évszázad alatt sok, különböző elven működő gyorsító eljárást dolgoztak ki és kialakultak az egyes alkalmazási területek sajátosságainak legjobban megfelelő gyorsítók. A legtöbb gyorsító besorolható a következő két fő típusba. Az első csoportnál, melyhez például a közismert *Van de Graaff*-berendezéseket soroljuk, a gyorsítás nagyfeszültségű tér hatására következik be. A másik csoportba azok a gyorsítók tartoznak, amelyeknél a gyorsítást nagyfrekvenciás elektromágneses hullám végzi. Itt a nagyon gyakori LINAC (*Linear Accelerator*) típusú berendezéseket említjük meg. A gyorsított elektronok energiája széles tartományon belül változhat, általában néhány száz keV-től néhányszor 10 MeV-ig terjed. Az ipari felületkezelési célra használt berendezéseknél a gyorsított elektronok energiáját néhány 100 keV-ra állítják be, míg a kutatási és egyéb sugártechnológiai célokra alkalmazott berendezéseknél az elektronenergia a leggyakrabban 2 és 10 MeV közötti. Az utóbbi tartományban az elektron sebessége a fénysebesség 98–99,9%-a körül mozog, azaz a gyorsítás erős relativisztikus tömegnövekedéssel jár.

Ki kell itt térni arra is, hogy mi a különbség a radionuklidokból származó elektronsugárzás (β -sugárzás) és a gyorsítókból származó elektronsugárzás között. A gyorsítókkal keltett sugárzás lényegében monoenergetikus és az elektronenergia nagysága (eV-ban) például a nagyfeszültséget alkalmazó berendezéseknél az elemi töltés és a voltban kifejezett feszültségkülönbség szorzataként adódik. Ezzel szemben az egyes β -részecskék energiája még akkor sem azonos, ha azok azonos radionuklidból lépnek ki. Az energiaspektrum folytonos: az energia a nuklidra jellemző maximális érték és zérus között változik. Az elektronok behatolási mélységét az anyagban alapvetően az elektronenergia és a közeg sűrűsége határozza meg. Egységnyi sűrűségű anyagnál mintegy 4 mm/MeV behatolási mélységgel lehet számolni.

Magyarországon az 1960–70-es évek fordulójától kezdve nagyszámú elektrongyorsítót helyeztek üzembe és alkalmaztak terápiás, technológiai, ill. kutatási célra. Kezdetben a sugárzás vegyipari alkalmazásai közül világszerte a po-

limerek térhálósításának volt legnagyobb jelentősége. Ezt korán felismerték az akkor fénykorát élő Műanyagipari Kutatóintézetben (MÜKI). Az első, kísérleti célú *Van de Graaff* típusú gyorsítót itt helyezték működésbe az 1960-as évek elején. Az itt végzett laboratóriumi, majd félüzemi méretű kísérletekben szerzett tapasztalatok alapján történt meg a 70-es és a 80-as években a Villamos Szigetelő Művek (VSZM) ipari besugárzó berendezéseinek vásárlása. A hőre zsugorodó polietilén kábelszigetelés előállítására azóta is használt berendezések gyártási technológiája is MÜKI szabadalmon alapul. A folyamat lényege: extrudált polietilén csövet sugárzással térhálósítanak, majd melegen feltágítják és lehűtik. Felhasználáskor, melegítés hatására ismét visszanyeri extrudálási méretét, illetve rásimul a szigetelendő villamos vezetékre. A polimerek sugárzásos térhálósításánál gyakran a feldolgozás közben adagolt kis mennyiségű (1-5%) monomer alkalmazásával érik el a térhálósítási dózis nagymértékű csökkenését.

A 80-as évek közepén lassulni látszott a polimerek sugárzásos térhálósításának ipari terjedése, felfutóban volt a sugárzásos felületkezelés. Ezen a területen kezdtek kutatásokat a MÜKI-ben is, ahol 1988-ban üzembe helyeztek egy felületkezelésre alkalmazható, Elektronfüggöny típusú 175 kV-os (ún. kifestésű) kísérleti elektrongyorsítót. A sugárzásos felületbevonás energia-takarékos és környezetbarát technológia. Lényege: a hagyományos, oldószeres festék helyett oldószermentes bevonóanyagot alkalmaznak, melynek viszkozitását sugárzással térhálósítható monomerrel állítják be a technológia által megkívánt értékre. A festék keményítéséhez így nincs szükség (mint a hagyományos „beégetős” lakkoknál) óriási hely- és energia-igényű kemencékre. A fa, forgácslap, papír, műanyag, vagy fém felületre vékony (néhány ezred mm-től néhány tized mm-ig) rétegben felhordják a bevonatot. A bevont tárgyat nagy sebességgel (a felülettől függően 10 és 800 m/perc között) áthúzzák a sugárnyaláb alatt, eközben a másodperc tört része alatt a bevonat megszilárdul. A gyorsítók energiafelhasználása és helyigénye kisebb, a technológiai sebesség pedig nagyobb, mint a hagyományos eljárásoké. Hátrányuk az alapanyag magas ára.

Intézetünkben 1983-ban helyeztünk üzembe alapvetően kutatási, de technológiai fejlesztési célokra is használható, LINAC típusú 4 MeV-es gyorsítót. A berendezés jellegzetessége, hogy impulzusüzemben működik, azaz rövid időtartamú gyorsított elektronnalábokat állít elő. A pulzusszélesség 80 nanoszekundum és 2,6 mikroszekundum között változtatható. A gyorsítóra alapozva 1985-ben az ENSZ Kulturális Fejlesztési Alapja, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség és a Magyar Tudományos Akadémia támogatásával impulzusradiolízis-mérő laboratóriumot létesítettünk. Az impulzus-radiolízis lényegében a közismertebb villanófény-fotolízishez, illetve a lézerkinetikus spektroszkópiához hasonló kémiai kinetikai kutatási módszer. A mintában rövid idő alatt elnyelt energia hatására keletkező köztitermékeket fényemissziójuk,

fényabszorpciójuk, ill. vezetőképességük alapján figyelik meg. A berendezést főleg gyors kémiai reakciók részleteinek tisztázására, a köztitermékek azonosítására és a reakciók sebességeinek meghatározására használjuk. Példaként szolgálhat a környezetvédelem számára fontos új technológia megalapozásával kapcsolatos vizsgálati irány, melynek részleteit szintén e technika alkalmazásával fedték fel. Egyes ipari szennyvizekben jelentős a fenoltípusú vegyületek koncentrációja. E gyakran toxikus vegyületek biológiai lebomlása rendkívül lassú, sugárzásos szennyvízkezeléssel viszont könnyen eltávolíthatók. Erre lehetőséget ad az, hogy a víz sugárbomlásából nagy hozammal keletkeznek nagy reaktivitású oxidáló vagy redukáló, a fenolokkal készségesen reagáló szabadgyökök. Már egészen kis sugárdózisok alkalmazásával a fenolok gyorsan degradálódó vegyületekké alakíthatók át.

Az impulzus-radiolízis berendezés polimerizációkinetikai vizsgálatokra is alkalmazható. A sugárkémiai technológiákban (pl. a fentiekben említett polimer térhálósítás, illetve felületkezelés) alkalmazott monomerek kinetikai paramétereinek meghatározása, illetve a polimerizáció mechanizmusának tisztázása segítheti a felhasználókat a megfelelő monomer kiválasztásában.

Az előzőekből is kiderül, hogy a sugárzásos módszereket gyakran alkalmazzák a tudományos kutatásban, részeivé váltak egyes ipari és mezőgazdasági technológiáknak, fontos, gyakran életmentő szerepük van a gyógyászatban. Jó érzéssel tölt el bennünket az, hogy e technikák hazai és nemzetközi elterjesztésében az intézetnek jelentős szerepe van.

In vivo orvosi izotópalkalmazás – radioaktív nyomjelzés az élő szervezetben

Aki szerencsés vagy szerencsétlen sorsa révén kapcsolatba kerül az orvostudományi egyetemekkel, megyei kórházakkal, vagy a mintegy húsz budapesti gyógyító intézménnyel, a diagnosztikai részlegek között bolyongva könnyen felfedezheti a radioaktivitás szimbólumát megjelenítő táblákat. Ezeket látva sokan a klasszikus röntgenosztályokra vagy a radiológiai laboratóriumokra gondolnak, azonban nemcsak az ilyen részlegek tartoznak ide, hanem azok az *izotóposztályok* vagy *nukleárismedicina-központok is*, amelyekben nyitott izotópkészítményekkel, radioaktív injekciókkal dolgoznak. Az elmúlt évtizedekben nemcsak világszerte, hanem hazánkban is kialakultak az orvosi izotópalkalmazás „fellegvárai”.

A nukleáris medicina napi gyakorlatában az izotópalkalmazás olyan *radioaktív nyomjelzési módszert* jelent, amelynél a nyomjelzendő rendszer maga az *élő szervezet*, maga az *ember*. A nyomjelzés élettani alkalmazását a 20. század elején *Hevesy György* magyar tudós alapozta meg, akinek munkásságát Nobel-díjjal méltányolta a világ tudományos közvéleménye.

Az izotópalkalmazás során elérendő cél *kettős*: vagy humán diagnózis felállításáról van szó a radioaktív izotópok sugárzásán alapuló képalkotás révén, vagy az ionizáló sugárzás terápiás hatását használjuk fel az emberben kialakult kóros képződmények gyógykezelése érdekében.

Radioaktív nyomjelzés megvalósításakor információt gyűjtünk valamely folyamatról, annak időbeli lefolyásáról. A vizsgálandó rendszerbe, az élő szervezetbe oly módon juttatunk radioaktív anyagot, hogy az ne befolyásolja magát a vizsgálandó folyamatot, amely tehát pontosan úgy megy végbe, mintha végre sem hajtottuk volna a nyomjelzést. A folyamatról az információt a radioaktivitás következtében a rendszerből kikerülő elemi részecskék közvetítik, oly módon, hogy azoknak a betegben mutatott térbeli és időbeli eloszlását regisztrálni tudjuk.

Amennyiben diagnosztikai célú képalkotást kívánunk végrehajtani, akkor számunkra az a kedvező, ha a kibocsátott részecskék *nem nyelődnek el az élő szervezetben*, hanem az emberi testből kijutva minél nagyobb számban jelen-

nek meg a detektorrendszerben, a kamerában. Ennek a célnak legjobban az elektromágneses sugárzás, elsősorban a γ -sugárzás felel meg, származzanak e fotonok akár közvetlenül az atommagból (gamma-kamerás vagy SPECT, *Single Photon Emission Computer Tomograph* általi leképezés), vagy keletkezzenek a magból kilépő pozitronoknak a közvetlen környezetben végbemenő annihilációjából (PET, *Positron Emission Tomograph* által történő leképezés). Az egyre nagyobb jelentőségű és világszerte terjedő PET-leképezéssel részletesen a következő dolgozat foglalkozik.

Az élő szervezetben végbemenő folyamatokról kapott *primer információt* a radioaktivitás térbeli eloszlása és időbeli változása jelenti. A *képalkotás* a radioaktivitás *térbeli* eloszlásának (akár különböző időintervallumokban) történő meghatározásán alapul, és a kapott kép minőségét illetően a *felbontóképesség* számít döntő fizikai paraméternek.

A végbemenő fiziológiai folyamatok sebessége sok esetben összemérhető a vizsgálat időtartamával, így *nemcsak morfológiai*, hanem *dinamikus, funkcionális* információhoz is juthatunk az egyes szervekkel, szövetekkel kapcsolatban. A folyamatok *időbeliségét* ekkor *képsorozat* készítésével követjük nyomon, amelynek során a betegnek és a kamerának mindvégig ugyanabban a pozícióban kell maradnia. Az *időbeliséget* illetően tehát a *primer információt az aktivitásváltozás*, ill. az ezt leíró *görbe jellemző paraméterei* jelentik (pl. az aktivitásmaximumhoz tartozó idő, a növekedés, ill. csökkenés sebessége monoexponenciális vagy biexponenciális görbeillesztés esetén).

A folyamatokról kapható *szekunder információ* viszont már az értékelésre vonatkozik, és magába foglalja

- a *kép megfeleltetését az anatómiai viszonyoknak*, (összehasonlítás az egészséges esetekről kapható képekkel, az ezektől való intenzitáseltérés megállapítása, értelmezése),
- a kapott *időbeli változás megfeleltetését a normál értékeknek*, (összehasonlítás az egészséges egyénektől származó, esetleg más módszerrel megállapítható értékekkel). A primer információra épülő szekunder információ az, ami sorsdöntő lehet a beteg szempontjából, mert pl. igen/nem döntés alapjául szolgál valamely terápiás beavatkozást vagy műtétet illetően.

Radioaktív nyomjelzés

A *radioaktív nyomjelzés* az élő szervezetben végbemenő fiziológiai folyamatokra vonatkozik, ennek megfelelően a nyomjelző anyagokat – az *in vivo* radiógyógyszereket – a vizsgálni kívánt folyamat jellemzőinek figyelembevételével kell kiválasztani. A fiziológiai folyamatok a nyomjelzés szempontjából három csoportba sorolhatók:

I. *Folyadékáramlás* – Ennek vizsgálata során a nyomjelző anyagnak, a radiofarmakonnak a vizsgálat ideje alatt az áramló rendszerben, azaz a vérkeringésben, a liquor-keringésben, vagy a nyirokkeringésben kell maradnia.

II. *Szelektív anyagmegkötődés* – Ebben a folyamatban a nyomjelző anyag, amit általában a vérkeringésbe juttatunk, a vizsgálni kívánt szervekben, szövetekben lokalizálódik. A megkötődés oka lehet kémiai kölcsönhatás, enzim-folyamat, receptor–ligandum kölcsönhatás, vagy immunreakció.

III. *Metabolizmus és kiválasztás* – Az élő szervezetben végbemenő alapvető anyagcsere-folyamatokról van szó, amelyekben a szelektív reakcióba lépő radioaktív nyomjelző anyag először halmozódik a reakció helyén, majd a folyamat végbemenetelével onnan eltávozik, koncentrációja csökken.

Az alábbiakban áttekintjük az élő szervezetben végbemenő, radioaktív nyomjelzéssel tanulmányozható folyamatokat és a nyomjelzésre használt *in vivo* radiológyszerek főbb típusait.

Folyadékáramlás

Az élő szervezetben végbemenő *folyadékáramlás* radioaktív nyomjelzéses vizsgálatánál a célkitűzés kettős: egyrészt a keringés fizikai paramétereinek meghatározása, másrészt a keringési pálya leképezése. Utóbbi esetben a leggyakoribb feladat a keringés gátoltságának kimutatása, de adott esetben válaszra vár a keringésből történő elfolyás tényének, mértékének a kérdése is. Vérkeringés vizsgálata esetén a viszonylag rövid ideig a vérben maradó hidrofíli kismolekulák, mint pl. a ^{99m}Tc -pertechnetát, a ^{99m}Tc -DTPA komplex, továbbá a vérben huzamosabb ideig jelenlévő ^{99m}Tc -humán szerum albumin, az ^{51}Cr -mal vagy ^{99m}Tc -mal jelzett vörösvértestek használatosak. A liquor-keringés vizsgálatára szigorúan izotóniás hidrofíli komplexeket (^{99m}Tc - vagy ^{111}In -DTPA), a nyirokkeringés tanulmányozására ^{99m}Tc jelzett valódi kolloidokat alkalmaznak.

Szelektív anyagmegkötődés

Szelektív anyagmegkötődés az élő szervezetben, ill. a kóros képződményekben (léziókban) szinte bárhol végbemehet.

A szerves csontmátrixon (hidroxipatiton) végbemenő ioncsere és kemisorpció révén kötődik meg a csontban, ill. csontléziókban a ^{99m}Tc -metilén-difoszfónát-komplex. Számos lézióban erősen megnövekszik a hidroxipatit-képződés, és ezeken a helyeken feltűnő mértékben dúsul a radioaktív nyomjelző anyag.

Komplekxkémiai okokból a vesében lévő szabad -SH-csoportot tartalmazó fehérjével történő ligandumcserében halmozódik a ^{99m}Tc -dimerkapto-borostyánkősav komplex, információt adva a vese funkcionális tömegére nézve.

Enzimfolyamatok révén nyújt leképezési lehetőséget a szívizomról a ^{201}Tl kation (Na/K-ATP-áz enzim, aktív transzport), a pajzsmirigyről a radiojód (^{123}I vagy ^{131}I , peroxidáz-enzim), a sejtek cukorfelvételéről a ^{18}F -dezoifluoroglükóz (hexokináz enzim).

A receptoraffin peptidek és az immunreakcióra hajlamos monoklonális vagy poliklonális antitestek elsősorban ^{111}In , ^{123}I és néhány esetben $^{99\text{m}}\text{Tc}$ jelzett formában alkalmazhatók.

Metabolizmus és kiválasztás

A metabolikus anyagforgalom nyomjelzése, a folyamat kvantitatív kiértékelésének lehetősége jelenti az igazi kihívást az izotópdiagnosztika számára. A sejtek oxigén-, cukor-, zsírsav- és aminosav-forgalma képalkotó eljárásban elsősorban pozitron-emitterekkel (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O és ^{18}F) és PET-leképezés révén határozható meg, néhány esetben alkalmazható csak a gamma-sugárzó ^{123}I radioizotóp a szubsztrátok jelzésére. Kiemelt jelentőségű a metabolizmus vizsgálata a tumorok esetében, mert az anyagforgalom összefüggésben áll azazal, hogy a tumor jó- vagy rosszindulatú-e.

A kiválasztást illetően a máj és a vese kiválasztó funkciója, annak dinamikája áll az érdeklődés homlokterében. A máj kiválasztását a bilirubin-analóg $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -N-fenil-karbamoilmetil-iminodiacetsav típusú vegyületekkel vizsgálhatják, míg a vese tubuláris szekrécióját a para-amino-hippuránnal analóg vegyületekkel tanulmányozhatják. Ezek közül a legrégebbi származék a ^{131}I -orto-jód-hippurát, újabbak a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -merkaptacetil-triglicin és $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -etiléndicisztein. E vegyületek alkalmasak a vesén átáramló effektív vérplazmamennyiség kvantitatív meghatározására is. A vese glomeruláris filtrációs sebességének mérésére hidrofíl, vérplazmához nem kötődő molekulák, a ^{51}Cr -EDTA és a $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -DTPA komplexek alkalmasak.

Radionuklid terápia

A radionuklid terápia ugyanúgy a nyomjelzés gondolköréhez tartozik, mint a képalkotó izotópdiagnosztika. A terápiás felhasználású radiogyógyszerek – hasonlóan a radioaktív diagnosztikumokhoz – olyan kis kémiai koncentrációban kerülnek be a szervezetbe, hogy jelenlétük a koncentrációviszonyokat illetően elhanyagolható. E készítmények fajlagos aktivitása azonban olyan nagy, hogy a léziókra vonatkoztatott, a kezeléshez szükséges dózist, azaz energiát képesek átadni.

A radionuklid terápia módszere a sugárzás és az élő sejtek, szövetek kölcsönhatásán, a β -sugárzásból származó elektronok, vagy a konverziós, ill. Auger-elektronok, továbbá esetleg az α -részecskék elnyelődésekor történő

energiaátadáson alapul. A terápiás hatás az elnyelt dózissal arányos, aminek mértékegysége a Gy (gray). Az elnyelt dózis függ az egységnyi tömegű kóros szövet aktivitásfelvételétől (aminek mértékegysége a MBq/g, „megabeke-rel/gramm”), a radionuklid által kibocsátott sugárzás energiájától (MeV) és az effektív felezési időtől (nap), ami a fizikai és biológiai felezési időből tevődik össze. A nagy fajlagos aktivitás mellett fontos továbbá a nagymértékű és szelektív koncentráció, valamint a hosszú tartózkodási idő a kóros szövetekben.

Elméletileg nincs szelektívebb kezelés a radionuklid terápiánál, mert ha a radiofarmakon tényleg csak a daganatokban és a krónikus gyulladásokban dúsul, a sugárzás energiája a szervezetnek csak ebben a térelemében nyelődik el. A gyakorlatban ez a szelektivitás nem valósul meg maradéktalanul, a jól megválasztott radionuklid terápiás kezelés kockázata mégsem nagyobb más kezelési módszerekénél, és az eredményességet illetően sem marad el azoktól.

Az emberi szervezet sugárzástűrő képességét figyelembe véve a radionuklid terápia akkor hatásos, ha a kezelendő képződmény által elnyelt dózis (a képződmény jellegétől, életfolyamataitól függően) 10–250 Gy tartományba esik.

A terápiás radiógyógyszerek hatásmechanizmusukat tekintve lehetnek sejten belül, sejtfelületen vagy az extracelluláris térben megkötődő típusok. A sejten belül, sőt magához a sejtmaghoz kötődő radiógyógyszerek a terápiás kezelés „magasiskoláját” jelentenék, és nem véletlen, hogy ilyen irányú kutatás világszerte folyik, felhasználva a biotechnológia eredményeit. A génszélesztés és a radionuklid terápia összekapcsolása eredményezheti a „molekuláris sebészetet”, amely mint fogalom már megjelent a szakirodalomban („*molecular surgery*”). Az ilyen kezelés során használandó radiógyógyszerek hatóanyaga: jelzett ellenanyag, peptid, receptorspecifikus vagy bármely más biospecifikus kölcsönhatás révén kötődő molekula, amelyeket összefoglaló néven radio-biokonjugátumoknak neveznek, és a *radio-immuno-terápia* fogalmába az *összes radio-biokonjugátummal végzett kezelést* beleértik.

A jelenlegi klinikai rutin azonban még messze esik az említett csúcstechnológiától. Igazán nagyszámú kezelés a hipertireózis és a pajzsmirigyrák radiojód (^{131}I) terápiáját tekintve adódik. Nem véletlenül fejlődik ez a terület: kiemelkedően nagy a *teljesen meggyógyult* betegek aránya. Emellett egyre inkább terjed a különböző tumorok csontáttéteinek *fájdalomcsillapító* kezelése ^{89}Sr -kloriddal, ^{90}Y - és ^{153}Sm -EDTMP, továbbá ^{186}Re -hidroxi-etilidén-foszfónát komplexekkel. A közvetlenül a tumorba injektált ^{32}P -króm-foszfát kolloid enyhülést jelent a beteg számára, mert a belső, lágy tumorok folyadéktermelő képességét és ezáltal a fájdalmat jelentősen csökkenti. A terápiás radiógyógyszerek külön csoportját képezik az ízületi gyulladások kezelésére alkalmas kolloidok, finom diszperz rendszerek, a ^{90}Y -szilikát, ^{186}Re -kénkolloid, ^{169}Er -citrát.

A hazánkban működő mintegy 45 nukleárismedicina-laboratóriumban évente *néhány százezer* betegen végeznek *in vivo* izotópdiaosztikai vizsgálatot, amelyhez elsősorban a ^{99m}Tc radionukliddal jelzett készítményeket használják. Ma még lényegesen kisebb a radionuklid terápiában részesülő betegek száma, legtöbbjük – évi *néhány ezer* beteg – esetében ^{131}I radiojóddal történő pajzsmirigykezelést végeznek. Fájdalomcsillapító csontterápiát mintegy *100 betegen* hajtanak végre évente, míg ízületi gyulladás kezelésére kb. *50 beteg* esetében kerül sor. Egyéb radionuklid terápiás kezelésben évi néhány-szor tíz beteg részesül.

Mindezekből látható, hogy az *in vivo* orvosi izotópalkalmazás, a radioaktív nyomjelzés az élő szervezetben fejlődőképes klinikai rutint nyújt az egészségügy számára, ugyanakkor olyan tudományágot képvisel, amely lehetővé teszi az *in vivo* körülmények közötti molekuláris történések képi megjelenítését, ill. a kezelés mechanizmusának jobb megértését.

TRÓN LAJOS-EMRI MIKLÓS-MIKECZ PÁL-
BALKAY LÁSZLÓ-
GALUSKA LÁSZLÓ-ÉSIK OLGA-MÁRIÁN TERÉZ

Pozitronemissziós tomográfia

A nyomjelzéses technikán alapuló pozitronemissziós tomográfia (PET) egyike a legmodernebb képalkotó eljárásoknak. Az ilyen eljárások nagy része a tanulmányozott rendszerek szerkezetéről ad felvilágosítást, úgy, hogy a strukturális elemek egy-egy tulajdonságát két- vagy háromdimenziós, képszerű formában jeleníti meg. A röntgentechnikával (beleértve a konvencionális átvilágító és a modernebb, rétegvizsgáló, ún. komputertomográfias - CT - eljárást) a rendszer különböző részeinek a röntgensugárzást elnyelő képessége tanulmányozható. Az ultrahangos vizsgálómódszerrel olyan szomszédos szerkezeti elemek különíthetők el egymástól, amelyekben más az ultrahang terjedési sebessége. A mágneses rezonanciás tomográfia (MRI) egyes atommagok mágneses sajátosságainak észlelésével lehetőséget nyújt az ilyen atommagok koncentrációjának meghatározására, valamint azok környezetének sok szempont szerinti tanulmányozására. Ez utóbbi módszerekkel tehát a vizsgált rendszereknek elsősorban a szerkezeti felépítése analizálható, függetlenül attól, hogy a vizsgálat tárgya élettelen tárgy-e vagy egy olyan élő rendszer, amelyben életjelenségek, ill. különböző anyagcsere-folyamatok játszódnak le.

A képalkotó módszerek egy másik csoportja lehetőséget kínál arra is, hogy segítségükkel az élő rendszerekben lejátszódó biokémiai folyamatokról is információt lehessen szerezni. Ilyen, funkcionális vizsgálómódszerek a nukleáris medicina hagyományos eljárásai (szcintillációs gammakamera, *single photon emission computed tomography*: SPECT és a PET-technika), de a mágneses rezonanciás módszer bizonyos, a szokványosnál összetettebb instrumentációt igénylő változatai is ide sorolhatók. Az élő rendszerek működéséről is képet adó, funkcionális vizsgálómódszerek alkalmazása során leggyakrabban intravénás injekcióval vagy, ritkábban, belélegeztetéssel olyan radioaktív izotóppal jelzett molekulákat juttatnak a tanulmányozott rendszerbe, amelyek meghatározott biokémiai folyamatokban vesznek részt. Mivel e molekulákat az emberi szervezetbe kell bejuttatni, a gammakamerás és a PET-vizsgálatok során felhasznált készítmények radiogyógyszernek (radiofarmakon) minősülnek. A szervezetbe bejuttatott radiofarmakon-molekulák a

transzportfolyamatok segítségével eljutnak a szervezet különböző régióiba, ahol az ott lejátszódó enzimreakciók szubsztrátjaként szolgálhatnak, aminek eredményeképpen az enzim specificitásától függő terméké alakulhatnak át. E molekulák részt vehetnek olyan, a sejtmembránon át lejátszódó transzportfolyamatokban is, amelyek jól meghatározott tulajdonságú molekuláknak a sejtekbe való szelektív felvételét biztosítják, de hozzákötődhetnek olyan sejt-felszíni struktúrákhoz (receptorokhoz) is, amelyek központi szerepet játszanak a sejt anyagcseréjének szabályozásában. Az enzimreakciókban képződő termékmolekulák mennyisége közvetlenül függ az enzimmolekulák lokális koncentrációjától. A sejtek által felvett molekulák mennyiségét a membránon át lejátszódó transzport befolyásolja, a receptorokhoz kötött molekulák száma pedig receptorszámfüggő. A felsorolt jellemzők mindegyike (az enzimmolekulák száma és azok aktivitása, a sejtmembránon át lejátszódó transzport intenzitása, a receptormolekulák sejtenkénti darabszáma), valamint azok szöveti-regionális eloszlása is módosulhat, ha változik az egész szervezet funkcionális állapota, ezért e mennyiségek pillanatnyi értékéből az egész rendszer funkcionális állapotára lehet következtetni.

A radioaktív izotópokkal megjelölt farmakonmolekulák (radiofarmakonok) térbeli eloszlása meghatározható, ha a radioaktív bomlásokból származó részecskéket alkalmas érzékelőkkel detektáljuk. A PET-módszer alkalmazása során a radioaktív jelölés pozitronbomló izotópokkal történik. Az atommag bomlásából származó pozitron a testszövetekben 1-2 mm távolság befutása alatt lefékeződik és „annihilációs” kölcsönhatásba lép egy elektronnal. Ennek során „eltűnik” a kölcsönhatás két „bemenő” részecskéje, a pozitron-elektron pár, és helyettük két gamma-foton jelenik meg, amelyek a kölcsönhatás helyét egy egyenes mentén, egymással ellenkező irányban hagyják el (ez a hely a pozitronok fékeződéséről mondottak szerint 1-2 mm-es pontossággal azonos a radiofarmakon-molekula helyével). Ha a gamma-fotonokat kisméretű érzékelőkből álló detektorrendszerrel észleljük, az egyidőben „megszóló” detektorok helyzete kijelöli ezt az egyenest. Az egyenesek, azaz az egyidőben megszóló detektorok adatait számítógép memóriájában tárolva rekonstrukciós szoftverekkel előállítható a radiofarmakon-molekulák térbeli (háromdimenziós) eloszlása.

Jelölési célra leggyakrabban négy könnyű, pozitronbomló izotópot használnak a PET-technikában, amelyek felezési ideje perces nagyságrendű: ^{11}C (20 perc), ^{13}N (10 perc), ^{15}O (2 perc) és ^{18}F (110 perc). Az első három izotóp „biológiai” izotóp, az élő szövetekben igen nagy mennyiségben előforduló elemek izotópjá, ezért viszonylag könnyen beépíthető sok olyan molekulába, amelyek biológiai jelentősége van. Ugyanezt nem lehet közvetlenül elmondani a ^{18}F izotópról, de a fluor bizonyos szempontból hidrogén-analógnak tekinthető.

A PET-program beindításához sok feltétel szükséges, amelyek nagy hányada instrumentális, ill. hardverjellegű, de legalább ilyen fontossága van a kü-

lönböző előképzettséggel rendelkező szakemberek ismereteinek és tapasztalatainak is. A PET-kamera, valamint az ahhoz csatlakozó számítástechnikai hardver és szoftver mellett az infrastrukturális feltételek közé tartozik a pozitronbomló izotópok előállítására alkalmas gyorsító (ciklotron) és egy jól felszerelt radiokémiai laboratórium. A magyar PET-program indításához a debreceni adottságok az 1990-es években nagyon kedvezőek voltak, hiszen az MTA Atommagkutató Intézetében ekkor már több évtizedes magfizikai tapasztalat állt rendelkezésre, és itt üzemelt az ország egyetlen, PET-izotópok előállítására alkalmas gyorsítója. A ciklotronépületben radiokémiai laboratórium is működött, és kialakították a PET-vizsgálatok kivitelezéséhez szükséges helyiségeket is. E meglévő adottságoknak a program 1994. évi indításában meghatározó szerepe volt, de emellett több szakterület (magfizika, nukleáris technika, kémia, radiokémia, elektronika, számítástechnika, programozás és orvostudomány) profiljába vágó számos feladatot is meg kellett oldani úgy, hogy induláskor az ahhoz szükséges szaktudás az országon belül nem vagy alig állt rendelkezésre.

A PET-radiofarmakonok előállítása során több speciális követelményt kell kielégíteni, és ezért ezt a tevékenységet a radioaktív nyomjelző módszerek egy külön csoportjaként lehet tekinteni. Az egyedi sajátosságok közül itt csak a humán (általában intravénás) alkalmazást és a jelölésre felhasznált radioaktív izotópok rövid felezési idejét említjük meg. A magyar törvényi szabályozás szerint a radioaktív izotópokkal jelölt diagnosztikai készítmények a gyógyszerekkel azonos elbírálás alá esnek, ezért alkalmazásuknak feltétele a gyógyszerkönyvbe való regisztráció. A diagnosztikum humán felhasználását az Országos Gyógyszerészeti Intézet a gyógyszerkönyvi bejegyzést követően is szigorú feltételekhez köti, aminek lényeges elemei a „*good manufacturing practice*” (a gyógyszergyártás minőségi előírásait tartalmazó nemzetközi szabályozórendszer) előírásainak megfelelő gyártás és a jól dokumentált, állandó minőségellenőrzés. Preparált sarzsónként vagy (a vizsgálat időigényének, valamint a jelölő izotóp felezési idejének viszonyától függően) gyártási műszakonként kell ellenőrizni, egyebek mellett, a kémiai és radiokémiai tisztaságot, a sterilitást és az airogenitást. A rendkívül szigorú minőségi előírások miatt igen nagy a jelentősége a reprodukálhatóságnak, a rövid (2 és 110 perc közötti) felezési idő pedig a radiokémiai manipulációk igen gyors és effektív kivitelezését teszi szükségessé. Mindkét szempont erős érv az egész radiokémiai protokoll automatizálása mellett, és ezért természetesnek tűnik, hogy a rutinszerűen alkalmazott radiofarmakonok előállítását minden PET-központban számítógépes vezérléssel végzik.

A PET-vizsgálatokban leggyakrabban a ^{18}F -izotóppal jelölt fluoro-dezoxiglükózt (FDG) használják. Ez a molekula nagyon sok szempontból ugyanúgy viselkedik, mint a glükóz, a szervezet egyik legfontosabb energiaforrása. A sejtek glükózfelvétele a sejtmembránba ágyazott specifikus transzporter-

fehérjék segítségével történik, és ezek a membránfehérjék az FDG-molekulákat is szállítják. A két ligandum egymással kompetál, összhangban azzal, hogy azonos kötőhelyekért versengenek. Az elmondottakból következik, hogy a nagyobb glükózigényű sejtek FDG-ből is nagyobb mennyiséget vesznek fel. Az intracelluláris térbe bejutott FDG-t a citoplazmában található hexokináz-enzim a glükózhoz hasonló módon foszforilálja, de a további glikolitikus enzimek az FDG-6P foszforilált terméket már nem fogadják el szubsztrátként. Az FDG-6P a sejt belsejében akkumulálódik, mert defoszforilálása általában elhanyagolható sebességgel történik, és az erősen poláros jellegű molekula a sejtmembrán lipidrétegén nem képes áthaladni. A felhalmozódás mértéke a sejt energia(glükóz-)igényének fokozódásával együtt nő, így a szöveti FDG-eloszlási „térkép” a szénhidrát-anyagcsere intenzitásának regionális mintázatát mutatja. FDG-PET-vizsgálatokat leggyakrabban tumordiagnosztikai céllal végeznek, hiszen a daganatos sejtek energiaigénye az esetek többségében meghaladja a normál sejtekét a gyakori osztódás miatt. Fontos megjegyezni, hogy a fokozott FDG-halmozás nem csalhatatlan jele a tumoros burjánzásnak, a kontrollnál nagyobb mértékű FDG-akkumuláció csupán azt jelzi, hogy a megfelelő szöveti régióban nagyon intenzív a szénhidrát-anyagcsere. Ezt a tényt a klinikusnak az egyéb vizsgálatok eredményei ismeretében kell interpretálni. Ismeretes az is, hogy nem minden tumoros folyamat velejárója a fokozott FDG-akkumuláció. A kis malignitású vagy „*low-grade*” tumorokban a cukorfelhasználás a normál szövetekével azonos mértékű is lehet, sőt olyan esetek is előfordulnak, amikor a tumoros régiók hipometabolikus területként jelennek meg az FDG-PET-képeken. Az FDG tehát semmiképpen nem „*tumor-tracer*”, csupán azt jelzi, hogy a vizsgált szöveteknek mennyire intenzív a szénhidrát-anyagcseréje (a fokozott metabolikus aktivitást kiválthatja pl. gyulladás vagy hegesedési folyamat is).

