

# fizikai szemle

A photograph showing the interior of a particle detector. The central part of the image features a grid of blue stars, likely representing a detector's sensitive area. Surrounding this are various metal components, including a large metal plate with several circular openings in the foreground. The lighting is a mix of green and blue, creating a technical and scientific atmosphere.

2005/4

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

*Főszerkesztő:*

**Berényi Dénes**

*Szerkesztőbizottság:*

**Barlai Katalin (Csillagászat),**

**Faigel Gyula,**

**Gnädig Péter (Négyszögletes kerék),**

**Horváth Dezső (Mag- és részecskefizika),**

**Jéki László, Kanyár Béla (Sugárvédelem),**

**Németh Judit, Ormos Pál (Biofizika),**

**Pál Lénárd, Papp Katalin,**

**Sükösd Csaba (Vélemények),**

**Szökefalvi-Nagy Zoltán (Biofizika),**

**Tóth Eszter,**

**Turiné Frank Zsuzsa (Megemlékezések),**

**Ujvári Sándor (A fizika tanítása)**

*Szerkesztő:*

**Hock Gábor**

*Műszaki szerkesztő:*

**Kármán Tamás**

*A lap e-postacíme:*

**fizsem.elft@mtesz.hu**

A folyóiratba zánt írásokat erre a címre kérjük.

*E szám vendégszerkesztője:*

**Sükösd Csaba**

*A címlapon:*

**Cserenkov-sugárzás a Budapesti Műszaki  
és Gazdaságtudományi Egyetem  
Oktató Reaktorában  
(fotó: Fehér Sándor, BME NTI)**

## TARTALOM

<i>Sükösd Csaba: Köszöntő</i>	117
<i>Vidovszky István: A jövő atomerőművei</i>	118
<i>Veres Árpád: A nukleáris hulladékkezelés újabb irányai</i>	122
<i>Pokol Gergő, Pör Gábor, Zoletnik Sándor: Transzport-releváns fluktuációk mérése a Wendelstein 7-AS fúziós berendezésen</i>	125
<i>Pálfalvi József, Szabó Julianna, Eördögh Imre: „Miképpen a földön, azonképpen az űrben is” A TRITEL háromtengelyű szilíciumdetektoros teleszkóp fejlesztése</i>	130
<i>Alseccz Anita, Osán János, Török Szabina: Röntgenspektroszkópiai módszerek az aktinidák környezeti hatásának vizsgálatában</i>	134
<i>Varga Zsolt, Myroslav V. Zoryi, J. Sabine Becker: Mintaelőkészítési módszerek <sup>226</sup>Ra ásványvizekből indukzív csatolású plazma-tömegspektrometriával történő meghatározására</i>	137
<b>A FIZIKA TANÍTÁSA</b>	
<i>Szűcs József: Nukleáris műveltség megalapozásának lehetősége 13–16 éves korú tanulóknál</i>	143
<i>Mester András: Orvosi fizika és a középiskolai magfizika-oktatás</i>	146
<i>Radnóti Katalin: A középiskolai fizikaoktatás problémái egy felmérés tükrében</i>	148
<b>VÉLEMÉNYEK</b>	
<i>Szentgyörgyi Zsuzsa: Prométheusz megmagyarázza</i>	152
<b>MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN</b>	
<i>Az atommagtól a konnektorig (Sükösd Csaba)</i>	153
<b>HÍREK – ESEMÉNYEK</b>	156
<b>NÉGYSZÖGLETES KERÉK</b>	159
<b>KÖNYVESPOLC</b>	160
<b>TÁRSULATI ÉLET</b>	160
<i>Cs. Sükösd: Introduction</i>	
<i>I. Vidovszky: Future nuclear power plants</i>	
<i>Á. Veres: New trends in the management of nuclear waste</i>	
<i>G. Pokol, G. Pör, S. Zoletnik: Detecting transport-relevant fluctuations at the W7-AS stellarator fusion device</i>	
<i>J. Pálfalvi, J. Szabó, I. Eördögh: ...in Space as on Earth...</i>	
<i>A. Hirn et al.: Developing the TRITEL triaxial Si-detector telescope</i>	
<i>A. Alseccz, J. Osán, S. Török: X-ray spectroscopy methods used in investigations of environmental effects of actinides</i>	
<i>Z. Varga, M.V. Zoryi, J.S. Becker: Preparation methods for inductively coupled plasma mass spectroscopy used in the determination of <sup>226</sup>Ra in mineral waters</i>	
<b>TEACHING PHYSICS</b>	
<i>J. Szűcs: Building nuclear culture at the age of 13–16</i>	
<i>A. Mester: Medical physics as a tool for teaching nuclear physics in secondary school</i>	
<i>K. Radnóti: Problems of secondary school physics teaching reflected in a poll</i>	
<b>OPINIONS</b>	
<i>Zs. Szentgyörgyi: Prometheus explains...</i>	
<b>SCIENCE IN BITS FOR THE SCHOOL</b>	
<i>From the atomic nucleus to the electric socket (Cs. Sükösd)</i>	
<b>EVENTS, PROBLEMS, BOOKS, NEWS OF THE PHYSICAL SOCIETY</b>	
<i>Cs. Sükösd: Vorwort</i>	
<i>I. Vidovszky: Kernkraftwerke der Zukunft</i>	
<i>Á. Veres: Neue Trends in der Entsorgung von Atom Müll</i>	
<i>G. Pokol, G. Pör, S. Zoletnik: Fluktuationen am Stellarator W7-AS und ihre Messung</i>	
<i>J. Pálfalvi, J. Szabó, I. Eördögh: ...wie auf Erden, also auch im Weltall...</i>	
<i>A. Hirn et al.: Entwicklung des triaxialen Si-Detektor-Teleskops TRITEL</i>	
<i>A. Alseccz, J. Osán, S. Török: Röntgenspektroskopische Methoden zur Untersuchung der Umweltschädigung durch Aktinide</i>	
<i>Z. Varga, M.V. Zoryi, J.S. Becker: Die Vorbereitung von Proben bei der Bestimmung von <sup>226</sup>Ra in Mineralwässern mit Methoden der induktiv gekoppelte Plasma-Massenspektrometrie</i>	
<b>PHYSIKUNTERRICHT</b>	
<i>J. Szűcs: Begründung der nukleare Kultur für 13–16-Jährige</i>	
<i>A. Mester: Medizinische Physik und der Schul-Unterricht in Kernphysik</i>	
<i>K. Radnóti: Probleme des Physik-Unterrichts in der Mittelschule; Verarbeitung einer Umfrage</i>	
<b>MEINUNGSÄUSSERUNGEN</b>	
<i>Zs. Szentgyörgyi: Prometheus erläutert...</i>	
<b>WISSENSWERTES FÜR DIE SCHULE</b>	
<i>Vom Atomkern bis zur Steckdose (Cs. Sükösd)</i>	
<b>EREIGNISSE, PROBLEME UND AUFGABEN, BÜCHER, AUS DEM GESELLSCHAFTSLEBEN</b>	
<b>Ч. Шюкожг: Предисловие</b>	
<b>И. Видовски: АЭС очередного поколения</b>	
<b>А. Вереш: Новые подходы в трактовке ядерных отходов</b>	
<b>Г. Покол, Г. Пör, Ш. Золетник: Флюктуации в стеллараторе W-7-AS и их измерение</b>	
<b>И. Пальфальви, Ю. Сабо, И. Эрдег: ... как на Земле, так и в Космосе ...</b>	
<b>А. Гирн и др.: Телескоп TRITEL на кремниевых детекторах</b>	
<b>А. Алъшец, Я. Ошан, С. Төрөк: Рентгено-спектроскопические методы в исследованиях загрязненности окружающей среды актинидами</b>	
<b>Ж. Варга, М.В. Зорий, Й.С. Бекер: Изготовление проб для определения <sup>226</sup>Ra в минеральных водах способом плазменной масс-спектрометрии</b>	
<b>ОБУЧЕНИЕ ФИЗИКЕ</b>	
<b>И. Сюч: Ядерно-физическая грамотность 13–16 летним школьникам!</b>	
<b>А. Мештер: Медицинская физика и обучение ядерной физике в средних школах</b>	
<b>К. Радноти: Проблемы обучения физике в средних школах</b>	
<b>ЛИЧНЫЕ МНЕНИЯ</b>	
<b>Ж. Сентгьорги: Подвиг Промефея</b>	
<b>НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ ДЛЯ ШКОЛ</b>	
<b>От атомного ядра к домашнему электричеству (Ч. Шюкожг)</b>	
<b>ПРОИСХОДЯЩИЕ СОБЫТИЯ, ПРОБЛЕМЫ И УПРАЖНЕНИЯ</b>	
<b>КНИГИ, ИЗ ЖИЗНИ ФИЗИЧЕСКОГО ОБЩЕСТВА</b>	

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

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: [mail.elft@mtesz.hu](mailto:mail.elft@mtesz.hu)

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős: Berényi Dénes főszerkesztő.

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

Nyomdai előkészítés: Kármán Tamás, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Teljesíti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszerűsített.

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

**HU ISSN 0015-3257**

# Fizikai Szemle

## MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

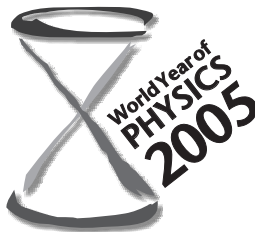
A Fizikai Szemle az Akadémia által 1862-ben elindított Matematikai és Természettudományi Értesítő és az 1891-ben Eötvös Loránd által alapított Matematikai és Physikai Lapok utóda és folytatása

LV. évfolyam

4. szám

2005. április

NEM ÉLHETÜNK



FIZIKA NÉLKÜL



## KÖSZÖNTŐ

A Fizikai Szemle 2004. márciusi száma a 96. oldalon közölte a Magyar Nukleáris Társaság 2003 decemberében megválasztott elnökének az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnökéhez intézett levelét, amelyben szorgalmazta a két társadalmi szervezet együttműködését.

Az Olvasó ennek az együttműködésnek egyik szép példáját tartja most a kezében. Az ELFT Elnöksége és a *Fizikai Szemle* Szerkesztősége egyetértett azzal, hogy a Fizikai Szemle adjon helyet a Magyar Nukleáris Társaság híreinek, cikkeinek is, és hogy a Fizikai Szemle címlapjának belső oldalára a Magyar Nukleáris Társaság neve is fölkerüljön az ELFT, az MTA Fizikai Osztálya, a Magyar Biofizikai Társaság és az Oktatási Minisztérium mellé. *A Magyar Nukleáris Társaság nevében ez úton is megköszönöm az Eötvös Loránd Fizikai Társulat vezetésének és a Fizikai Szemle szerkesztőségének ezt a baráti lépést.*

A mostani „tematikus” szám nukleáris módszerekkel, technikákkal összefüggő cikkeket fog csokorba. Az írások legnagyobb része – a *Fizika Tanítása* és a *Vélemények* rovat is – a Magyar Nukleáris Társaság által rendezett III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon<sup>1</sup> elhangzott előadások alapján készült.

A szimpózium résztvevői 8 tematikus szekcióban 43 előadást hallhattak. A Fizikai Szemlébe olyan cikkeket válogattunk, amelyek témája és feldolgozási módja illik a folyóirat megszokott stílusához és érdekelheti a lap olvasótáborát. A cikkek egy másik csoportját a *Magyar Energetika* című folyóirat közölte. A szimpózium teljes anyaga megjelenik CD-n is, amelyet a résztvevők automatikusan

megkapnak, és amelyet – érdeklődés esetén – a Fizikai Szemle olvasói számára is hozzáférhetővé teszünk.

Az atomenergia társadalmi elfogadásának két központi kérdése az erőművek biztonsága, valamint a radioaktív hulladékok elhelyezése. Nem véletlen, hogy az első két cikkünk ezekkel a témákkal foglalkozik, megismertetvén az Olvasót a negyedik generációs atomerőművekkel, valamint a radioaktív hulladékok biztonságos elhelyezésére irányuló legújabb nemzetközi és hazai erőfeszítésekkel.

Reméljük, hogy még ebben a században a hasadáson alapuló erőművek mellé a fúziós energiatermelés is az emberiség szolgálatába áll, ennek érdekében világszerte egyre intenzívebb kutatások folynak. Harmadik cikkünk a magyar kutatók egyik eredményéről számol be a szakmai részletek iránt is érdeklődő Olvasónak.

Az energiatermelés mellett a nukleáris módszerek a tudomány, műszaki és gazdasági élet sok egyéb területén is szerepet kapnak. Két cikk foglalkozik a nukleáris módszerek szerepével az űrkutatásban, másik kettő pedig a nukleáris környezetvédelemmel. *A fizika tanítása* rovatban megjelenő három írás a magfizika és a nukleáris ismeretek tanításának különböző vetületeit elemzi. *Mindeztudás az iskolában* rovatunk mostani cikke az atomenergiával kapcsolatos legfontosabb ismereteket közérthető nyelven adja át.

A Fizikai Szemle számaina a sokszínűség, a témaválasztásban is megnyilvánuló változatosság jellemzi. Reméljük, hogy tematikus számunk is tükrözi ezt a törekvést, annak ellenére, hogy most csak a nukleáris módszerekre és azok alkalmazásaira koncentráltunk.

Sükösd Csaba

a Magyar Nukleáris Társaság elnöke

<sup>1</sup> Budapest, 2004. december 2–3., szervezők: Aszódi Attila és Yamaji Bogdán.

## Miért beszélünk a jövőről

A futurologia nehéz tudomány, hiszen senki sem rendelkezik a jövőbe látás képességével, így minden, jövőre vonatkozó elképzelés publikálása előre vetíti a biztos kudarc árnyékát. Mondhatnánk, hogy nem kell a jövővel foglalkozni, hiszen elég problémát vet fel a jelen is. Mégsem tehetjük ezt, hiszen minden szülő, nagyszülő természetes aggodalommal próbálja kifürkészni gyermeke, unokája jövőjét még akkor is, ha biztos benne, hogy ő annak már nem lesz részese. Gyermekeink, unokáink jövője az egész emberiség jövőjétől is függ, ezért foglalkozni kell olyan kérdésekkel, amelyek ezt jelentősen befolyásolják. Ilyen az energia kérdése is. Lesz-e elegendő energia, és ha lesz, nem fogja-e annak termelése a környezetet elviselhetetlen mértékben károsítani? Az energia jelentős és egyre növekvő hányadát villamos energia formájában állítják elő. A villamos energia termelése sokkal központosítottabb, mint a többi fajta energiáé (fűtés, járművek), így könnyebben áttekinthető. Ezért korlátozzuk vizsgálatainkat a villamos energiára, ám megjegyezzük, hogy a levont következtetések döntő része a teljes energiatermelésre is igaz.

## A villamos energia termelésének jelen helyzete

Az elmúlt években az 1. táblázatban összefoglaltak szerint változott a világ villamosenergia-termelése [1]. Amint az a táblázat adataiból látszik, a villamos energia termelése ma is folyamatosan növekszik. Nem is várható a növekedés megállása, hiszen egyrészt az emberiség létszáma is növekszik (a jelenlegi becslések szerint 2050-re kb. 10 milliárdra), másrészt az a mintegy kétmilliárd ember, a jelenlegi népesség harmada, aki ma nem jut villamos energiához, nyilván igényli azt, és ezt az igényt ki kell(ene) elégíteni. A villamosenergia-termelés és az életszínvonal közötti arányosság általánosan nem vitatható, noha néhány kivétel található. A legtöbb nemzetközi tanulmány, például [2, 3] úgy ítéli meg, hogy 2050-re a várhatóan tízmilliárd főből álló emberiség mintegy 50%-kal több energiát igényel majd, mint a mai hatmilliárd.