Az FDG-PET-módszer neurológiai felhasználásai közül mindenképpen meg kell említeni az epileptogén fókusz lokalizálása céljából végzett vizsgálatokat. Az epilepsziás kórképek hátterében az agyi idegsejtek gátlászavara van, amit megfelelő gyógyszeres terápia segítségével általában kontrollálni lehet úgy, hogy epilepsziás rohamok vagy egyáltalán nem vagy csak nagyon ritkán következnek be. Az esetek 20-25%-át kitevő gyógyszerrezisztens kórképekben a megoldás a műtéti beavatkozás, ha be lehet határolni azt az agyi régiót (epileptogén fókusz), ahonnan az epilepsziás működészavar kiindul. Ha ezek a területek jól körülhatárolhatók és nem foglalnak magukban életfontosságú funkcionális központokat, továbbá a sebész számára elérhetőek, akkor eltávolíthatók, és ez a betegség végleges gyógyítását jelenti. Az epileptogén fókusz általában elektrofiziológias módszerrel próbálják lokalizálni, de ez a technika nem mindig vezet eredményre. Ilyenkor az FDG-PET-vizsgálat jelenti az egyetlen lehetőséget a műtéttel megoldható esetek kiválasztására. A keresett régiók az agyi FDG-PET-vizsgálatokban hipometabolikus területek formájá-

ban rajzolódnak ki, amelyek az FDG-t a normális működésű szöveteknél kisebb mértékben halmozzák.

Az FDG-PET-módszer további neurológiai alkalmazásai között meg kell említeni az agyi glukózanyagcsere csökkenésével járó, fiatalkori demencia-típusok elkülönítését. A differenciál-diagnosztika alapja az, hogy a különböző kórképekhez (Alzheimer-kór, Parkinson-kór, multiinfarktusos demenciák stb.) tartozó csökkent metabolikus aktivitású területek az agynak más-más régióiban jelentkeznek, és az FDG-eloszlások jellemző mintázatai egymástól biztonsággal megkülönböztethetők.

Alacsony grádusú tumorszövet azonosítása céljából lehet alkalmazni a ^{11}C -izotóppal jelölt metionint. Ez a radiofarmakon kóros dúsulást mutat sok olyan tumoros szövetben, amelyek FDG-vizsgálata nem ad értékelhető eredményt. Ez azzal kapcsolatos, hogy a tumoros szövetek fehérjeszintézisének intenzitása az esetek igen nagy hányadában szignifikáns módon meghaladja a normál szövetek fehérjeszintézisét, míg az FDG-akkumulációról sok tumoros kórfolyamat esetén nem mondható el ugyanez. Természetes, hogy intenzív fehérje- vagy peptidszintézist végző szövetekben (pl. mirigyek) a jelölt metionint nem lehet daganat-lokalizálásra használni.

A szövetek vérellátásának (a szöveti perfúciónak) tanulmányozására olyan kisméretű molekulák alkalmasak, amelyek az erekből könnyen kilépnek az érfallakon át, és a szövetekben viszonylag szabadon diffundálnak, így az erek közvetlen közelében nagyon rövid idő alatt egyenletesen eloszlának. Erre a célra ^{15}O -izotóppal jelölt butanol- vagy vízmolekulákat használnak széleskörűen.

A szöveti sejtek felszínén található specifikus receptorok mennyisége több kórképben megváltozhat. Ilyen esetekben a receptorszám megváltozásának észlelése hatékonyan támogatja a diagnosztikát. Karcionid tumor metasztatikus kimutatására használják a szerotonin receptorvizsgálatokat, az epileptogén fókuszok azonosítását segíti a benzodiazepin receptorok „feltérképezése”, neurodegeneratív folyamatok diagnosztizálásához pedig a különböző neuroreceptorok vizsgálata jelent segítséget. A PET-módszert nagy érzékenysége teszi alkalmassá a receptorstátusz tanulmányozására, hiszen a sejtfelszíni receptorok koncentrációja gyakran a nmol koncentráció-tartományba esik.

Speciális alkalmazási területet jelentenek az agyaktivációs vizsgálatok, amelyekkel azt lehet tanulmányozni, hogy meghatározott mentális vagy egyéb agyi tevékenységekben az agynak mely területei vesznek részt. Az ilyen funkciókban szerepet játszó régiók sejtjei a nyugalmi állapothoz képest gyakrabban kerülnek ingerületi állapotba. A fokozott működéshez nagyobb mértékű energiafelhasználás társul, ennek megfelelően ezek az agyi területek nagyobb mértékben halmozzák az FDG-t. Méréstechnikai okok miatt az ilyen vizsgálatokat nem FDG-radiofarmakkal, hanem valamelyik perfúziós tracerrel szokták kivitelezni. Erre az ad módot, hogy a perfúziós és a glukózanyag-

csere-mintázatok között általában szoros korreláció van, hiszen a fokozott glükózfelhasználást fokozott perfúzió biztosítja.

Az alkalmazások igen tág köre még a lehetőségét is kizárja, hogy megpróbáljuk azokat röviden felsorolni. A módszert egyaránt hatékonyan alkalmazzák az alap- és alkalmazott kutatásokban. Kiemelkedő a jelentősége a gyógyszerkutatásban és gyógyszerfejlesztésben (gyógyszerek specifikus kötődése, szöveti dúsulása, a dúsulás kinetikája, a hatóanyagot lebontó folyamatok tanulmányozhatók), hiszen a PET-módszer segítségével egy gyógyszerkészítmény kifejlesztésének ideje évekkel lerövidíthető.

A többi képalkotó eljárással összehasonlítva a PET-módszer előnyös sajátosságai között elsősorban a fentebb már taglalt „funkcionális” leképezést és a nagy érzékenységet kell megemlíteni, valamint azt a szinte kimeríthetetlen lehetőséget, hogy újabb jelzett molekulákkal egyre több biokémiai folyamatról lehet más módszerrel nem pótolható információt szerezni. További egyedi vonása a PET-technikának, hogy a vizsgálatok eredményei kvantitálhatók. A számszerűsített eredmények miatt a vizsgálatokat más időben vagy más PET-központban végzett vizsgálatok eredményeivel közvetlenül össze lehet vetni. Erre természetesen nincs mód, ha a vizsgálatok eredményei csupán „van, nincs, kicsi, nagy, erős, gyenge stb.” kvalitatív megállapításokkal fejezhető ki. A módszer felbontóképessége (5 mm) gyengébb, mint az „anatómiai” (CT és a mágneses rezonanciás tomográfiás) vizsgálatok 1 mm körüli felbontóképessége, és az sem előnyös, hogy a PET-felvételeken alig látszanak anatómiai részletek. E két hiányosságon segít az ún. fúziós technika, amelynek segítségével a PET és az anatómiai képalkotó módszerek felvételei egymásra vetítve, egyetlen képen jeleníthetők meg. Így ugyanazon a képen lehet nagy érzékenységgel megjeleníteni a funkcionális jellegzetességeket és a jó felbontású anatómiai részleteket.

A PET-technika mintegy két évtizeden át szinte kizárólag kutatási célokat szolgált, de a legutóbbi tizenöt évben egyre inkább bevonult a klinikumba is, és ma a fejlett egészségügyi ellátással rendelkező országokban már szerves része a rutindiagnosztikának. A módszer alkalmazási gyakorisága természetesen elmarad a CT- és az MRI-vizsgálatok gyakorisága mögött, de a reális igények kielégítéséhez általában 1,5–2 millió lakosonként működtetnek egy PET-kamerát. Ma Magyarországon egyetlen kamera üzemel (az évi vizsgálat-szám kb. 1100), így ezt az arányt nem érjük el, de a közeljövő instrumentális fejlesztéseivel minden bizonnyal közelíteni fogjuk.

Anyagvizsgálatok neutronokkal

A neutronok mint elektromosan semleges mikrorezscecskék különleges helyet foglalnak el a nukleáris anyagvizsgáló módszerek között. Nagy behatoló-képességük, hullámtulajdonságaik, sőt mágneses nyomatékuk révén ideális mikroszondák. Szóródásuk megfigyelésével az anyag fizikai és kémiai szerkezete, az elnyelődésükkor fellépő radioaktív sugárzás mérésével pedig kémiai elem-összetétele határozható meg. Az alábbiakban részletesebben áttekintjük ezeket a módszereket, különös tekintettel az új évezred perspektíváira.

Szórásvizsgálatok lassú neutronok segítségével

A jövő században – legalábbis annak belátható részére vonatkoztathatóan – a tudomány fejlődési irányát az anyag szerkezetének olyan részletekbe menő megismerése képezi, amely ismeretek felhalmozása a fenntartható fejlődés biztosítása szempontjából elengedhetetlen. A fenntartható fejlődés megköveteli az energia, a nyersanyagok takarékos, biztonságos, környezetkímélő felhasználását, ami elképzelhetetlen az ezen feltételeknek eleget tevő technológiák alkalmazása nélkül. Ilyen technológiai irányzat a miniatürizálás, az adott termék minimális veszteséggel történő előállítása, a megbízhatóság az élettartam megnövelése mellett. A gazdaságossági szempontokon kívül alapvető cél az emberi élet minőségének javítása, az egészség megőrzése, ami új és hatékony gyógyászati eljárások kidolgozását és új, hatékony gyógyszerek előállítását igényli.

A fentiekben megfogalmazott kihívásoknak megfelelni csak sokoldalú és nem konvencionális eszköztárral lehetséges. A lassú neutronokkal végzett szórásvizsgálat egyike a sokat ígérő és egyedi anyagvizsgáló módszereknek. Maga a módszer korántsem új, de jelenleg kifejlesztett változatai, valamint a mérési eszköztár következő években várható fejlődése új távlatokat nyit a módszer kiterjedt alkalmazása előtt.

Melyek is a neutronok azon a tulajdonságai, amelyekre várakozásainkat alapozhatjuk? A neutron elektromosan semleges, mágneses momentummal rendelkező elemi részecske, amelynek nyugalmi tömege közelítőleg a proton tömegével azonos. A maghasadás során keletkezett gyors neutronok a neutronforrást körülvevő közegben (moderátorban) elszenvedett ütközések következtében a másodperc néhány milliomod része alatt lelassulnak, és átlagos kinetikus energiájuk a moderátor hőmérsékletének fog megfelelni. A neutron mikrorészecske, azaz mozgását a kvantummechanika szabályai írják le, amely elmélet szerint a neutron duális tulajdonságokkal bír, azaz a részecske tulajdonságok mellett hullámsajátságai is vannak. A lassú neutronok hullámhossza összemérhető a kondenzált közegeket alkotó atomok átlagos távolságával.

Mivel a neutron-elektron kölcsönhatás gyakorlatilag elhanyagolható, a neutronok alapvetően az atommagokkal lépnek reakcióba. Ez a kölcsönhatás izotópfüggő, azaz az adott kémiai elem különböző izotópjai esetében más és más. Ez a tulajdonság lehetővé teszi azonos kémiai tulajdonságú, de a neutronszórásban eltérő módon viselkedő vegyületek előállítását, azaz meg tudunk jelölni egyes atomokat vagy atomcsoportokat, így ezek viselkedése külön tanulmányozható. Figyelemreméltó, hogy a könnyű elemekből álló anyagok éppoly jól tanulmányozhatók neutronszórással, mint a nagy tömegszámú atommagokat tartalmazóak. (Különösen szerencsés körülmény, hogy a hidrogén és annak nehéz izotópjá, a deutérium kölcsönhatása a neutronnal jelentősen különbözik egymástól. Tekintettel arra, hogy a hidrogén alapvető összetevője a szerves – és ezen belül a biológiai – molekuláknak, az izotóp-összetételükben különböző, de kémiai tulajdonságaik szempontjából változatlan anyagok új perspektívából, és ezáltal mélyebb részleteikben tanulmányozhatók).

Ha eltekintünk a némely esetben kellemetlen, neutronelnyeléssel járó magreakcióktól, a vizsgálandó anyagmintára eső neutronok az anyagot alkotó atomok magjain szóródnak. Így a szórt neutronok állapotából (ismerve azok kiinduló állapotát) következtethetünk a vizsgált közeg atomi léptékű szerkezetére és az atomok, illetve atomcsoportok mozgására.

Ha a neutron kinetikus energiája nem változik a szórási folyamat során, rugalmas kölcsönhatásról beszélünk. Ha a különböző szórócentrumokon (atommagokon) szóródott neutronhullámok interferenciaképet alkotnak, a szórás koherens, és a szórt neutronok eloszlásfüggvényéből a tanulmányozott objektum atomi szerkezetéről kapunk információt. A kristályos anyagokon végzett neutrondiffrakció az atomi szerkezet meghatározására alkalmazható. A neutron (semleges részecske lévén) könnyedén áthatol az atommagokat elválasztó elektronfelhő sűrűjén, így a mintába – más sugárzásokhoz mérten – szokatlanul nagy mélységben (akár centiméterekre is) képes behatolni.

A ma már kifinomult mérési eljárásoknak köszönhetően a neutrondiffrakció egyaránt hatásos szerkezetkutatóeszköz a bonyolult elemi cellával rendelkező, egzotikus – többek között biológiai molekulák, magashőmérsékleti

szupravezető anyagok alkotta – kristályoknak, és a nagypontosságú rácsparaméter mélységeloszlásának meghatározásával a maradék mechanikai belső feszültség (gyakorlati életben rendkívüli fontosságú) meghatározásának. A nagy terhelésnek kitett alkatrészekben (például turbinalapátokban), illetve hegesztett alkotóelemekben a hegesztési varratokban kialakult feszültség mértéke alapján megállapítható az adott alkatrész várható élettartama, amivel akár 30-40%-nyi megtakarítás érhető el. A nukláris erőművek tartályának sugárállóságát – így várható élettartamát – szintúgy a neutrondiffrakció segítségével állapíthatjuk meg a legnagyobb előrejelzési biztonsággal. Nem nélkülözheti a neutrondiffrakció hatékonyságát a geofizika sem. A kőzetek textúrájából a tektonikus hatások millió évekkkel ezelőtti irányát és mértékét kapjuk meg, miáltal a lemeztektonika pontosabb megismeréséhez jutunk. Folyadékokon végzett neutrondiffrakció főként az oldatokban kialakult molekulaelrendeződésről szolgáltat információt.

Környezetünkben a legerjedtebb és legfontosabb oldószer a víz. A víz molekulájának egyszerű kémiai összetétele ellenére a víz mint közeg hihetetlenül bonyolult szerkezetű, amely szerkezet már kis mennyiségű oldott molekula jelenlétében drasztikus módon megváltozik. Ez az oka annak, hogy a víz az eddigi alapos tudományos erőfeszítések ellenére sem adta ki sokarcúságának „titkát”, pedig e titok megfejtése a kulcs számtalan fontos biológiai (és tegyük hozzá, kémiai) jelenség megértéséhez. A proton–deutérium izotópcseré teszi jelentőssé a neutronszórás hozzájárulását eme elegendően nem hangsúlyozható fontossággal bíró probléma megoldásához.

A neutron mágneses momentumának köszönhetően a mágneses anyagok mikroszerkezete tanulmányozásának egyedülálló eszköze a neutronszórás. Azaz a neutron nanométer méretű mágneses szondaként használható. Neutronszórás nélkül aligha ismerhettük volna fel az antiferromágnesség mikroszerkezeti eredetét. A mágneses (és gyakorta a nem mágneses) anyagok vizsgálata megkívánja, hogy a neutronok mágneses momentuma azonos irányba essék. Az ilyen neutronok áramát nevezzük polarizált neutronnyalábnak. A polarizált neutronnyaláb előállításának eszközei is a modern csúcstechnológia vívmányai között tartandók már számon. A polarizált neutronok révén ismerhetünk meg számos alapvető fizikai jelenséget, mint például az egy- és kétdimenziós mágneses szerkezeteket, a szupravezetés és a mágnesség kapcsolatát az új, erős permanens mágnesek belső szerkezetét. E tanulmányok alapján pedig újabb, jobb minőségű mágnesek, a magnetostrikció vagy a mágneses ellenállás elvén alapuló eszközök készíthetők. A ma használatos számítástechnikai eszközök mágneses alkatrészei anyagának szerkezetét szinte kizárólag a mágneses neutronszórásnak köszönhetően ismerhettük meg. A mágneses vékonyréteg-szerkezetek jobb megismerése tette lehetővé, hogy a számítógépekben az információátvitel sűrűsége az elmúlt 10 év alatt több ezerszeresére nőhetett.

Ha a vizsgálandó objektum nem atomok, hanem a neutron hullámhosszát egy-két nagyságrenddel meghaladó méretű ún. nanorészecskék halmaza, akkor a szórás kép kis szögterületre koncentrálódik. A kis szórési szögek tartományában végzett vizsgálatok a nanorészecskék méreteiről, felületük domborzati képéről és térbeli eloszlásukról tájékoztatnak. Megjegyzendő, hogy a nanorészecskék mérettartománya kívül esik a szokásos fénymikroszkópok látókörén, csak az elektronmikroszkópot lehet hasonló mérettartományba eső objektumok vizsgálatára alkalmazni. A kisszögű neutronszórás, a nagy mélységbe való behatoló képességnek hála, hatékonyan használható a nanoszerkezetek roncsolásmentes tanulmányozására. A kis szögterület miatt azt hihetnénk, hogy csökken a szórás kép által tartalmazott információ. Az izotóphelyettesítés módszerének köszönhetően azonban a mért szórás kép információ tartalma nagymértékben feldúsítható. A módszer iránti igényt jellemzi, hogy egyre nagyobb számú kisszögű szórás vizsgálat berendezés épül világszerte. A modern technológia ugyanis fokozódó mértékben igényli a nanoszerkezetekről szerzendő ismerteket. A kisszögű szórással vizsgált objektumok nagy családjából kiemelkednek például a polimerek, amelyek finomszerkezete alapvetően határozza meg a polimer anyag tartósságát, megmunkálhatóságát, használat utáni környezetkímélő szétbonthatóságát. A kompozit anyagok közismerten elterjedőben vannak, mivel tartósak, könnyűek. A hajszálnál sokkal vékonyabb szén, elemi bór, cirkónium, stb. szálak nanoszerkezete, a kompozitban való elhelyezkedése, a kompozitot képző egyéb összetevőkhöz való kapcsolódása szintén nem vizsgálható neutronszórás nélkül. A jövő anyagainak nagy családját alkotják a szinterelés útján kapott ötvözetek, kerámiák.

A szinterelési eljárás eredménye a készítményben maradt nanoüregek méretétől, számától és elhelyezkedésétől függ. A gyógyszerek, a kozmetikumok legtöbb fajtája a szervezetbe mindinkább az ún. nanokapszulák révén juttatható be. Ezen kívül a nanokapszulák fontos szerephez jutnak a mosószerek minőségének javításában, nagymértékben fokozzák az olajkitermelés hatékonyságát is. A jövő elektronikus ipara a nanochipeken fog alapulni, amelyeket a ma már intenzíven kutatott szén nanocsövekre alapozva álmodnak meg a kutatók.

A mágneses szórás a nanoszerkezet világában is igen jelentős. Gondoljunk csak az ún. ferrofolyadékokra, azaz mágneses nanoszemcsék szuszpenziójára, vagy a ferrogélekre, amelyek ugyancsak nanoszemcsék gélekbe keverésével állíthatók elő. Az előbbi anyagcsalád a mágnesesen vezérelt transzportjelenségek esetében fontos, például ferrofolyadék szemcséihez tapasztott, biológiaiilag aktív molekulák szállíthatók révükön külső mágneses térrel vezérelve. A másik anyagcsoport a mechanikai érzékelésre vagy ún. lágy, az izommozgást finoman utánzó mozgulatokra készíthető intelligens anyagok családjá. Ez utóbbihoz tartoznak a nagy – száraz térfogatuk ezerszeresét kitevő – víz-

tartalmat felvevő „szupergélek”, avagy a piezo-effektust mutató aerogélek. Ez utóbbi anyagok a ferrogélekkel megfelelő módon összekapcsolva a nem merev alkatrészekből álló, az élő szervezetek mozgását követő ún. „lágú robotok” alapját képezhetik.

Ha a neutronhullám kis szögben sűrűsülve érint egy sík felületet, mód nyílik a felületi vékony rétegek tanulmányozására. A felületi rétegek tulajdonságainak vizsgálata egyáltalán nem öncélú. A heterogén katalízis, a korrózió folyamatai a felületi tulajdonságok minőségétől függően mennek végbe. A felületvizsgálat segítségével e folyamatok egyes fázisai is nyomon követhetőek, lehetővé téve e folyamatok megértését és azok pozitív befolyásolását. A felületszórás hatékony eszköz a természetes és a mesterséges membránok szerkezetének felderítésére. E tanulmányok közelebb visznek a sejtfal működésének megismeréséhez, a mesterséges membránok pedig szelektív és vezérelhető nanoszűrőként tűnnek ígéretesnek.

Ha a neutron kinetikus energiája a szóródás folyamán megváltozik, rugalmatlan szórásról beszélünk. A rugalmatlan szórás az anyag atomi, illetve molekuláris szintű mozgásáról tudósít. Lévéen a neutron véges tömegű részecske, az energiaátadás vizsgálatát egyszerű sebesség-, illetve – a kvantummechanika alapján – hullámhosszmérésre vezethetjük vissza. A kondenzált anyagok belső dinamikájának ismerete nem csak az egyszerűbb diffúziós mozgások letapogatását jelenti. A fehérjemolekulák működését – ami természetesen mozgással jár – nyomon követve, dinamikájában ismerhetjük meg az élet működését. Hasonlóan fontos a heterogénkatalízis-folyamat időbeli lefolyásának megértése. Jelenleg nem ismeretes más közvetlen megfigyelési módszer ezen mozgások részletesebb tanulmányozására.

A rugalmatlan szórás akkor a leginformatívabb, ha a vizsgált mozgás legfinomabb részletét is láttatni tudja. Ez a mérés technika nyelvére lefordítva igen kis energiacsere meghatározását jelenti. Egy szellemes magyar ötletnek köszönhetően – amelynek lényege, hogy a neutron sebességváltozása a neutron mágneses momentumának külső térben való elfordulására vezethető vissza – az energiaváltozás mérésének pontossága eléri a nanoelektronvolt értéket. Ezáltal érzékelhetővé válik például a polimer molekulák önszerveződésének folyamata, mely folyamat a polimerlánc részeinek bonyolult, de a molekuláris erők által jól meghatározott „tánca” révén megy végbe. Metastabil, például üvegszerű állapotban lévő anyagok egyensúlyi helyzetének kialakulása is vizsgálható az említett módszerrel.

Eme rövid ismertető során igyekeztünk a neutronszórás hatékonyságát néhány tipikus példa segítségével vázolni, némi hangsúlyt helyezve arra, hogy miként képes a neutronszórás segíteni a gyakorlati élet által felvetett problémák megoldását. A felsorolt témák révén, amelyek korántsem merítik ki a neutronszórás alkalmazásának teljes körét, igyekeztünk bemutatni az eljárás hasznosságát. Végezetül feltétlenül említésre méltó, hogy Magyarországon a

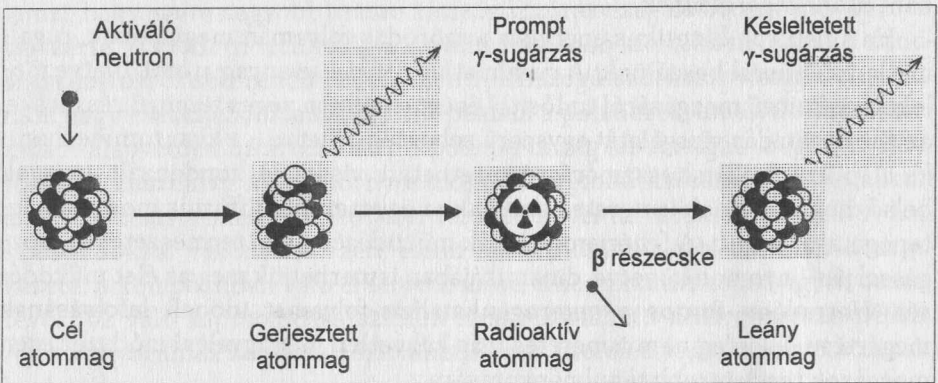
Budapesti Kutatóreaktor mellett, nemzetközi együttműködés keretében – az Európai Unió támogatásával – a felsorolt feladatok megoldására irányuló intenzív és nemzetközi elismerést kivívó kutatómunka folyik.

Neutronaktivációs analízis

A magfizikai alap kutatások eredményeit hasznosító egyik legjelentősebb nukleáris kémiai módszer az aktivációs analízis. A módszerrel a vizsgált anyag *minőségi és mennyiségi elemösszetételéről* szerezhetünk információt. Az aktivációs analízis főbb lépéseit az 1. ábra szemlélteti.

1. ábra

A neutronaktivációs analízis főbb lépései



A vizsgálandó anyagot nukleáris részecskékkel (neutronokkal, protonokkal, deutronokkal, fotonokkal, stb.) sugározzuk be, amelyek az anyag atommagjainak egy részét átalakítják. Gyakorlatban a legelterjedtebb a neutronaktivációs analízis (NAA). Ha az atommag elnyeli, befogja a neutront, akkor egy gerjesztett állapotban lévő köztes atommag keletkezik. A gerjesztett atommag szinte azonnal megszabadul a gerjesztési energiától: *prompt* (azonnali) γ -sugárzást bocsát ki és egy másik atommaggá alakul. A prompt γ -sugárzás jellemző a köztes atommagra. A magátalakulás eredménye legtöbbször egy olyan atommag, amely *radioaktív*, tehát bizonyos időtartamig (amely néhány perctől évekig is tarthat) még további magsugárzásokat bocsát ki. Közülük a γ -sugárzás a legalkalmasabb mérési célokra, melyet *késleltetett γ -sugárzás*-nak is szokás nevezni. A mérésre általában a besugárzástól távolabbi helyen (mérőlaborban) és későbbi, optimális időben kerül sor. A γ -sugárzás egyes komponenseinek energiája alapján azonosítjuk a mintában található elemeket, míg egy adott energiájú sugárzás intenzitása arányos az azonosított elem mennyiségével.

Az aktivációs analízist a magyar származású, Nobel-díjjal kitüntetett *Hevesy György* és *Hilde Levi* fedezte fel és valósította meg 1936-ban.¹ Megjelenése óta persze sokat fejlődött a módszer, különösen a nukleáris kutatóreaktorok megépítése után. Ma már a vizsgált anyagot nagyteljesítményű reaktorokban aktiváljuk, ahol a minta 1 cm² felületét akár 10¹⁴ (százbillió) neutron is érheti egyetlen másodperc alatt; az indukált radioaktív sugárzást pedig alacsony sugárzási háttérű mérőhelyeken és igen érzékeny, félvezető detektorokkal és jó minőségű mérőrendszerekkel (γ -spektrométerrel) regisztráljuk. Az aktivációs analízis igényeivel és lehetőségeivel együtt nagyon sokat fejlődtek a módszertani, illetve a modern számítógépes mérési és kiértékelési eljárások is. A neutronaktivációs analízis módszertani és alkalmazott kutatásainak magyarországi bázisai az MTA Atomenergia Kutatóintézet által üzemeltetett és a közelmúltban felújított és továbbfejlesztett Budapesti Kutatóreaktor, valamint a Budapesti Műszaki Egyetem Tanreaktora.

Az aktivációs analízis tehát az atommagok reakcióin alapul. A nukleáris folyamatok során felszabaduló energia tipikusan 5-6 nagyságrenddel meghaladja a kémiai folyamatokra (vegyületek képződésére) jellemző energiát. Ebből adódnak a módszer különleges lehetőségei és kiemelkedő érzékenysége, illetve korlátai is. Klasszikus neutronaktivációs analízis esetében a vizsgálatok elvégzéséhez néhány milligramm anyagmennyiség már elegendő; de speciális esetekben lehetőség van még kisebb tömegű minták (pl. hajszálak) elemzésére is. Kedvező mátrixanyag esetében a stabil elemek mintegy 2/3 részének mérése (ún. panoráma-analízise) végezhető el 1-1000 ng (ng = 10⁻⁹ g) mennyiségben, amint ezt a 2. ábra mutatja.

Az NAA tehát különösen alkalmas nyomelemek meghatározására. Egyidejűleg természetesen több elem is mérhető. A mérés pontossága a kísérleti körülményektől függően tipikusan 1-10% között változhat. A módszer legelterjedtebb változatának alkalmazásakor nincs szükség a minták kémiai kezelésére (roncsolásra), így a minták nem károsodnak tartósan. Bizonyos idő eltelté után ismét felhasználhatóak eredeti rendeltetésüknek megfelelően, vagy a mérések megismételhetők, illetve más vizsgálati eljárásokkal kiegészíthetők és ellenőrizhetőek. Ha mégis szükség van (radio)kémiai műveletre, akkor az analízist nem zavarja a vegyszerek szennyezése, mert a radioaktív sugárzást nem befolyásolják az aktiválás után bevitt, tehát inaktív szennyezők. Olyan elemek (például ritkaföldfémek) analízise is elvégezhető neutronaktivációs analízissel, melyek kémiai tulajdonságai kivételesen hasonlítanak egymásra, és ezért kémiai módszerekkel csak igen nehezen elemezhetőek. Az említett és más előnyös tulajdonságoknak köszönhetően az NAA-módszert gyakran *referenciamódszer*ként használják standard anyagok, analitikai mód-

1 G. von Hevesy, H. Levi, Kgl. Danske Videnskab. Selskab. Math.-fys. Medd., 14 (1936) 5.

2. ábra

A neutronaktivációs analízissel tipikusan kimutatható legkisebb anyagmennyiség nanogrammban kedvező mátrix esetén ($ng = 10^{-9} g$)

H 1300																	He 1000																												
Li 24 000	Be 49 000											B 2.5	C 807 000	N 115 000	O 1000	F 287 000	Ne 1000																												
Na 1 4 700	Mg 100 73 000											Al 10 15 000	Si 100 23 000	P 100 54 000	S 1000 15 000	Cl 1 790	Ar 1																												
K 10 3 100	Ca 100 18 000	Sc 1 850	Ti 10 790	V 1 700	Cr 10 3 900	Mn 0.01 2 700	Fe 1000 28 000	Co 1 940	Ni 100 5 100	Cu 10 8 400	Zn 10 18 000	Ga 1 28 000	Ge 10 13 000	As 1 8 700	Se 10 4 400	Br 1 8 500	Kr 10																												
Rb 10	Sr 10 7 000	Y 100 11 000	Zr 10 71 000	Nb 100 53 000	Mo 10 3 800	Tc - -	Ru 10 11 000	Rh 10 10	Pd 100 19 000	Ag 1 1 700	Cd 10 11	In 0.01 19 000	Sn 10 110 000	Sb 1 40 000	Te 10 11 000	I 1 10 000	Xe 100																												
Cs 1	Ba 10 41 000	La 1 22 000	Hf 1 570	Ta 1 4 300	W 0.1 18 000	Re 0.1 5 700	Os 10	Ir 0.1 19 000	Pt 100 3 000	Au 0.1 4 500	Hg 100 85	Tl 100 48 000	Pb 10000 240 000	Bi 100 2200000	Po -	At -	Rn -																												
Fr -	Ra -	Ac -	Rf -	Db -	Sg -	Bh -	Hs -	Mt -																																					
<table border="1"> <tr> <td>Ce 10 29 000</td> <td>Pr 100 14 000</td> <td>Nd 10 880</td> <td>Pm 100</td> <td>Sm 0.1 7.1</td> <td>Eu 0.001 47</td> <td>Gd 10 8.4</td> <td>Tb 1 24 000</td> <td>Dy 0.001 110</td> <td>Ho 1 1 800</td> <td>Er 1 350</td> <td>Tm 10 1 900</td> <td>Yb 1 1 800</td> <td>Lu 0.01 2 700</td> </tr> <tr> <td>Th 10</td> <td>Pa 1</td> <td>U 10</td> <td>Np -</td> <td>Pu -</td> <td>Am -</td> <td>Cm -</td> <td>Bk -</td> <td>Cf -</td> <td>Es -</td> <td>Fm -</td> <td>Md -</td> <td>No -</td> <td>Lr -</td> </tr> </table>																		Ce 10 29 000	Pr 100 14 000	Nd 10 880	Pm 100	Sm 0.1 7.1	Eu 0.001 47	Gd 10 8.4	Tb 1 24 000	Dy 0.001 110	Ho 1 1 800	Er 1 350	Tm 10 1 900	Yb 1 1 800	Lu 0.01 2 700	Th 10	Pa 1	U 10	Np -	Pu -	Am -	Cm -	Bk -	Cf -	Es -	Fm -	Md -	No -	Lr -
Ce 10 29 000	Pr 100 14 000	Nd 10 880	Pm 100	Sm 0.1 7.1	Eu 0.001 47	Gd 10 8.4	Tb 1 24 000	Dy 0.001 110	Ho 1 1 800	Er 1 350	Tm 10 1 900	Yb 1 1 800	Lu 0.01 2 700																																
Th 10	Pa 1	U 10	Np -	Pu -	Am -	Cm -	Bk -	Cf -	Es -	Fm -	Md -	No -	Lr -																																

Az elemek szimbóluma alatti első sor a kutatóreaktorokkal végzett, klasszikus NAA-ra, míg a második sor a prompt-gamma NAA-ra² vonatkozik.

szerek és más eljárások hitelesítésére. A nagyérzékenységű, modern műszeres analitikai módszerek között az NAA ellentmondásos helyet foglal el viszonylagos bonyolultsága és nagy költségigénye miatt. Ez azonban csak látványos, mert a „sugárforrásokat” az esetek döntő többségében nem vagy nem kizárólag analitikai céllal hozzák létre, így az NAA a sugárforrás kihasználtságát tovább növeli.

Az aktivációs analízis – egyedi lehetőségei révén – termékenyítőleg hat más (szub)diszciplínák fejlődésére, elsősorban azokon a területeken, ahol korábbi vagy más analitikai módszerek korlátozott érzékenysége és/vagy hiányos eredményei nem tették lehetővé számos kérdés megválaszolását. A teljesség igénye nélkül szolgáljon néhány példa az előbbi állítás igazolására.

Fontos biológiai funkciókat ellátó vegyületekben (enzimekben, fehérjékben) gyakran találunk olyan elemeket, amelyek nagyon kis koncentrációban vannak jelen, de esetleges hiányuk mélyreható zavarokat és károsodást okoz az élő szervezetben. Emberi, állati és más biológiai eredetű anyagok nyomelemtartalmának ismerete tehát nagymértékben hozzájárul néhány anyag-

2 C. Yonezawa, Anal. Sci. 9, 267 (1993)

cserefolyamattal, táplálkozással, patológiával és munkaegészségüggyel kapcsolatos kérdés jobb megértéséhez. Az NAA-vizsgálatok egyrészt a szervek, haj, köröm, bőr és vérplazma létfontosságú nyomelemtartalmának normál értékeit és térbeli eloszlását eredményezik, majd ezek egyes betegségek kialakulásában és megelőzésében játszott szerepének megállapítását célozzák. Az emberi vérszérum nyomelemtartalma és a daganatos, illetve a Down-kóros megbetegedések kialakulása között összefüggést találtak; a vérszérum mangán-, réz- és cinktartalma például akut és krónikus májgyulladás esetén jelentősen eltér a normál értéktől. Állatkísérletek és klinikai vizsgálatok egyaránt bizonyítják, hogy a szelén-pótlásnak, napi 200 μg mennyiségű szelén adagolásának jelentős hatása van a daganatos betegségek megelőzésében: a rákos megbetegedések előfordulását 41%-kal, a tüdőrákot 46%-kal, a prosztatataraktot 68%-kal is csökkentheti.