A 2. táblázat a termelt villamos energia részarányának változását mutatja [1] alapján, felső részében öt földrészen, középső részén négy kiválasztott országban. A táblázat utolsó sorában pedig a növekedési ütemet látjuk a világon. A táblázat adatai sok érdekes tény tartalmaznak:

- a leggyorsabban növekvő földrész Ázsia, a leglassabban növekvő Európa,
- Európa és Észak-Amerika növekedése a világátlag alatt van, de csak Európáé lényeges mértékben,
- Afrika részaránya feltűnően csekély, és ez alig változik,
- Magyarország növekedése nem éri el a világátlagot, és – noha meghaladja az európai átlagot – nem éri el a vele azonos nagyságú európai társáét sem,

- Kínában a növekedés minden elképzelést felülmúló mértékű.

Némi merészséggel az alábbi következtetéseket is levonhatjuk:

- Ázsia részaránya a villamos energiából nemsokára eléri az ott élők létszámának megfelelő mértéket.
- Afrika részaránya a villamos energiából belátható időn belül nem éri el az ott élők létszámának megfelelő mértéket.
- Kína nemsokára meghatározó lesz a villamosenergia-termelésben.
- Európa jelentősége a villamos energia termelésében erősen csökkenni fog.
- Az Egyesült Államok – noha részaránya csökken – még hosszú ideig meghatározó marad a villamosenergia-termelés területén.

Megállapítható tehát, hogy a villamos energia termelésének növekedésével a közeljövőben világszerte számolni kell, továbbá egyes térségekben (elsősorban a Távol-Keleten) jelentős mértékű növekedéssel kell számolni. Jelenti-e ez a környezeti károk egyre fokozódó növekedését?

Az őszinte válasz az, hogy nem tudjuk, de megalapozottan reménykedhetünk abban, hogy ez elkerülhető, ha a villamos energia termelésének módja változik. A környezetbarát változások a fosszilis energiatermelés ma még jelentős (70% feletti) részarányának csökkenésétől várhatóak. E részarány növekvő termelés mellett akkor csökkenhet, ha a többi villamosenergia-termelési mód (atomenergia, megújuló energia felhasználása) jelentősen növekszik. A megújuló energiaforrások részarányának számottevő növekedésére nem lehet számítani, hiszen a hagyományos megújulók (víz, tűzifa) szinte teljes mértékben kiaknázottak, az újak részaránya pedig ma olyan kicsi (egy százalék alatt), hogy annak jelentős növekedése sem érné el a kívánt hatást. Megjegyzendő, hogy a tűzifa ugyan megújuló energiaforrás, de részt vesz a szén-dioxid-termelésben. Javulás rövid távon tehát az atomerőművek részarányának növekedésétől várható. A jelenlegi atomerőművek elfogadottsága azonban nem megfelelő. Többek között ezért merült fel új típusú, úgynevezett negyedik generációs atomerőművek kifejlesztésének szükségessége. Hosszabb távon sokat remélhetünk

Év	Termelt energia (terawattóra)	Termelt energia (%)
1990	11 340	100
1995	12 637	111
2000	14 595	129
2001	14 813	131
2002	15 290	135

2. táblázat

**A termelt villamos energia részaránya (minden adat %-ban)**

	Részarány 1990-ben	Részarány 2002-ben	Növekedés 1990–2002	Növekedés 2001–2002
Észak-Amerika	32,0	30,0	26,7	1,9
Ázsia	20,8	28,9	88,0	7,0
Afrika	2,7	3,0	47,6	3,1
Európa	38,2	29,7	4,9	1,0
Közép- és Dél-Amerika	4,4	5,2	58,9	3,3
Magyarország	0,24	0,22	26,7	-0,9
Portugália	0,24	0,28	59,6	-1,9
Egyesült Államok	26,8	25,1	26,4	2,7
Kína	5,2	10,3	166,8	11,8
Világ	100	100	34,8	3,2

a ma még nem ismert energiatermelési módoktól, például a magfűzítőtől, amelynek békés energiatermelésre történő felhasználhatósága ma még nem bizonyított.

## Az atomerőművek generációi

A világ első, energiát termelő atomreaktora, azaz atomerőműve alig több mint ötven esztendővel ezelőtt kezdte meg működését. Az eltelt fél évszázad alatt, a többi műszaki alkotáshoz hasonlóan, az atomerőművek is jelentősen fejlődtek. Ötven év fejlődése hozott annyi változást, hogy érdemes az atomerőműveket is életkoruk szerint csoportosítani. A generációkra osztás bizonyos mértékig önkényes, ellenben növeli az áttekinthetőséget.

### Első generációs atomerőművek

Ide tartoznak az első erőművek, amelyeket az ötvenes és hatvanas években, illetve a hetvenes évek elején helyeztek üzembe. Ezek jelentős része ma már nem üzemel, a maradék pedig élettartama végén jár. Az első generációs erőművek sem jelentettek kimagasló biztonsági kockázatot, de tekintettel arra, hogy ez a generáció még a jelenleginél kevésbé szigorú biztonsági előírások figyelembevételével, a biztonsági kultúra alacsonyabb szintjén épült, az üzemeltetés sok, részben jogos kritikának van kitéve. A ma is üzemelő első generációs erőművek több biztonság-növelő átalakításon estek át.

### Második generációs atomerőművek

A második generációs erőművek alkotják a ma üzemelő erőművek döntő többségét. Itt már a tervezés során is szigorúbb biztonsági elveket alkalmaztak, például mindegyiket ellátták olyan nyomásálló burkolattal (*konténmenttel*), amely baleseti helyzetekben megakadályozza a radioaktív anyagok környezetbe jutását. A konténmentek hatékonyságát valós baleseti helyzetben bizonyította az Egyesült Államokban 1979 tavaszán bekövetkezett TMI baleset [4].

A második generációs erőművek az egyre szigorodó előírások folytán több biztonság-növelő átalakításon estek át. A második generációhoz tartoznak a Paksi Atomerőmű blokkjai.

A szakemberek döntő többsége a második generációs erőműveket biztonságosnak ítéli, a közvélemény azonban sok esetben nem osztja ezt a véleményt. Valószínűleg könnyebb lesz egy új generáció biztonságosságát elfogadtatni, mint a meglévő előítéleteket eloszlatni.

### Harmadik generációs atomerőművek

Ebbe a generációba tartoznak a fejlett (*advanced*) erőművek. Jelenleg ilyen épül Finnországban (APR 1600 – 1600 MW elektromos teljesítményű fejlett, nyomottvízes reaktor). A rajzasztalonon többféle ilyen erőmű készült, ám szinte semmi sem valósult meg belőlük.

Ezek az erőművek tökéletesebbek a második generáció erőműveinél, mind gazdaságossági (hatásfok), mind biztonsági (fejlett biztonsági kultúra alapján terveztek) tekintetben, de lényegileg (típusok, üzemanyagciklusuk) nem különböznek azoktól.

E generációt jelenleg olyan kevés erőmű képviseli, hogy az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma nem tekinti megvalósult generációnak. A harmadik generáció hiánya tulajdonképpen a második generáció dicsérete, hiszen leváltására nem volt szükség.

### Negyedik generációs atomerőművek

Ezek a jövő erőművei. Jelenleg még a tervezés szintjén sem léteznek, de létrehozásuk érdekében komoly nemzetközi projekt indult, melyet az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (*Department of Energy*, DOE) kezdeményezett. A projekt célja az atomenergia elfogadtatása. A DOE megítélése szerint erre a harmadik generációs erőművek nem alkalmasak, mert bár műszaki kifogás nem merül fel ellenük, nem jelentenek áttörést azokon a területeken (pl. üzemanyagciklus), ahol áttörés nélkül a további fejlődés nem garantálható. Érdemes megjegyezni, hogy az egész program bevallott célja az is, hogy értelmes, színvonalas kutatómunkával lássa el a kutatókat, és hosszú távon is vonzza a tehetséges fiatalokat a nukleáris szakmába. A tehetséges kutatók megtartása és utánpótlásának biztosítása a ma működő (zömmel második generációs) atomerőművek biztonságának is feltétele. Továbbá a fejlett országok nyilvánvalóan szeretnék elkerülni, hogy a nukleáris szakmát csakis a fejlődő országokban műveljék, ami a jelenlegi tendenciákból következne, hiszen a csekély számú épülő atomerőmű döntő többsége fejlődő országokban épül, és a kutatás súlypontja is oda kezd áthelyeződni.

### Milyen lesz a negyedik generáció

Az új típusú atomerőművekkel szemben alapvető követelmény a környezetbarát tulajdonság és a fenntartható fejlődéshez való hozzájárulás. Ez reális cél, hiszen már a

második generáció erőművei is alapvetően környezetbarát jellegűek voltak.

A negyedik generációs atomerőművek létrehozására nemzetközi projekt alakult, GENERATION-IV International Forum (GIF) néven, 2000 januárjában. A programban szinte kezdettől fogva részt vesznek a nukleáris fejlesztésekben jelentős szerepet játszó országok (Argentína, Brazília, Dél-afrikai Köztársaság, Egyesült Államok, Egyesült Királyság, Franciaország, Japán, Kanada, Koreai Köztársaság és Svájc). 2003-ban a projekt két irányban is kibővült: az Európai Unió (az EURATOM) a nemzetközi projekt tagjává vált, továbbá az OECD Nukleáris Energiaügynökség (*Nuclear Energy Agency*, NEA) látja el a nemzetközi program titkársági teendőit. Az EU valamennyi tagországát képviseli, de Franciaországot és az Egyesült Királyságot csak azokban az ügyekben, amelyekben e két tagország közvetlenül nem játszik szerepet a projektben.

A GIF projektben a tanulmányozásra kiválasztott perspektivikus reaktortípusok a következők:

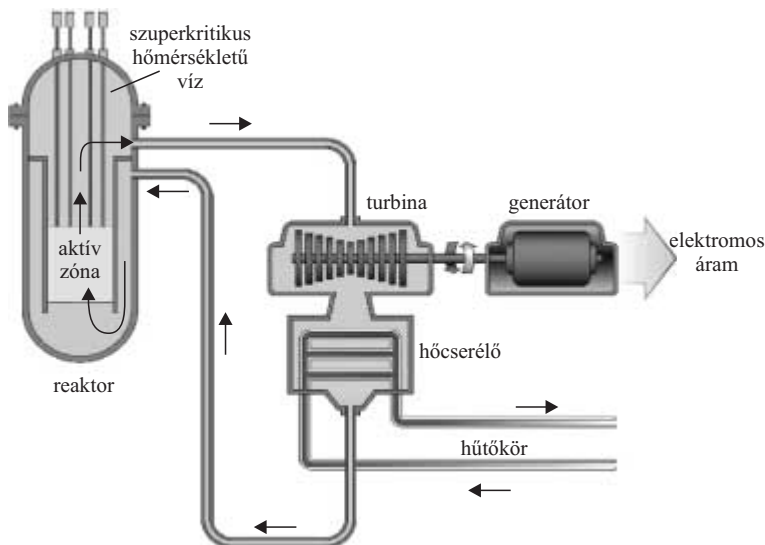
- magas hőmérsékletű gázhűtéses termikus reaktor,
- szuperkritikus hőmérsékleten működő vízű hűtéses termikus reaktor,
- nátriumhűtésű gyorsreaktor,
- gázhűtésű gyorsreaktor,
- ólom–bizmut hűtésű gyorsreaktor,
- olvadéksós reaktor (*molten salt reactor*).

Mint ismeretes, a jelenleg működő reaktorok néhány kivételtől eltekintve termikus reaktorok. Ezek továbbfejlesztése a fent említett első két típus.

A *magas hőmérsékletű gázhűtéses reaktorok* ötlete nem új keletű. Ez nem is meglepő, hiszen a magasabb hőmérséklet jobb termikus hatásfokot jelent. Ilyen reaktorok, prototípus szinten, már működtek Németországban és az Egyesült Királyságban. Sajnos ezek fejlesztése abbamaradt. A negyedik generációs magas hőmérsékletű reaktorokat nagyon magas hőmérsékletű (*very high temperature*) reaktoroknak is nevezik, ezzel is jelezve, hogy a cél a vízbontás hőmérsékletének meghaladása. Ilyen módon ezek a reaktorok a hidrogénenergetika céljait is szolgálnák. Hidrogénenergetikán azokat a módszereket értjük, amelyek során primer energiaforrások kiaknázásával hidrogént állítanak elő, a hidrogént tárolják, szállítják, s végül a benne lévő kémiai energiát felhasználják. Az energiatermelési, -szállítási, -felhasználási módok gyökeres megváltoztatását ígéri a hidrogénenergetika [5].

A *szuperkritikus hőmérsékleten működő vízű hűtéses termikus reaktor* a jelenleg legelterjedtebben tanulmányozott reaktortípus, a nyomottvízes továbbfejlesztése (1. ábra). Erre vonatkozóan intézetünkben is folynak számítások nemzetközi együttműködés keretében.

A következő három típus *gyorsreaktor*. A gyorsreaktorok fejlesztését az Egyesült Államokban annak idején Jimmy Carter, az egyetlen nukleáris diplomával rendelkező amerikai elnök szigorú tilalma akadályozta. Világméretben azonban nem sikerült teljesen leállítani,



1. ábra. A szuperkritikus hőmérsékletű reaktor elvi működési sémája

mert prototípusok működtek (Szovjetunió, később Kazahsztán), sőt részben működnek (Franciaország, India) néhány országban. A gyorsreaktorok biztonsága valóban több figyelmet érdemel, mint a termikusoké. Továbbfejlesztésük azonban elengedhetetlen, ha zárni akarjuk az üzemanyagciklust, hiszen az újrafeldolgozás kizárólag termikus reaktorokkal nem oldható meg. Az, hogy három gyorsreaktor is szerepel a hat között, egyrészt e reaktortípus fontosságát jelzi, másrészt viszont azt, hogy ezen a területen ma még nincs elegendő tapasztalat ahhoz, hogy a legjobb megoldást ki lehessen választani.

Az utolsó típus sem előzmények nélküli. Az Egyesült Államokban már működött egy *sóolvadékos reaktor*. Fejlesztése azonban az újrafeldolgozási igények csökkenése folytán abbamaradt. E reaktortípus fejlesztésén egy ideje dolgoznak már Oroszországban is. Az olvadékos reaktorok – ha a kívánalmaknak megfelelően sikerül fejleszteni azokat – jelentős szerepet játszhatnak a kiégett üzemanyag legkellémetlenebb alkotóelemeinek (a plutónium és a többi transzurán elem) békés megsemmisítésében. Magyarországon a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézetében folynak kutatások a sóolvadékos reaktorok reaktorfizikai és termohidraulikai viselkedésével, valamint transzmutációra való használhatóságával kapcsolatban.

Valamennyi típusnál szemben alapvető követelmények:

- a gazdaságosság,
- a természeti erőforrások fenntartása,
- a keletkező hulladékok minimalizálása,
- a biztonság és megbízhatóság,
- hadi célra való használhatatlanság.

A gazdaságosság és a természeti erőforrások fenntartása összefügg. A negyedik generációs atomerőművek fejlesztése során már nem a ma általános nyílt üzemanyagciklust veszik alapul, hanem zárt ciklusban gondolkodnak. Ez két alapvető előnnyel jár: egyrészt az uránkincs jobb kihasználására vezet, másrészt megkönnyíti a kiégett fűtőelemek kezelését. A zárt ciklus azt jelenti, hogy a kiégett fűtőelemeket nem tárolják közép és

hosszú távon (rövid távon technológiai okokból szükséges), hanem visszatáplálják az energiatermelő folyamatba. A gazdaságosság csak akkor követeli meg a zárt ciklust, ha az urán ára lényegesen emelkedik, ez azonban hosszú távon mindenképpen várható. A zárt ciklusban a keletkező hulladékok mennyisége csökken, és a katonai felhasználás kizárása is könnyebb. A biztonság és a megbízhatóság már a jelenleg működő atomerőművek esetében is jó, továbbfejlesztése azonban kívánatos, és mai tudásunk szerint lehetséges is.