Az emberiség egyre növekvő igényeinek kielégítése közben sok szempontból meghatározó átalakítójává vált környezetének, ami már földi méretekben is megmutatkozik. Jövönk az ember és környezete kapcsolatának megértésétől és összehangolásától függ. Ebben a folyamatban is jelentős szerepet játszik az NAA, mert a módszer előnyei kitűnően érvényesülnek környezeti minták (talaj, pernye, por, üledék, hulladékok, aeroszol, szén, felszíni víz, illetve biomonitorok) vizsgálatokor. Budapest levegőjében jelenlévő, szuszpendált részecskék (aeroszok) különböző méret szerinti frakcióinak mintavételezésével mintegy 200-500 μg tömegű mintákat kapunk. A méret szerinti frakciók gyűjtése nagyon fontos az aeroszok további biogeokémiai viselkedésének és egészségügyi hatásának jobb megértése szempontjából. NAA-módszerrel rendszerint 45-50 kémiai elemet határozunk meg az aeroszol-frakciókban. Ilyen adatsorok együttes kiértékelése, majd multistatisztikus, modellezési és más számítási módszerek új és a folyamatok lényegére vonatkozó ismereteket nyújtanak az aeroszol levegőszennyezőkről. Azonosíthatjuk például a levegőszennyezés eredetét és meghatározhatjuk forrásmegoszlását, vagyis a gépjárműforgalom, az energiatermelés, a hulladékégetés, az ipari tevékenység, a háztartási tevékenység, a légköri transzportfolyamatok és a természetes források hozzájárulását a levegőszennyezéshez egzakt módon számolhatjuk. Ezen ismeretek szükséges feltételei a hatásos környezetvédelmi elképzelések és megoldások kialakításának.

Régészeti tárgyak és műalkotások nyomelemtartalma nagymértékben változhat keletkezésük földrajzi, történelmi és kulturális körülményeinek, valamint technológiai/műszaki fejlettségének különbözőségéből eredően. A nyomelemek sorozatának koncentrációja az ujjlenyomathoz hasonlóan sok esetben lehetővé teszi a kérdéses tárgyak (pl. fémeszközök, érmék, agyagból, márványból vagy vulkáni üvegből készített tárgyak) eredetének meghatározását, azonosítását és történelmi korokba való besorolását, illetve a hamisítványok kiszűrését.

Az NAA-módszert sikeresen alkalmazták *modern geokémiai, geokronológiai és kozmokémiai problémák* megoldásakor is, melyek közül elsősorban meteoritok, holdkőzet és ásványok ritkaföldfém-tartalmának meghatározását kell kiemelni. Sok esetben az NAA segítségével döntik el, hogy a vizsgált tárgy meteorit-e egyáltalán, és ha igen, akkor az összetevőik (köztük a nyomelemek) alapján osztályokba sorolják, kozmokémiai folyamatokhoz rendelik őket. A holdfelszín *in situ* és laboratóriumi vizsgálatában és jellemzésében is nagy szerepet játszott az NAA.

A *kriminalisztikai* alkalmazásokat jól szemlélteti *Napoleon* császár hajszálai arzéntartalmának vizsgálata az esetleges mérgezés kimutatása céljából. Az emberi szervezetbe jutó arzén aránylag jelentősen dúsul a hajszálakban, ami NAA-val már mérhető. A hajszálak hosszúsága mentén mért arzéneloszlás retrospektív megállapításokat is lehetővé tett. Az NAA-t igénybe veszik per-döntő bizonyítékok, bünt tárgyak vagy lőpornyomok elemzésekor is, amint azt a *J. F. Kennedy* elleni merénylet kivizsgálása is jól példáz.

A *jelen és a jövő kor speciális anyaga*inak nagyon szigorú tisztasági követelményeket kell teljesíteniük. Gyakran csak olyan anyagok megfelelőek, amelyekben a szennyezőknek vagy doppeló (szándékosan adagolt) anyagoknak legfeljebb 1 atomja található az alapanyag 100 milliárd atomjával szemben, egyenletesen elosztva, ami mintegy $10^{-10}\%$ -nak felel meg. Ilyen speciális (pl. elektronikai vagy nukleáris szerkezeti) anyagok kifejlesztésében, tulajdonságainak tanulmányozásában és gyártási technológiájának kidolgozásában is szerepet játszik az NAA.

Prompt aktivációs analitika hideg neutronokkal

Már a neutron felfedezése után két évvel – 1934-ben – megfigyelték, hogy a neutronokkal bombázott hidrogén α -sugárzást bocsát ki.³ Vagyis a prompt-gamma aktivációs analízis (PGAA) alapjául szolgáló magfizikai jelenség – a sugárzásos neutronbefogás – felfedezése két évvel megelőzte az előző fejezetben ismertetett neutronaktivációs analízis bevezetését. Ennek ellenére a PGAA-módszert az elemanalitikában csak jóval később kezdték el alkalmazni, amit az atommagra vonatkozó ismeretek akkori fejletlensége, valamint a megfelelő neutronforrások és sugárzásmérő detektorok hiánya magyaráz.

A módszer fénykora tulajdonképpen csak most kezdődik, a nagyteljesítményű atomreaktoroknál létesített intenzív hidegneutron-nyalábok rohamos terjedésének köszönhetően. Érdeemes tehát röviden áttekintenünk a PGAA-módszer alapjait, legfontosabb alkalmazási területeit, valamint olyan perspek-

3 E. Amaldi, O'd. Agostino, E. Fermi, B. Pontecorvo, E. Segré, *Recerca Sc.* 2, 467 (1934);
D. E. Lea, *Nature* 133, 24 (1934)

tivikus továbbfejlesztési lehetőségeit, amelyek áttörést hozhatnak a tudomány és a technika számos fontos területén.

A neutron befogódásakor keletkező közttes atommag a kötési energia megnövekedése következtében gerjesztett állapotba kerül, majd a tipikusan 7-8 megaelektronvolt energiafelesleget γ -sugárzás formájában adja le. Mivel ez a folyamat mintegy 10^{-16} s alatt végbemegy, a sugárzás azonnali, *prompt* jellegű, így időben megelőzi az esetleges radioaktív bomlást és az azt kísérő γ -sugárzást. További fontos különbség, hogy a *prompt* γ -sugárzást a közttes atommag – az anyaelem – nívóin végigcsorgó kaszkádok alkotják, a radioaktív bomlást kísérő γ -sugárzást viszont a leányelem gerjesztési nívói közötti átmenetek képezik. Mivel a *prompt* γ -sugárzás minden elem esetében fellép, megfigyelése révén olyan elemek is mérhetőek, amelyeknél a neutronbefogás kizárólag stabil – esetleg igen hosszú felezési idejű – izotóphoz vezet, azaz az elem nem „aktíválódik”, vagy pedig a leányelem rögtön alapállapotában keletkezik, s ezért nem bocsát ki γ -sugarakat.

A *prompt*-gamma aktivációs analízis tehát elvben valamennyi kémiai elem egyidejű kimutatására alkalmas a hidrogéntől az uránig (sőt a transzuránokig), és segítségével egyúttal az izotópösszetétel is meghatározható, bár az érzékenység esetenként erősen változó. A gyakorlat számára a legfontosabbak a könnyű elemek, különösen a más analitikai módszerekkel nehezen kimutatható hidrogén és bór, szerves anyagokban és élő organizmusokban a szén, a nitrogén, a kén és a foszfor. Jól mérhető a mérgező kadmium és a higany, továbbá a geológiában fontos indikátor ritkaföldfémek, amint azt a 2. ábra mutatja.

Noha a PGAA inherensen érzékenyebb,⁴ mint az NAA, hisz az aktivitás állandóan telítésben van, a vizsgálathoz használatos neutronnyalábok intenzitása nagyságrendekkel kisebb a reaktor belsejében való besugárzáskor elérhetőnél, ami érzékenység tekintetében rendszerint az NAA javára billenti a mérleget. Ám éppen a kis neutronfluxusnak köszönhetően a minta felaktiválódása elhanyagolható, így a módszer az NAA-val szemben teljesen roncsolásmentes. A folyamat nukleáris jellegéből következik, hogy az analitikai jel nem függ sem a kémiai, sem a fizikai állapottól, így a PGAA bármilyen anyagra alkalmazható. Nincs szükség hosszadalmas mintaelőkészítésre sem, hisz a minta egyszerűen a nyaládba helyezhető és mérhető. Emellett az eredmény a spektrumból azonnal kiolvasható, tehát az egész mérési folyamat jól automatizálható. A neutronok és az indukált nagyenergiájú γ -sugárzás nagy áthatolóképeségének köszönhetően még nagytömegű mintánál sincs mátrixhatás (vagy az egyszerűen korrigálható), ellentétben például a röntgenfluoreszcencia-analízissel.

4 T. L. Isenhour, G. H. Morrison, Anal. Chem. 38, 162 (1966)

A PGAA-módszer univerzalitásának ára, hogy a γ -sugárzást közvetlenül a neutronnyalámban kell mérni, s hogy a γ -spektrum is lényegesen összetettebb a hagyományos neutronaktivációs analízisben megszokottnál, ami lényegesen bonyolultabb méréstechnikát igényel. Noha a nagy energiafelbontású félvezető γ -detektorok megjelenése a hatvanas években már lehetővé tette a PGAA-módszer bevezetését, az akkoriban elérhető – elsősorban radioaktivitáson alapuló – neutronforrások nem tudták produkálni a megfelelő intenzitást és a kellően alacsony sugárzási háttérrel.

Az áttörést az a felismerés hozta, hogy a nagy hullámhosszúságú – tehát kisenergiájú – neutronok a fényhez hasonlóan a teljes visszaverődés elvén nagy távolságra elvezethetők, míg a kritikusnál rövidebb hullámhosszúságúak a nyalámból kiszóródnak. Így a neutronokat termelő atomreaktor aktív zónájától biztonságos távolságban – akár 100 m-re – nagyfluxusú, alacsony háttérű besugárzó nyaláb hozható létre. Ráadásul ez a nyaláb a kritikus szög igen alacsony – egy-két fokos – értékének köszönhetően gyakorlatilag kollimált. A neutronvezető annál effektívebb, minél hidegebbek a neutronok, ezért a reaktorban termelődő termikus neutronokat cseppfolyós hidrogén moderátorral – *hidegforrással* – tovább lassítják. Külön előny, hogy a befogódás valószínűsége a neutron sebességével fordított arányban nő, ami a szobahőmérsékletű – termikus – neutronokkal összehasonlítva további, mintegy háromszoros érzékenységnövekedést eredményez.

Az első neutronvezető-nyalábokon végzett úttörő PGAA-kísérletek (Orsay: 1968, Grenoble: 1973) után azonban hosszú szünet következett. Végül a nagyméretű, nagy tisztaságú germánium detektorok megjelenése hozta meg az áttörést. Az első modern γ -detektoros PGAA-mérést hidegneutron nyalábon a KFA Jülich reaktoránál végezték el, 1986-ban.⁵ Ezután a hidegforrások terjedésének köszönhetően sorra létesültek PGAA-mérőhelyek szerte a világon.⁶ Hazánkban a Budapesti Kutatóreaktor rekonstrukcióját követően, 1995-ben helyeztük üzembe termikus neutronvezetőre telepített PGAA-berendezésünket,⁷ amely a hidegneutron-forrás ideji átadásával neutronfluxus tekintetében is felveszi a versenyt az USA és Japán csúcsberendezésével.

A technikai lehetőségek azonban mindezzel még korántsem merültek ki. Ha például a neutronvezető egy olyan mikrokapilláris, amelynek szemközti falai elég közel – mikrométernyi távolságra – vannak egymástól, a kapilláris a fényvezető száloptikához hasonlóan meggörbíthető anélkül, hogy a teljes reflexió feltétele megszűnne. Több ezer mikrokapillárist tartalmazó üvegszálak

5 R. M. Lindstrom, R. Zeisler, M. Rossbach, J. Radioanal. Nucl. Chem. 112, 321 (1987)

6 NIST, USA: 1993; JAERI, Japán: 1993; U. Texas, USA: 1996; PSI, Svájc: 1997.

7 G. L. Molnár, T. Belgya, L. Dabolczi, B. Fazekas, Z. Révay, Á. Veres, I. Bikit, Z. Kis, J. Östör, J. Radioanal. Nucl. Chem. 215, 111 (1997)

százait kévébe fõgva neutronlencse⁸ készíthetõ, amely tizedmilliméter átmérõjû pontra képes fókuszálni a neutronnyalóbot, miközben a koncentráció eredményeként a fókuszpontban a fluxus csaknem két nagyságrenddel megnõ. Ily módon lehetõvé válik igen kis minták mérése, avagy a mintafelület effektív pásztázása. Egyelõre két laboratórium (NIST, PSI) rendelkezik ilyen eszkõzrel, ám alkalmazásuk még számos nehézségbe ütközik.

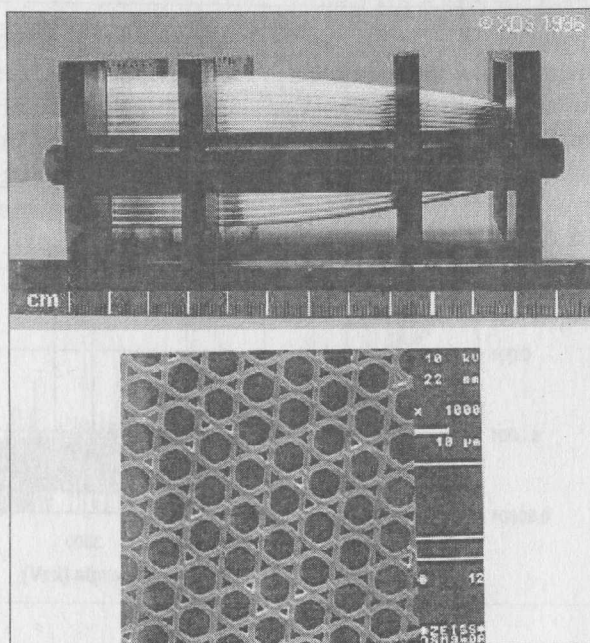
A PGAA a fentiekbõl következõen igen széles körben használható elem-analitikai módszer, különösen ha gyors, roncsolásmentes, a minta teljes

térfogatára kiterjedõ panorámaanalízisre van szükség. Potenciális alkalmazási köre szinte végtelen: A-tól Z-ig, vagyis az archeológiától a zoológiáig terjed. Nem lehet célunk, hogy itt mindezt bemutassuk, ezért néhány olyan példát ragadunk ki, amelyek a módszer egy-egy különleges adottságát aknázzák ki.

A roncsolásmentes elemzés a régészetben alapvetõ fontosságú, hisz a rendszerint pótolhatatlan leleteket nem szabad sem kémiaileg, sem fizikailag megbontani. A fõ összetevõk analízise például bronz- vagy nemesfém tárgyak, fémszobrok, pénzek esetében leleplezheti a hamisítást, míg a nyomelem tartalom a tárgy eredetére, készítési módjára utalhat. A csiszolt kõeszközök vizsgálata az obszidián vagy más alapanyag beszerzési helyét segíthet felderíteni, s még sorolhatnánk tovább a példákat. Tehát várható, hogy az archeometria, amely eddig csak igen korlátozott elem-analitikai arzenálra támaszkodhatott, a PGAA egyik legkomolyabb felhasználója lesz.

3. ábra

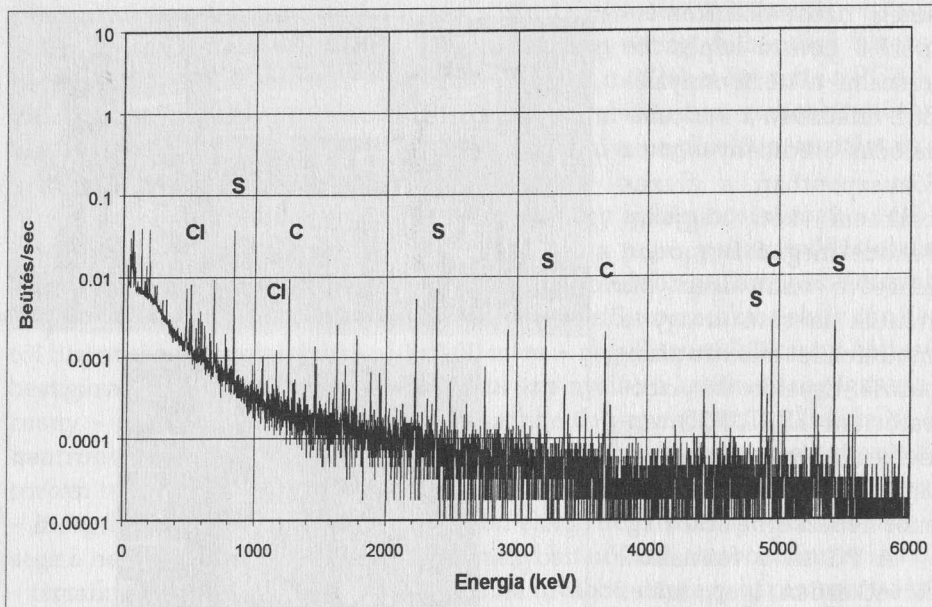
Az egyik elsõ polikapilláris neutronlencse



Forrás: X-Ray Optical Systems

8 M. A. Kumakhov, V. A. Sharov, Nature 357, 390 (1992);

H. Chen, R. G. Downing, D. F. R. Mildner, W. M. Gibson, M. A. Kumakhov, I. Yu. Ponomarev, M. V. Gubarev, Nature 357, 391 (1992)

Kémszennyezés kimutatása C₆₀ fullerénben

A nagy tisztaságú anyagok *nyomelem*-szennyezőinek feltárására számos felületi és térfogati módszer ismert, utóbbira példa az NAA. Ezekkel az eljárásokkal a PGAA rendszerint sikerrel versenyezhet, ha roncsolásmentes módon kell könnyű elemeket – például hidrogént vagy bórt – mérni. Egy másik kedvező eset, amikor könnyű elemekből felépülő mátrixban kell szennyező- vagy adalékelemeket kimutatni. Ilyenkor a mátrix elemekre vonatkoztatott kis érzékenység kimondottan előnyös, hisz a mátrixból eredő gyenge γ -sugárzás nem zavarja a nyomelemek kimutatását (ugyanakkor maga a mátrixösszetétel is mérhető). Ilyen anyagok lehetnek a szilíciumalapú félvezetők, vagy például a 4. ábrán bemutatott C₆₀ fullerén, mely utóbbiban sikerült kimutatnunk az előállítás során klathrát formájában beépült ként.

Végezetül két olyan fontos területet említünk meg, melyek számára a prompt-gamma technika továbbfejlesztése új perspektívát nyithat.

Az orvostudomány egyik legnagyobb kihívása a daganatos betegségek elleni küzdelem. A bőr 10-es izotópjá neutronbesugárzás hatására alfa-sugarakat bocsát ki és a lítium 7-es izotópjává alakul át. Az így keltett alfa-sugárzás roncsoló hatásán alapul a bőr neutronbefogásos rákterápia (BNCT). A ⁷Li végmag az esetek 94%-ában gerjesztett állapotban keletkezik, ezért a kibocsátott prompt γ -sugárzás felhasználható a folyamat nyomon követésére. Eddig a PGAA-módszert csak a tumorba juttatott bőr koncentrációjának mérésére

használták, de elvben lehetséges a *tomográfiás leképezés*, s ezzel a leadott sugárdózis térbeli eloszlásának meghatározása is.

Az elemösszetételen túl *szerkezeti információ* is nyerhető a prompt γ -sugarak révén, ha visszalökődésmentes rezonancia-abszorpciót – *Mössbauer-effektust* – tudunk létrehozni. Már a hatvanas években sikerült Mössbauer-effektust kimutatni a ^{156}Gd 89 keV és a ^{158}Gd 80 keV energiájú prompt γ -sugárzásával,⁹ de a technikai nehézségek miatt elmaradt a folytatás. A mai hidegneutron-nyalábok intenzitása viszont lehetővé tenné, hogy a Mössbauer-magok, s így az e módszerrel vizsgálható jelenségek körét jelentősen kibővítsük.

9 J. Fink, P. Kienle, Phys. Lett. 17, 326 (1965)

Nukleáris szerkezetvizsgáló módszerek

A radioaktivitás felfedezésének következménye volt, hogy a tudomány megismerte a mag sugárzás típusait (alfa, béta, gamma), tulajdonságait (töltés, tömeg, energia) és kölcsönhatásait az anyaggal. Ezeknek a sugárzásoknak alapvető tulajdonsága, hogy az atomokat, molekulákat gerjesztik és ionizálják. Innen az ionizáló sugárzás elnevezés is. Ma már gyorsítók segítségével, mesterségesen is elő lehet állítani ionizáló sugárzásokat. A sugár és az anyag kölcsönhatásait vizsgálva az anyag tulajdonságairól igen részletes, hasznos információkhoz juthatunk. A következőkben néhány ilyen technikát mutatunk be.

Pozitronannihilációs spektroszkópia (PAS)

Dirac 1928-ban kiszámolta és 1930-ban publikálta a nagy energiájú elektronok (amelyek sebessége összemérhető a fény sebességével) relativisztikus energiáját. (Felhasználta, természetesen, *Einstein* speciális relativitáselméletét). Az eredmény meglepte, ugyanis, egy gyökvonás miatt, pozitív és negatív érték adódott.

$$E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} \quad (1. \text{ kifejezés})$$

ahol E az elektron energiája, m_0 a nyugvó elektron tömege, p az elektron impulzusa és c a fénysebesség.¹

Dirac ebből a furcsa eredményből; ti. hogy az energia negatív is lehet, arra következtetett, hogy az elektronnak létezik egy antirészecskéje, amelynek, elmentétben az elektronnal, pozitív töltése van, de a többi tulajdonsága (tömege, mágneses viselkedése stb.) igen hasonlóak az elektréhoz. Dirac egy kissé naiv, de azért az elektron–pozitron páros keletkezését energiából (gamma-

¹ P. A. M. Dirac: Proc. Cambridge Phil. Soc., 26, 36 1. 1930.

fotonból), illetve azok egyesülését, átalakulását energiává (gamma-fotonokká) jól leíró modellt is alkotott. (A pozitron-elektron páros átalakulását fotonokká, nem túl szerencsés módon, annihilációnak nevezzük, és ez az elnevezés, jobb híján, a magyar szakirodalomban is meggyökeresedett.)

Anderson 1932-ben 1300 db fotólemezen megvizsgálta a kozmikus sugárzás nyomait. 15 db olyan nyomot talált, amelyekről kiderült, hogy azok olyan pozitív töltésű részecskétől származnak, melyeknek tömege jóval kisebb, mint a már ismert, pozitív töltésű proton tömege. Ez a kísérleti eredmény bizonyította, hogy a Dirac által megjósolt részecske, a pozitron létezik.² (A proton tömege 1840-szer nagyobb, mint a pozitron tömege.) Dirac és Anderson is fizikai Nobel-díjat kaptak. Dirac 1933-ban, de az indoklásban az új, hatékony atomelmélet felfedezése szerepelt. Anderson 1936-ban lett Nobel-díjas és az indoklás a pozitron felfedezését említette.

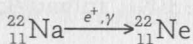
A pozitron-elektron páros akkor alakul át fotonokká, ha a pozitron már elvesztette mozgási energiáját, mozgása lelassul és egy minimális időt az elektron közelében tud tölteni. A keletkezett fotonok száma leggyakrabban kettő és ritkán három. Ha az annihilációban részt vevő elektronnak nincs mozgási energiája, akkor a keletkezett két foton 180° -os szögben indul el a keletkezés helyétől és energiájuk $0,51$ MeV lesz. (Az elektron vagy pozitron tömegével ekvivalens energiát az Einstein-egyenlettel lehet számolni: $E = mc^2$, ahol E az energia, m a tömeg és c a fénysebesség vákuumban.) Így teljesül a mozgásmennyiség (impulzus) és energia megmaradásának az elve. (A két, ellentétes irányban haladó, azonos energiájú foton mozgásmennyiségének összege nulla, tehát az annihiláció nem produkált új mozgásmennyiséget.) Ha viszont az elektron mozog a pozitronnal való kölcsönhatás pillanatában (és az anyagban, az atom- és molekulapályákon lévő elektronokra ez a jellemző állapot) akkor a keletkezett két gamma-foton haladási iránya nem teljesen 180° -os szöget zár be, és energiájuk sem lesz pontosan $0,51$ MeV.

Ha mérjük az annihilációs gammafoton-párok szög- vagy energiaeloszlását (a 180° -os szögtől illetve a $0,51$ MeV energiától való eltérés gyakoriságát) akkor információt kapunk az annihilációban részt vevő elektronok energiaeloszlásáról. Ilyen mérés egyedülálló információt tud szolgáltatni például a fémekben az elektromos vezetést biztosító elektronok energiájáról (*Fermi-nívók*) és ez fontos adat a fémfizikusok számára. Az 1. ábra azt mutatja be, hogy a vegyészek számára is hasznos lehet egy ilyen szöghorrelációs görbe.

A pozitronokat, mint már említettük, nagy energiájú fotonokból (>1.02 MeV) is lehet nyerni (párképződés), de a legtöbb PAS-laboratórium pozitív béta-bomlással átalakuló, pozitronokat emittáló, radioaktív nuklidokat használna pozitronforrásként. Ilyen a nátrium 22-es tömegszámú izotópja, melynek

2 C. D. Anderson: Phys. Rev., 41, 40 5. 1992.

atommagjában 11 proton és 11 neutron van, tehát tömegszáma 22: $^{22}_{11}\text{Na}$. Az atommagok akkor stabilisak, ha a semleges neutronok száma kissé meghaladja a pozitív töltésű protonok számát. Ezért a $^{22}_{11}\text{Na}$ úgy stabilizálódik, hogy egy protonja egy pozitronkibocsátással neutronná alakul, miközben a nátriumból neon lesz.

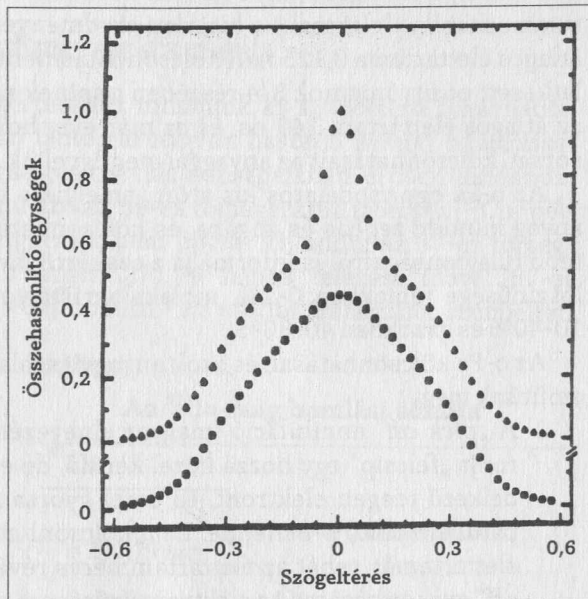


A radioaktív bomlás során egy gamma-foton is felszabadul és ez egy újabb mérés technikát, az élettartammérést teszi lehetővé. Ez azt jelenti, hogy a pozitronnal egy időben keletkező gamma-fotonnal elindítunk egy időmérő szerkezetet, majd a pozitron annihilációjából származó, más energiájú fotonnal leállítjuk az időmérést. Ezt néhány százezerszer megismételjük és ez kielégítő

statisztikát szolgáltat a pozitronok átlagélettartamának meghatározására. Ez az érték fémekben 0,1 és 0,4 nanoszekundum ($\text{ns} = 10^{-9} \text{ s}$) között van, attól függően, hogy milyen az adott fémbe az elektronsűrűség. A hibahelyeken (például a kristályrács egyes pontjaiban hiányzik egy vagy több atom) kisebb az elektronsűrűség, ahol a pozitron hosszabb ideig „él”. A pozitronok átlagos élettartamának méréséből igen hasznos információkhoz jutunk a vizsgált anyagok hibaszerkezetéről.

1. ábra

Az egymástól távolodó két gamma-foton haladási irányának eltérése a 180° -os szögtől



Ha a pozitronok tiszta szilíciumban annihilálódnak (●), egy haranggörbét kapunk. Ha a szilícium hidrogént is tartalmaz (▲), egy keskenyebb komponens is megjelenik (két haranggörbe), ugyanis a hidrogén elektronjainak kisebb az impulzusa, mint a szilícium elektronjainak. A haranggörbék szétválasztása és területaránya alapján a hidrogénkoncentrációt is meghatározhatjuk. (Az ábrát S. Berko és munkatársainak mérése alapján készítettük.³⁾

3 Y. J. He, M. Hasegawa, R. Lee, S. Berko, D. Adler, A.L. Jung: Phys. Rev., B33, 592 4. 1986.

Ha a pozitron és az elektron megfelelő energiaállapotban találkozik, akkor előfordulhat, hogy az annihiláció helyett összekapcsolódnak, és egy a hidrogénhez hasonló, de 920-szor könnyebb atomot, pozitroniumot (PS) hoznak létre. A keletkezett Ps-atomok 1/4 részében az elektron és pozitron spinje (pördülete) ellentétes irányú (ennek neve para-Ps) és – összhangban a kvantummechanikai leírással – a kísérleti eredmények is azt mutatták, hogy ennek átlagos élettartama 0,125 ns. (Kölcsönhatásmentes térben.) Szerencsére a keletkezett pozitroniumok 3/4 részében a spinek párhuzamosak (orto-Ps), ezért az átlagos élettartam 140 ns, és ez már elég hosszú idő ahhoz, hogy az o-Ps sorsát, kölcsönhatásait az anyaggal megfigyeljük.⁴

Az o-Ps egy csodálatos kis atom, amelyik a legkisebb réseken is bejut az anyag minden zegébe és zugába, és kölcsönhatásai révén az anyag legrejtettebb tulajdonságairól is informálja a szakértő megfigyelőt. A Ps-képződés valószínűsége fémekben 0-2%, molekulakristályokban 0-30%, folyadékokban 10-40% és gázokban 40-80%.

Az o-Ps kölcsönhatásai, és azok anyagvizsgálati felhasználásai közül kettőt említünk meg.

1. A „pick off” annihiláció (magyar elnevezés nincs) során az o-Ps pozitronja „felcsíp” egy hozzá közel kerülő, de ellentétes irányú spinnel rendelkező idegen elektront, és ezzel gyorsan annihilálódik, mintha antiparallel spinű; p-Ps lenne. Ez a kölcsönhatás csökkenti az o-Ps átlagos élettartamát, tehát az élettartammérés révén következtethetünk a „pick off” gyakoriságára. Az elektronsűrűséggel nő ennek a kölcsönhatásnak a valószínűsége, csökken az o-Ps élettartama, ha viszont üregek, szabad térfogatok vannak a vizsgált anyagban (ahol kicsi az elektronsűrűség) akkor az oda jutó o-Ps-atomok hosszú ideig élhetnek, és ez növeli a mérhető átlagos o-Ps-élettartamot.

A polimerek minőségmeghatározó jellemzője a bennük lévő szabad térfogat. Ezzel magyarázható, hogy a PAS alkalmazása robbanásszerűen terjed a polimerkutatás, -technológia és -minősítés területén.

2. Az o-Ps elektronja is képes kölcsönhatásra a környezetében lévő paramágneses atomok vagy molekulák nem kompenzált spinnel rendelkező elektronjaival. Ezek a párhuzamos spinű elektronok változtatják irányukat (paramágneses spinrelaxáció), miközben, a mágneses kölcsönhatás miatt, az o-Ps elektronjának spinirányát is megváltoztatják. Ezáltal az o-Ps átalakul p-Ps-á (orto-para konverzió), aminek az élettartama három nagyságrenddel kisebb, mint az o-Ps-é, tehát az orto-para konverziót is követni lehet az élettartamméréssel. A mi kutatócsoportunknak sikerült először megmutatni, hogy a PAS-módszer is alkalmas arra, hogy a hő-

4 A Vértes, I. Kiss: Nuclear Chemistry, Elsevier, Amsterdam, 1987.

mérsékletváltozás hatására változó spinű anyagokban („*spin cross-over*”) a spinátmenetet jelezze. (Érdemes megjegyezni, hogy az ilyen tulajdonságokkal rendelkező molekulák csúcstechnológiai alkalmazását több kutató valószínűsíti.)

Mössbauer-spektroszkópia

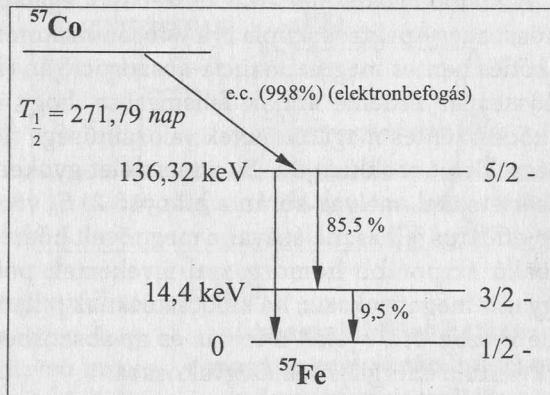
Az MS alapjelenségének megértéséhez induljunk ki az izotópia fogalmából. Míg egy adott elem különböző izotópjai nagyon hasonló kémiai tulajdonságokkal rendelkeznek, addig radioaktív tulajdonságaikban erősen különbözhetnek. Míg a 27-es rendszámú kobalt 59-es tömegszámú izotópjá (^{59}Co) például stabil, azaz radioaktív sugárzást nem bocsát ki, addig az 57-es tömegszámú ^{57}Co -elektron befogás útján, 271,79 napos felezési idővel 57-es tömegszámú vasatommaggá (^{57}Fe) bomlik.⁵ Az utóbbi átalakulást szemlélteti a 2. ábra.

A 2. ábrán azt is láthatjuk, hogy az átalakulás nem alapállapotú, hanem gerjesztett állapotban lévő ^{57}Fe atommagot eredményez. Az atommagok ugyanis – az atomokhoz hasonlóan – stabil alapállapotuk mellett különböző gerjesztett állapotokat is felvehetnek. Ezeket a gerjesztett állapotokat meghatározott energia jellemzi, mely energiát az atommag leadhatja egy γ kvantum kisugárzásával, ha egy gerjesztett állapotból az alapállapotba, vagy egy alacsonyabb energiájú gerjesztett állapotba kerül.

Amennyiben egy gerjesztett állapotú mag (forrás) által kibocsátott γ kvantum egy azonos de alapállapotú atommaggal (abszorbens) találkozik, úgy elképzelhetjük, hogy az addig alapállapotú atommag a γ -kvantumot és az általa képviselt energiámmennyiséget elnyeli, és ennek következtében gerjesztett állapotba kerül. Ezt a jelenséget, amit a γ -sugárzás *magrezonancia-abszorpciójának* nevezünk, ténylegesen sikerült megfigyelni 1951-ben.⁶

2. ábra

Az ^{57}Co -mag bomlási sémája



5 J. G. Stevens, V. E. Stevens (eds.): Mössbauer Effect Data Index (1975) IFI/PLENUM, New York–London, 54. p.

6 P. B. Moon: Proc. Phys. Soc. (London) A64, 76. 1951.

A magrezonancia-abszorpció jelenségének kísérleti megfigyelését hátráltatja, hogy egy szabad atommag mint forrás által kibocsátott γ -kvantum energiája kisebb, mint a megfelelő magátmenet energiája. Ennek oka, hogy a γ -kvantum kibocsátásakor az atommag az impulzusmegmaradás törvényének értelmében a γ -rész haladási irányával ellentétes irányban visszalökődik, és az ehhez szükséges mozgási energiát, az ún. E_R visszalökődési energiát, szintén a magátmenet energiája fedezi. ^{57}Fe -mag esetén (2. ábra) E_R értéke közelítőleg $1,9 \cdot 10^{-3}$ eV.

Hasonló impulzusátadás zajlik le a γ -kvantum elnyelődésekor az abszorbens atommagnál is, ezért szabad atommagok esetében a γ -kvantum $2 \cdot E_R$ energiával kevesebbel rendelkezik, mint ami a magrezonancia-abszorpció létrehozásához szükséges lenne.

Ugyanakkor, ha a forrás- és abszorbens atommagokat egy szilárd test rácsába ágyazzuk be, úgy az esetek egy részében a magátmenetek során fellépő visszalökődés E_R energiája elhanyagolhatóan kis értékű lesz, megvalósul az ún. *visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpció*. A szóban forgó visszalökődésmentes magátmenetek megvalósulási valószínűségét az ún. *Mössbauer-Lamb-faktor* adja meg.