Felmerül még egy lényeges kérdés: milyen legyen a reaktorok, erőművi blokkok mérete. A blokkméretet eleinte a műszaki lehetőségek határozták meg. Tekintettel arra, hogy a gazdaságosság a blokkmérettel arányosan nő, az idők során egyre nagyobb blokkokat építettek. Így, mint láttuk, a harmadik generációban már 1600 MW villamos teljesítményt is sikerült elérni. Azonban a villamosenergia-hálózat biztonsága szempontjából nem szerencsés túlságosan nagy blokkokat üzemeltetni, mert ilyen esetekben egy-egy blokk kiesése (ami még nagy üzembiztonság esetében sem zárható ki) túlságosan nagy zavart okoz. A kis és a fejletlen országok igénye tehát a relatíve kis teljesítményű (150–300 MW) blokkok üzemeltetése. Ez az igény markánsan megfogalmazódott az EU negyedik generációs atomerőművekkel kapcsolatos álláspontjának kialakításakor. Tehát a negyedik generáció valószínűleg igen különböző blokkméretű (150–2000 MW) erőművekből fog állni.

## A GIF-től a negyedik generáció megvalósításáig

A GIF projekt egyelőre a különböző típusokkal kapcsolatos kutatásokra irányul. Később a projekt elmehet egymásik (nem biztos, hogy mind a hat) típus megvalósításáig. Lehet azonban, hogy a reaktorok kifejlesztése már más (nemzeti vagy regionális) keretek között történik.

Az EU eleinte csak négy reaktortípus iránt érdeklődött, ma már mind a hat irányt perspektivikusnak tartja. Érdeklődésének homlokerében a nagyon magas hőmérsékletű reaktorok kutatása áll. Az az EU munkacsoport, amely a negyedik generációs atomerőműveknek a következő (hetedik) keretprogramba való beépítésén dolgozik, és amelynek magam is tagja voltam, javasolta egy program indítását az aktinidák kezelésére, és a nukleáris hidrogéntermelés tanulmányozására is. (Az üzemanyagban az el nem hasadt uránmagok neutronbefogással a legkülönbözőbb aktinidákká alakulnak, ezek között vannak hosszú felezési idejűek is, kezelésük így különös figyelmet érdemel.) Mindkét cél csakis a negyedik generációs erőművekkel érhető el. Az EU nukleáris szakemberei azon vannak, hogy az Unió jelenlegi előnyét kihasználva (itt a villamos energia 35%-át termelik atomerőművek!) legalább ezen a területen ne kerüljön hátrányba nagy versenytársaival szemben (Egyesült Államok, Kína, Japán).

Mi a helyzet Magyarországon? Tekintettel arra, hogy a közeljövőben senki sem tervezi Magyarországon atomerőmű építését, ha épül új erőmű valaha, akkor az felte-

hetően negyedik generációs lesz. Az ezzel kapcsolatos döntés ma még nem aktuális. Az azonban a magyar nukleáris szakemberek felelőssége, hogy ha egykor ez a kedvező döntés megszületik, akkor Magyarország fel legyen készítve az új technológia fogadására. Ezért elemi érdekünk bekapcsolódni a negyedik generációval kapcsolatos kutatásokba. Részvételünk jelenlegi szintje (egy-két részterületen csekély mértékű kutatás) biztosan nem elegendő.

## Történeti összefoglalás

A nukleáris technika sajnálatos módon a hadiipar szolgálatában fejlődött ki, és ott ért el kimagasló sikereket a második világháború alatt és közvetlenül utána. A genfi konferenciák (1955 és 1958) után megkezdődött a nukleáris energia békés felhasználása, a nukleáris ipar pacifikálása. Eleinte ez is nagyon sikeres volt. Sorra épültek az egyre jobb atomerőművek, és ennek nyomán ma is több mint 400 erőművi blokk termeli a világ villamos energiájának mintegy 16%-át. A hetvenes évek második felétől a fejlődés lelassult, majd stagnálás következett.

Az atomenergiának sok ellensége támadt világszerte. Sajnos két súlyos baleset (TMI 1979 és Csernobil 1986) is hozzájárult az ellenfelek – amúgy nem mindig megalapozott – érveihez. Az atomerőművek ugyan elterjedtek a világ minden részén, de csak harminc ország energiatermelésében vesznek részt. Az atomenergia fejlesztésében élenjáró országok – mint Norvégia és Dánia – végül is nem építettek atomerőművet, főként az Északi-tengerben talált olajkincs miatt. Az atomenergiát jelentős mértékben használó országok közül ketten (Németország, Svédország) valamennyi atomerőműük leállítása mellett döntöttek, bár hosszú határidőt szabva nem veszélyeztették rövid távú energiatermelésüket. Egyedül Franciaországnak sikerült az elérhető legnagyobb mértékben kihasználni az atomenergia nyújtotta lehetőségeket, és így villamos energiájának 75%-át atomerőművekben termelni. Európa keleti térségében sem volt jobb a helyzet, Lengyelország még az első atomerőmű építésének befejezése előtt leállította nukleáris energiaprogramját. Igaz viszont, hogy itt található az atomenergiát legnagyobb mértékben (80%) hasznosító Litvánia, bár elavult erőművi blokkjainak a közeljövőben történő leállítása miatt ez az arány jelentősen csökken, legalábbis a tervezett új atomerőművi blokkok megépítéséig.

A világ energiatermelése azonban elérte azt a szintet, amikor a környezeti károk már nem elhanyagolhatóak. A savas esők problémája a fosszilis energiatermelés csökkentését kívánatosá teszi. A környezetre kevésbé káros fosszilis források (gáz, kőolaj) belátható időn belül kimerülhetnek. A szén-dioxid-kibocsátás okozta globális felmelegedés még nem igazolható egyértelműen, de egyre inkább valószínűsíthető. Az energiatermelésnek tehát a jelenleginél környezetbarátabbá kell válnia, ezt többé-kevésbé mindenki belátta. Ezért született a kiotói megállapodás a szén-dioxid-kibocsátás csökkentéséről, amelynek betartása sajnos egyelőre nem várható. Amint láttuk, a környezetbarát irányba történő változásra pillanatnyilag

csak az atomenergia részarányának növelése ad módot. Ennek fő gátja jelenleg az atomenergia nem kellő társadalmi elfogadottsága. Ezen az új atomerőmű-típusok megjelenése segíthet. Ehhez mindenki számára érthetően demonstrálni kell, hogy a negyedik generációs erőművek környezetbarát tulajdonsága nem kétséges, segítenek a fenntartható fejlődés megőrzésében, biztonságosak, megbízhatóak és hadi célokra használhatatlanok.

## Irodalom

1. US Department of Energy, International Energy Annual 2002, Released March–June 2004 (<http://eia.doe.gov/>)
2. *Global Energy Perspectives* – World Energy Council (WEC), 1998
3. *World Energy Assessment* – Joint Publication of UN and WEC, 2000
4. VIDOVSKY I.: *Az atomenergia előnyei és kockázatai* – Fizikai Szemle 53/8 (2003) 272–277
5. J.M. OGDEN: *Prospects for building a hydrogen energy infrastructure* – Annual Review of Energy and the Environment 24 (1999) 227–279

# A NUKLEÁRIS HULLADÉKKEZELÉS ÚJABB IRÁNYAI

Veres Árpád

MTA KK Izotópkutató Intézet

## Történeti visszatekintés

Enrico Fermi 1934-ben elsőként idézett elő atommagátalakítást neutronokkal. Már 1940-ben ráérezett arra, hogy a mesterségesen létrehozott, de további felhasználásra már alkalmatlan radioaktív anyagok – a nukleáris hulladékok – komoly technikai és társadalmi problémákat okozhatnak. Ez a jóslata napjainkra beigazolódott.

1942. december 2-án a világon először értek el atommáglyában önfenntartó láncreakciót az USA chicagói egyetemén. Az első békés célú mesterséges radioizotóp-alkalmazás ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{32}\text{P}$ ) pedig 1946. augusztus 2-án történt (Oak Ridge, NL).

Hazánkba nyolc évvel később, 1954. szeptember 15-én érkezett először mesterséges radioaktivitású szállítmány: 100 mCi (3,7 GBq)  $^{60}\text{Co}$  sugárforrás és három  $^{32}\text{P}$  radioizotóp-készítmény (63 MBq,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ; 15 MBq,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ; 74 MBq,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) formájában (1. ábra).

A hazai radioizotóp-alkalmazások 50 éves alakulását jól szemléltetik a forgalmazás adatai. A 2. ábrán feltüntettük az import-, export- és a hazai szállítmányok számát. Ez a forgalom magában foglalja az orvosi diagnosztika, a biológia, a mezőgazdaság, az iparfejlesztés és a tudományos kutatás legkülönbözőbb területein alkalmazott radioizotópokat. Az izotópok alkalmazásaival azonban megjelentek a sugárzó hulladékok kezelésének problémái is.

A kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékok elhelyezésére 1960-ban létesült az első felszíni „ideiglenes radioaktív hulladék-tároló” Solymár határában. Az 1970-es években foglalkoztak e hulladékok hosszabb távú tárolására alkalmas geológiai hely feltárásának kérdéseivel. A kutatások eredményeként Püspökszilágyon 1976-ban helyeztek üzembe egy felszíni betonmedencés tárolót, amelybe a solymári hulladékot is áthelyezték.

Az elhelyezés mellett nem kevésbé fontos feladat a radioaktív hulladék mennyiségének csökkentése. Erre vonatkozóan többféle technológiát is kidolgoztak (elektrodialízis, bepárlás, ioncserélés [1–3]).

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

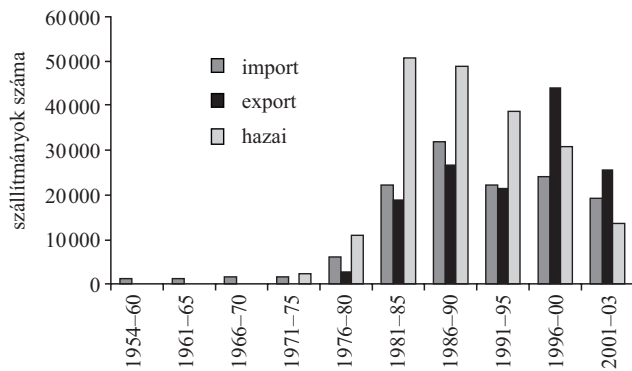
A kis és közepes aktivitású, főleg rövid felezési idejű radioaktív hulladékok hosszú távon jóval kisebb veszélyeket jelentenek környezetünkre, mint az atomerőművek kiégett fűtőelem kötegeiben felhalmozódott, nagy aktivitású nukleáris hulladék, amely több, hosszú felezési idejű radionuklidot is tartalmaz.

1954. június 27-én lépett üzembe az első olyan atomerőmű (Obnyinszk, SzU), amely már a hálózatra is termelt villamos energiát. Ennek villamos teljesítménye mindössze 5 MW volt. Ötven év alatt a világ villamosenergia-termelésében az atomenergia részesedése már megközelítően 17%-ra emelkedett. Egy 1998-as becslés szerint, ha az atomerőművi energiatermelés a jelenlegi szinten marad, akkor 2015-re a nukleáris hulladék mennyisége eléri a 250 ezer tonnát, és ez a hulladék több mint 2000 tonna plutóniumot is tartalmaz. A nagy mennyiségű, hosszú életű és nagy aktivitású nukleáris hulladékok keletkezésének mértékére a 1. táblázatban mutatunk be néhány adatot.

1. ábra. Az első, mesterséges radioaktivitású szállítmány kézírásos nyilvántartási adatai.

Készlet		Felszólítás	
(jel., m., dát.)	levegő alatti	(jel., m., dát.)	levegő alatti
$\text{CO}^{60}$	100 mc	1954	12.22
$\text{Na}_2\text{HPO}_4$			
$\text{P}^{32}$	1,7 mc	12.15	1954
$\text{H}_3\text{PO}_4$			
$\text{P}^{32}$	0,4 mc	12.15	1954
$\text{K}_2\text{HPO}_4$			
$\text{P}^{32}$	2,9 mc	12.15	1954
		$\text{CO}^{60}$ 100 mc	1954
			12.22
		$\text{Na}_2\text{HPO}_4$	
		$\text{P}^{32}$ 1,7 mc	12.15
			1954
		$\text{K}_2\text{HPO}_4$	
		$\text{P}^{32}$ 2,9 mc	12.15
			1954





2. ábra. A radioaktív izotópforgalom alakulása az elmúlt 50 évben

A nukleáris hulladék felhalmozódásával járó környezeti veszélyek és az atomerőművi balesetektől való igen erős lakossági félelmek világszerte egyre növekvő ellenállást váltanak ki mind a hulladékok elhelyezésével, mind a nukleáris energiatermeléssel szemben. Ezek új eljárások keresésére ösztönözték a szakembereket az egész világon, hosszú felezési idejű, nagy aktivitású nukleáris hulladékok átalakítására, megsemmisítésére (elégetésére), továbbá „tisztább” energiaforrások feltárására.

A továbbiakban a nagy aktivitású és hosszú felezési idejű nukleáris hulladékok mennyiségét csökkentő eljárásokkal (*transzmutáció*), az elérhető hasznosítási lehetőségekkel és a biztonságos elhelyezés kérdésével foglalkozunk, hazai szempontokat is szem előtt tartva.

## Nukleáris hulladékok mennyiségének csökkentése spallációval

A megfelelően előkészített, hosszú felezési idejű nukleáris hulladék intenzív neutronterben rövidebb felezési idejű izotópokká alakulhat át. A transzuránok (ld. *táblázat*) elhasadnak, a hosszú felezési idejű hasadási termékek pedig rövidebb felezési idejűekké alakulnak. El kell azonban kerülni, hogy miközben az egyik nuklidot rövid felezési idejűvé alakítjuk, közben egy másik – eredetileg rövid felezési idejűből – hosszú felezési idejűt hozzon létre. Ezért a nukleáris hulladékot a transzmutálás előtt

*1. táblázat*

**Az aktinidák és hasadási termékek mennyisége  
1 tonna kiégett (33 MWd/kg)  
urán fűtőelemkötegen (g/t)**

Aktinidák			Hasadási termékek		
Nuklid	$T_{1/2}$ (év)	(g/t)	Nuklid	$T_{1/2}$ (év)	(g/t)
$^{239}\text{Pu}$	$2,4 \times 10^4$	5450	$^{99}\text{Tc}$	$2,1 \times 10^5$	810
$^{237}\text{Np}$	$2,1 \times 10^6$	450	$^{129}\text{I}$	$2,3 \times 10^6$	370
$^{243}\text{Am}$	$7,4 \times 10^3$	100	$^{135}\text{Cs}$	$1,6 \times 10^7$	170
$^{245}\text{Cm}$	$8,5 \times 10^3$	1,2			

fel kell dolgozni (*particionálás*), azaz külön kell választani a megfelelő komponenseket.

Makroszkopikus mennyiség átalakításához igen nagy neutronfluxus és megfelelő neutronspektrum (energia-eloszlás) szükséges. Nagy neutronfluxus előállításának egyik ígéretes módja a gyorsítóval hajtott rendszer (*accelerator driven system, ADS*).