A *Rudolf Mössbauer* által 1958-ban megalapozott,⁷ s azóta róla elnevezett Mössbauer-spektroszkópia is a γ -fotonok atommagokon történő ilyen visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpcióján (*Mössbauer-effektus*) alapszik. Mössbauer érdeme annak felismerése, hogy egy szilárd testben a visszalökődésmentes magátmenetek valószínűsége növekszik, ha a szilárd test hőmérsékletét csökkentjük. Ez a szemlélet gyökeresen ellentétes volt a korábbi kísérletekkel, melyek során a hiányzó $2 \cdot E_R$ visszalökődési energiát, a *Doppler-effektus* felhasználásával, a megnövelt hőmérséklet révén a szilárd testben előálló szaporább hőmozgással igyekeztek pótolni. A γ -kvantum energiája ugyanis megnövekszik, ha kibocsátásának pillanatában a forrás az abszorbens felé mozog. Ha v jelöli a forrás és az abszorbens relatív sebességét, akkor a γ -kvantum energiájának megváltozása:

$$\Delta E_\gamma = E_\gamma \cdot \frac{v}{c}, \quad (2. \text{ kifejezés})$$

ahol c a fénysebesség, E_γ pedig a γ kvantum energiája a $v=0$ m/s esetben. Az 1. ábrán látható γ magátmenetek közül az ^{57}Fe $I_g=3/2$ és $I_a=1/2$ magspinű (impulzusmomentumú) magállapotai közötti 14,4 keV energiájú átmenetet tekintve, a $2 \cdot E_R \approx 3,8 \cdot 10^{-3}$ eV visszalökődési energia kompenzálásához a forrást körülbelül $v=80$ m/s sebességgel kellene az abszorbens felé mozgatni.

Mai ismereteink szerint a véges élettartamú állapotokra, így az atommag gerjesztett állapotaira is, egyfajta energiabizonytalanság jellemző. A tárgyalt 14,4 keV-os ^{57}Fe magátmenet esetében ez például azt jelenti, hogy a magátme-

7 R. L. Mössbauer: Z. Physik 151, 124 (1958)

net során keletkező γ -kvantum energiája bizonyos valószínűséggel eltérhet a 14,4 keV-os értéktől. Az eltérés mértéke és a megfelelő valószínűség között a γ -kvantum energiájára vonatkozó valószínűségrés-függvény teremt kapcsolatot, melyről leolvasható, hogy a γ -kvantum energiája milyen valószínűséggel esik két különböző energiaérték közé. Az atommag sugárzásos magátmenetei esetén a megfelelő valószínűségrés-függvény a *Breit-Wigner-féle*, vagy más néven *Lorentz-függvény* alakját veszi fel:

$$I(E) = \frac{\Gamma}{2\pi} \cdot \frac{1}{(E - E_0)^2 + (\Gamma/2)^2} \quad (3. \text{ kifejezés})$$

Az E , E_0 és Γ mennyiségek jelentései leolvashatóak a 3. ábráról.

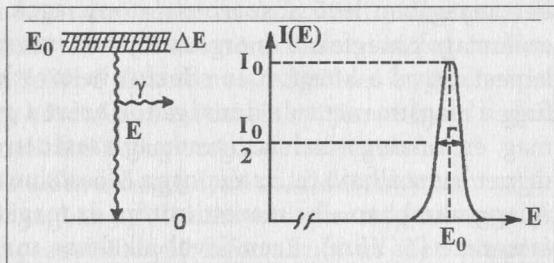
Az energiabizonytalanság abszolút mértékére jellemző Γ félértékszélesség (3. ábra) értéke magátmenetek esetében általában

$\Gamma_R \cong 10^{-7} \cdot 10^{-9}$ eV. Összehasonlítva ezt az E_R visszalökődési energia jellemzően $E_R \cong 10^{-2} \cdot 10^{-3}$ eV nagyságú értékével, láthatjuk, hogy szabad magok esetében szinte elhanyagolhatóan kis mértékű az átfedés a forrás atommagra és az abszorbens atommagra jellemző energia valószínűségrés-függvény között (4. ábra). A Γ energia-bizonytalanság tehát nem kompenzálhatja a visszalökődési effektus miatt a magrezonancia-abszorpcióhoz hiányzó energiát. Ezért a magrezonancia-abszorpció bekövetkezését elsősorban azokban az esetekben várjuk, mikor mind a forrásban, mind pedig az abszorbensben visszalökődésmentes magátmenet valósul meg ($E_R = 0$ eV).

Amennyiben a forrás az abszorbenshez képest nyugalomban van, úgy a Mössbauer-effektus bekövetkezését megíúsíthatja, ha a forrás és az abszorbens atommagot eltérő kémiai környezet (atomi elektronok, elektromosan töltött ligandumok) veszi körül. Az atommagot

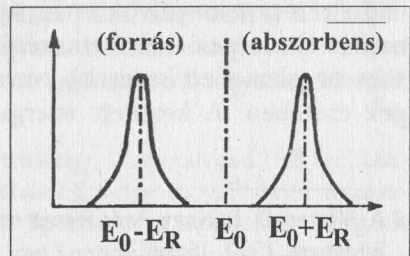
3. ábra

Sugárzásos magátmenet sematikus ábrázolása és a keletkező γ -kvantum energiáját leíró valószínűségrés-függvény



4. ábra

A visszalökődés hatása a magátmenet során keletkező γ -kvantum energiájára (a forrásban), és a magrezonancia-abszorpció bekövetkezéséhez szükséges energiára (az abszorbensben)



körülvevő töltések által az atommag helyén keltett elektromos és mágneses terek ugyanis kölcsönhatásba lépnek az atommag elektromos töltésével és mágneses momentumával, minek következtében az atommag gerjesztett energianívójára jellemző E_0 energiaérték kismértékben megváltozhat. Ha ez a változás jelentősen meghaladja a Γ félértékszélesség értékét, akkor még visszalökődés-mentes esetben sem valószínű, hogy a forrásból kilépő γ -kvantum képes az abszorbens atommagot gerjeszteni. Az is előfordulhat, hogy az atommagot érő mágneses vagy elektromos terek hatására az atommag alap- és gerjesztett állapota több különböző energiával jellemezhető állapotra hasad fel, mely állapotok mágneses kvantumszámukban vagy csak annak abszolút értékében különböznek egymástól.

A kémiai környezetnek az atommag állapotaira kifejtett hatása teszi lehetővé, hogy a visszalökődésmentes magrezonancia-abszorpciót mint hatékony spektroszkópai módszert – Mössbauer-spektroszkópia – alkalmazzuk.

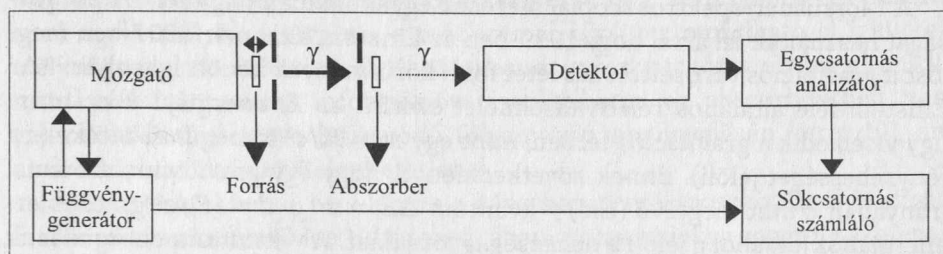
A Mössbauer-spektroszkópai mérés leggyakrabban az ún transzmissziós geometriában történik (5. ábra). A mérés célja, hogy letapogassuk az abszorber anyagában lévő abszorbens atommagok energianívóit a forrásban lévő atommagok megfelelő energianívójához, mint standard viszonyítási ponthoz képest. Mivel a Mössbauer-effektus bekövetkezésének valószínűsége erősen függ a magátmenet tulajdonságaitól, ezért a gyakorlatban csak néhány atommag, és minden alkalmas atommag esetében általában csak egyetlen magátmenet használható fel *hatékonyan* Mössbauer-spektroszkópai mérés céljára. A leggyakrabban alkalmazott izotóp- és magátmenet az ^{57}Fe mag 14,4 keV-os átmenete (2. ábra). Ezen kívül alkalmas magátmenetek találhatók a ^{151}Eu , ^{125}Te , ^{121}Sb , ^{119}Sn , ^{129}I , ^{141}Pr , ^{155}Gd , ^{161}Dy , ^{191}Ir és további ritkábban alkalmazott⁸ izotópok esetében.

A Mössbauer-mérés során az abszorbens energianívók letapogatását a forrás sebességének periodikus változtatásával érjük el. A szóba jövő sebességértékek maximumának nagyságrendje ^{57}Fe esetében általában 1..10 mm/s. Adott sebességérték mellett detektáljuk az abszorber által átengedett γ -kvantumok számát. Azon sebességeknél, melyek esetében a γ -kvantum energiájának a 2. kifejezésben foglaltak szerinti megváltozása éppen kompenzálja az abszorbens és forrás magok különböző kémia környezetének megfelelő eltérést a magnívók energiájában, az abszorberben megnő a magrezonancia-abszorpció bekövetkezésének valószínűsége. Ennek következtében e sebességek mellett kevesebb γ -kvantum jut el a detektorba mint más sebességek esetében. A keresett energiakülönbség-értékeket tehát a Mössbauer-

8 A. Vértes, D. L. Nagy: Mössbauer spectroscopy of frozen solutions, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1990. 13. old.

5. ábra

A forrás, az abszorber, és a detektor elhelyezkedése transzmissziós geometriában, és a kapcsolódó elektronika sematikus rajza



spektrumban abszorpciós csúcsok fogják jelezni a megfelelő sebességértékeknél.

Ez a spektroszkópiai kísérleti módszer lehetővé teszi a magállapotok energiaszintjeinek mérését 13-15 értékes – egyedülállóan nagy – relatív pontossággal. Ez a pontosság elegendő a magenergiaszintek megváltozásának kimutatására az atommag és a környező elektronok közötti elektromos és mágneses kölcsönhatások következtében. E kölcsönhatások viszont érzékenyen reagálnak a szilárdtestben fellépő elektromos, mágneses és geometriai struktúrák megváltozásaira, s így kézenfekvő módszert nyújtanak mind fizikai anyagszerkezeti, mind kémiai analitikai anyagvizsgálatok elvégzésére.

A Mössbauer-spektroszkópia előnye, hogy olyan roncsolásmentes vizsgálati módszer, amely a vizsgált anyagban az alkalmazott atommag *valamennyi* különböző mikroszkopikus környezetéről nyújt információt, az adott környezet előfordulási gyakoriságának megfelelő statisztikai súllyal.

Egyedülállóan nagy pontosságának és előnyeinek köszönhetően a Mössbauer-spektroszkópia alkalmazási köre igen széles.⁹ A magfizikában (pl. gerjesztett magállapotok élettartamának, magspinjének, elektromos kvadrupólus momentumának vagy mágneses momentumának meghatározása), a szilárdtestfizikában (pl. kristályszerkezet, mágneses szerkezet, elektronszerkezet, vagy rácsdinamika tanulmányozása), a kémiában (a Mössbauer-atom kémiai kötésviszonyainak, oxidációs állapotának, elektronszerkezetének tanulmányozása), a biokémiában (pl. izolált biológiai vegyületek kötéseinek, elektronszerkezetének vizsgálata, fehérjék szerkezetének tanulmányozása), a relativitáselmélet igazolására, és a biológiában is egyaránt alkalmazásra talált. Mivel a Mössbauer-spektroszkópia alkalmazási köre igen sokrétű, egyetlen kiemelt

9 N. N. Greenwood, T. C. Gibb: Mössbauer Spectroscopy, Chapman and Hall Ltd, London, 1971. A. Vértes, L. Korecz, K. Burger: Mössbauer Spectroscopy, Elsevier, Amsterdam, 1980.; Gary. J. Long (editor): Mössbauer Spectroscopy Applied to Inorganic Chemistry, Volume 1, Plenum Press, New York and London, 1984.

példa sem tudná teljes egészében bemutatni az e spektroszkópai módszerben rejlő lehetőségeket. Ezért a továbbiakban a Mössbauer-spektroszkópia alkalmazásának inkább egy egyedi példáját mutatjuk be.

A Mössbauer-spektroszkópai mérések egyedülállóan nagy relatív pontosságát használták fel arra, hogy 1959-ben az Einstein által már 1907-ben megjósolt gravitációs vöröseltolódás létét földi körülmények között igazolják.¹⁰ Az Einstein-féle általános relativitáselmélet szerint az E_γ energiájú γ -kvantum úgy viselkedik a gravitációs térben, mint egy $m = E_\gamma/c^2$ tömegű részecske (c a fénysebességet jelöli). Ennek következménye, hogy egy gravitációs erővonal irányában d utat megtevő (eső) γ -kvantum $\Delta E_\gamma = m \cdot g \cdot d = (E_\gamma/c^2)gd$ többlet-energiához jut, ahol g jelöli a nehézségi gyorsulást. A γ -kvantum energiájának megnövekedése maga után vonja a megfelelő elektromágneses hullám frekvenciájának megnövekedését is (kékeltolódás):

$$\Delta\nu = \Delta E_\gamma / h = (E_\gamma / (hc^2)) \cdot g \cdot d, \quad (4. \text{ kifejezés})$$

ahol h a Planck-állandót jelöli. A gravitációs erővonal irányával ellentétes irányban haladó γ -kvantum viszont veszít az energiájából, ezért a megfelelő elektromágneses hullám frekvenciája csökken (vöröseltolódás).

Laboratóriumi körülmények között a föld gravitációs terében a γ -kvantum energiájának relatív megváltozása kicsiny ugyan, de Pound és Rebka 1959-ben mégis sikerrel végezte el a kísérletet a Harvard egyetem 22,6 m magas tornyában, a ^{57}Fe -izotóp 14,4 keV-os magátmenetét felhasználva. A kísérlet során a forrást és az abszorbenst rendre a torony aljában, ill. tetejében helyezték el. A forrás által kibocsátott γ -kvantumnak tehát a gravitációs mező ellenében kellett feljutnia az abszorbenshez. Ezen az úton a γ -kvantum energiájának relatív csökkenése elméletileg $\Delta E_\gamma / E_\gamma \cong 2,510^{-15}$. Ennek az energiának a kompenzálásához a forrást igen kis sebességgel, 0,75 $\mu\text{m/s}$ -al kell az abszorbens felé mozgatni, azaz a sebesség megbízható mérését is ehhez hasonló pontossággal kellett elvégezni.

A kísérletileg mért, és az elméletileg megjósolt frekvenciaeltolódás hányadosára

$$\frac{\Delta\nu_{\text{kísérleti}}}{\Delta\nu_{\text{elméleti}}} = +1,05 \pm 0,10$$

adódott, azaz a γ -kvantumhoz tartozó elektromágneses hullám frekvenciájának a gravitációs tér hatására bekövetkező változása a kísérletek alapján hibán belül megfelelt az Einstein által megjósolt értéknek.

A Mössbauer-spektroszkópiának ez volt az első olyan alkalmazása, amely széles körben felhívta a különböző tudományterületek művelőinek figyelmét az e módszerben rejlő nagyszerű lehetőségekre.

10 R.V. Pound, G.A. Rebka, Jr: Phys. Rev. Lett., 4, 33 7. 1960.

Szerkezetvizsgálat szinkrotronsugárzással

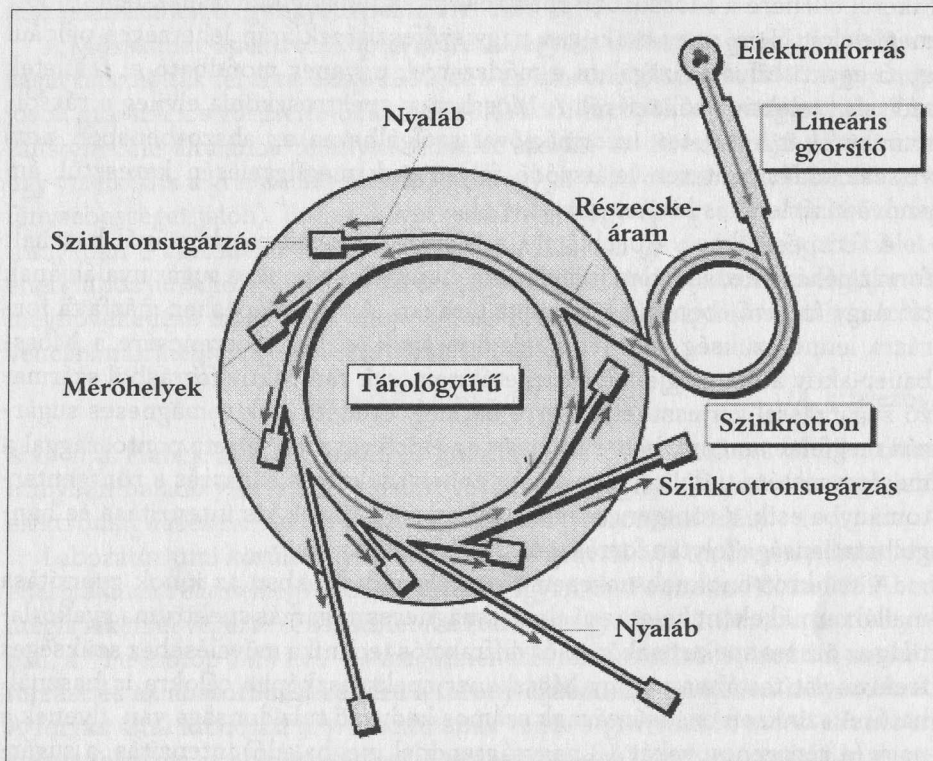
Sikerei ellenére a Mössbauer-spektroszkópia néhány kihívásnak nem tudott megfelelni. Nem, vagy csak igen nagy erőfeszítések árán lehetséges például apró egykristályok vizsgálata e módszerrel, ugyanez mondható el felületek mélység szelektív analiziséről. A Mössbauer-spektroszkópia elvileg a rácsdinamikáról is részletes információval szolgálhatna az abszorbenzben *nem* visszalökődésmentesen lejátszódó folyamatok megfigyelésén keresztül, ám ezek a kísérletek is kivitelezhetetlenek.

A fenti esetekben a problémák a Mössbauer-spektroszkópiánál használt forrás néhány kedvezőtlen tulajdonságában gyökereznek: a sugár nyalábjának túl nagy átmérőjében, túl kis intenzitásában. Az előrelépéshez másfajta forrásra lenne szükség, aminél e tulajdonságok jobbak. Szerencsére a Mössbauer-aktív atom magjának átmenetét nemcsak radioaktív forrásból származó sugárzással gerjeszthetjük: erre bármely eredetű elektromágneses sugárzás megfelel, amennyiben energiáját az előző részben jelzett pontossággal a magátmenetére tudjuk hangolni. Az ehhez szükséges sugárzás a röntgentartományba esik, a röntgensövek azonban sugárzásuk kis intenzitása és hangolhatatlansága folytán forrásként nem használhatók.

A szinkrotronoknak nevezett részecskegyorsítókban az ionok gyorsítása melléktermékeként keletkező elektromágneses sugárzás spektruma gyakorlatilag az összes spektroszkópai és diffrakciós technika műveléséhez szükséges frekvenciát tartalmazza, így Mössbauer-spektroszkópai célokra is használható. A szinkrotronsugárzásnak számos kedvező tulajdonsága van, ilyenek a nagy (a röntgensöveket 13 nagyságrenddel meghaladó) intenzitás, a sugárnyaláb kis átmérője (tipikusan néhány tized milliméterszer néhány milliméter) és teljesen polarizált volta, továbbá pulzált időszerkezete. A szinkrotronsugárzást alkalmazni vágyók azonban számtalan technikai kihívással szembesültek (újszerű detektorok, monokromátorok tervezése és építése), arról nem is beszélve, hogy tevékenységük általában zavarta a szinkrotronokat üzemeltető részecskefizikusok munkáját. A szinkrotronsugárzás előnyeinek felismerése és az ezt követő kitartó lobbizás után olyan, ún. harmadik generációs szinkrotronok épültek, melyeket már kifejezetten szinkrotronsugárzás előállítására terveztek.

A módszer tudományos hátterének ismertetését ehelyütt nem is kíséreljük meg, néhány érdekességről szeretnénk csak számot adni. Mielőtt azonban ennek rövid bemutatására rátérnénk, szeretnénk ismertetni a szinkrotronsugárzás keletkezését, majd néhány példával kívánjuk illusztrálni a szinkrotronsugárzás egyéb alkalmazásokban elért látványos sikereit. Stratégiai fontosságúnak tartjuk, hogy minél többen megismerjék, a szinkrotronok megjelenése milyen nagymértékben kitolta a spektroszkópai és diffrakciós kísérleti technikák korlátait. Különösen időszerű ez most, nem sokkal azután, hogy

Egy tipikus harmadik generációs szinkrotron felépítése



Magyarország az egyik legkorszerűbb és legnívósabb szinkrotron, az ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) társult tagja lett.

Az 6. ábrán, mely egy tipikus harmadik generációs szinkrotron felépítését mutatja, végigkövethetjük a szinkrotronsugárzás keletkezéséhez vezető utat. Először is gyorsítandó részecskékre van szükségünk, ezért egy elektronágyúból, mely hasonló a televíziónk hátuljában zümmögő katódsugárcsőhöz, elektronokat juttatunk egy lineáris gyorsítóba. A lineáris gyorsító néhány száz millió elektronvoltra (megaelektronvolt, MeV) gyorsítja ezeket, sebességük ekkor a fénysebesség 99,99994%-a. Ezután az elektronok a szinkrotronba kerülnek, ahol néhány tizedmásodperc alatt néhány százezerszer körbejárnak a többszáz méter kerületű csőkarikában, miközben az alkalmazott rádiófrekvenciás tér kb. 7 milliárd elektronvoltra (gigaelektronvolt, GeV) gyorsítja őket. Ekkor az elektron tömege már 14 000-szerese nyugalmi tömegének, tehát egy Li-atoménak felel meg, sebessége pedig a fénysebesség 99,999999997%-a. Ezeket az elektronokat kis csomagokban juttatják a több száz méter átmérőjű tárológyűrűbe. (Technikai okok miatt számos szinkrot-

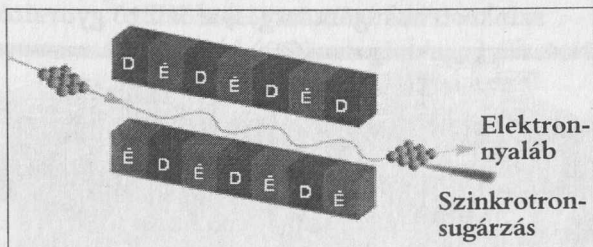
ronban elektron helyett a pozitront használják.) A tárológyűrűben mágneses egységek tartják körpályán az elektronokat, és energiavesztésüket rádiófrekvenciás térrel folyamatosan pótolják. Az ultranagy vákuum ellenére az elektronok lassan elfognak, ezért a tárológyűrűt az előbbi módon kb. 10 óránként újratöltik.

A tárológyűrűben számos speciális mágneses eszköz található szinkrotronsugárzás előállítására. Ezek azt használják ki, hogy a mágneses téren átsuhanó töltött részecskék – érintőleges irányú elektromágneses sugárzás formájában – energiát veszítenek. A mágnesek megfelelő elhelyezésével befolyásolható a szinkrotronsugárzás energiája, intenzitása, polarizációja. A 7. ábra egy ilyen bonyolultabb mágneses egység, az ún. undulátor felhasználásával illusztrálja a szinkrotronsugárzás keletkezését. Az ezen mágneses egységekben keletkező sugárnyalábot elvezetik, a megfelelő optikai elemekkel, tükrökkel, monokromátorokkal, résekkel alakítják energiáját és méreteit, majd a mérőhelyekre vezetik.

A 8. ábrán láthatjuk a grenoble-i ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) látképét, a 9. ábrán pedig ennek a tárológyűrűt és a gyorsítókat tartalmazó részletét.

7. ábra

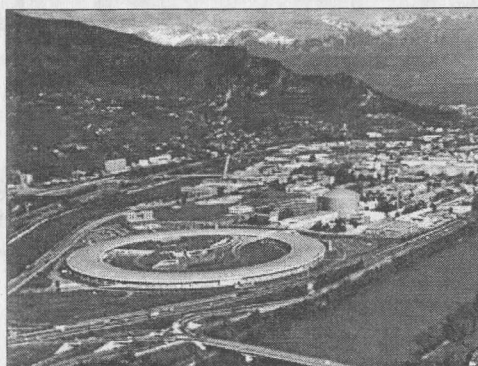
A szinkrotronsugárzás keletkezése



Mágneses téren áthaladó töltött részecskék energiát veszítenek, ami szinkrotronsugárzás formájában bocsájtódik ki

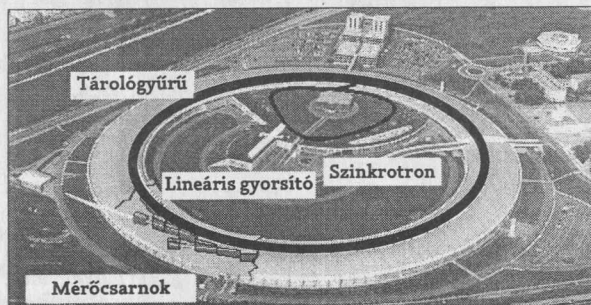
8. ábra

A harmadik generációs szinkrotronok egyik legjelentősebb képviselője, a grenoble-i ESRF látképe



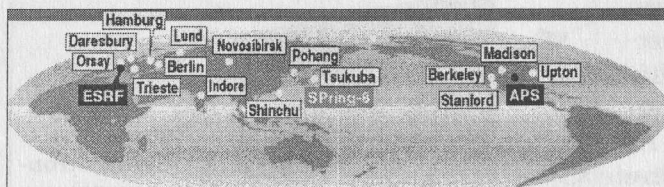
9. ábra

Az ESRF tárológyűrűje és gyorsítói



10. ábra

A világ jelentősebb, kutatási célokra szinkrotronsugárzást (is) előállító gyorsítói



11. ábra

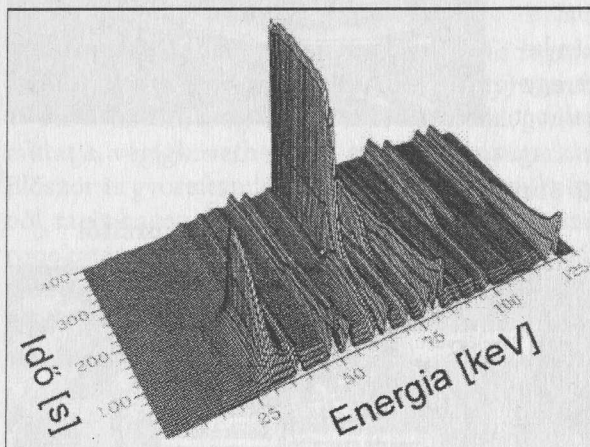
Csontritkulás tanulmányozása szinkrotronsugárzással végzett mikro-tomográfiával



A képen balról jobbra 33, 55 és 72 éves nők csontszövetéről készített felvétel látható.

12. ábra

Instabil fázis megfigyelése in situ energiadiszerzív röntgendiffrakcióval



Forgó betonkeverőben lévő portlandcement vízfelvételek időbeli lefolyását követhetjük az ábrán. A 31 keV-nél megjelenő majd eltűnő csúcs instabil köztiterméket jelez, mely kb. 150 másodperc után átalakul a stabilis hidráttá.

A 10. ábra bemutatja, hogy a világ mely részein találunk szinkrotronsugárzást alkalmazó mérőhelyeket. Ezek közül háromnak a többinél sokkalta kedvezőbbek a paraméterei: ezek a

már említett ESRF, a japán Spring-8 és az amerikai APS.

A 11. ábrán látható mikrotomográfias felvétel ezredmilliméternél is jobb felbontását a szinkrotronsugárzás nagy intenzitása és fókuszáltsága tette lehetővé. Ugyancsak a nagy intenzitás eredményeképpen készülhetett el a 12. ábrán látható időfüggő röntgendiffraktogram, mely a cement vízfelvétele során kialakult köztitermék kialakulását és átalakulását fedti fel. A nagy intenzitást és a pulzált időszerkezetet kihasználva lehetségessé vált egy biológiai eredetű rendszerben bekövetkező kémiai változásról képsorozatot készíteni, ennek három fázisát mutatja be a 13. ábra.

A magyar tudósok (Tegze Miklós és Faigel Gyula) által kifejlesztett atomi felbontású holográfia műveléséhez is jelen-

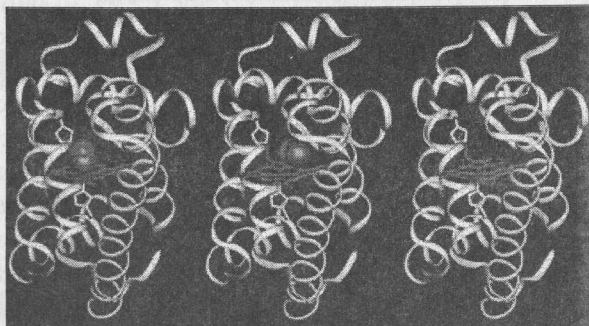
tős segítség a szinkrotronsugárzás hatalmas intenzitása. A 14. ábrán egy ilyen hologramot mutatunk be.

Végezetül a szinkrotronsugárzás Mössbauer-spektroszkópiai alkalmazásáról ejtünk néhány szót. A nyaláb nagyfokú kollimációja és nagy intenzitása lehetővé tesz olyan biológiai, anyagtudományi, stb. alkalmazásokat, melyek korábban nem voltak kivitelezhetőek. A sugárzás teljes polarizációja ideális mágneses szerkezetek vizsgálatára. Az alkalmazások pilanatnyilag az alábbi atommagokat tartalmazó anyagok vizsgálatára terjednek ki: ^{57}Fe , ^{83}Kr , ^{119}Sn , ^{151}Eu , ^{169}Tm , ^{181}Ta . A szinkrotronsugárzás energiájának hangolhatósága folytán várható, hogy a közeljövőben elérhetővé válik olyan magok vizsgálata is, melyek vizsgálatára a hagyományos Mössbauer-spektroszkópia alkalmas sugárforrás híján nem ad módot.

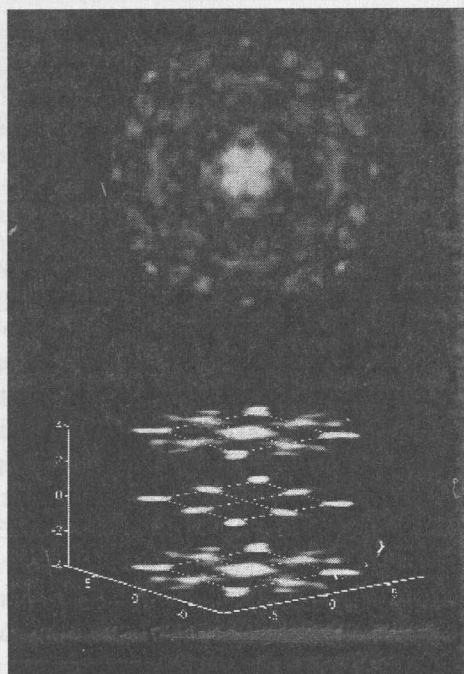
E módszereknél a mintában lévő rezonáns atommagokat szinkrotronsugárzással gerjesztjük, és általában ezek időbeli bomlását figyeljük meg a kísérlet során. Az atommag környezetének hatását a spektru-

13. ábra

Első lépések a molekuláris biológiai mozi felé
– a szénmonoxid (CO) mioglobinnal alkotott komplexének bomlása



Ultrarövid lézerpulzus hatására a komplex elbomlik, és a CO-molekula leválik a mioglobinnal. Ennek a folyamatnak a lépéseit követhetjük a szinkrotronsugárzás egy-egy „felvillanásával” készült krisztallográfiai felvételeken.

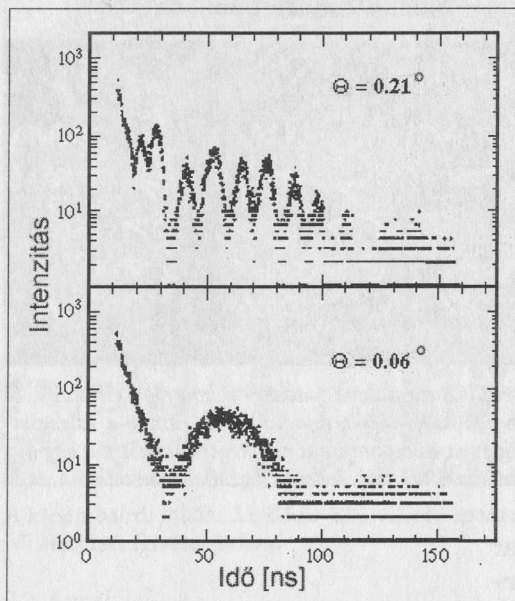


14. ábra

A SrTiO_3 holografikus képe (felül), valamint a Sr^{2+} ionok ebből rekonstruált elhelyezkedése (alul)

15. ábra

Üvegfelületre felvitt 20 nm vastag oxidált vasréteg vizsgálata szinkrotron-Mössbauer-reflektometriával (SMR)



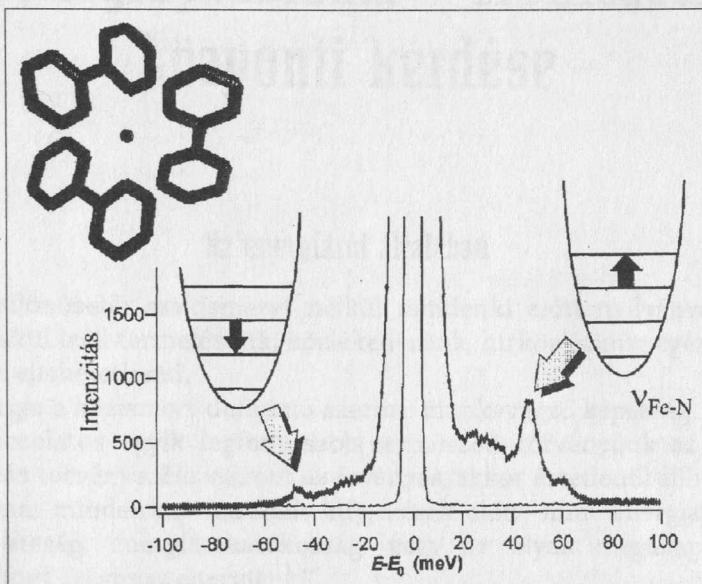
A sugárzás $0,06^\circ$ -os beesési szögnél kb. 2 nm mélyen hatol be az anyagba, így csak a minta tetején lévő 30 atomnyi rétegről hoz információt. Az ábra alján látható az ilyen körülmények között felvett spektrum, mely paramágneses fázis – valószínűleg $\text{FeO}(\text{OH})$ – jelenlétét tükrözi. A $0,21^\circ$ -os beesési szögnél a behatolási mélység kb. 20 nm, az ennek megfelelő (felső) spektrum az anyag belsejében lévő mágneses fázisra jellemző, melynek kémiai összetétele valószínűleg magnetit (Fe_3O_4).

rugalmatlanság azt jelenti, hogy a mag gerjesztésével párhuzamosan az abszorbeált foton valamely más kölcsönhatásban is részt vesz, például gerjeszti a rácsrezgéseket. Ezen kísérletekből sokat tanulhatunk a szilárdtestek rácsdinamikájáról. A módszer további érdekessége, hogy azzal kecsegtet, hogy oldott anyagok, s esetleg az oldatszerkezet vizsgálatára is alkalmazható. Utóbbi technika alkalmazásának hazai művelői az ELTE Magkémiai Tanszéke és az MTA RMKI munkatársai. A 16. ábrán a $[\text{Fe}(2,2'\text{-dipiridil})_3]^{2+}$ komplex vizes oldatának spektrumát láthatjuk, ahol az 50 meV-nál megfigyelt kisebb intenzitású csúcs elsőként mutatja, hogy oldatfázisban megjelenhetnek molekularezgések a rezonanciaszórás rugalmatlan spektrumában.

mokban időbeli oszcillációkként észleljük. Kiemelnénk e módszerek közül az úgynevezett szinkrotron-Mössbauer-reflektometriát, melynek alkalmazásában élen járnak az MTA Rézszecke- és Magfizikai Kutatóintézetének munkatársai. A módszer azon alapul, hogy súroló beesés esetén, amikor a sugárzás a minta felszínével csaknem párhuzamosan halad, a beesés szögétől függ, hogy a sugárzás milyen mélyen hatolhat be a mintába. Ezáltal a módszer kitűnő felületek és mágneses (multi)rétegek vizsgálatára. A 15. ábrán látható egy 20 nm-es vastag eloxidált vasfólia spektroma két különböző beesési szögnél, melyen a felületről és a minta belsejéről származó spektrumok igen látványosan tükrözik a kémiai minőségkülönbséget.