Ha egy nehéz atommag igen nagy energiájú (1–10 GeV) részecskékkel (p,  $\gamma$  stb.) lép kölcsönhatásba, akkor sok elemi részecske és maradék magképződmény keletkezik. Ez a spalláció. Két különböző típusát szokás megkülönböztetni:

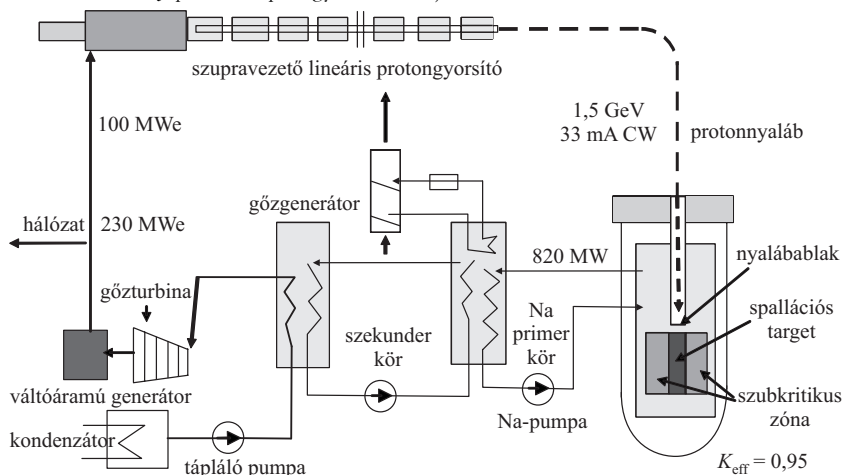
- 1) hadronspalláció (erős kölcsönhatási folyamatok),
- 2) fotonspalláció (elektromágneses kölcsönhatási folyamatok).

Ezek a folyamatok közvetlenül is használhatók nuklidok átalakítására, tehát transzmutációra. A spallációnak van azonban egy másik előnye is. Egyetlenegy 1–5 GeV energiájú proton nehéz elemekből álló céltárgyból (W, Pb, Bi, U, Pu stb.) 40–55 neutron is kelthet az energiától és céltárgytól függően. Így a spalláció igen intenzív neutronforrások létesítésére is alkalmas. Ha ezeket az intenzív neutronforrásokat szubkritikus rendszerek meghajtására használjuk, a neutronok száma tovább sokszorozható, és így igen nagy neutronfluxusú rendszerek ( $10^{15}$ – $10^{17}$   $\text{n cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) hozhatók létre. Ezen szubkritikus rendszerek további előnye, hogy a gyorsító lekapcsolásával leállnak, s így például elkerülhető egy kritikussági baleset (Csernobil).

A nagy intenzitású spallációs neutronforrások segítségével tehát lehetővé válik, hogy szubkritikus üzemmódban, protongyorsítóval hajtott erőművekben „égessük el” (alakítsuk át, transzmutáljuk) a felhalmozódott nagy aktivitású és hosszú felezési idejű nukleáris hulladékokat. Egy protongyorsítóval hajtott (1 GeV és 100 mA nyalábáramú)  $2 \times 500$  MW energiát előállító szubkritikus reaktorrendszer – a tervezet szerint – 1200 kg/év nukleáris hulladék (800 kg  $^{239}\text{Pu}$  és 400 kg Np, Am és Cm) transzmutálására képes [4].

Az elmúlt tíz évben sok nagy projekt készült amerikai, japán (3. ábra), francia, orosz és több nemzetközi együttműködés keretében, a nukleá-

3. ábra. Japán koncepció gyorsítóval hajtott szubkritikus reaktorrendszerre [5]



ris hulladékok elégetésével működő szubkritikus rendszerek és nagy intenzitású spallációs neutronforrások létesítésére.

A kiégett fűtőelemek elválasztására, valamint spallációs céltárgyak készítéséhez sok radiokémiai eljárást dolgoztak ki. Újabban pirokémiai elválasztási technológiák kutatásfejlesztései kaptak nagyobb hangsúlyt, tekintettel az igen magas hőmérsékletekre.

## Az Izotópkutató Intézetben elért eredmények

Az atommagok átalakításának két módja – a spalláció és a neutronbefogás – megtervezéséhez és sikeres végrehajtásához minél pontosabban kell ismerni a megfelelő hatás-keresztmetszeteket. E téren számos mérés és elemzés történt az Izotópkutató Intézetben mind a 45 MeV – 5 GeV  $\gamma$ -energia, mind az 1–2 GeV-es protonenergia, mind pedig a termikus neutronok tartományában.

Japán együttműködés keretében 50 MeV-ig meghatároztuk a  $^{99}\text{Tc}^m$  izomer integrális hatás-keresztmetszetét: ( $\sigma_i = 5,8 \pm 1$  mbarMeV) [6], továbbá a  $(\gamma, xn)$  reakció  $^{129}\text{I}$  transzmutációs hozamait, (4. ábra) a spallációs küszöb-energia körüli energiatarományban [7].

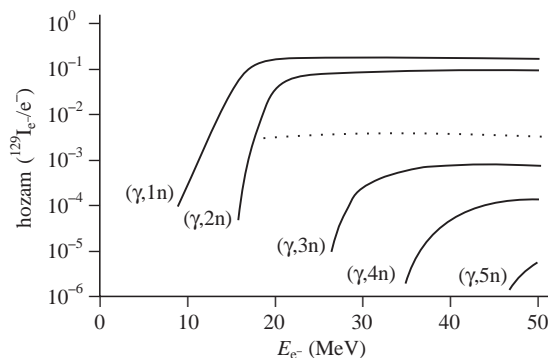
Belgya Tamás és munkatársai promptgamma-aktivációs analitikai (PGAA) berendezésükkel nemzetközi együttműködésben számos izotóp termikus neutronbefogási hatás-keresztmetszetét határozták meg [8, 9]. A nem mérhető nukleáris adatok modellszámítása is rendkívül fontos. Erre a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség (NAÜ) egy Referencia Bemenő Adatkönyvtár Projektet indított, amelyhez az Izotópkutató Intézet munkatársai diszkrét atommagnívó-könyvtárat készítettek [10].

Az ilyen adatok lényegesek a gyorsítóval hajtott rendszerek számítógépes tervezésénél, mivel az eddig végzett számítógépes szimulációs rendszerek eredményei – a paraméterek nem megfelelően pontos ismerete miatt – rendkívüli mértékben eltértek egymástól.

## A nukleáris hulladék elhelyezése mély geológiai formációkban

### A világban...

A nagy aktivitású nukleáris hulladékok kezelése és föld alatti tárolása témában az első szimpóziumot a NAÜ 1962-ben szervezte [11]. Azóta számos nemzetközi együttműködés keretében is foglalkoztak a hosszú idejű tárolás biztonsági kérdéseivel. Az 1970-es években az USA Sandia National Laboratories projektje keretében nemzetközi együttműködések alakultak a nukleáris erőművek hulladékainak tenger alatti elhelyezésére. Ezt az elképzelést azonban később feladták. Az 1980-as és 90-es években további, nemzetközi rendezvényeken megvitatott együttműködési modellek alakultak ki nukleáris hulladékok elhelyezési lehetőségeinek vizsgálatára mély geológiai formációkban (lásd pl. a NEA/OECD keretében tartott GEOTRAP Workshopokat [12]). 1987-ben, két-évenkénti *Migrációs Konferencia* sorozat indult, amely még napjainkban is folytatódik.



4. ábra. A  $^{129}\text{I}(\gamma, xn)$  reakció transzmutációs hozama 2,3 kg/cm<sup>2</sup> vastagságú mintában a 9–50 MeV energiatarományban, elektronhőj nélkül. A szaggatott vonal a  $^{129}\text{I}(n, \gamma)$  reakció hozama, elektronhőj jelenlétében.

A nukleáris anyagok mély geológiai formációkba történő elkülönítésére általában háromszoros gátrendszert alakítanak ki:

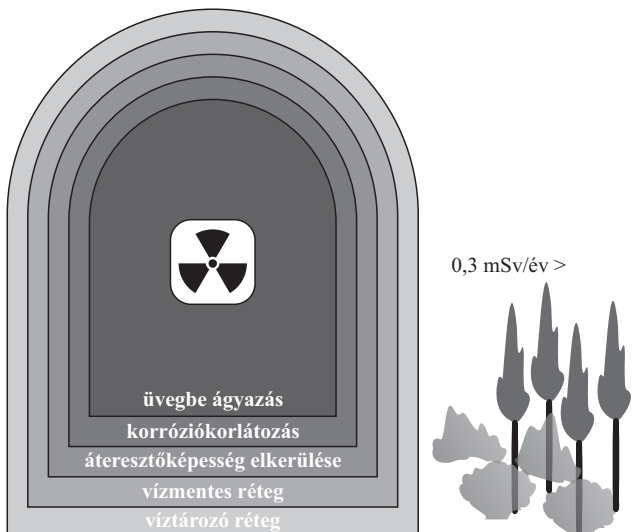
1. műszaki gátak (korrózióknak hosszan ellenálló konténerek);
2. bányaműszaki gátak (a konténereket körülvevő, a radionuklidokat jól megkötő, izoláló anyagok);
3. földtani gátak (azok a mélygeológiai képződmények, amelyekben az előző gátak elhelyezkednek).