Szemben a Mössbauer-spektroszkópiával, a rezonáns fotonok rugalmatlan szóródásának rész kérdéseit is vizsgálhatjuk a szinkrotronsugárzás energiája hangolhatóságának és nagy intenzitásának következtében. A

**[Fe(2,2'-dipiridil)₃]²⁺ komplex
glicerines oldatának
rugalmatlan magrezonancia-szórás spektruma**



Az ábra bal felső sarkában látható a komplex vázlatos szerkezete. A jelzett csúcsok olyan molekularezgésektől származnak, amelyek során a magrezonancia-abszorpció az Fe-N nyújtási rezgés egy kvantumának létrehozásával, illetve kioltásával valósul meg.

Az e részben bemutatott képek jelentős része az ESRF honlapjáról (<http://www.esrf.com/>) származik.

A nukleáris szerkezetvizsgáló módszerek alkalmazásának nemzetközi munkamegosztásában a magyarországi fizikus és vegyész intézetekben lévő laboratóriumok fontos eredményeket értek el. Például a Mössbauer-spektroszkópia témakörben publikált dolgozatok több mint 2%-ának magyar szerzője (is) van. (A magyarok létszáma a Föld lakóinak 0,25%-a.)

A nukleáris szerkezetvizsgáló módszerek a 20. század utolsó évtizedeiben fejlődtek ki, finomodtak, tökéletesedtek. Feltehető, hogy a 21. században a természettudományok széles területén válnak hatékony rutinmódszerekké.

Az energiaprobléma – civilizációnk központi kérdése

Az energiáról általában

Minden különösebb szakismeret nélkül mindenki előtt nyilvánvaló, hogy energia nélkül leáll termelésünk, közlekedésünk, hírközlésünk: egész mai civilizációnk ellehetetlenül.

Az energia a közismert definíció szerint: munkavégző képesség. Az energiával kapcsolatos egyik legfontosabb természeti törvényünk az energiamegmaradás törvénye. Ha viszont ez érvényes, akkor értetlenül állhat az ember az olyan, mindennap használt kifejezések előtt, mint energiatermelés, energiavesztés, energiatakarékosság, vagy az olyan megállapításokkal szemben, hogy „véges az energiánk!”

A fent idézett mindennapi kifejezésekben arról van szó, hogy a számunkra hasznos, felhasználható energiából mennyi „vész el” különböző nem kívánt folyamatok, pl. súrlódás, vagy sugárzás stb. révén. Az energia tehát megmarad egy adott rendszerben, csak számunkra nem lesz teljes egészében felhasználható. Az energiatermelés is azt jelenti, hogy a rendelkezésre álló kémiai, nukleáris, napsugárzási stb. energiaforrásokból mennyit tudunk úgy felszabadítani, hogy céljainkra felhasználható legyen. Az energiánk pedig azért véges, mert a fenti energiaforrásokban általában meghatározott mennyiségű energia van felhalmozva, ill. csak bizonyos mértékig tudjuk kihasználni a rendelkezésre álló energiát (hatásfok!).

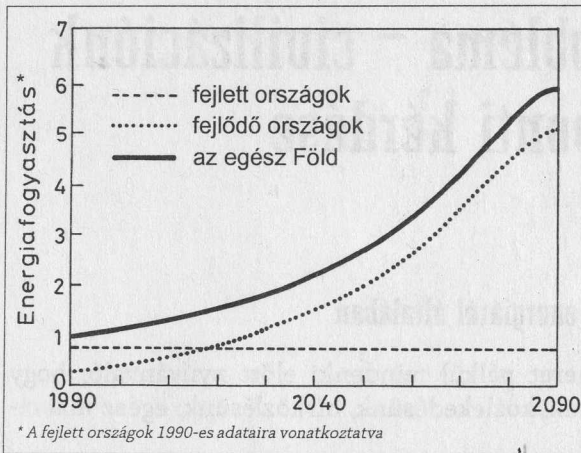
Az energiaprobléma rendkívül komplex kérdéskör. Még inkább így van ez, ha figyelembe vesszük a felhasználással kapcsolatos különféle körülményeket. Különálló problémaköröket képeznek: az *energiatermelés*, *-átalakítás*, *-átvitel*, *-elosztás*, *-tárolás*, *-takarékoság*.

A felsorolás minden bizonnyal nem teljes, és minden egyes fenti témakörben számos probléma merül fel, számos kérdést kell megoldani, nemcsak műszaki-természettudományos vonatkozásban, de gazdasági és környezetvédelmi szempontból is.

Az energiaproblémához tehát csakis interdiszciplinárisan közelíthetünk. Az előbb említett természettudományos-műszaki és gazdaságtudományi ismeret-

1. ábra

Az energiafogyasztás várható alakulása 1990-től 2090-ig



Forrás: D. R. O. Morrison „World Energy in the Next Century” 43. Pugwash konferencia anyagában

zánkban 1950 óta a villamosenergia-termelés hatásfoka kb. duplájára nőtt (17%-ról mintegy 34%-ra) és nem kétséges, hogy emögött milyen sok kutató- és fejlesztő munka van. De ha az új, alternatív energiaforrások felhasználására, az energiatakarékosság növelésére, az energiatermelés során a környezet fokozottabb védelmére, a közlekedés környezetkárosító hatásának csökkentésére és számos más hasonló problémára gondolunk – ezek megoldása is csak igen intenzív kutatások és fejlesztések révén oldható meg.

Másrészt bármennyire is tekintetbe vesszük azt, hogy az energiatakarékosság műszaki megoldásainak tökéletesedése, valamint a fogyasztók magatartásának a befolyásolása az energiaszükséglet növekedésének ütemét mennyire csökkenteni, világviszonylatban mégis az energiafogyasztás növekedésével kell számolnunk. Ezt elsősorban a fejlődő országok növekvő energiaigénye indokolja. Becslések szerint, a század végére az energiafogyasztás világviszonylatban megkétszöröződik. Bizonyos forgatókönyvek szerint még Európában is 20%-kal nő az energiafogyasztás 2020-ra, világviszonylatban pedig közel duplájára. A különböző problémák megoldásánál ezeket a várható értékeket mindenképpen figyelembe kell venni.

Jelenlegi energiaforrásaink

A fosszilis, a nukleáris és a megújuló energiaforrások. Energiaforrásainkat tekintve ma is az ún. fosszilis energiaforrások: a földgáz, a kőolaj és a szén fedezik döntő mértékben energiaszükségletünket. Ez közel 80%-ot jelent.

Ennek kb. 40%-a a kőolaj, majd a földgáz következik és azután jön a szén. Jelentős a vízenergia és a nukleáris energia hozzájárulása is. Ezek százalékaránya – hasonlóan a tűzifához – 5-6% körül mozog. Ettől nem sokkal marad el a háztartási hulladék és trágya energiaforrásként történő alkalmazása, és egyre nagyobb szükség van más, ún. alternatív, vagy megújuló forrásokra is (természetesen a vízenergia is megújuló). Az Európai Unió céljai szerint 2020-ra a megújuló energiaforrások az összenergia-szükséglet 20%-át kell, hogy fedezzék. Ugyanakkor ma – a vízenergiát nem tekintve – a többi megújuló energiaforrás kb. 2%-ot tesz ki és százalékosan mintegy évtizede stagnál.

A megújuló energiaforrások a következők: víz, szél, nap, árapály, hullám, biomassa, biogáz, bioüzemanyag, geotermikus energia.

Ezek közül a legígéretesebbnek tartják a nap, a szél, és a biomassa (ez ma elsősorban a tűzifát jelenti, de nem kizárólag azt) felhasználását.

Ismeretes, hogy a *nukleáris energiaforrásnak* két formája is van: az egyik, amely manapság felhasználásra kerül, az ún. hasadási, a másik a fúziós, amelyre vonatkozólag még folynak a kutatások, és energiatermelésre történő felhasználása ma még tulajdonképpen nem lehetséges. Ismeretes különben, hogy a hasadási nukleáris energiatermelés azon alapul, hogy bizonyos nehéz atommagok (urán, ill. más, igen nehéz atommagok, pl. plutónium) hasadása-
kor energia szabadul fel. A fúziós energiatermelés esetében ellenkezőleg: igen könnyű atommagok (elsősorban hidrogénizotópok) egyesülésekor válik szabaddá energia. Mindez az atommagok kötési energiájának a rendszám függvényében történő változásával magyarázható.

A fenti energiaforrásokat különböző szempontok szerint értékelik: a készletek, a gazdaságosság, a környezetszennyezés (kockázat) és végül a társadalmi elfogadottság szerint.

Legfontosabb energiaforrásainkból a következő időtartamokra elegendő készletek állnak rendelkezésre:

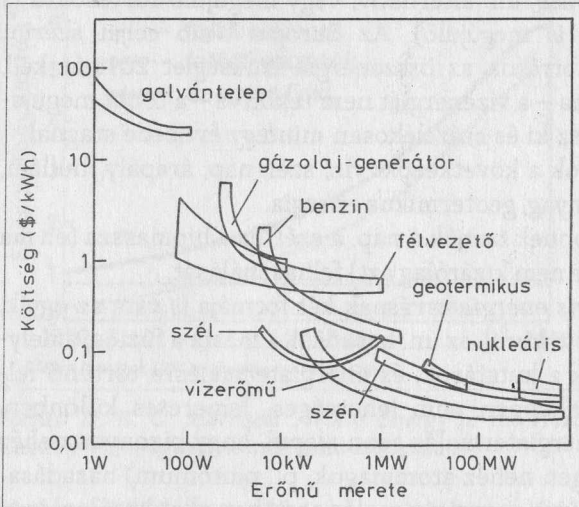
kőolaj, földgáz	néhányszor 10 év
szén	néhányszor 100 év
nukleáris (hasadási)	néhányszor 1000 év
víz	megújuló.

Különösen a kőolajjal kapcsolatban (de ez részben érvényes a földgázra is) meg kell azt is jegyezni, hogy külön problémát jelent nagyobb lelőhelyeinek koncentráltága néhány kitüntetett területre, amely – mint a közelmúltban is láttuk – komoly konfliktusok, háborúk veszélyét rejti magában.

Ami a különböző energiaforrások *gazdaságosságát* illeti, azt a 2. ábrán mutatjuk be. Látható, hogy részben átfedés van a különböző források között gazdaságosság tekintetében, részben kétségtelenül érvényesül bizonyos tendencia. Tény, hogy pl. a szilícium fotocellás napenergia-felhasználás esetében – bár folyamatosan olcsóbb és olcsóbb lesz – a segítségével előállított villamos energia ára még mindig többszöröse a ma konvencionálisan előállított villa-

2. ábra

Az elektromos energia előállításának ára az erőmű teljesítményének függvényében különböző energiaforrások esetén



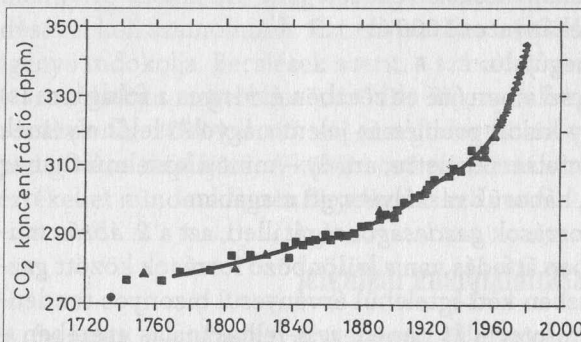
Forrás: D. R. O. Morrison „World Energy in the Next Century” 43. Pugwash konferencia anyagában

hez járul a hamuban koncentrálnódó rákkeltő anyagok szétszóródása. Sok esetben a szén lelőhelyétől függően még jelentős radioaktív sugárzási terhelés is jelentkezik a környezetre nézve.

A kockázatról szólva térjünk át a nukleáris energetikára. Itt a fő kockázati tényező a hasadási termékek, az ún. nukleáris hulladék kérdése. Megfelelő geológiai rétegekben, megfelelő tartályokban és ellenőrzés mellett, ezek az anyagok sok ezer évig biztonságosan tárolhatók. Ugyanakkor azonban más szempontból nyugtalanító, hogy bizonyos radioaktív anyagok hosszú felezési idejük miatt messze jövő generációk számára tehertételként, veszélyforrásként jelentke-

3. ábra

A CO₂ koncentrációjának változása Földünk atmoszférájában 1730-tól a legutóbbi időkig



Forrás: D. R. O. Morrison „World Energy in the Next Century” 43. Pugwash konferencia anyagában

mos energia árának. Ennél is nagyobb baj, hogy egész élettartama alatt éppenhogy visszaadja az előállításánál befektetett energiát.

A környezetszennyezés és a kockázatok tekintetében a fosszilis energiaforrásoknál jól ismert, hogy felhasználásuk során mindegyikükönél szén-dioxid keletkezik, amely a melegházhatás révén részben kiszámítható, részben még ma is kiszámíthatatlan káros hatással jár Földünkre és lakóira nézve (hőmérséklet-emelkedés: tengerparti területek elöntése, éghajlati övek eltolódása, szárazság). Eh-

hez járul a hamuban koncentrálnódó rákkeltő anyagok szétszóródása. Sok esetben a szén lelőhelyétől függően még jelentős radioaktív sugárzási terhelés is jelentkezik a környezetre nézve.

1. táblázat

1 kWóra villamos energia ára (Ft) az erőművekben 1996-ban

Pécsi Szénerőmű	11,33
Bakonyi Szénerőmű	10,07
Vértesi Szénerőmű	7,66
Tiszai Olajerőmű	6,29
Mátrai Szénerőmű	4,97
Duna Menti Olajerőmű	4,67
Paksi Atomerőmű	3,38*

* Az árban minden kapcsolódó költség, így a majdani leszerelés költsége is bele van számítva.

Marx György: *Energia és emberiség. Debreceni Szemle, 1997/2. 163-171.*

sebb kockázatot jelentenek a társadalomra. (Igaz viszont, hogy a nukleáris energetika terjedése magában hordozza a nukleáris fegyverek fokozottabb elterjedésének a veszélyét is, amelyet politikai és műszaki-tudományos módszerek kombinált alkalmazásával lehet megfelelően ellensúlyozni.)

Az energetikai kérdésekkel kapcsolatban az energiaforrások szempontjából nemcsak az objektív műszaki-természettudományos értékelés számít, hanem a *társadalmi elfogadottság* is. Ebben pedig irracionális szempontok is szerepet játszanak, sőt nemegyszer különböző, a háttérben meghúzódó gazdasági érdekek is. Igen nagy a tömegtájékoztatási eszközök felelőssége. Mindenesetre társadalmi elfogadottság tekintetében nagyok a különbségek a különböző országok között. Franciaország, ahol a villamosenergia 80%-át nyerik nukleáris forrásból (vagy Japán), össze sem hasonlítható Dániával vagy Ausztriával.

Megemlítjük még, hogy az *etikai* megfontolásokat sem lehet figyelmen kívül hagyni: utalunk itt pl. a következő generációkkal szembeni felelősségünkre.

Végül a fentiek ismeretében le kell szögeznünk: *energiatermelés kockázatok nélkül nem lehetséges*, bármilyen forrást is használunk egyébként. A kockázatok nagyon különbözőek lehetnek ugyanál a forrásnál is az adott helyi körülményeknek megfelelően. Amikor tehát döntünk arról, hogy adott helyzetben milyen energiaforrást használjunk, mindenkor figyelembe kell venni ezeket a körülményeket (pl. hogy van-e lehetőség és konkrétan milyen vízerőmű építésére: lassú vagy gyors folyású a folyó vagy hogy a szén milyen radioaktív tartalmú stb.), annak tudatában, hogy bizonyos kockázatot mindenképpen vállalni kell. Természetesen kötelességünk törekedni a kockázat minimalizálására. A társadalmat azonban mindenkor objektíven tájékoztatni kell, beleértve a bizonytalanságokat is.

nek. Érdekes viszont megemlíteni, hogy pl. Franciaországban a háztartási és egyéb szemét lakosonként és évenként 2,5 tonna, kb. ugyanennyi az ipari szemét, a radioaktív hulladék pedig 1 kg, és ebből a hosszú felezési idejű radioaktív anyag 10 g. Egyébként normál üzemenben a nukleáris erőművek a környezet szempontjából a legtisztábbaknak tekinthetők, gyakorlatilag nincs káros kibocsátásuk a környezetbe. A balesetek, különösen a csernobili, joggal megrázták ugyan a társadalmat, azonban ha a tényleges áldozatokat és veszélyeket objektíven összehasonlítjuk az egyéb energiaforrások által keltett veszélyekkel, ill. áldozatokkal, ki-

A jövő lehetőségei

A jelenleg használatos energiaforrásokat, ill. az energiagazdálkodást illetően a három legfontosabb követelmény a következő: a hatásfok növelése, energiatakarékosság, környezeti ártalmak csökkentése.

Mindhárom vonatkozásban jelentős tartalékok és komoly lehetőségek vannak. Az energiatermelésnél például reális esély van a 60%-os hatásfok elérésére, de különböző kombinált felhasználásokat alkalmazva a 80-90% sem lehetetlen. Nem kétséges, hogy nagyok a tartalékaink az energiatakarékosság terén is (gondoljunk csak a közlekedésre: korszerű tömegközlekedés vagy individuális autózás), a környezetkárosítás mérsékléséhez pedig sok figyelem és további kutatás, műszaki fejlesztés szükséges. Itt említjük meg a szupravezetésben rejlő lehetőségeket az elektromos energia veszteségmentes továbbítására, amely szintén a jövő reményei közé tartozik.

Hol várhatók lényeges áttörések az energiaprobléma megoldásában?

Mindenekelőtt a nukleáris energia terén. Több vonatkozásban is folynak olyan kutatások a *hasadási nukleáris energiatermelés területén*, amelyek bizonyos reményekre jogosítanak. Itt elsősorban nem arra gondolunk, hogy az atomerőművek biztonsága a kutatások és fejlesztések következtében állandóan növekszik, azaz egyre elhanyagolhatóbb az atomerőművektől eredő, nagyarányú radioaktív sugárszennyeződés veszélye, hanem arról van szó, hogy a *nukleáris hulladékokkal kapcsolatosan egészen új eljárások* kutatása folyik. Nukleáris módszerekkel (elsősorban gyorsítók, vagy speciális reaktortípusok alkalmazásával) a hosszú élettartamú radioaktív izotópokat rövid élettartamúakra alakítják át. Nem kell különösebben indokolni, hogy ez milyen nagy jelentőségű a tárolási problémák megoldása szempontjából, vagyis abból a szempontból, hogy milyen terhelést hagyunk utódainkra.

Egy másik terület, ahol intenzív kutatómunka folyik, a *gyorsítóval kombinált energiatermelő reaktorok* megvalósítása. Itt arról van szó, hogy olyan izotópok esetében is (tórium), amelyekkel egyébként nem lehet önfenntartó nukleáris energiatermelő folyamatot létrehozni, megfelelő körülmények mellett és gyorsító bekapcsolásával láncreakció jöhet létre. Ez a megoldás két szempontból is jelentős lenne. Először is a gyorsító kikapcsolásával azonnal leáll a folyamat, azaz a reaktor ún. „megszaladásáról” nem lehet szó. Másrészről új izotópok kapcsolhatók be az energiatermelésbe, és így messze kitolódik a nukleáris energia időbeni felhasználása, mivel nő a megfelelő nyersanyag-mennyiség.

A *fúziós energiatermelés* fizikai alapjairól már egy-két mondat erejéig szövegtünk az előbbieken. A fúziós reaktor megvalósítása az emberiség egyik nagy reménysége, mivel a szennyezés és a biztonság szempontjából is lényegesen előnyösebb, mint a hasadásos reaktor. Nyersanyag tekintetében gyakorlatilag kimeríthetetlenek a források, hiszen lényegében a tengerekben

és óceánokban található hidrogén-izotópok felhasználásáról van szó. A technikai nehézségek azonban igen nagyok, hiszen mintegy 100 millió °C-os hőmérsékletet kell elérni a megfelelő sűrűségű hidrogéngáz-keverékben 1 sec időtartamig. Ma ezek a kísérletek jórészt nemzetközi együttműködésben folynak, így pl. az EU, az USA, Oroszország és Japán közös erőfeszítésével is, de ma még meglehetősen bizonytalan, hogy mikor sikerül önfenntartó fúziós folyamatot megvalósítani.

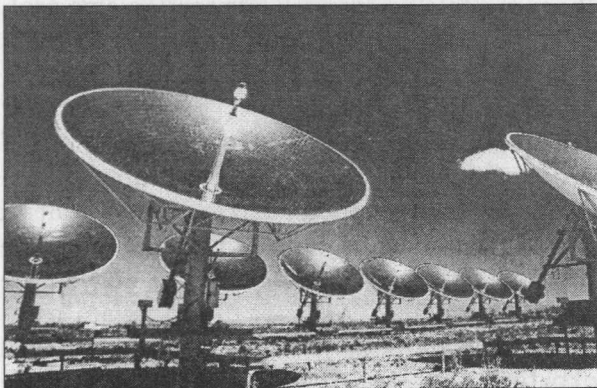
Megújuló energiaforrások

Számos olyan energiaforrás létezik, amelyek eddig is rendelkezésre álltak, de különböző okokból általában ezeket egyáltalán nem, vagy alig használta fel az emberiség. Ezek közül talán az ún. *vízi energiaforrások* a kivételek, amelyekből azonban meglehetősen kevés tartalék, eddig ki nem használt ilyen forrás van – főleg Európában.

Próbáljuk nagyon vázlatosan végignézni a többi ilyen megújuló forrással kapcsolatos jelenlegi helyzetet. Vegyük elsősorban a *napenergia* közvetlen felhasználását. A napenergia mindenütt rendelkezésre áll, azonban nem mindenütt egyenlő mértékben, és ugyanakkor ún. „híg” energiaforrás: 10 km²-re esik kb. 1 GW (109 W). Felhasználásának két fő módja van, az egyik a gyűjtőtükrök segítségével történő napenergia-felhasználás, ill. az energiatermelés. Számos ilyen kísérleti berendezés működik már a világon, pl. a franciaországi Odeilloban (1000 kW). A másik típusú napenergia-felhasználás fotoelektromos cellákkal történhet.

4. ábra

Naperőmű gyűjtőtükrökkel (ún. termikus naperőmű) White Cliffs-ben



Forrás: New South Wales, Australia – J. Andonze: *Energy – a fair deal for all. The UNESCO Courier*, May 1998. 8–13.

Az előbbieknél a probléma a gyűjtőtükrök hatalmas mérete, a tükrök elhomályosodása, és az, hogy a változó napenergia miatt (éjszaka, évszakok, felhősödés, stb.) meg kell oldani a nagy teljesítményű energiaakkumulálás kérdését. A fotoelektromos megoldásnál a probléma a cellák magas ára, amely azonban évről évre csökken, viszont valószínű, hogy ezzel a megoldással valóban nagy telje-

sítményt nem sikerül elérni, inkább csak magánházak, vagy különösen az elektromos hálózattól távol eső építmények (p. műholdak is) elektromos ellátására alkalmas.

A *szélergia* felhasználására komoly előrelépések történtek. Ez az az energiaforma, amelyet korábban nagymértékben felhasznált az emberiség (hajózás, malmok), de később mintha elfelejtkezett volna róla. Ma Európa élen jár ebben a technikában, a világon működő ilyen berendezések 90%-a Európában kerül felhasználásra (érdekes megemlíteni, hogy ezek 50%-át viszont a technikailag magasan fejlett kis ország, Dánia állítja elő). Ettől azonban nem remélhető, hogy nagymértékben hozzájárulhatna az emberiség energiaszükségleteinek kielégítéséhez – legalábbis egyelőre. Alkalmazhatósága nagymértékben függ a meteorológiai tényezőktől, ugyanakkor zajproblémák és egyéb környezetvédelmi ártalmak is felmerülnek alkalmazásával kapcsolatban.

Az árapály mint energiaforrás szintén felhasználható. Ismeretes viszont, hogy az árapály igen különböző az egyes tengerek, ill. tengerpartok esetében. Nem kétséges, az emberiség ez esetben sem engedheti meg magának, hogy ahol erre esély van, ne használja fel ezt az energiaforrást is. Komoly kísérletek történtek már ebben az irányban. Érdekes megemlíteni a Franciaországban a Rance folyó torkolatánál épült ilyen erőművet, amely 240 MW teljesítményű.

Ugyancsak energiaforrást jelent a *tengerek és óceánok hullámozása*, amely szintén nagyon különböző a földrajzi helyszínektől függően. Mindenesetre erre vonatkozólag is vannak már ígéretes kísérleti felhasználások.

Biomassza, biogáz, bioüzemanyag. A biomassza egyelőre főleg a tűzifát jelenti, amely nem elhanyagolható mértékben kerül felhasználásra és előnyös oldalai mellett több problémát is felvet (pl. az őserdők irtása). Vannak még ebben a kategóriában olyan energiaforrások, amelyekre vonatkozólag már napjainkban, túl a kísérletek első szakaszán, komoly felhasználásra is sor került. Itt szó van a városi hulladék megfelelő kezelése – fermentáció – révén termelt biogázzal, de szó van arról is, hogy megfelelő növények kifejezetten erre szolgáló termelésével állítsanak elő olyan akár gáznemű, akár folyadék állapotú üzemanyagot, amelyet energiatermelésre, ill. főleg a közlekedésben üzemanyagként fel lehet használni.

A *geotermikus energiaforrás* is a jövő lehetőségei közé számítható. A föld belseje magas hőmérsékletével kézenfekvő energiaforrást jelent. Ennek konkrét felhasználása különböző módon, ill. forrásokból történhet, itt csak utalunk pl. a vulkántevékenységekben vagy a gejzírekben rejlő lehetőségekre. Hazánkban különösen fontos lehet ez az energiaforrás, hiszen ismeretes, hogy az Alföld mennyire gazdag hévizekben. Ezeket általában gyógyfürdő céljára használják fel. Nagyon fontos lenne, hogy hazánk úttörő szerepet játsszon ezen energiaforrás energetikai célokra történő hasznosításában.

Új lehetőségek a közlekedésben. Külön kell szólnunk – fontossága miatt – a közlekedés helyzetéről az energiaforrások, ill. felhasználás szempontjából.

Igen előrehaladtak a kísérletek az elektromos autó megvalósítására. Ebben az esetben az elektromos energia segítségével vízből hidrogént nyerünk és a hidrogént egyesítve oxigénnel kitűnő motort kapunk. A bomlástermék pedig az elképzelhető legkörnyezetkímélőbb: víz. Ilyen repülő is készült már, és Európában készen van a megfelelő autó prototípusa, amely 120 km-es sebességgel 500 km hatótávolságú. Problémát jelent azonban többek között a motor és tartozékai nagy helyigénye, továbbá bizonyos robbanásveszély, hiszen itt tulajdonképpen durranógázzról van szó.

Hogyan tovább?

Nem kétséges, hogy az egész energiaprobléma megoldásának a kulcsa a *ku*tatás. Kutatni kell az energiatakarékosabb, környezetkímélőbb, biztonságosabb megoldásokat, főleg a megújuló energiaforrásokat. E nélkül nem remélhetjük az energiaprobléma megoldását hosszabb távon.

Ugyanakkor tisztán kell látni, hogy a közeljövőben az alternatív energiaforrások nem tudják fedezni az emberiség energiaszükségletét. Sem a fosszilis, sem a nukleáris energiaforrásokat nem tudjuk nélkülözni belátható időn belül. A politikának, a médiának és a társadalomtudományoknak is meg kell tenniük a magukét azért, hogy a társadalmat ne előítéletek, babonák, és indokolatlan, irracionális félelmek irányítsák.

Kettős szorításban: a magyar atomenergetika esélyei és lehetőségei

Az atomkor békés szülötte, a nukleáris energetika, az energiaprobléma¹ világméretű megoldásának nagy lehetőségeként tűnt fel. A hatvanas-hetvenes években az atomerőművek sokaságát fejlesztették ki, építették fel a fejlett világban. Az új iparág lendületét a Three Mile Island atomerőmű közismert balesete és a csernobili katasztrófa törte meg, de a recesszió kialakulásában a gazdasági tényezők, az energiapiac fejlődése is közrejátszottak. A katasztrófák után az elmúlt két évtizedben az iparág – a műszaki biztonság és a biztonsági kultúra tekintetében egyaránt – képes volt újítani, de megújulni nem. Ma a tárgyilagos vizsgálódás számára igazolni lehet, hogy az atomerőművek kockázata rendkívül kicsi, s azt az atomerőművek adta gazdasági és környezetvédelmi haszon érdekében érdemes vállalni, mégis az atomenergetika a fejlett világ egy részében – legalábbis átmenetileg – megtűrt, perspektíva nélküli technológiává vált.

Az atomenergetika az egykori szocialista tömb országokban az általánosan kedvezőtlen helyzethez képest is rosszabb, s különös helyzetben van. A csernobili katasztrófa után, de még inkább a szocialista politikai-gazdasági modell összeomlásával, az atomenergetika a társadalmi és szakmai kritika keresztútjába került. A nemzetközi nyomás, a hazai közvélemény, az újszülött zöld mozgalmak, a politikai rendszer változása, az integrációs ambíciók egy önvizsgálati, öngazolási folyamatot gerjesztettek. A szakemberek, az üzemeltetők gondossága, felelősségtudata és tenniakarása eredményeként ez a folyamat tudatos és átgondolt biztonság-növelő programhoz vezetett Magyarországon. A nemzetközi szervezetek kiemelt támogatási célként kezelték a szovjet tervezésű blokkok biztonságának növelését, s a saját piacukon alulfoglalkoztatott jeles nyugati cégek, intézmények nagy ambícióval kapcsolódtak be a biztonság-növelő projektekbe.

Az elmúlt tíz évben a hazai atomenergetika – a fent említett tényezők hatására, főleg a belső, szakmai motivációk, törekvések hatása alatt – a kedvezőt-

1 A problémakör megismeréséhez vö. Vajda György Energiapolitika c. kötete (MTA, Bp., 2001).

len körülmények ellenére is jelentősen fejlődött. Ez a fejlődés mindenekelőtt a paksi atomerőmű biztonságát szolgálta, szolgálja. A műszaki biztonság növelése és a biztonság tudatos üzemeltetői kultúra fejlesztése része a paksi atomerőmű múltjának és jelenének, s továbbvitele a hazai atomenergetika jövőbeli esélyeit is meghatározza.

Ma szembe kell nézni egy újabb kihívással. Az atomenergetika mint a nehézipar és a hadiipar gyermeke fejlődését mindenütt a világon állami preferenciák segítették és egy olyan gazdasági környezet, amely jól tűrte a villamosenergia-szolgáltatók piaci kivételezettségét. Ez a helyzet alapvetően megváltozott a villamosenergia-piac világméretű felszabadításával. Az atomerőműveknek a közeljövőben „rendes” termelőüzemekké, üzleti vállalkozásokká kell válniuk, amelyek viselkedését a gazdaság többi szereplőjéhez hasonló piaci elvek és elvárások igazgatják. A versenyképesség, a költség-haszon optimalizálás, az elégséges piaci hányad megszerzése ugyanolyan létkérdéssé válik az atomerőművek, így a paksi atomerőmű számára is, mint bármely profitorientált piaci szereplőnek.

Nyilvánvaló, hogy a paksi atomerőműnek nincs esélye a jövőre, ha nem tesszük meg mindent az erőmű biztonságáért, de még így sem lesz rá szükség, ha nem tudjuk megnyerni a fogyasztókat a piacon. Az ezredfordulón kilátásainkat két tényező határozza meg: meg kell felelni a folyamatosan szigorodó biztonsági követelményeknek, az üzemeltetőre-engedélyesre háruló kötelezettségeknek, és ezzel együtt versenyképesnek kell maradni.

Ebben a kettős szorításban kell a közeljövőben helyt állnunk, hogy a 21. századra esélyt teremtsünk a hazai atomenergetika számára. A változásokat, az évezred küszöbén prognosztizálható új körülményeket világos elképzelésekkel, átgondolt válaszokkal, stratégiával kell várni. Ennek alapja az, hogy a paksi a világ egyik legsikeresebben üzemeltetett atomerőműve, amely a tudományos invenció és innováció révén nem egy letűnt kor műszaki rekvizituma, hanem a jelen korszerű elvárásainak megfelelő, még hosszú évekig biztonságosan működtethető, tiszta forrása a villamos energiának.

A paksi atomerőmű fő jellemzői

A paksi atomerőmű négy blokkja vízzel moderált, vízzel hűtött úgynevezett VVER-440/V213 típusú energetikai reaktorokkal működik. A típust a hetvenes években fejlesztették ki a Szovjetunióban. A fejlesztés tükrözte a szovjet ipar sajátosságait: a gépgyártás minőségét, az elektronika és a számítástechnika relatív elmaradottságát, s a túlméretezett műszaki megoldásokat, ami meghatározza a blokkok tényleges biztonságát. A VVER-440/V213 típusra egyfelől a robosztus, könnyen tartható, neutronfizikai értelemben vett kis, stabil teljesítményeloszlású, alacsony teljesítménysűrűségű aktív zóna,

másfelől pedig a nagy hűtőközeg-térfogat és sima, időben elnyújtott tranzienek, operátori hibára kevésbé érzékeny remanens hőelvitel jellemző. A VVER-440/V213 reaktortípus már konténmentben helyezkedik el, ami a zónában lévő nagyaktivitású anyag és a környezet közötti (negyedik!) utolsó gát. Ez a konténment kivételében nem, de funkcióját tekintve ugyanolyan, mint a nyugati, nyomottvízes PWR reaktoroké.

Az atomerőmű blokkjainak párhuzamos kapcsolására 1982 és 1987 között került sor. A reaktorok hőteljesítménye 1375 MW. A blokkok villamos teljesítménye – a szekunderkörü rekonstrukciók megvalósításának megfelelően – eltérő, 460, illetve 470 MW. A tervezettnél magasabb villamos teljesítmény a reaktorok változatlan, terv szerinti hőteljesítménye, és a biztonsági korlátok betartása mellett, a szekunderkörü korszerűsítéseknek, a hatásfok-növelésnek köszönhető. A termikus hatásfok az eredeti terv szerinti 32% helyett ma 33,5% felett van. Az évi villamosenergia-termelés közel 14000 GWh, ami az ország termelésének csaknem 40%-a, s ez ma az országban legolcsóbban termelt villamos energia. Ez a négy blokk biztosítja az ország számára az energia-hordozók egészséges sokféleségét, diverzitását. A blokkok teljes élettartamra vetített teljesítménykihasználási tényezője 83,7–87,4% között van. A rendelkezésre állás és a teljesítménykihasználás szempontjából két blokk a világ legjobb tíz, és minden blokk a világ legjobb 25 atomerőművi blokkja között van.

A sikeres üzemeltetést nem csak a termelési mutatók, hanem a biztonsági statisztika is jól igazolja. Az automatikus védelmi működések száma évente és blokkonként kevesebb, mint egy. A blokkok üzeme közben adódó események a nemzetközileg elfogadott besorolás szerint eleddig a biztonság szempontjából irrelevánsak voltak.

Az atomerőmű rendkívül tiszta, környezetkímélő. A folyékony radioaktív kibocsátások mennyisége összes béta aktivitásban mérve a hatósági korlát 5%-a, a légnemű kibocsátások mennyisége radioaktív nemesgázok tekintetében a hatósági korlát kb. 5%-a, egyebekben pedig a korlát egy százalékát sem éri el. Lényegesebb azonban az, hogy a paksi atomerőmű üzemeltetése révén a CO₂-emisszió az országban legalább 24%-kal, évi 14 millió tonnával kevesebb annál, mintha a teljes termelés fosszilis energiahordozók eltüzelésével történne.

Hangsúlyozni kell, hogy a paksi atomerőmű biztonsága és kitűnő üzemviteli eredményei mögött ott van a hazai műszaki-tudományos és ipari infrastruktúra kiváló teljesítménye.

Új válasz a szakmai és társadalmi kritikára

A hatvanas-hetvenes években a társadalmi környezet, a szocialista fejlődési modell kedvező volt a paksi atomerőmű létesítéséhez. A társadalmi befogadás nem volt kérdés, a társadalmi kritikának nem volt helye, a vezetők, a

szakemberek, a mérnökök jövőt építő felelőssége pótolni látszott azt. A csernobili katasztrófa és a szocialista politikai-gazdasági rendszer összeomlása után az atomenergetika a hazai és nemzetközi társadalmi és szakmai kritika kereszttüzebe került.

A társadalmi és szakmai kritikára a hazai atomenergetika intézményei és a paksi atomerőmű egyértelműen reagált, a válasz a nyíltság és az önvizsgálat volt. Ennek eredményeképpen a lakosság 73%-a elfogadja, támogatja a paksi atomerőmű üzemeltetését.

Az önvizsgálat eredményei is közismertek. A bizalmatlanság és a hitelvesztés arra készítette Magyarországot, hogy a villamosenergia-termelés, sőt a nemzetgazdaság szempontjából meghatározó szerepet játszó atomerőmű biztonságát igazolja. A felkészülés és az első biztonsági elemzések az atomerőmű által is támogatott országos (OKKFT, tárcaközi és OMFB) kutatás-fejlesztési programok keretében történtek még a nyolcvanas években, amelyek jól illeszkedtek a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) programjaihoz. A hazai műszaki-tudományos intézmények koordinált munkája eredményeként, az AGNES (*Advanced Generalised New Evaluation of Safety*) program keretében, 1994-ben elkészült a paksi VVER-440/V213 típusú blokkok biztonságának első, komplex kritikai értékelése. Ez kritériumait és módszertanát tekintve megfelelt a fejlett világ elvárásainak, és mint önkritikus vállalkozás legitímálta a paksi atomerőművet a hazai és a nemzetközi szakmai és laikus közvélemény előtt.

A kilencvenes években elvégzett biztonsági felülvizsgálatok rendszertechnikai elemzésekre, determinisztikus üzemzavari- és baleseti szimulációra, valószínűségi kockázatelemzésre és a súlyos balesetek elemzésére támaszkodtak. Az elemzések a technológiából eredő belső kockázati forrásokra, az emberi hibákra, valamint a külső és belső környezeti hatásokkal (földrengés, repülőgép-rázuhanás, nagyenergiájú csőtörések) szembeni biztonságra terjedtek ki. Ma a biztonsági elemzés már elkészült minden blokkállapotra és minden kockázati forrásra, így a tüzesetekre és elárasztásokra is.

Érdeemes elidőzni a biztonsági elemzések egyik eszközénél, a valószínűségi biztonsági elemzésnél. Az atomerőművek kockázatának objektív, helyesebben, a lehetőségek szerint a leginkább objektív értékelési módszere a valószínűségi kockázatelemzés (a nálunk is elterjedt angol betűszóval a PSA). Leegyszerűsítve a definíciókat, az 1. szintű PSA azt mutatja meg, hogy az összes lehetséges, a biztonság szempontjából fontos meghibásodást, eseményt figyelembe véve milyen valószínűséggel következik be a reaktor aktív zónájának komoly sérülését eredményező, azaz a radioaktív kibocsátás veszélyével járó zónaolvadás. A 2. szintű PSA annak valószínűségét és mértékét határozza meg, hogy a lehetséges balesetek következtében a környezetbe aktivitás kerül ki, a 3. szintű PSA pedig a kibocsátások egészségügyi konzekvenciáit értékeli. Az 1. szintű PSA kitüntetett fontosságú, hiszen ez a másik két szint alapja, s

együttal (eltekintve a konténment megkerülésével járó balesetektől) megadja a környezetet érintő esemény bekövetkezésének felső valószínűségi korlátját. A valószínűségi alapú, kockázatorientált megközelítés egyre növekvő szerepet kap az üzemeltetői, sőt a hatósági gyakorlatban és a kockázat társadalmi kommunikációjában. A fejlett világban szinte minden atomerőművi blokkra létezik 1. szintű PSA. Hazánkban a PSA alkalmazását megalapozó kutatások és a módszertan adaptációja a nyolcvanas években történt meg, 1994-től pedig a PSA-elemzések a paksi atomerőmű biztonsági elemzésének szerves részét képezik. A PSA-elemzések azt is megmutatják és számszerűsítik, hogy milyen kezdeti események és meghibásodások a dominánsak a zónaolvadás kialakulásában, azaz hol és hogyan kell beavatkozni, hogy a lehető leghatékonyabban növeljük a biztonságot.

A kilencvenes években végzett biztonsági felülvizsgálatok eredményeként ismertté váltak a VVER-440/V213 típusú blokkok hátrányos tulajdonságai, biztonsági hiányai. A technológiai eredetű kockázati forrásokra a blokkok zónaolvadási gyakorisága néhányszor 10^{-4} /év értékre adódott, ami lényegében megfelelt a paksi blokkok tervezése idején, illetve a nyolcvanas évek elején még elfogadható biztonsági szintnek. Az atomerőművet gyakorlatilag nem tervezték külső környezeti hatásokra (pl. földrengésre), és a belső kockázati forrásokkal szembeni védettsége sem kielégítő (pl. nagyenergiájú csőtörések), a berendezések minősítése pedig nem követte a nyugati gyakorlatot. Kiderült, hogy néhány fontos műszaki intézkedés, biztonságnövelő átalakítás végrehajtásával a zónaolvadás gyakorisága a belső technológiai kockázati forrásokat tekintve egy nagyságrenddel csökkenthető. Ennek érdekében az atomerőmű biztonságnövelő programot indított, amely lényegében a reaktorból történő hőelvitel védettségét, működéskéességét javítja. E program eredményeként mára az említett zónaolvadási gyakoriság $7 \cdot 10^{-5}$ /év értékre csökkent, s így a típus előnyös tulajdonságai is egyre jobban érvényesülnek. A telephely szeizmicitásának újraértékelése megadta az erőmű biztonsága szempontjából mértékadó, 1/10000 év gyakoriságú földrengés jellemzőit. A mai követelmények szerint az atomerőmű biztonsági szempontból fontos szerkezeteinek és berendezéseinek a 0,25 g maximális vízszintes talajgyorsulást kiváltó földrengés esetén is biztosítani kell a reaktor leállítását, lehűtését és a remanens hő elvitelét, valamint a dóziskorlátok betartását. Mivel az atomerőmű tervezésekor a telephely szeizmicitását a jelenlegi értékeléshez viszonyítva csaknem egy nagyságrenddel alábecsülték, átfogó programot kellett indítani az atomerőmű földrengésállóságának felülvizsgálatára és növelésére.

A paksi atomerőmű célja, hogy a fent jelzett biztonságnövelő programot 2002. végére megvalósítsa, s így a zónaolvadás gyakoriságát – a belső kockázati forrásokat és a földrengést tekintve – 10^{-5} /év körüli értékre csökkentse (százezer év alatt egyszer várható zónaolvadás, környezetet érintő kibocsátás ennél kisebb gyakoriságú). Ezzel a csaknem 300 millió dolláros programmal

teljesülnek az üzemeltethetőség alapvető, biztonsági feltételei, az atomerőmű biztonságával szemben megfogalmazott nemzetközi szakmai (NAÜ-) és EU-elvárások is, amelynek alapelveit még az 1992. évi müncheni G7 csúcs határozta meg. A csatlakozás egyik feltételeként elvárt paksi biztonságnövelési programot az EU fórumai mindeddig elismerték, szakmai szempontból pedig ki kell emelni a WENRA, a nyugat-európai országok nukleáris hatóságai szervezetének pozitív értékelését.

A biztonságnövelő program párosul egy modernizációs, rekonstrukciós programmal is, amelynek természetesen biztonsági kihatásai is vannak. 2002-re a paksi atomerőmű – a VVER atomerőművek közül elsőként – korszerű, szabadon programozható reaktorvédelemmel fog rendelkezni a Siemens Teleperm-XS rendszerének bázisán. A rekonstrukció egy blokkon 1999-ben sikeresen megtörtént, s évente egy újabb blokkal folytatódik. A másik komplex hatású rekonstrukció a 2000-ben befejeződött kondenzátorcsere, ami – mivel a kondenzátorcsövek rozsdamentes acélból készültek – lehetővé teszi a gőzfejlesztőt kímélő, magas pH-jú szekunder körüli vízüzem bevezetését. Ez előfeltétele annak, hogy a meglévő, egyébként nehezen cserélhető gőzfejlesztőkkel erőmű-élettartamot hosszabbítsunk.

Összehasonlítva a VVER-440/V213 típusú paksi blokkok zónaolvadási gyakoriságát pl. az ismert s reprezentatívnak tekinthető USA-adatokkal megállapíthatjuk, hogy a belső, a technológiából eredő kockázati forrásokra már ma, a 2002. végére ütemezett biztonságnövelő program eredményeként pedig összességében, minden kockázati forrás együttes hatását tekintve a paksi blokkok biztonsága a nyugati PWR-ek átlagos biztonsági színvonalán lesz.

Az atomerőmű biztonsága azonban a mi felfogásunkban nem statikus, új tudományos ismeretek, üzemeltetési tapasztalatok az új évezredben is a biztonság új aspektusait tárják fel, új feladatok megoldására kell felkészülnünk, amiről még a későbbiekben szólunk.

Új kihívás: a versenyképesség

A biztonságnövelő intézkedések kontextusában kell szólni az atomenergetika versenyképességét általában, illetve a paksi blokkok gazdaságos üzemeltetését konkrétan is érintő tényezőkről.

A biztonságnak, a minőségnek, a specifikus, csak az atomenergetikára jellemző szigornak megvan az ára. Az igen kis valószínűségű események által okozott rendkívüli terhekre, mint pl. a tízezer év alatt egyszer előforduló földrengésre, a primerköri csővezeték törésére, nagyenergiájú csőtörésekre és repeszekre való tervezés jelentősen megnövelte az atomerőművek tervezési, létesítési költségeit. A nyolcvanas évekre megszigorodó követelmények miatt csak a rendkívüli külső hatásokra való tervezés országtól, telephelytől függő-

en 6-17%-kal növelte az atomerőmű-létesítési költségeket. Az 1967–1974 közötti időszakhoz hasonlítva a nyolcvanas-kilencvenes évekre az atomerőmű tervezés-létesítés mérnökóra igénye megtízszereződött (az egymillió mérnökórával szemben több mint tízmillió mérnökóra áll), ami egy átlagos blokk esetében mintegy 15%-os költségnövekedést eredményezett. Ez részben magyarázható azzal, hogy a tervezés a nyolcvanas évekre sokkal részletesebbé, számításokkal, elemzésekkel megalapozottabbá vált, ám a növekedést javarészt a tervezés-létesítés során alkalmazott független ellenőrzések, kontrollszámítások, az eltérések formális dokumentálása és kezelése stb. okozta. A berendezések speciális minősítése, ami az atomerőművi alkalmazás feltételévé vált a nyolcvanas években, újabb, mintegy 20%-os költségnövekedéshez vezetett. Mindezek nem csak az új blokkok beruházási költségeit, a létesítés esélyeit befolyásolják, hanem rávilágítanak arra, hogy milyen volumenű munkát kell elvégezni a paksi atomerőmű biztonságnövelő programja során, amelynek célja a földrengésvédelem megoldása, a tervezési üzemzavarokkal szembeni biztonság javítása, a berendezések újraminősítése a nukleáris biztonsági követelmények szerint, valamint arra is, hogy ezt a munkát milyen műszaki igényességgel és minőségbiztosítás mellett kell végezni. Nyilvánvaló az is, hogy a jövő biztonságnövelő intézkedései is rendkívül költségesek lesznek, még akkor is, ha a paksi blokkok biztonságának szintre hozása 2002 végéig, a most folyó programmal megtörténik.

Míg a versenytársakat csak fenyegeti, addig a paksi atomerőmű költségeit már ma is terheli a környezethasználat és a hulladékelhelyezés megoldásának költsége. A vízhasználatért, az üzem alatt keletkezett és az erőmű leszereléséből származó radioaktív hulladék elhelyezésének megoldásáért, a kiégett fűtőelemek átmeneti kezeléséért és a végleges tárolás megoldásáért évente befizetett tízmilliárd forint jelentősen befolyásolja az atomerőműben megtermelt villamos energia árát.

Az ország energiaellátásának biztonsága, a rövid távú, negatív politikai zavaroktól való megvédése érdekében az atomerőmű két évre elegendő biztonsági és stratégiai üzemanyag-tartalék készzésére kötelezett. Ilyen mértékű felelősség és ilyen költség sem terheli a versenytársakat. Hangsúlyozni kell, hogy más energiahordozó esetében nem is oldható meg az ilyen mértékű stratégiai tartalék-készítés, csak a nukleáris üzemanyag esetében, ez az atomerőmű egyik kétségbenvonhatatlan előnye.

Ezek a körülmények, az atomerőmű üzemeltetőjére-engedélyesére háruló kötelezettségek jelentősen meghatározzák az atomerőmű versenyképességét, ami az elkövetkező egy-két évtized központi kérdése lesz.

Az új század elején a fejlett világ villamosenergia-iparában, s az integráció következtében hazánkban is, a villamosenergia-piac átrendeződése és a versenymechanizmusok hatása okozza a legdrámaibb változást. Az államilag irányított monopóliumra épülő villamosenergia-ellátás idején az árképzés gaz-

daságpolitikai és szociális megfontolások alapján történt. Ezzel szemben a liberalizált villamosenergia-piac a legjobb, legolcsóbb termelőket preferálja, s a tőke a nyereséges villamosenergia-termelő vállalkozások felé fordul. Ma az USA atomerőműveinek kétharmadánál a villamosenergia-termelés változó költsége 0,02 USD/kWh, ami megegyezik az USA-átlaggal (az 1998. évi átlagos piaci ár 0,067 USD/kWh). A liberalizálódó európai piacon a villamos energia tőzsdei ára kb. 4-6 Ft/kWh. Ezeket az áradatokat óvatosan kell kezelni, de a várakozások szerint a villamos energia ára csökken, és az elkövetkező két évtizedben tartósan alacsony marad. A fejlett országokban s hazánkban a villamosenergia-igény igen mérsékelt növekedése nem nyújt majd nagy fejlődési lehetőséget. A hazánkban jelentős tényezőként értékelt erőműlejtés okán lesznek ugyan fejlesztések, de nem várhatók látványos erőműépítési projektek. Az MVM Rt. 1999-ben lezajlott kapacitás-pályázata azt mutatta, hogy új erőmű létesítése 7 Ft/kWh alatti ár esetén reális. A fosszilis energiahordozók árának moderált növekedése aligha változtatja meg a piaci erőviszonyokat, s nem várható, hogy a környezetvédelmi megszorításoknak számottevő hatása lesz a fosszilis erőművek versenyképességére.

Ebben a környezetben kell a paksi atomerőmű versenyképességét növelni, piaci részesedését megőrizni. Erre bizonyos korlátok között van lehetőség. Mindenekelőtt szemléletmódot kell váltani. A korábbi gazdasági környezet alig inspirálta az üzemeltetőt a költségtakarékos gazdálkodásra. A műszaki intézkedések tervezésénél, de az üzemeltetési, karbantartási gyakorlat kialakításánál is egyfajta maximalizmus, a szakmai tökéletesség megvalósítása volt a fő hajtóerő, aminek leginkább a műszaki megvalósíthatóság szabott korlátot. A jövőben az általános pénzügyi-gazdasági technikák alkalmazása, a költségelemzések, a megtérülés vizsgálata a döntések elengedhetetlen feltétele lesz, legyen szó az üzemeltetés, a karbantartás, vagy a biztonság-megbízhatóság javítását szolgáló intézkedésekről. Bizonyos tabukat is le kell rombolni: még a biztonság növelését szolgáló módosítások esetében is a költségtakarékos megvalósítására kell törekedni, s az alapvető biztonsági követelményeken túl az elképzelhető és lehetséges biztonsági szint elérésénél, a már tolerálható kockázat csökkentésénél olyan ésszerűségi elveket célszerű követni, mint pl. az ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*). Ez a nukleáris biztonsági hatóság attitűdjének, munkamódszerének megváltozását is feltételezi. Kitüntetett szerepe lesz a valószínűségi módszerekkel támogatott, kockázatorientált (*risk-informed, performance-based*) hatósági módszereknek. Példaként említhetjük, hogy az USA nukleáris hatósága, az NRC az alapvető nukleáris biztonsági követelmények kockázatalapú átdolgozásához fogott. Jó példa a tabuk lerombolására az első biztonsági osztályba sorolt csővezetékek ellenőrzésének racionalizálása, amit már több üzemeltetői csoport (pl. a Westinghouse) is előkészített, s amihez a PSA-eredmények adták az alapot, igazolva, hogy a korábbi felfogásban meghatározónak tekintett csőtörések nem domináns for-

rásai a zónaolvadás kockázatának. A karbantartási rutinok újragondolása, a túlzott, meg nem térülő karbantartások, felújítások visszafogása, a kockázatorientált megelőző karbantartási és felülvizsgálati technikák alkalmazása komoly eredményt hozhat. A paksi atomerőmű versenyképessége a fenti, kritikus technikákon kívül számos egyszerűbb eszközzel is javítható, mint például a vállalkozók, beszállítók versenyeztetése, az üzem közbeni karbantartás lehetőségének kihasználása, a karbantartás-tervezés és -előkészítés továbbfejlesztése. Hangsúlyozni kell, hogy a piaci verseny nem nyerhető meg elkötelezett, hozzáértő üzemeltető, karbantartó és műszaki szakembergárda és felkészült műszaki-tudományos és ipari háttér nélkül.

A versenyképességet meghatározó műszaki, üzemeltetési és karbantartási színvonalnövelésének hagyományai vannak a paksi atomerőműben. A versenyképesség egyik eleme a rendelkezésre állás, ami a műszaki intézkedések sokaságának, illetve a karbantartás-szervezés javításának köszönhetően érte el a már említett magas szintet. A hatásfok javítását eredményező kondenzátor- és turbina-rekonstrukciónak, a korszerű töltettervezésnek, a kiégetési stratégiák megújításának egyaránt jelentős hatása van a versenyképességre. Az üzemanyagfelhasználás javításának köszönhetően a kiégetési mélység, azaz az egységnyi üzemanyagból kinyert energia mennyisége mára 37 MWnap/kgU, ami 15%-kal több, mint az üzemidő elején, s a 4 éves kiégetési ciklus bevezetésével 42 MWnap/kgU értékre fog nőni.

A cél világos, a költségek csökkenésének követni kell az általános európai trendeket, hogy az atomerőmű az integráció után is megőrizhesse a jelenlegi piaci pozícióját. Erre egy rövidtávú programmal készül fel, aminek nem annyira az előirányzott költségcsökkenés a lényege, hanem az atomerőmű korszerűen gazdálkodó céggé való átalakítása.

Könnyen belátható, hogy piaci körülmények között a gazdálkodás sikere egyúttal biztonsági kérdés is, hiszen csak a gazdaságilag sikeres erőműnek van módja, fedezete a biztonsági problémák megoldására, a szükséges mértékű karbantartásra, felújításokra, rekonstrukciókra. Ezen a ponton tehát nyilvánvaló, hogy a versenyképesség a biztonságra kedvezően hat vissza. A nemzetközi tapasztalat azt mutatja, hogy a biztonság szempontjából legjobbnak ítélt blokkok piaci pozíciói, rendelkezésre állása, versenyképessége a legjobb.

A közeljövő stratégiája

Az a célunk, hogy a magyar nukleáris energetikai ipar fennmaradjon, és a nukleáris energia a jövő évszázad egyik tiszta forrása lehessen a hazai villamosenergia-termelés számára. A továbbélés alapja csak a paksi atomerőmű lehet, annak biztonsága, megbízhatósága, jelenlegi versenyképessége, nem-

zetközi jó híre és hazai elfogadottsága, mivel új blokk létesítése a közeljövőben aligha képzelhető el. Ennek oka az engedélyezés körülményesége, az igen hosszú projekt-előkészítés és építkezési időszak, az atomenergetikával szemben megkülönböztetett szigorúságú biztonsági és környezetvédelmi követelmények, a mérsékelt társadalmi támogatottság (ma 29%), a befektetői kockázatok, amelyek együttesen magas beruházási költségekhez és magas energiaárakhoz vezetnek. Az atomerőmű pozitívumai, a normálüzemben elhanyagolható környezeti hatások, a 90% körüli kihasználhatóság, a hosszú (60 év) élettartam, az üzemanyag stratégiai készletezésének lehetősége stb. nem tudnak érvényesülni ebben a környezetben.

Nyilvánvaló, hogy e cél elérése érdekében a legfontosabb teendőnk továbbra is a paksi blokkok biztonságának növelése. Ennek menete, ahogy arról már szoltunk, 2002. végéig már meghatározott, s teljesíti az EU elvárásait. A 2002 utáni időszak súlypontjában egyrészt a 2. szintű PSA elkészítése és az ebből eredő további biztonságnövelő intézkedések kidolgozása, megvalósítása áll. Ezzel szoros kapcsolatban van a konténment visszatartó funkciójának ellenőrzése és javítása, mindenekelőtt a szivárgási hányad csökkentése. Fontos feladat lesz a balesetkezelési eljárások, technikák kidolgozása, bevezetése. Ennek első lépéseként már elkészült és hamarosan bevezetjük az állapotorientált kezelési utasítások rendszerét.

Az atomerőműnek versenyképes alternatívának kell maradni, ahogy arról már szoltunk.

Biztosítani kell a paksi blokkokon az élettartamnövelés lehetőségét. Az önköltség által vezérelt piaci rendszerben a meglévő kapacitás minél jobb és minél további kihasználása a legcélszerűbb magatartás, még akkor is, ha a továbbüzemelés (műszaki, biztonsági, illetve jogi-engedélyezési) feltételeit igen nehéz teljesíteni. Ebben az összefüggésben fontos műszaki-gazdasági kérdés lesz majd a rekonstrukciók célszerű ütemezése, a nem cserélhető berendezések, komponensek élettartamának és a biztonságos üzemeltethetőség határának megállapítása. Reális cél a paksi blokkok élettartamának húsz évvel való meghosszabbítása.

Lehetőség van a blokkteljesítmény további növelésére is, immáron a reaktor teljesítményének fokozásával. Ez is a versenyképesség növelésének egyik, a paksihoz sokban hasonló finnországi loviisa-i blokkokon már sikerrel alkalmazott módja. A paksi atomerőműben a szekunderköri korszerűsítésekkel, a kondenzátor-rekonstrukció és a turbina retrofit eredményeként, a blokkok villamos teljesítménye már eléri a 470 MW-ot. A finnországi példa azt mutatja, hogy – kihasználva a VVER-440/V213 reaktor tartalékait, kedvező tulajdonságait, alacsony teljesítménysűrűségét – a reaktor-hőteljesítmény biztonságosan mintegy 9%-kal növelhető. A paksi reaktorok teljesítményének biztonságosan megvalósítható akár 5%-os növelése egy kisebb erőműnyi, közel 100 MW többletkapacitást eredményezhet. A most lezajló kondenzátor-

rekonstrukció és turbina retrofit ehhez a teljesítmény-fokozáshoz is megadja a szekunder oldali feltételeket.

Komoly lehetőségek rejlenek még, különösen egy meghosszabbított élet-tartamú erőművet tekintve, az üzemanyag-gazdálkodásban, nagyobb kiégetést, kedvezőbb zónaparamétereket eredményező, következőképp relative olcsóbb üzemanyag alkalmazásában.

Az atomerőmű üzemeltetése nem függetleníthető a kiégett üzemanyag és a radioaktív hulladék problémájától. Ez külön stúdiumot érdemelne, itt csak a legfontosabb aspektusait érintjük. A kiégett üzemanyag átmeneti tárolása a telephelyen lévő tárolóban 50 évre megoldott. Ma a világon intenzív kutató-fejlesztő munka folyik a kiégett üzemanyag optimális kezelésének, illetve a nagyaktivitású hulladék végleges elhelyezésének megoldására. Ennek meglesz az eredménye, ezért ma a világon mindenütt a kivárás stratégiáját követik. Ezzel a kérdéskörrel megfelelő szinten foglalkoznak hazánkban is. A kis- és közepes aktivitású radioaktív hulladék végleges elhelyezését a világon technikailag megoldottnak tekintik. A hazai tároló telephelyének kijelöléséig, illetve a tároló elkészültéig a paksi atomerőműnek meg kell oldani a hulladék üzemi területen való kezelését és átmeneti tárolását. Ez is a közeljövő egyik fő feladata. Távlatra tekintve fel kell készülni a meghosszabbított élettartamukat is lefutott blokkok leállítására és leszerelésére.

A 21. század esélyei

A fentiekben vázolt, mintegy húsz évre szóló program, stratégia csak időleges túlélési taktikának tekinthető a 21. század időskáláján. Ez a túlélési taktika jellemző általában a fejlett világ atomenergetikájára a következő két évtizedben, s Ázsia a világ egyedüli térsége, ahol a közeljövőben az atomerőművi kapacitás bővülése várható. Az atomerőmű-tulajdonosok a versenyképesen üzemeltethető atomerőművi kapacitásaikat a tervezett élettartamon túl, összességében 60 évig, üzemeltetni akarják mindenütt, ahol ezt a politikai környezet lehetővé teszi. Ezt általában segíti a működő atomerőművek kielégítő társadalmi elfogadottsága. Végeredményben azonban a működő atomerőművek száma az évszázad első két évtizedében csökken. Ennek a túlélési taktikának van egy kétségtelen eredménye, a túlélés maga, de vannak belátható hátrányai is. Bár az élettartam-növelés előfeltétele a biztonságnövelés, nyilvánvaló, hogy a biztonságnövelés technikai lehetőségei nem korlátlanok, a javító szándék előbb-utóbb beleütközik a húsz-harminc évvel ezelőtt készült tervek koncepcionális és műszaki korlátjaiba. A biztonságnak, a megbízhatóságnak minőségileg új szintjére csak koncepcionálisan új megoldások alkalmazásával lehet eljutni, ahogy az a már megtervezett inherens módon biztonságos új típusok esetében már látható.

Meggyőződésünk szerint a 21. század ennél több szerepet ad az atomenergetikának, s ahogy az atomenergetika szerepét a hőskornak számító ötvenes-hatvanas években túlértékelték, úgy ma – helytelenül és remélhetőleg csak átmenetileg – alulbecsülik azt. Ezt most is, mint 1955-ben, az atomenergia békés felhasználásának szentelt első világkonferencia idején, a globális fejlődés perspektívájában lehet megítélni és megérteni.

A korábbi években gyakran festettek apokaliptikus képet az energiahiánnyal küszködő jövő társadalmáról, a fosszilis energiahordozók elapadásáról. Mára mindez túlzásnak bizonyult. Ma a világ energiaszükségletére, energiatermelésére vonatkozó prognózisok (*UNDP Energy and Atmosphere Programme, European Commission, International Energy Agency, World Energy Council, US Department of Energy* stb. tanulmányai) főleg a század első felét tekintve igen visszafogottak, bár meglehetősen szórnak. Nincs mód az egyes energiaprognózisok bemutatására, még azoknak a nemzetközi és nemzeti programoknak a felsorolása, áttekintése is meghaladná e dolgozat terjedelmét, amelyek a világ energiaszükségletének és termelésének alakulásával, annak gazdasági, szociális és környezetvédelmi konzekvenciáival foglalkoznak. Itt csak a főbb tendenciákra hivatkozunk. Eszerint 2050-re várhatóan 10 milliárd felett lesz a világ lakossága, a primerenergia-felhasználása minimum megduplázódik, a kb. 8,4 Gto (gigatonna olaj ekvivalens) értékről kb. 19,8 Gto-ra. A villamosenergia-termelés a mai háromszorosára nőhet. A CO₂-emisszió – lévén a fosszilis energiahordozók hányada kb. 70% marad – közel megduplázódik, főleg a fejlődő országok energiafelhasználása miatt, s a mai kb. 23,7 Gt-ról 33,7 Gt-ra növekedik. Ez ellentmond mindazoknak a törekvéseknek, amelyek a földi környezet, az atmoszféra, a jövő nemzedékek életminősége védelmére irányulnak. Látható, a globális fejlődés az energiaszükséglet új, globális problémáktól mentes kielégítését követeli meg: a fenntartható fejlődés növekvő energiafelhasználással jár, de az energiafelhasználás mai módja nem fenntartható.

A prognózisok nem az energiahordozók hiányával, hiszen a fosszilis, a megújuló és a hasadóanyag-potenciál jelentős, nem is az árak növekedésével, hanem a felhasználás konzekvenciáival sokkolnak.

A villamosenergia-termelés adja a teljes antropogén CO₂-emisszió egyharmadát, könnyen belátható tehát, hogy a liberalizált villamosenergia-piac sem teszi szükségtelemmé a rendszerszintű stratégiákat. Az energiapiac és benne a villamosenergia-ipar a globális környezeti problémák miatt az állami, sőt nemzetközi szabályozás színtere marad, pl. az Európai Unió Kiotói Konferencia utáni stratégiája a villamosenergia-iparágban a megújuló energiaforrások alkalmazását, az energia racionális felhasználását preferálja, és adóztatni kívánja a CO₂-kibocsátókat.

A konvencionális energetika fejlesztésével, mindenekelőtt a határfok növelésével már eddig is komoly eredmények születtek a CO₂-emisszió relatív

csökkentésében, s a környezetkímélő, magas hatásfokú technikák jövőbeli elterjedésével a helyzet kétségkívül javul. A hatásfok-növelésnek azonban gyakorlati és elvi korlátai vannak.

A megújuló energiaforrások széleskörű alkalmazása, a zöld energia alkalmazásának sikere még kérdéses. Az USA, az EU által kiemelten támogatott kutatások eredményeitől függ, hogy a megújuló energiaforrások kívánt mértékű felhasználása műszakilag megvalósítható és gazdaságilag racionális lesz-e. Ezért a megújuló energiahasznosításának prognózisai 2050-re nagyon szórónak, néhány százaléktól az 50%-ig a primerenergia-mérlegben. Érthető és elfogadható azonban az a kitüntetett szerep, amit a megújuló forrásoknak szánunk az új évezredben. A tudományos kutatás a nem szenciklusú technológiák kifejlesztését is lehetővé teheti.

Ma a primer energia felhasználásának hatásfoka globálisan nem több 37%-nál, s ha a termodinamika második tétele miatti veszteséget is figyelembe vesszük, akkor a fejlett ipari országok energiarendszerének hatásfoka kisebb, mint 10%. A várakozások szerint a fejlett világban az elkövetkező húsz évben 25-35%-os, a fejlődő országokban 40%-os hatásfokjavulás várható. A legegyszerűbb példánál maradva: amíg a legközönségesebb villamos eszköz, az izzólámpa hatásfoka mindössze 1%, széles tere van az energiafelhasználás racionalizálásának és a takarékoságnak.

Tételezzük fel minden jó szándékú törekvés sikerét, és még ekkor is azt az eredményt kapjuk, hogy a CO₂-emisszió csak úgy maradhat 2050-ben a mai szinten, ha az emissziómentes (nukleáris és megújuló) energiafelhasználás aránya legalább 50% lesz a primerenergia-mérlegben. Legyen bár a megújuló energia felhasználása a mai kb. 8%-kal szemben akár 40%-nyi, akkor is szükség lesz a CO₂-emisszió szinten tartásához a nukleáris energia alkalmazásának továbbfejlesztésére. Az optimizmusra azonban nincs sok ok. Ahogy azt a 2020-ig készült USA prognózisok is mutatják, a villamosenergia-termelésben a leállított atomerőművek helyét nem a megújuló kapacitások, hanem a gazdasági racionalitás okán, a konvencionális erőművek foglalják el a CO₂-emisszió növekedése ellenére. Hasonló tendenciáktól lehet tartani Európában is.

Zárszó

Az atomkor, amely alatt sajnálatos módon leginkább az atomfegyverek és a hidegháború időszakát értjük, és nem annak a hallatlan technológiai fejlődésnek korszakát, ami azt valójában jellemezte, a mai közvélekedésben egy letűnt korszaka a 20. századnak. A 20. század technológiái, amelyek meghatározzák a civilizált világ életét, mint a villamos energia széles körű alkalmazása, a modern vegyipar, a motorizált közlekedés, s napjainkban az informatika a társadalom sokkal nagyobb megértésével, szimpátiájával, befogadó

készségével találkoztak, mint az atomenergetika. A hagyományos energetika és a megújuló források felhasználása behozhatatlannak látszó, történelmi előnyben van az atomenergetikával szemben. A tűzgyújtás egyidős az emberrel. A víz, a szél erejének megértése, a Nap melegének elfogadása (különösebb megértés nélkül, s anélkül, hogy belegondolnánk annak nukleáris eredetébe) mind természetesebb az ember számára, mint a csak bombában, vagy az atomerőművek bonyolult technológia-rendszereiben felszabadítható nukleáris energia. A biztonság igazolása is rendkívül nehéz, hiszen senki sem törődik azzal, hogy a Three Mile Island-i, a csernobili vagy a tokai balesetnek mennyi is volt a valószínűsége, miután már bekövetkezett. A tárgyilagos és nem kevés hozzáértést igénylő értékelés azonban azt igazolja, hogy az atomerőművek biztonságos és gazdaságos üzemeltetésének, a radioaktív hulladék végleges elhelyezésének technikai feltételei rendelkezésre állnak, s a tudomány fejlődése minőségileg új technológiai megoldásokat is kínálhat, mint pl. a transzmutáció alkalmazása a nagy aktivitású hulladék ártalmatlantítására.

Rövid távon és kisebb régiókat, országokat tekintve nehezen prognosztizálható az atomenergetika jövője. A globális hatások mellett érvényesülnek lokális adottságok és regionális hatások is, más és más fejlődési pálya várható Franciaországban és Dániában, más az USA-ban, Japánban, Indiában vagy Kínában. Ilyen komplex hatások szabják meg majd a magyar energetika fejlődését is. Az azonban elvitathatatlan, hogy a világot nyomasztó, a 20. századtól megörökölt nagy problémák megoldásához szükséges műszaki-gazdasági fejlődés olyan technológiákra épülhet, amelyek maguk nem okoznak újabb globális problémákat, olyan forrásokra, mint a nukleáris energia, amelynek felhasználásánál a mai technikai eszközökkel a környezeti káros hatások kockázata ellenőrizhetően rendkívül alacsony szinten tartható.

A nukleáris energia felhasználásának jövője annak a társadalmi felismeréstől és elismeréstől függ, hogy a hatékony környezetkímélő energiatermelés nem valósítható meg atomerőművek nélkül. A jövő szempontjából fontos tehát a hazai atomenergetika itt bemutatott stratégiájának sikere, a paksi blokkok biztonságának növelése, az élettartam szükség és célszerűség szerinti meghosszabbítása, a versenyképesség növelése. A legnagyobb kihívás az új évezredben azonban az új atomerőművi blokkok létesítése, különösen, ha a meglévő blokkok leállítása időszerűvé válik. A paksi atomerőmű üzemi tapasztalatai teljes mértékben igazolják, hogy lelkiismeretes, felkészült és a biztonságért elkötelezett üzemeltető kezében az atomerőmű a legtisztább villamosenergia-forrás, ökológiai és ökonómiai szempontból egyaránt a legjobb alternatíva a jövő civilizációja számára.

Nukleáris technika a 21. században

A rosszul gombolt mellényt újra ki kell gombolni.

DEÁK FERENC

Eisenhower elnök 1953-ban mondta el *Atomok a békéért* című emlékezetes beszédét, amelyben kijelentette, hogy „semmilyen merész elképzelés nem tűnik lehetetlennek”. A nukleáris technikában ez volt az eufória korszaka, amelynek szellemét legjobban az indai *Babha* szavai jellemzik: „A legdrágább energia a meg nem termelt energia.” Töretlennek hitték a növekedés lendületét, és a fejlődésben jelentős szerepet szántak az atomenergiának. A helyzet 50 év alatt alaposan megváltozott. Ma is sok embernek van véleménye az atomenergiáról, de ezek nagyon különbözők: „fejlesszük gyorsan”, „fejlesszük lassan”, „állítsuk le a fejlesztést”, „szereljük le az atomerőműveket”, és számos, ezekhez hasonló jelszó hangzik el. *Robert Schakne*, a CBS televíziós riporterének a szavai: „Ideális világban egy ilyen széles körű vita műszaki kérdésekről szólna semleges felek között. A valóságos világban a nukleáris vita a szent háború vérrokona. Találunk benne igazhívókat, szenvedélyeket, mitológiákat, ördögöket és intoleranciát az igaz hittől való elhajlással szemben. Ebben a légkörben mindenki címkét visel: pronukleáris, antinukleáris, hitetlen és hívő. Semlegesek nincsenek megengedve.” Bizony, bizony, rosszul van ez a mellény begombolva, ideje hát, hogy megpróbáljuk újragombolni.

Amikor a „nukleáris” jelző valamilyen összefüggésben elhangzik, többnyire az atomenergiára gondolunk – szerencsére egyre inkább csak annak békés alkalmazására. Ennek a kis írásnak nem véletlenül „nukleáris technika” a címe, ugyanis sokkal többről van szó: a magfizikai módszerek mindennapi életünk szerves részévé váltak, bár ennek nem mindig vagyunk tudatában. A problémák azonban még ebben a tágabb értelemben is elsősorban nem műszaki, hanem emberi természetűek. Egyre inkább tudati, erkölcsi és gazdasági kérdések dominálnak. Mindenekelőtt eszünkbe jut a globális felmelegedés, amely kétszeresen is csapdajelenség. A csapdába nem csak a sugárzó energia, hanem az emberiség is beleesett.

A melegház csapdája

Majdnem pontosan száz éve, hogy *Camille Flammarion* francia csillagász 1893-ban publikálta *A világ vége* című regényét. Egy nap – írta – az emberek vissza fognak térni „az örök éjszakába”, aminek egyik lehetséges forgatókönyve a következő volt: „a hőmérséklet jelentősen emelkedni fog”, és az emberiség „belepusztul a hőségbe és a szárazságba”. Azóta e vízióknak több változata látott napvilágot. Nemrég mosolyra fakasztó formában jelent meg újra: „Találmányaikkal tönkreteszik az éghajlatot.” Ma viszont nagyon komoly a klimatológusok figyelmeztetése: lehetséges, hogy a szennyező iparok terjedése, a fosszilis tüzelőanyagok égetése, az erdők kiirtása veszélyesen megváltoztatja a légkört. Még a mértéktartó elmék is nagyon pesszimista jóslatokkal állnak elő.¹

Hans Jonas német filozófus a technikai civilizáció etikai kérdéseit boncolgatja, és a problémakörrel kapcsolatban határozott következtetésre jut. Szerinte az emberek valószínűleg nagyon „veszélyes játékba” fognak. A sarki jég olvadása, az óceán szintjének emelkedése katasztrófát jelentene. „Az iparosodás néhány évszázadáig tartó vidám, frivol emberi ünnepéért talán egy átalakult földi világ évezredeivel kell majd fizetni.” De ki fog fizetni? A nem iparosodott országok ugyanúgy fizetnek majd, mint az iparosodottak? A kérdések sorát hosszan lehetne folytatni. Hasonlóan sorjáznak a válaszok is. Megtalálhatók köztük a szokásos szélsőségek: egyesek azonnali intézkedéseket, drasztikus nemzetközi szankciókat követelnek, mások vitatják az egész jelenségkör létét. Vannak megfontoltak is, akik igyekeznek magukat a tényekhez és a klimatológia megalapozott kijelentéseihez tartani.

Nem kívánunk az éghajlat tudományának részleteibe menni, de enélkül is leszögezhetjük, hogy olyan részrendszerek együttes viselkedéséről van szó, amelyek önmagukban is nagyon bonyolultak, és nehezen modellezhetők: óceánok, talaj, növénytakaró, állatok, légkör és felhők. A melegházhatást okozó gázok (szén-dioxid, metán, nitrogén-oxidok, ózon stb.) között bonyolult kölcsönhatások vannak. Ugyanúgy megtalálhatók a negatív kölcsönhatások, mint a pozitívak. Nem csoda, hogy a modellszámítások egymáshoz képest nagyon szórnak. 1988-ban a 2100-ig várható felmelegedésre adott jóslatok 0,40 és 8,33 °C közé estek. Ez a szórás néhány év alatt jelentősen szűkült: a modellek ma 2 és 5,5 °C közötti értékeket adnak.

Az efféle bizonytalanságok joggal sugallják: miért az aggodalom? hátha nem is olyan nagy a vész? Valóban, ma még sok kérdés vitatott. Biztosan van azonban két kivétel: egyrészt a melegházhatást okozó gázok mennyisége *évről évre növekszik*, másrészt a melegházhatás *létező effektus*. Ha ugyanis nem lé-

¹ Pierre Thullier, *L'humanité saisie par l'effet de serre*, Recherche No. 243, mai 1992.

tezne, a földfelszín hőmérséklete $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ lenne, nem pedig a mai $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ami vitatott, az az effektus mértéke, megjelenésének időskálája és hatása. Talán van egy harmadik bizonyosság is: *a melegházhatás ellen szükséges intézkedések maguk is nagyon fájdalmasak, és nagyon sokba kerülnek*. Egy sor ipart le kellene állítani vagy más alapra kellene helyezni, világszinten teljesen új energiapolitikát kellene bevezetni, át kellene alakítani a mezőgazdaságot (hiszen a metán nagy részét a rizsföldek termelik), óriási területeken erdőket kellene telepíteni (vagyis szűkíteni kellene a mezőgazdaság termőterületét), és így tovább. Ki fogja mindezt megfizetni? s milyen kritériumok alapján oszlik majd el a kár? Az ezzel együtt járó politikai, társadalmi és gazdasági problémák miatt az orvosság talán több kárt okoz, mint a feltételezett baj, amit el akarunk vele háritani. Eddig az emberiség ennél sokkal egyszerűbb problémákat sem volt képes megoldani, ennél sokkal kisebb tétekért is világháborúk törtek ki. Érdeemes hát az egészbe belefogni? A filozófus Hans Jonas erre egyszerű választ ad: ha a tétek ekkorák, akkor az optimizmussal szemben a pesszimizmusnak van helye, vagyis a rossz prognózisnak kell az elsőbbséget adni. Nyilván azért idéztük a filozófust, mert magunk is így gondoljuk: az emberiség helyes stratégiája a globális felmelegedés ellen való intézkedés. Persze ha a szükséges intézkedéseket megtesszük, nem fogjuk megtudni, hogy lett volna-e felmelegedés vagy sem. (Talán nem is olyan nagy baj, ha ez titok marad.)

Megtalálja-e az emberiség a megoldást?

A kialakult helyzet leküzdésének az emberiség biztos vesztese: a nagyobb baj elkerülése érdekében vállalnia kell a melegházhatás elleni intézkedések okozta veszteségeket. Volt-e ez valaha is másképpen? Volt-e olyan eset a történelemben, amikor az ember tartósan nyerni tudott a természettel szemben? Ideig-óráig talán tudott nyerni. Nagyszerű találmányai révén és óriási áldozatok árán sok problémát megoldott. Minden megoldásból azonban újabb gondok sarjadtak, amelyek leküzdése újabb találmányokat és újabb áldozatokat követelt. A fejlett világ leküzdötte a szegénységet, éhséget, betegségeket, és végül *a maga számára* jólétet teremtett. Az ipari forradalom kezdete óta tapasztalt fejlődés viszont magával hozta a globális felmelegedés problémáját. Semmi múltbeli tapasztalat nem utal arra, hogy az új probléma megoldása magának a fejlődésnek a megtagadása lenne. Sokkal inkább egy új fejlődési pálya kijelölésére van szükség, amelynek az irányát többé-kevésbé már ismerjük is. Csak egyetlen kérdés maradt nyitva: lesz-e erőnk az ezzel elkerülhetetlenül együtt járó áldozatokat vállalni?

A kiotói konferencia után kirajzolódtak a megoldás módozatai: energiatakarékosság, megújuló energiaforrások körültekintő alkalmazása, a közlekedési kibocsátások csökkentése, atomenergia. Nehéz a felsoroltakkal (ebben a

sorrendben) egyet nem érteni. Ami viszont egyre inkább intézményesül, illusztrálja, hogy fenti kérdéseink és kételyeink nem alaptalanok: az egyes országok adni-venni fogják a CO₂-kibocsátások csökkentésében elért eredményeiket. A felvilágosodás évszázadából származik egy keserű mondás: „Ha a népek tudnák, mily csekély bölcsességgel kormányozzák őket, egész életüket halálfélelemben töltenék.” Nos, a bölcsesség egyre nyilvánvalóbb hiányához újabban a döntéshozók olyan mértékű cinizmusa és romlottsága járul, hogy az tényleg aggodalomra ad okot. Nem is tudjuk, súlyosbító vagy enyhítő körülménynek vegyük-e, hogy – belga javaslatra – az atomerőművek révén elért csökkentést nem szabad eladni.

Számunkra természetesen az a fő kérdés, képes lesz-e a nukleáris energetika a tőle elvárható mértékben hozzájárulni a megoldáshoz, ugyanis a melegházhatás számos okozója közül kiemelkedik az energetika. Az emberek a megújuló energiaforrásokban reménykedtek, amikor Svédországban annak idején az atomerőművek ellen szavaztak. Ma már látják, hogy a dolog nem olyan egyszerű, mint korábban gondolták. Ennek megértéséhez a magyaroknak elég Bős-Nagymaros problémájára gondolni. Egyéb megoldások viszont a melegházhatás miatt vitathatók. Ez lehet az oka annak, hogy a népszavazás 2:1 arányban az atomerőműveknek kedvezne, ha ma tartanák. A svédek nemzetközi tekintélye alapján várható, hogy a világ nagy részén szintén megfordul a közvélemény vélekedése.

Nézzük meg ezért, mit lehet várni az atomenergiától! Jelenleg 400-nál több energetikai reaktor működik. Ha a melegházhatás problémáját világszinten atomerőművekkel oldják meg, ez újabb problémákat vet fel. Gyakran hallható a következő laikus, ámde logikus kérdés: „tudják-e *garantálni*, hogy nem történik súlyos baleset?”. Csernobili típusú baleset valóban aligha várható, hiszen – remélhetőleg – rövidesen leállítják az RBMK² típusú reaktorokat, de legalábbis alaposan átalakítják őket annak érdekében, hogy hasonló baleset kizárható legyen. A hosszabb távon is üzemeltethető, többi reaktortípus vonatkozásában azonban az idézett kérdésre a válasz: nem! A technikában ugyanis semmit sem lehet *garantálni*. Legfőljebb arról lehet szó, hogy *a súlyos üzemzavar valószínűsége kicsi*.

Tisztáznunk kell a *súlyos üzemzavar* fogalmát: az aktív zóna megolvadásával járó üzemzavar, amelynek során radioaktív szennyezés juthat ki a környezetbe. A szennyezés mennyisége messze kisebb, mint Csernobil esetében volt, hiszen tervezési norma korlátozza (meglehetősen kis értékre) a lakossági többletdózist. A súlyos üzemzavar tehát nem minősíthető katasztrófának. Mégis kerülendő, tehát hosszú távon csak olyan konstrukciók fogadhatók el, amelyekre vonatkozóan a súlyos balesetek valószínűsége kicsi. Kérdés persze, mi tekinthető „kicsinek”.

1 Orosz rövidítés. Magyar jelentése: nagy teljesítményű, alternatív típusú reaktor.

A paksi atomerőmű tipikus példának tekinthető. Azok közé tartozik, amelyek biztonságát a 80-as évek végén egyre többen kritizálták, bár konkrétan Paksról még nem beszélt senki. Annak érdekében, hogy ne érjen váratlanul a teljes bizonyossággal előrelátható bíráló, a 90-es évek első éveiben elvégeztük az atomerőmű biztonságának korszerű módszerekkel való újraértékelését. Az üzembe helyezést megelőző biztonsági elemzés ugyanis a 70-es évek végének a színvonalán történt, tehát minden esetleges nyugati bírálattól függetlenül is időszerű volt az analízist megismételni. Ez volt az *AGNES-projekt*³ célja, amelyben a teljes magyar szakembergárdán kívül belga, finn és német szakemberek is részt vettek. A megszületett hatalmas dokumentáció a szakma „bibliájává” vált, azóta is minden vizsgálatban és döntésben ebből indulunk ki.

A projekt eredményei közül egyetlen számot emelünk ki. A súlyos baleset gyakoriságára 10^{-4} /év nagyságrendű becslés adódott.⁴ Ennél rosszabb szám is adódott már más atomerőművekre, de ezt mégsem tartottuk elfogadhatónak. Ha a világon csak Pakson működne atomerőmű, ez a szám senkinek nem okozna gondot. Az erőmű négy reaktorának *valamelyike* a tervezett 30 éves élettartam alatt mindössze 1% valószínűséggel szenvedne súlyos balesetet, ami nem aggasztó. A világon azonban 400-nál több hasonló atomerőmű működik, tehát évtizedenként kellene súlyos balesettel számolnunk, ha mind egyikre a fenti szám lenne érvényes. A többségre azonban tízszer kisebb szám érvényes, tehát nekünk erre az értékre kellett csökkentenünk a súlyos baleset gyakoriságát. Így született meg egy átfogó *biztonságnövelő intézkedési* terv, amely 2002 körül zárul, és már elértük a nyugat-európai és amerikai reaktorokra jellemző biztonságot.

Nézzük meg, mit jelent ez világméreteken. A ma működő reaktorok esetében a súlyos baleset gyakorisága 10^{-5} /év *nagyságrendű*. A svéd moratórium kezdetéig hátralevő 10 évben ez azt jelenti, hogy a súlyos balesetek várható száma:

$$400 \times 10^{-5} \times 10 = 0,04.$$

Tekintve, hogy csak nagyságrendi becslésből indultunk ki, a tényleges érték ennek néhányszorosa is lehet. *Poisson*-statisztikát feltételezve könnyű kiszámítani ebből, hogy

$$1 - e^{-0,04} = 0,96 = 24/25$$

annak az esélye, hogy 2010-ig sehol a világon ne következzen be súlyos baleset. Ez ugyan messze áll attól, amire a köznyelvi „garancia” szó ráillik, némi

3 AGNES: angol rövidítés. Magyar jelentése: a biztonság újraértékelése általános, korszerű módszerekkel.

4 A stochasztikus folyamatok elméletében járatlan olvasó számára inkább ezt mondánánk: ez a szám annak a valószínűsége, hogy egy év alatt az adott erőműben súlyos baleset következzen be.

jóindulattal azonban mégis elfogadható. A legtöbb atomerőműben ugyanis folyamatosan tesznek további biztonságnövelő intézkedéseket, amelyek célja kettős: egyrészt csökkenteni kívánják a súlyos baleset valószínűségét, másrészt enyhítik a következményeit, ha mégis bekövetkezne.

Ha azonban a melegházhatás mérséklésére atomerőműveket építenek, akkor jelenlegi számuknak legalább meg kell tízszeresződnie. Ha tehát a fenti becslést erre és egy reaktor névleges élettartamára, vagyis 30 évre vonatkoztatjuk, akkor a súlyos balesetek várható számára legalább

$$4000 \times 10^{-5} \times 30 = 1,2$$

adódik, ami azt jelenti, hogy mindössze

$$1 - e^{-1,2} = 0,30 \approx 1/3$$

annak az esélye, hogy az újonnan épülő atomerőművek első generációjának a működése alatt a világon sehol se következzen be súlyos baleset. Ez már nagyon kedvezőtlen, és aligha fogadható el.

Nyilvánvaló tehát, hogy hosszú távon az atomerőművek olyan generációjára van szükség, amelyekre vonatkozóan a súlyos balesetek gyakorisága a jelenleginél nagyságrendekkel kisebb, mondjuk, 10^{-7} /év nagyságrendű érték. Mielőtt azonban erről beszélünk, szót kell ejtenünk a közeljövő problémáiról.

Az emberi tényező

Az atomerőművi balesetek egyértelműen megmutatták, hogy bekövetkeztükben döntő szerepet játszott az *emberi tényező*. Ha a balesetek *okát* firtatjuk, *operátori tévedésekről* beszélünk, ha az *elkerülésükre* tett intézkedéseken dolgozunk, *minőségbiztosításra*, *szakemberképzésre* és *-továbbképzésre* meg hasonlókra gondolunk. Egyszerűsítsük le a dolgot: az eddig elért eredményekben döntő szerepet játszott a paksi atomerőmű szakembergárdája és az őket támogató tudományos háttér. Rövid- és középtávon tehát döntő jelentőségű ezek sorsa.

A tudományos kutatói háttér hazánkban az 50-es évek végén jött létre, a kutatók első generációja már nyugdíjban van, illetve elérte a nyugdíjkorhatárt. A mögöttük jövő derékhad ötvenes éveikhez közelít. Az atomerőmű személyzetében a meghatározó emberek sem sokkal fiatalabbak náluk. Mindenesetre még dolgozhatnak 15-20 évet. Nem mindegy, hogyan tekintenek erre az időszakra. Ha ezt a hanyatlás korának és nem a fejlődés nekik jutó szakaszának tekintik, akkor a legjobbak elvándorlásával, de legalábbis apátiájával kell számolnunk. Az emberi tényező szempontjából ennél fogva már a rövidtávú perspektíva is fontos.

A szénhidrogének, elsősorban a földgáz jelenlegi ára azt eredményezi, hogy új atomerőmű építése gyakorlatilag sehol sem gazdaságos, ahol földgáz rendelkezésre áll (a mai áron és bőségben). A működő atomerőművek esetében tehát döntő azok élettartama. Az eredetileg 30 évre tervezett atomerőművek általános vélemény szerint legalább 50 évig tarthatók üzemben. Ennek azonban feltétele, hogy hitelt érdemlően bizonyítható legyen: a kulcsberendezések (elsősorban a reaktortartály) állapota ezt lehetővé teszi. Egészen másképp látják az üzemeltetők saját berendezésüket, ha erre irányuló konkrét lépések történnek, hiszen ez számukra perspektívát jelent. A paksi első blokk esetében a dolog 2007 után válik aktuálissá, de a vizsgálatoknak már most el kell kezdődniük ahhoz, hogy a megfelelő döntések és műszaki intézkedések időben megtörténhessenek. A biztonságnövelő intézkedések programja 2002 körül lezárul, és szervesen át kell nőnie egy élettartam-növelési programba. Az emberi tényező szempontjából ennek minél hamarabb történő megindítása és nyilvánosságra hozatala elengedhetetlen.

Tekintsük át ezután a fiatal generáció szempontjait. Az egyetemeken az egész világon tendencia a nukleáris technika iránti érdeklődés csökkenése. Egyre kevesebb hallgató választ atomenergetikai szakokat. Az Egyesült Államokban az ilyen hallgatók száma felére csökkent, de hasonló a tapasztalat Nagy-Britanniában, Németországban, Hollandiában és más országokban is. Nehezen hihető, de egyéb tapasztalatokkal összhangban levő magáninformációnk szerint például a német egyetemeken összesen *három* mérnök végzett nukleáris területen. Magyarországon a helyzet jobb, amiben szerepet játszik az oktatóreaktor megléte, de a végző fiatalok nagy része nem az atomerőművek területén, hanem a nukleáris technika egyéb területein szakosodik. A korábban nagy nukleáris programmal rendelkező országokban sorra szerelik le az oktató- és kutatóreaktorokat, számolják fel a nukleáris technikával kapcsolatos tanszékeket és kutatócsoportokat. A dolognak természetszerű velejárója a kutatás hanyatlása és a szakma öregedése.

Ha ez a tendencia tartós lesz, *el fog veszni a nukleáris biztonságra vonatkozó kompetencia*. Miért baj ez? Legalább három okból:

1. *Ma még megvan* ez a kompetencia, és nagy luxus lenne veszni hagyni. Mindannyian emlékszünk, milyen erőfeszítések árán jött létre. Még ha visszatérne is az ötvenes évek eufóriája (amire egyébként nem sok esély van), akkor sem lenne kormány, amely még egyszer létrehozná a korábbi nemzeti laboratóriumokat, megépítené a prototípusokat, de nem lennének kutatók sem, akik újra elvégeznék a ma hatvanas éveiben járó kutatógeneráció már egyszer elvégzett munkáját.
2. *Ha elvész a kompetencia, eltűnik az atomerőmű mint opció* a jövő energiagondjainak megoldására. Hogy ezt miért nem szabad megengedni, arról fentebb bőven volt szó, de az alábbiak is erről szólnak.

3. Ma még léteznek nukleáris létesítmények, amelyek biztonságos üzemeltetése az utolsó üzemóráig igényli a kompetenciát. Ezt csak súlyosbítja az a körülmény, hogy *leszerelésük, a hulladékok kezelése és elhelyezése szintén igényel szakértelmet* és nem is keveset.

A globalizált világban bárhol történik nukleáris baleset, annak mindenhol érezhető a társadalmi hatása. A kompetenciát tehát egy minimális szinten kell tartani mindenhol.⁵ Nem lehet azonban eléggé hangsúlyozni azoknak az országoknak a felelősségét sem, amelyek atomerőműveket exportáltak, hiszen ők kötelesek (lennének) az üzemeltetőt az erőmű teljes élettartama alatt szakmailag támogatni. Ahhoz, hogy ez alól mentesüljenek, a teljes know-how-t el kellett volna adniuk, ami nem történt meg. Ha belegondolunk, hogyan teszi tönkre saját nukleáris iparát a német és az amerikai kormány, rá kell ébrednünk, ezzel nem csak saját országa, hanem más országok ellen is vét. Természetesen hasonló felelősség terheli az orosz kormányt is, amely annyival azért jobb az említetteknel, hogy nem teszi *szándékosan* tönkre saját nukleáris iparát.

Mit lehet tenni? A sommás válasz egyszerű: körülbelül annak az ellenkezőjét, ami történik. Mindenekelőtt *meg kell óvni a létező berendezéseket a leszereléstől*. Ebben a tekintetben a magyar kormányzatok és a magyar nukleáris ipar egésze a dicséretes kivételek közé tartozik: hathatós lépések történtek a magyar kutatóreaktor és oktatóreaktor érdekében. A másik fontos tennivaló *a megszerzett ismereteknek az elkallódástól való megóvása*. Nemzetközi szinten nagy erőfeszítések történnek, hogy a valószínűleg megismételhetetlen kísérletek eredményeit a jövő számára rögzítsük és összegezzük. Ez elsősorban a reaktorfizikában van így, amely egyre inkább egy kihaló „állatfaj” benyomását kelti.⁶ A hatvanas években ez a volt a nukleáris tudományok vezérhajója, a kilencvenes években pedig már alig hoz átütő eredményt. Itt jutottunk el a harmadik fontos tennivalóhoz: *a kutatás fokozásához*. Arra természetesen nincs szükség, hogy visszahozzuk az ötvenes-hatvanas évek nagy nukleáris laboratóriumait, de a jelenlegi hullámvölgyből ki kell jönni. A megoldandó műszaki problémák ugyanúgy sokasodnak, mint régen, továbbra sem nélkülözhető tehát egy hatékony kutatóbázis. A tennivalók sorát folytathatnánk, de ehelyett inkább a két legfontosabb távlati kérdésre térünk át.

5 Hogy ez a szint nem lehet alacsony, azt a közelmúltban Tokai Murában történt baleset is mutatja.

6 E sorok írója reaktorfizikus. A tisztelt Olvasó ne panaszkodásnak, hanem ténymegállapításnak vegye ezt a mondatot.

A nukleáris hulladékok

A nukleáris technika hulladékainak a sorsa váltja ki napjainkban a legtöbb vitát. Ehhez diplomatikusan illene hozzátenni: „és méltán váltja ki a legtöbb vitát!” Nem tesszük ezt hozzá, mert a *probléma elsősorban nem műszaki*, és a kialakult helyzet *méltatlan*. Mint az alábbiakban vázoljuk, akár a kis és közepes, akár a nagy aktivitású hulladékokról van szó, biztonságos elhelyezésük megoldható, de ha szükséges, a tárolási idő is csökkenthető. Erről már sokminden elhangzott, talán elég lesz egy ritkán hallható gondolatot megemlíteni: miután a hulladék kikerült a reaktorból, már nem hordoz annyi energiát, amennyi a radioaktív anyagoknak nagy területen való szétszóródásához kell. Még egy baleset is csak lokális és könnyen kezelhető következményekkel járna. Miért folyik akkor vita? Azért, mert a nukleáris technikának ez az egyetlen problémája, amelynek csak a *megoldási lehetőségét* dolgozták ki, de a hulladékok *tényleges elhelyezése* még nem történt meg. Nem véletlen tehát, hogy a nukleáris technika ellenzői éppen ide összpontosítják a tüzet. A megoldás nem érdekük, és – ha tehetik – nem is fogják engedni a *tényleges megoldást*.

A különböző geológiai formációkban való elhelyezés első lépése az alkalmas telephely kiválasztása. Hazánkban volt erre irányuló kísérlet, de eredmény még nincs, aminek végső okát az előző bekezdésben megadtuk. Van azonban egy másik ok is. Nálunk azt az igényt támasztják, hogy a földtani környezet *egymagában* nyújtsa az elhelyezés hosszú távú biztonságát. A világ más helyein a megközelítés józanabb: a földtani és az épített környezetnek *együttesen* kell ugyanezt nyújtania. Ideje lenne tehát nálunk is kijózanodni. Ebben a helyzetben nem véletlen, hogy országunkban a hulladékelhelyezést kizárólag geológiai feladatnak tekintik. Akár tetszik azonban a geológusoknak, akár nem, előbb-utóbb más tudományok képviselőit is engedniük kell szóhoz jutni. Lassan egy évtizede folyik nálunk nemzeti célprogram, de ebben egyetlen fizikus, vegyész, hőtechnikus sem vett részt. Már a geológiai formációkban való elhelyezéshez is ismerni kell a hulladék összetételét, a radioaktivitás által termelt hőt, a kőzetre gyakorolt hatást, a várható korróziót és hasonlókat. Jellemző, hogy valaki egy napilapban „bedobta”, hogy a Yucca Mountainban (USA) tervezett hulladéktemetőben a nagy aktivitású hulladék kritikussá válhat,⁷ amivel nem kis zavart okozott. Nálunk fel sem merül ilyesminék a vizsgálata. Fentebb a nukleáris biztonsági kompetencia megőrzéséről volt szó. Nos, a nukleáris hulladékokkal kapcsolatban természetesnek vesszük, hogy az nálunk létre se jön? Ideje lenne a dologgal legalább egy követő kutatás erejéig foglalkozni.

A radioaktív hulladékok kezelésének nem ez az egyetlen módja. Egyre több szó esik a *transzmutációról*: a hulladékot intenzív neutronsugárzásnak tesszük ki, aminek hatására gyorsan bomló izotópokká alakul át. Végered-

7 Reaktorrá válhat. Az állítás szerintünk tévedés.

ményben mintegy 30 év alatt a hulladék aktivitása olyan szintre csökken, mint azé az uráné, amelyet eredetileg felhasználtak. Ez erkölcsileg is korrektebb megközelítés, hiszen az a generáció likvidálja a hulladékokat, amely azok létrejöttének a hasznát élvezte (például a villamos energiát). A transzmutáció gondolata egyébként nem új. Már az ötvenes években lehetett a *nukleáris triádról*, vagyis a három alapvető nukleáris technika együttműködéséről olvasni: hasadás, fúzió és gyorsítók. Bármelyik felhasználható a szükséges neutronsugárzás létrehozására. A legújabb elképzelések szerint gyorsítókat alkalmaznának.

Kevesebb szó esik egy másik fajta transzmutációról, pedig az is ígéretes. A hatvanas években működött az Egyesült Államokban egy különleges reaktor: az urán *sóolvadék* formájában keringett a reaktorban. Tekintve, hogy más típusok az erőművi felhasználásban gazdaságosabbnak bizonyultak, ezt leállították. Ha azonban a keringő sóolvadék az atomerőművek nagy aktivitású hulladékait tartalmazza, akkor ez szintén alkalmas transzmutációra. Az olvadék egy olyan körben keringene, amelynek egyik oldala a reaktor, másik oldala pedig egy kémiai berendezés. Az utóbbiban folyamatosan kivonnák az olvadékból a burkolóanyagot (cirkónium), a maradék uránt és a hasadási termékeket, de végig a rendszerben maradnának a távoli transzuránok és a plutónium. Ezek gyakorlatilag teljes egészében hasadási termékekké alakulnának át. A megoldás előnye, hogy teljesen kiküszöböli a hulladékok legvitatottabb részét: a plutóniumot és a távoli transzuránokat.

Mindkét megoldás nagyon sok kutatást és fejlesztést igényel még. Jó példák arra, hogy a meglévő kutatóbázist miért nem lenne szabad veszni hagyni. Természetesen nem lehet arról szó, hogy az egész kutatást egyetlen ország, főleg egy hozzánk hasonlóan kis ország végezze el. A paksi atomerőművet sem mi fejlesztettük, de *részt vettünk* a fejlesztésben, aminek nem az a fő jelentősége, hogy hasznos eredményeket értünk el (bár ez is igaz), hanem az, hogy megszereztük a nélkülözhetetlen szakértelmet. Végső következtetésünk tehát az, hogy ideje lenne aktívan bekapcsolódnunk az ezen a területen folyó kutatásokba *is*.

A nukleáris hulladékokkal kapcsolatban még egy megjegyzést kell tennünk. Világszerte csak néhány éve indult meg a hulladékok elhelyezésének finanszírozására szolgáló pénzalapok feltöltése. Ez önmagában elégséges indok arra, hogy a meglévő atomerőművek élettartamát meghosszabbítsuk: minél tovább üzemelnek, annál több pénz gyűlik össze az alapon.

Az atomerőművek új generációi

Mint már szó volt róla, hosszabb távon szükség van az atomerőművek új generációjára, amelyek esetében a jelenleginél egy vagy két nagyságrenddel ki-

sebb a súlyos baleset gyakorisága. A gyártó vállalatok több irányban indultak el. Ezek a törekvések három fő csoportra oszthatók:⁸

- Az *evolúciós erőművek* a meglévő típusok továbbfejlesztésének tekintetűek. Villamos teljesítményük 900 MW fölött van. A konstrukciós célok sok tekintetben a hetvenes évek céljainak tagadását jelentik: nagyobb biztonsági tartalékok, kisebb fajlagos teljesítmény, alacsonyabb hőmérsékletek, nagyobb tömegű hűtőközeg, a maradékhő természetes áramlással való eltávolítása, szigorúbb biztonsági előírások, jobb ember-gép kapcsolat stb. Az erőművek felépítése robusztusabb, például a reaktortartálynak nagyobb a rideg töréssel szemben való szilárdsága.
- A *passzív erőművek* a biztonságot a fizika alaptörvényeire (gravitációra, természetes áramlásra, tárolt hőre stb.) alapozzák, így az nem függ egyes biztonsági rendszerek megfelelő működésétől. (Ezt *inherens biztonság*nak is nevezzük.) Az ilyen erőművek teljesítménye 600 MW vagy kisebb. A passzív megközelítés sok alkatrészt (szelepet, szivattyút stb.) feleslegessé tesz, tehát a konstrukció lényegesen egyszerűbb, az erőmű olcsóbb és gyorsabban felépíthető. További előny, hogy az ilyen erőmű könnyebben elviseli a üzemzavarokat és a külső hatásokat.
- Az *innovatív reaktorok* a biztonságot teljes egészében passzív eszközökkel érik el. Az innovatív irányzat teljesen szakít az eddigi konstrukciókkal. Némelyik elképzelés imponálóan szellemes ötlet. Ez egyben gyengéjük is, hiszen egyelőre valószínűtlen, hogy meg fognak valósulni. Ha nagy számban megindul újabb atomerőművek építése, azok valószínűleg az előbbi két csoportba fognak tartozni.

A fejlődés fontos eleme lesz *típusstervek* használata. Ilyenek hiánya elsősorban az Egyesült Államokban okozott eddig problémát. Ott ugyanis minden reaktort egyedileg terveztek meg, ami elnyújtotta az engedélyezési eljárást, továbbá nagyon gyakoriak voltak az utólag előírt módosítások. Mindez jelentősen növelte a kamatterheket, és ennek révén rontotta az atomerőművek versenyképességét. Ennek ellenkezője történt Franciaországban, ahol következetesen típussterveket alkalmaztak, amivel jelentősen lerövidítették az építés és engedélyezés idejét. Természetesen ez is jár hátrányokkal: minden utólag felismert hiányosság egyben típushiba is, amelynek a korrigálása nagy számú erőműben igényel utólagos változtatásokat. A tapasztalat azonban a francia megközelítést igazolta. Az amerikaiak is arra fognak a jövőben törekedni, hogy az újonnan épített erőművekben a helyi sajátosságokból származó dolgok részarányát a minimumra csökkentsék.

8 A témakör jó összefoglalóját adja Szabó Zoltán fenti című riportja (KFKI-1994-23/G). Az itt írtak is ezen a dolgozaton alapulnak.

Zárszó

A 21. század elejére a nukleáris technika nagykorúvá vált. Valószínű, hogy a globális problémák megoldásában nélkülözhetetlen eszközzé fog válni. Ideje lenne tehát, hogy megszűnjön az antinukleáris „szent háború”, és átadja helyét a józan és műszaki realitásokon alapuló vitának. Megoldandó probléma pedig van bőven: a hulladékok elhelyezése, az atomerőművek új generációjának létrehozása, a meglévő erőművek élettartamának meghosszabbítása és így tovább. Mindez azonban azt igényli, hogy jöjjön a szakemberek újabb generációja, amely megőrzi és továbbfejleszti azokat az ismereteket, amelyeket elődeik létrehoztak. A fiatal generáció jogos igénye viszont, hogy tőlünk ne romokat, hanem működő eszközöket örököljenek.

A neutronforrások sokadik évezrede

A neutronok az anyagokat felépítő atommagok egyik alkotóelemeként a Föld tömegének több mint felét adják. Ellentétben azonban a másik alkotóelemmel, a hidrogénatom magjaként óriási mennyiségben szabad állapotban is található protonnal, a neutronok nem élnek sokáig a szabad levegőn, az atommagokon kívül. Elemi állapotban a magányos neutron kb. 15 perc élettartammal protonra, elektronra és anti-neutrínóra bomlik. De mivel a legtöbb elem atommagja elég nagy valószínűséggel elnyeli a neutront, pl. a levegő nitrogénje is, a „matuzsálemi” 15 percet sem éri meg a legtöbb neutron amely a Földön megjelenik. Pár hete nagy sajtóvisszhangra talált a *Nature* folyóiratban megjelent cikk, amely neutronok mágneses csapdába ejtését írta le, amely révén a neutronok elkerülnek az elnyelő anyagokkal való találkozást és megélhetik a természetes halált.

Helyzetkép

Szabad állapotba jutott neutronok egyedülálló dolgokat tudnak művelni, így előállításuk a 20. század tudományának és történelmének jelentős fejezete. Akármennyire büszkék is kívánnánk lenni az emberi találékonyságra, az első nagy intenzitású földi neutronforrásokat bizony a természet hozta létre. Ezeknek léteznek ugyanaz a két fő típusa, amelyekkel manapság az emberi kéz a legnagyobb mennyiségben gyártja a szabad neutronokat. Ezek közül ma már csak az egyik működik a természetben, az ún. *spalláció*. E magfizikai reakciócsaládnak az a lényege, hogy egy nagyon nagy sebességű (energiájú) részecske a legtöbb atommagból ki tud ütni egy vagy több neutront, mégpedig többféle módon. A legtermékenyebb az a folyamat, amelyben egy mag elnyeli az energetikus részecskét és annak energiáját, ettől felhevül, és nagy számban párolognak el belőle neutronok.

A Földre érkező kozmikus sugárzás spalláció révén másodpercenként mintegy 1017 neutront hoz így létre a felső légkörben. Ez évenként 5 gr-nyi

neutront jelent, nem igazán ipari szintű mennyiséget. Ezek a neutronok mintegy 30 000 km/sec sebességgel száguldanak át a légkörön, és a Föld felületén, elsősorban a talajban levő nedvesség hidrogénatomjaival ütközve jelentős részük lelassul mintegy 2-3 km/sec sebességre, amely megfelel a szobahőmérsékletű anyagok atomjai mozgási energiájának. Ezek a kozmikus eredetű lassú neutronok mintegy 10 évvel ezelőtt bekerültek a világ minden napilapjába, általában a címdoldalra. Teljesen saját hibájukon kívül. Ugyanis a nagy port felvert „hideg magfúzió” proponensei megalapozatlan téziséket azzal is alátámasztani vélték, hogy kimutatták neutronok jelenlétét a laboratóriumaikban. Ha tényleg fúzióról lett volna szó, sokszor több neutronnak kellett volna fel szabadulnia. A szenzáció lázában bizony elfelejtettek annak utánanézni, hogy a neutronok akkor is ott voltak-e, amikor a titokzatos hideg fúzió nem volt jelen.

A földtörténet korábbi szakaszában más típusú, sokkal termelékenyebb neutronforrások is működtek. Ezek a maghasadásnak ugyanarra az elvére épültek, mint a mai atomerőművek. E folyamat során az urán 235-ös izotópja egy neutronot fog be, és ennek következtében széthasad kisebb tömegű magokra, miközben több neutron is szabaddá válik. Az urán 235 ma mindössze 0,7%-át alkotja az természetben található uránnak, amelynek a Földön ismert előfordulási helyei közül a tengerek vizében feloldott mennyiség messze a legnagyobb. (A bányákból való kinyerés azonban ma olcsóbb.) A Föld fiatal korában a 235-ös urán izotóp részaránya sokkal nagyobb volt, így könnyebben létrejöttek az uránlerakódásokban olyan feltételek, amelyek révén spontán, véletlenül a ma nagy gonddal tervezett és felügyelt atomerőművekkel azonosan működő óriási atomreaktorok jöttek létre, pl. a mai Ghána területén. A maghasadás nagy méretekben való létrejöttének kulcsa a láncreakció, amelyet *Szilárd Leó* ismert fel 1934-ben. Szilárdnak sikerült felfedezését az angol tengerészetnek átadott szabadalom formájában 5 éven keresztül titokban tartania, azzal a céllal, hogy az atomfegyverkezési verseny megindulását késleltesse. 1939-ig tartott, míg néhány más vezető tudós is rájött a dologra, és ezek egyike, a francia *Joliot-Curie* megtörte a többiek által kért hallgatást. A láncreakció révén minden hasadási ciklus után közel megduplázódhat a hasadások száma, és egyetlen hasadási folyamat által indított lavina a másodperc tört része alatt milliárd atomra terjed tovább. Egy átlagos méretű atomerőműben egy másodperc alatt mintegy 1020 neutron keletkezik, azaz évenként mintegy 5 kg, miközben mintegy 500 kg urán-235 hasad el.

A maghasadás óriási energiát szabadít fel hő formájában, egy átlagos háztartás évi energiaszükségletét mintegy 2 gr urán fedezi, de eközben kb. feleannyi tömegű plutónium is keletkezik, amely az atomhulladék legkritikusabb eleme. A plutónium maga is ugyanannyi hasadási energiát tartalmaz mint az urán-235, és ugyanúgy békés és háborús célokra is felhasználható. Míg az urán-235 izotópot csak bonyolult és költséges eljárásokkal lehet kivonni a ter-

mészetes uránból, vagy az atomerőművek elhasznált fűtőelemeiből, a plutónium kémiai úton viszonylag egyszerűen kivonható az atomhulladékból, és a világ atomenergia- és atomfegyver-programjai eddig kb. 800 tonna plutónium létrehozásához és tárolásához vezettek.

A lassú neutronok jelentősége abban is áll, hogy szilárd testek, folyadékok, biológiai anyagok kutatásában mint *szonda* igen fontos szerepet játszanak. Ez annak köszönhető, hogy a neutronsugárzásnak mind hullámhossza mind rezgési frekvenciája az atomi szerkezetek és mozgások távolság- és idő-tartományába esik. Különösen egyedülállóak a neutronokkal végzett kutatás által nyújtott lehetőségek az ún. „puha” anyagok vizsgálatában. Ebbe az anyagcsaládba tartoznak a gazdaságban egyre nagyobb szerepet játszó polimerek és biopolimerek. Ezekben az óriás molekulaláncokból felépülő rendszerekben olyan szerkezetek alakulnak ki, amelyek elemi méretei az atomi és makroszkopikus méretek közé esnek, az ún. nanoméretek tartományában vannak. Például egy polimerlánc-molekulát körülvevő többi polimer lánc az eredeti molekula körül egy kb. 4 nm (0.004 mikron) átmérőjű „csövet” alakít ki, és a molekulalánc ezen a csövön belül tud relatíve szabadon mozogni. Mivel itt az atomi léptékhez viszonyítva nagy méretekről van szó, a kémiai kötésekben szomszédos atomok távolságának mintegy hússzorosáról, az ilyen méretű szerkezeti elemek mozgása lényegesen lassabb lesz a nagyobb tömeg és tehetetlenség miatt, mint az egyéni atomok mozgása.

Ily módon nemcsak a szerkezet, hanem a mozgási folyamatok jellemző ideje is a mikroszkopikus és makroszkopikus tartományok közé esik, a mezoszkopikusnak nevezett területre. A neutronokhoz hasonlóan gazdag információt szállítani tudó két legfontosabb másik módszer, a fény-szórás és röntgenvizsgálatok számára a mezoszkopikus tér-idő tartomány hozzáférhetetlen. Nem véletlen, hogy a „puha” anyagok elméletében elért eredményeiért 1991-ben Nobel-díjjal kitüntetett *Pierre-Gilles de Gennes* jóslatainak kísérletei bizonyításában a neutronos vizsgálatok, köztük a Magyarországon felfedezett *Neutron Spin Echo eljárás**, döntő szerepet játszottak. E területen a jövő legfontosabb kihívása az élő szervezet „puha” anyagainak jobb megismerése, amelyen belül elsősorban a funkcionalitás megértése áll az érdeklődés középpontjában. Sok többé-kevésbé direkt megfigyelésből tudjuk, hogy a biológiai molekulák szerkezete egyedül nem magyarázza meg működésüket, és a legfontosabb életjelenségek, pl. a hemoglobin oxigénszállító képessége a molekula spontán belső mozgása, rezgése, csavarodása nélkül elképzelhetetlen. Részletekben azonban nagyon keveset tudunk e mozgások módozatairól, mechanizmusáról, hatékonyságáról, kölcsönhatásairól.

Az anyagok kutatásához nagy fényerejű lassú neutronnyalábokra van szükség. Ezeket manapság a cikk elején említett mindkét „természetes” eljárás se-

* Ezt a módszert e cikk szerzője fedezte fel. (A szerk.)

gítségével állítják elő, nem olcsón. A maghasadáson alapuló kutatóreaktorokból, amelyek mellett korszerű anyagkutatást lehet végezni, 8-9 van Európában, ezek közé tartozik a KFKI kutatóreaktora. A spallációs módszer földi változatában gyorsítóval nagy sebességű protonokat állítunk elő amelyek valamilyen nehézfém (ólom, wolfram, higany, stb.) tömbre esnek és a nehézfémagokból protononként kb. 30 neutronot ütnek ki. Ez utóbbi eljárás egyre jobban terjed, mert neutrononként kb. hétszer kevesebb hőleadáshoz vezet, mint a maghasadás. Márpedig a kutatási célokat szolgáló neutronforrásokkal szemben a fő követelmény a forrás fényessége, azaz az egy adott térfogatban másodpercenként keletkező neutronok száma. Ezt pedig a neutronkeltést kísérő hőleadásnak határt szabó hűtési teljesítmény korlátozza. Európában jelenleg két spallációs forrás működik (Angliában és Svájcban), amelyek közül az oxfordi ISIS berendezés a világ legnagyobb teljesítményű spallációs forrása. A neutronokkal való kutatásban évtizedek óta vezető szerepet játszó kutatóreaktor ugyancsak Európában található, a grenoblei Laue-Langevin Intézetben.

Perspektívák az új évezredben

A fenti helyzetfelmérésből azonnal látható, hogy a következő fő feladatok, kihívások várnak az új évezredben a kutatásra és a társadalomra azokon a területeken, ahol a neutronok a főszereplők:

a) Megoldást kell találni az atomhulladék kezelésére, veszélyességének csökkentésére, illetve felszámolására,

b) Tovább kell fejleszteni a kutatásra használt neutronforrások teljesítőképeségét az újabb problémák megoldására, elsősorban az élő szervezetben található és működő anyagok jobb megértésére.

Mindkét kihívás területén a gyorsítóra alapozott spallációs módszer nyújt nagy lehetőségeket.

Az atomhulladék kezelésével kapcsolatban teljesen világos, hogy az atomenergia-termelés leállítására csak a probléma méreteinek növekedését állítaná meg, megoldást nem jelentene. A világban mostanáig felhalmozódott plutónium mennyisége már akkora, amelyből több atombombát lehetne gyártani relatíve egyszerű eszközökkel, mint amennyit eddig összesen építettek az atomhatalmak. Ráadásul a jelenlegi nemzetközi atomenergia-politika alapköve az az elvárás, hogy minden ország tartsa meg saját hatalmában az általa megtermelt összes plutóniumot. Míg a világ országainak egy része, legalábbis hivatalosan, a plutóniumot mint terhes hulladékot tekinti, más országok egyszerűen értékes nyersanyagként tartják. Ez utóbbi felfogás is indokolt: a plutónium óriási energiatartalommal rendelkezik, amit mind békés energiatermelésre, mind egyéb célokra fel lehet használni, azonnal vagy akkor, ha a technológia

kifejlesztésre kerül. Bár környezetvédelmi szempontból az utókorra hagyott plutónium összehasonlíthatatlanul kisebb problémát jelent, mint az üvegházhatást létrehozó gázok, a kémiai szennyezések, a genetikai manipulációk nem kellőképpen ismert és profitokokból alig kutatott lehetséges következményei, a probléma megoldása mégsem várthat magára túl soká, elsősorban a rosszindulatú felhasználás veszélye miatt, amelyre társadalmi instabilitások, szervezett bűnözés, fanatizmus, diktatúrák fellépése különös lehetőséget adhatnak.

A fizika és technológia fejlődése vezetett oda, hogy a természet alapvető energiaforrását, a magenergiát, amelyből a Nap is táplálkozik, a Földön is hasznosítani lehessen. Az ismert készletek, elsősorban tórium és a tengervízben feloldott urán formájában, sokezer évre elegendőek lennének. Ugyancsak a fizikai kutatástól lehet és kell elvárni az ezzel fellépett fő probléma megoldását is, azaz azt, hogy az (alapos fizikai okból kifolyóan) a Földről az emberi civilizáció megjelenése előtt sokkal eltűnt plutónium eltávolításának módját megtaláljuk. Ettől nem is állunk olyan messze. A plutónium maghasadás révén bontható le, ugyan radioaktív, de felszabadítható energiát nem tartalmazó elemekre. A maghasadást neutronokkal való besugárzással lehet létrehozni, de az atomerőművekben felszabaduló neutronok mennyisége ehhez kevés. Bár egyéb hasonló megoldásokra is gondoltak, lényegében megoldatlan hőtechnikai problémák miatt az erre irányuló kutatásokat Oroszország kivételével mindenütt feladták. (Oroszország különös helyét ebben a vonatkozásban az határozza meg, hogy a világon egyedül ők rendelkeznek a megolvadt ólommal való hűtés nagyüzemi technológiájával.) A gyorsítók alapuló spallációs technika lehetőséget ad elektromos áramnak neutronokra való átalakítására. Az egész eljárás annyira hatékony lehet, hogy – a Los Alamosban végzett számítások szerint – a plutónium hasadásával felszabadult energiából termelhető elektromosság nemcsak a gyorsító üzemeltetésére elegendő, de értékesítésének árából a plutóniumot „elégető” telep felépítése, üzemeltetése és környezetre ártalmatlan formában való lebontása is fedezhető lehetne. Ezen „transzmutáció”-nak nevezett eljárástól az várják, hogy az atomerőművekből kikerült, kb. 6 millió évig a természetes szint felett radioaktív és könnyen kinyerhető plutóniumot nagy mennyiségben tartalmazó hulladékot olyan hulladékkra alakíthassuk át, amelynek radioaktivitása 1000 év alatt lecseng az eredetileg kibányászott nyersanyagok szintjére, és hasadóanyagot, így plutóniumot is csak olyan csekély nyomokban tartalmaz, amelyet ipari kémiai eljárásokkal már nem lehet kinyerni. Ez az atomhulladék-politikában is fordulatot jelenthetne: ilyen feltételek mellett egy más ország atomhulladékának átalakítása és plutóniummentesítése egyszerű üzleti szolgáltatássá válhatna, hiszen a plutónium „elégetéséből” nyert energia a művelet költségeit legalább nagyjából fedezné. A plutónium valóban különös nyersanyag: az általa hordozott energia értékesítése révén a saját eltüntetését teheti gazdaságossá.

A transzmutációhoz szükséges nagyteljesítményű gyorsítók kifejlesztése a neutronokkal végzett anyagkutatás számára is óriási új lehetőségeket nyit meg. Szupravezető gyorsító célokkal működő, 100-200 MW teljesítményű protonnyaláb előállítására alkalmas lineáris gyorsítók kifejlesztésén dolgoznak az USA-ban, Franciaországban, Japánban, amelyek másodpercenként mintegy 1021 neutron előállítására lesznek alkalmasak. Egy ilyen gyorsító impulzusüzemben, amely során mindössze az idő 5-10%-ban lenne bekapcsolva, a jelenlegi legjobb kutató neutronforrást, a 60 MW hőteljesítményű grenoblei reaktort 20-30-szor szárnyalná túl, kb. 10 MW nyalábteljesítmény, azaz mintegy 18 MW elektromos áramfogyasztás mellett. Az USA-ban épülőfélben van az első 1 MW teljesítményt meghaladó spallációs neutron forrás. Európában nemzetközi összefogásban Ausztria tervez egy 0,5 MW teljesítményű berendezést Bécsújhely közelében, amely az említett amerikai forrás legerősebb konkurense lenne 2005-től mindaddig, amíg egy még nagyobb, mintegy 5 MW-os európai nemzetközi spallációs forrás, meg nem jelenne 2010 körül, egy egyenlőre gondosan nyitott kérdésként kezelt helyszínen, mindenesetre tőlünk sokkal nyugatabbra.

Védekezés az ionizáló sugárzások károsító hatása ellen – sugárvédelem

Az atomenergia és az ionizáló sugárzások békés célú alkalmazása az ipar, a mezőgazdaság, az egészségügy és a tudományos kutatás számos területén jelentős mértékben hozzájárul az emberiség életfeltételeinek javításához. Az ionizáló sugárzás azonban káros is lehet az emberi szervezetre és a környezetre. Az atomenergia és az ionizáló sugárzások alkalmazása nyújtotta előnyöket csak úgy lehet kihasználni, ha védekezünk a sugárzások káros hatása ellen.

Összatekintés

A sugárforrások és a sugárvédelem fejlődésének százhat éves történetét az 1. táblázat szemlélteti.

A röntgensugárzás felfedezése után már néhány hét múlva észlelték, hogy a besugárzott testfelületen bőrpír, majd további besugárzás után bőrgyulladás, sőt elhalás lép fel. A radioaktív sugárzás hasonló elváltozást okozott. Néhány év múlva kimutatták a sugárzások rákkeltő hatását. Azt találták, hogy az emberi szervezetbe került csekély mennyiségű radioaktív anyag okozta belső besugárzás is károsító hatást gyakorolhat. Orvosi diagnosztikai és terápiás célra egyre nagyobb sugárintenzitást kibocsátó röntgenberendezéseket gyártottak és nagy aktivitású rádium sugárforrásokat készítettek. A sugárzások ipari alkalmazása az első évtizedekben nem volt jelentős, ezért elsősorban az orvosok és az ápoló személyzet köréből szedte áldozatait a védelem nélkül használt röntgen- és rádiumsugárzás.

Harminc év szomorú tapasztalatai után hívták fel kutatók először a figyelmet arra, hogy bizonyára van egy olyan sugáradag – dózis –, amelyet az ember jelentős károsodás nélkül képes elviselni (tolerálni). A sugárforrás és a felhasználó személy közé olyan vastag árnyékolóréteget kell elhelyezni, hogy az embert az ún. toleranciadózisnál nagyobb sugárterhelés ne érje.

1. táblázat

Sugárforrások, sugárvédelem

1895	A röntgensugárzás felfedezése – heteken belül bőrpír, gyulladás
1896	A természetes radioaktivitás felfedezése Thomson: „ <i>there is evidently a point beyond which exposure cannot go without causing serious trouble</i> ”
1900	Leukémia, egyéb daganatok megjelenése
1919	Magreakciók felfedezése
1920	Belső sugárzás: csontszarkomás megbetegedések
1925	I. Nemzetközi Radiológus Kongresszus – a toleranciadózis fogalma – a Szt. György kórház (Hamburg) emlékoszlopán 400 mártír, köztük 18 magyar neve A Sugárzási Egységek Nemzetközi Bizottsága (ICRU) – toleranciadózis: 0,2 R/nap (mai egységben kb. 720 mSv/év)
1930	A mesterséges radioaktivitás felfedezése
1938	A maghasadás felfedezése
1942	Az első atomreaktor
1945	ATOMBOMBA
1946	Atombomba – légköri atomfegyver-kísérletek
1950	ICRP – megengedhető dózis: 0,3 R/hét (mai egységben kb. 150 mSv/év)
1951	Az első atomerőmű
1954	Mesterséges radioaktív izotópok alkalmazása hazánkban
1958	ICRP – megengedhető dózis: 0,1 R/hét (mai egységben kb. 50 mSv/év)
1959	KFKI kutatóreaktor – izotópgyártás
1971	BME tanreaktor
1977	ICRP 26 – determinisztikus károsodás – sztochasztikus sugárhatás (LNT-teória) dóziskorlát: foglalkozási 50 mSv/évlakossági 5 mSv/év
1980	I. Tv. az atomenergiáról
1982	A paksi atomerőmű 1. blokkjának indítása Sugárvédelmi Alapszabályzat (BSS) – a NAÜ kiadványa
1986	A csernobili atomerőmű súlyos balesete
1988	Az „1980. évi tv. az atomenergiáról” felhatalmazása alapján: a 7/1988. (VII.20) SZEM R. a sugárvédelemről (az ICRP 26 és a BSS alapján)
1990	ICRP 60 – dóziskorlát: foglalkozási 20 mSv/év lakossági: 1 mSv/év
1996	CXVI. Tv. az atomenergiáról; Nemzetközi Biztonsági Alapszabályzat: Az ionizáló sugárzás elleni védelem és a sugárforrások biztonsága (IBSS), a NAÜ kiadványa.
2000	Az ICRP-60 és a NAÜ IBSS alapján készített 16/2000 (VI. 8.) Eü. Min. rendelet a sugárvédelemről.

A gyorsítók, majd az atomreaktorok által kibocsátott sugárzás intenzitása, valamint az atomreaktorokban keletkező mesterséges radioaktív izotópok aktivitása sok nagyságrenddel felülmúlta a röntgenberendezések által előállított sugárintenzitást, illetve a negyvenes évek elejéig előállított természetes radioaktív – elsősorban ^{226}Ra – sugárforrásokét.

Az atombomba bevetése, majd a légköri atomfegyver-kísérletek okozta viághermvú radioaktív szennyezés a Föld valamennyi lakóját érintette.

A 20. század második felében az atomenergia és az ionizáló sugárzás békés alkalmazása széles körben, így hazánkban is elterjedt. Reaktorok épültek, lendületesen fejlődött az izotópgyártás és alkalmazás, 1982-ben üzembe lépett a paksi atomerőmű. Ezalatt világszerte növekedett a sugárforrások aktivitása. Az ICRP (*International Commission on Radiological Protection* – Nemzetközi Sugárvédelmi Bizottság) a sugárzások károsító hatásáról összegyűjtött tapasztalatok – elsősorban a hirosimai és nagaszaki atombomba támadás túlélőinél észlelt késői károsító hatások elemzése alapján – több lépcsőben csökkentette a sugárveszélyes munkahelyen dolgozók és a lakosság megengedhető dózisát. Ennek következtében a sugárveszélyes munkát végzők körében a normál munkavégzés mellett kevés egészségkárosodás lépett fel és a baleseti besugárzásból eredő halálozások száma is töredéke volt a század első felében védelem nélkül végzett munka áldozatainak.

Napjaink sugárvédelmi szemlélete az ICRP 26-os kiadványán alapul. Eszerint kétfajta sugárhatással kell számolnunk. Az egyes szervek működését a szervre és hatásra jellemző dózisküszöb felett a sugárzás rövid időn belül (néhány nap, hét elteltével) károsítja, és a dózis növekedtével a kórkép súlyossága nő. Szabály, hogy sugárveszélyes munkát csak olyan műszaki sugárvédelmi berendezésekkel ellátott létesítményben szabad végezni, ami biztosítja, hogy normál körülmények között ez az ún. determinisztikus sugárkárosodás ne lépjen fel.

A sugárzás másik, késői károsító hatása egyes rosszindulatú betegségek, illetve genetikai hibák gyakoriságának növekedésében nyilvánul meg. Az ICRP feltételezése szerint ezen ún. sztochasztikus hatásoknak nincs dózisküszöbük, és a károsodás arányos a dózissal (*Linear Non-Threshold* – LNT-teória). A dóziskorlátnak biztosítania kell, hogy a sugárveszélyes munkát végzők kockázata ne legyen nagyobb, mint a más hasznos tevékenységet végzőké, és a dózis ezen korláton belül olyan kicsire kell leszorítani, ami ésszerűen elérhető.

Az ICRP 60-as kiadványa az egységnyi dózis okozta rosszindulatú betegségek gyakoriságnövekedésére a korábbinál nagyobb értéket adott meg. A foglalkozási sugárterhelés ajánlott dóziskorlátja az 1928. évinek mintegy harmincadrésze. A lakossági dóziskorlát pedig az átlagos természetes sugárterhelés egyharmada.

Az atomenergia és az ionizáló sugárzások biztonságos alkalmazásának követelményeit szerte a világon, így hazánkban is törvény írja elő (az 1996. évi

CXVI. törvény az atomenergiáról), és a sugárvédelmi előírásokat az ICRP, illetve a NAÜ (Nemzetközi Atomenergia-ügynökség) ajánlásain alapuló rendeletek szabályozzák.

Quo vadis, sugárvédelem?

A sugárvédelem alapkérdései

Az új évezred küszöbén számos fontos feladat áll a sugárvédelmi szakemberek előtt.

Elvi szempontból a legfontosabb az úgynevezett kisdózis-dilemma feloldása. Közismert, hogy a nagy besugárzásoknak káros hatásaik vannak, nem egyértelmű azonban, hogy a kis dózisok (általában a 100 mSv alatti dózisokat tekintik annak) is ártalmasak-e az emberi szervezetre. Bár az ICRP változatlanul a lineáris, küszöb nélküli dózis-hatás összefüggés-hipotézis megtartását ajánlja, ennek realitását egyre többen kérdőjelezi meg.

A rövidség kedvéért nézzük csupán a két legfontosabb ellenérvet. A világ több táján (India, Svédország, Brazília egyes területein) élnek népcsoportok évszázadok óta az átlagosnál (kb. 2,5 mSv/év) jóval nagyobb (10-20 mSv/év) háttérsugárzásnak kitéve. Az eddigi epidemiológiai vizsgálatok ezekben a populációkban semmiféle rendellenesség-többletet nem mutatnak a megfelelően választott kontrollcsoportokhoz képest. Még megdöbbentőbb a *B. Cohen* és munkatársai által több éve végzett rendkívül körültekintő elemzés, amely arra az eredményre vezetett, hogy az Egyesült Államok azon megyéiben a legkisebb a tüdőrák-előfordulás gyakorisága, amelyekben a legnagyobb a radon-koncentráció.

A jelenségnek (amennyiben valóban fennáll) két alapvető indoka lehet. Több biológiai kísérlet bizonyította, hogy a kismértékű sugárzás, amellet, hogy kétségtelenül okoz káros DNS-eltéréseket, bizonyos immunreakciók felerősödéséhez is vezet. Amennyiben az immunmechanizmusok felerősödése a más eredetű (nem az ionizáló sugárzások által keltett) DNS-eltérések kifejlődését is gátolni képes, az ionizáló sugárzás eredő hatása akár pozitív is lehet. A másik alapvető érvelés arra épül, hogy az élet fejlődésekor a mainak 3-5-szöröse volt a háttérsugárzás, azaz az élő szervezetek az evolúció során a mostaninál nagyobb sugárzási szintekhez adaptálódtak.

A kisdózis-kérdés eldöntése epidemiológiai felmérések alapján – éppen a kis várható hatások következtében – statisztikai korlátok miatt nem várható. A másik lehetséges megközelítés, a biológiai alapfolyamatok jobb megértésén alapuló modellezés, ma még szintén távol áll attól a szinttől, amely a dilemma eldöntéséhez szükséges.

Feltehetően az elméleti tisztázást megelőzően állást kell foglalni abban a kérdésben, hogy a nagyon kis dózisokat mekkora népességre és milyen

hosszú időre szabad összegezni, azaz le lehet-e vonni következtetéseket a „kollektív dózis” értékéből, felfedezhető-e összefüggés a nagyon sok ember által kapott nagyon kis besugárzás összege és a népesség egészségi állapota között.

A sugárvédelmi szakemberekre a fenti alapvető kérdések tisztázásán túl is sok feladat vár. Egységesíteni kell a természetes és mesterséges eredetű besugárzások korlátozásának alapelveit, az elvi egységesítésbe be kell vonni az orvosi diagnosztikai és a terápiás besugárzások optimalizálásának kérdését is.

Egységes elveket kell követni az újonnan bevezetendő eljárásoknál, és a meglévő létesítményeknél bekövetkező balesetek következményeinek felszámolására, illetve enyhítésére tett intézkedéseknél követendő sugárvédelmi megfontolásokat illetően.

Meg kell alapozni a radioaktív hulladékok végleges elhelyezésénél követendő sugárvédelmi elveket – tisztázni kell a későbbi generációk védelmének elveit.

Az atomerőművek leállítást követő leszerelésekor szennyezett területek maradnak vissza. Ezek megtisztítása, mentesítése (dekontaminálása) műszaki kihívás; a szennyezetlenné visszaminősítés kritériumainak megállapítása fontos elméleti feladat.

A mai sugárvédelmi rendszabályok kizárólag az ember védelmével foglalkoznak. A sugárvédelmet ki kell terjeszteni a természet egészére.

Gyakorlati sugárvédelem

A lakosság sugárterhelésének legnagyobb részét a természetes radioaktív izotópok, különösen a radon-bomlástermékek belégzése okozza. Szerte a világon mintegy két évtizede folyik a lakosság radon-expozíciójának széles körű vizsgálata. Hazánkban az átfogó felmérés csupán a kilencvenes évek elején kezdődött, és még koránt sincs befejezve.

A radon-sugárterhelés felmérésével párhuzamosan folyó epidemiológiai vizsgálatok a jövőben várhatóan értékes adalékot nyújthatnak az LNT-teória elvetéséhez vagy megerősítéséhez. A vizsgálatok alapján a nagy radonkoncentrációjú lakások radonmentesítésére is van lehetőség. A radonveszélyes területek feltérképezésével mód lesz azok lakásépítési területek köréből történő kizárására. A radon különböző közegekben való migrációjának és a bomlástermékek légzőszervekkel való kölcsönhatásának modellezése a megbetegedés kialakulási mechanizmusának pontosabb megértését fogja szolgálni. Ezen vizsgálatok a különböző anyagok természetes radioaktív koncentrációja mérésének a továbbfejlesztését vonják maguk után.

A lakosság sugárterhelésének jelentős hányada az orvosi diagnosztikai eljárásoktól származik. A legmodernebbnek számító CT-vizsgálatok különösen nagy sugárterheléssel járnak. A lakosság medicinális sugárterhelésének csök-

kentése érdekében törekedni kell a berendezések és eljárások okozta sugárterhelés csökkentésére. Emellett folyamatosan ellenőrizni kell a paciensek sugárterhelését, hogy a nem megfelelő vizsgálati módszerek kiszűrhetőek legyenek. Az ellenőrzéshez új automatikusan működő berendezésekre van szükség, hogy az adatok számítógépes statisztikai feldolgozásra alkalmasak legyenek.

A nukleáris létesítmények, köztük az atomerőművek radioaktív izotóp-kibocsátása napjainkban a lakosság körében általában jelentéktelenül kis sugárterhelést eredményez. A csernobili atomerőmű súlyos balesete azonban felhívta a figyelmet a nukleáris baleset-elhárítás jelentőségére, mely a környezetben élők biztonságát van hivatva szolgálni. Az óvintézkedések bevezetéséhez ismerni kell a radioizotóp-kibocsátás jellemzőit, a légköri és vízi terjedés folyamatát, az izotópok migrációját a talajban, az élelmiszerláncban történő vándorlást és végül az emberrel való sokrétű kölcsönhatást. A folyamatok számítógépes modellezésének további finomításával elérhető, hogy a helyesen bevezetett óvintézkedésekkel a dóziscsökkenés az elérhető legnagyobb legyen.

A radiológiai helyzet elemzéséhez szükség van folyamatosan működő országos környezetellenőrző hálózatra. Ezen a téren a fejlődés egyik iránya a radioaktív szennyeződés jellemzőinek – pl. aeroszol- és gőzhányad, izotóp-összetétel – egyre részletesebb távmérése és értékelése. A másik irány, mivel a radioaktív szennyeződés terjedése nem ismer országhatárokat, a távmérő rendszerek több országra kiterjedő integrációja. Az egyre részletesebb mérési adatok, valamint a valós helyzetet jól közelítő modellezés a veszély előrejelzésének pontosítását, ezen keresztül a beavatkozások nagyobb hatékonyságát eredményezheti.

A sugárveszélyes munkahelyeken dolgozók személyi dozimetriai ellenőrzési módszereinek fejlesztése a foglalkozási sugárterhelés csökkentését szolgálja. A külső sugárterhelés mérésére az elektronikus doziméterek használata kezd elterjedni. A fejlesztés fő iránya a személyek külső sugárforrásból eredő dózisének mérésére alkalmas új detektorok bevezetése, valamint a miniatürizálás. Az integráló dózismérők közül a termolumineszcens és a szilárdtest nyomdetektoros technika további kibontakozása várható. A cél az érzékenység növelése és a sugárminőség mérése mellett a gyors és olcsó kiértékelési módszerek kidolgozása. A belső terhelés meghatározásának fejlesztése a nagy energiafelbontású és érzékeny félvezető detektorok alkalmazásával a radioaktív izotópok testen belüli eloszlásának jó felbontású feltérképezését célozza. Az anyagcserefolyamatok valóság-hű modellezésével a sugárterhelés pontosabb meghatározására lesz lehetőség.

A kötet szerzői

- BALKAY LÁSZLÓ PhD; tudományos munkatárs; Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum PET Centrum, Debrecen
- BERÉNYI DÉNES az MTA rendes tagja, emeritus professzor; MTA ATOMKI, Debrecen
- CSER LÁSZLÓ a fizikai tudomány doktora; tudományos tanácsadó, KFKI Szilárdtestfizikai és Optikai Kutató Intézet, Budapest
- EMRI MIKLÓS PhD; tudományos munkatárs, Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum PET Centrum, Debrecen
- ÉSIK OLGA tanszékvezető egyetemi tanár a Semelweis Egyetem Sugárterápiás Tanszékén, az Országos Onkológiai Intézet munkatársa
- FEHÉR ISTVÁN a fiz. tud. kandidátusa, sugárvédelmi tanácsadó, KFKI Atomenergia Kutató Intézet
- GALUSKA LÁSZLÓ PhD; Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum, Nukleáris Medicina Tanszék
- HORVÁTH DEZSŐ a fiz. tud. doktora; tudományos tanácsadó, MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest
- KATONA TAMÁS dr. techn., a műszaki tudomány kandidátusa, tudományos tanácsadó, Paksi Atomerőmű Rt., Paks
- KLENCSÁR ZOLTÁN PhD; tudományos segédmunkatárs, MTA-ELTE Nukleáris és Szerkezetvizsgáló Kutatócsoport, Budapest
- KOBLINGER LÁSZLÓ a fiz. tud. kandidátusa, az Országos Atomenergia Hivatal főig.-helyettese
- KÖRNYEI JÓZSEF a kém. tud. kandidátusa, dr. habil. egyetemi docens; Izotóp Intézet Kft., Radiógyógyszer Üzletág igazgatója, Budapest
- MÁRIÁN TERÉZ biol. tud. kand.; tudományos főmunkatárs, Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum PET Centrum, Debrecen
- MARX GYÖRGY akadémikus; ELTE, Atomfizikai Tanszék, Budapest

- MEZEI FERENC az MTA rendes tagja, egyetemi tanár, igazgató, Los Alamos National Laboratory, USA
- MIKECZ PÁL PhD; tudományos munkatárs, Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum PET Centrum, Debrecen
- MOLNÁR GÁBOR a fizikai tudomány doktora; tudományos tanácsadó, osztályvezető, Kémiai Kutatóközpont Felület- és Izotópkutató Intézet, Budapest
- SALMA IMRE a kémiai tudomány kandidátusa; tudományos főmunkatárs, ELTE Kémiai Technológiai és Környezetkémiai Tanszék, Budapest
- SCHILLER RÓBERT a kém. tud. doktora; KFKI Atomenergia Kutatóintézet, Budapest
- SZATMÁRI ZOLTÁN a fiz. tud. doktora, egyetemi tanár; a Nukleáris Technika Intézet igazgatója, BME, Nukleáris Technika Intézet, Budapest
- TRÓN LAJOS a biol. tud. doktora, egyetemi tanár; Debreceni Egyetem Orvos- és Egészségtudományi Centrum PET Centrum, Debrecen
- VANKÓ GYÖRGY okleveles vegyész; tudományos segédmunkatárs, MTA-ELTE Nukleáris és Szerkezetvizsgáló Kutatócsoport, Budapest
- VÉRTES ATTILA az MTA rendes tagja, egyetemi tanár; az MTA Nukleáris és Szerkezetvizsgáló Kutatócsoport vezetője, ELTE, Magkémiai Tanszék, MTA-ELTE Nukleáris és Szerkezetvizsgáló Kutatócsoport, Budapest
- WOJNÁROVITS LÁSZLÓ a kémiai tudomány doktora; az MTA Kémiai Kutatóközpont Izotóp- és Felületkémiai Intézet igazgatója, MTA, Kémiai Kutatóközpont Izotóp- és Felületkémiai Intézet, Budapest

Ára: 500 Ft