Az 5. ábrán például, a karlsruhei nukleáris kutatóintézetben 15 éves kutatómunka alapján kifejlesztett többgátas hulladéktároló rendszer elvi felépítése látható. A kiválasztott tárolóhely a gorlebeni kőszóképződmény, amely 850 m mélységben helyezkedik el, mintegy 250 millió éves, és azóta nem érintkezett vízzel.

### ...és ittthon

A nagy aktivitású nukleáris hulladékok hazai tároló helyének keresése (1994–98) során a kővágószőlősi Bodai aleurolitformáció geológiai vizsgálatai azt mutat-

5. ábra. Többgátas tárolórendszer sematikus rajza a nagy aktivitású hulladékok környezetbe jutásának hosszú idejű meggátolására [13]. Az egyes gátak funkciói: legbelül a kiégett fűtőelem üvege ágyazva a feloldódás megakadályozására; utána korrózió-, szorpciókorlátozás; majd a leülepedés, átteresztőképesség elkerülése; negyedikként a 250 millió éves vízmentes réteg; legkívül vizes oldatokat, kolloidokat visszatartó víztároló réteg.



ták, hogy a több száz méter vastag, ~6 km<sup>2</sup> kiterjedésű másodlagos kőzet kiválóan alkalmas nukleáris tárolóhely létesítésére [14]. A legkedvezőtlenebb – nedvesített – anyagmintákon <sup>125</sup>I- és más izotópokkal végzett szorpció és diffúziós vizsgálatok 10<sup>-10</sup> m/s diffúziósebességet mutattak, ami 10–100 m / 1000 év migrációs sebességet jelent [15]. Ez azt jelenti, hogy ha mindenféle műszaki gát nélkül, egyenesen az agyagba helyeznénk el a nukleáris hulladékot, akkor ezer év alatt kevesebb mint 100 méterre távolodna csak el a helyétől, tehát biztosan nem érné el a talajvíz szintjét.

A nukleáris hulladékok határfelületek közötti kicserélődési mechanizmusának nyomjelzés-technikai módszerekkel történő vizsgálatát a szerző a *Radiotracer Studies of Interfaces*, 3 című könyv 10.2 fejezetében tekintette át [16]. A feldolgozatlan, a kémiai reprocesszálást követő és a kiégett fűtőelemek kezelése (transzmutáció) utáni nukleáris hulladékok elhelyezése és hosszú idejű tárolása során felmerülő kérdések irodalmi tapasztalataira helyeztünk hangsúlyt.

## Következtetések

Nemzetközi rendezvények elemzése alapján az alábbi területekre különös figyelmet és jelentős kapacitást kell fordítani tudományos és fejlesztési kísérletekben, valamint az eredmények ipari léptékű megvalósításában:

- Az elválasztási (particionálási) és transzmutációs folyamatok olyan irányú továbbfejlesztése, hogy megte-remtődhessen az összes aktinida (U, Np, Pu, Am és Cm) visszanyerése és újrafeldolgozása a hasadási termék és radiotoxikus anyagtartalom oly mértékéig, hogy a visszamaradó vég-hulladék radioaktivitása már pár száz év alatt drasztikusan lecsökkenjen.

- Nukleáris mérések a transzmutációs eljárásokban szereplő magreakciók hatáskeresztmetszetének minél pontosabb megismerésére.

- A mély geológiai formációkban történő elhelyezéskor a hosszú idejű tárolás során fellépő felületi kémiai reakciók által kialakuló anyagáramlás követése, kiegészítve a környezetvédelmi problémák megoldására irányuló vizsgálatakkal. A nukleáris hulladék tárolási körülményeinek tökéletesítése, és a feldolgozás újabb lehetőségeinek keresése.

## Irodalom

1. J. HIRLING, O. PAVLIK: *Infra-Red-Heated Evaporator System for Concentration of Radioactive Effluents* – Proc. Symp. on Management of Low- and Intermediate Level Radioactive Wastes, Aix-en-Provence, IAEA, 773, 1970
2. VERES Á.: *Nukleáris létesítményekben keletkező kis és közepes aktivitású, radioaktív hulladékok feldolgozásának és elhelyezésének problémái* – Energia és Atomtechnika 18 (1974) 366
3. FEHÉR L., FÉNYES GY., TORDAI GY.: *Radioaktív hulladékfeldolgozó és -tároló létesítése* – Izotóptechnika 17 (1974) 177
4. V.D. KAZARITSKY et al. – Nucl. Instr. Meth. In PR, A414 (1998) 21
5. T. TAKIZUKA: *Status of Nuclear Transmutation Study* – JAERI-Conf. 99.003, 150, 1999
6. T. SEKINE, K. YOSHIHARA, L. LAKOSI, Á. VERES: *Integral Cross Section of the <sup>99</sup>Tc(γ,γ)<sup>99m</sup>Tc Reaction in the 15–30 MeV Energy Region* – Appl. Radiat. Isot. 42 (1991) 149
7. VERES Á., LAKOSI L., SÁFÁR L.: *Nukleáris hulladékok átalakítása fűkezési sugárzással* – Fizikai Szemle, 50 (2000) 399–402
8. T. BELGYA, G.L. MOLNÁR, ZS. RÉVAY, J.L. WEIL: *Determination of thermal neutron capture cross sections using cold neutron beams* – 10th Int. Conf. on Nuclear Data for Sci. Techn., Sept. 26 – Oct. 1, 2004, Santa Fe, New Mexico, AIP, 2005, in print
9. G.L. MOLNÁR, T. BELGYA, Z. RÉVAY et al. – J. Radioanal. Nucl. Chem. 2005, in print
10. T. BELGYA – in RIPL-2 Handbook, (ed. M. Hermann) IAEA, 13, 2004
11. International Atomic Energy Agency: *Treatment and Storage of High-Level Radioactive Wastes* – Proc. Symp. Vienna, IAEA, 1963
12. Proc. 5th Workshop on Radionuclide Retention in Geological Media, (Oskarshamn, Sweden 7–9 May 2001) OECD, 2002
13. B. GRAMBOW, A. LOIDA, E. SMAILOS: *Long-term stability of spent nuclear fuel waste packages in Gorleben salt repository environments* – Nucl. Technology 121 (1998) 174
14. P. ORMAI, F. FRIGYESI, I. BENKOVICS, G. ÉRDY-KRAUSZ, L. KOVÁCS, GY. BÁRDOSY: *Hungarian Approach for the Final Disposal of High Radioactive Waste* – Chapter 12, in Geological Problems in Radioactive Waste Isolation (ed. P. Whitespoon) 113, 1998
15. K. LÁZÁR: *Study of migration of radionuclides in claystone considered as a prospective media for nuclear waste disposal* – IAEA-TECDOC-1177 (2000) 57
16. Á. VERES: *Environmental problems* – Chapter 10.2, in Radiotracer Studies of Interfaces 3 (ed. G. Horányi) Elsevier 359–404, 2004

# TRANSPORT-RELEVÁNS FLUKTUÁCIÓK MÉRÉSE A WENDELSTEIN 7-AS FÚZIÓS BERENDEZÉSEN

Pokol Gergő, Pór Gábor  
BME Nukleáris Technika Tanszék  
Zoletnik Sándor  
KFKI-RMKI Plazmafizikai Főosztály

*Anomális transzportjelenségeket vizsgáltunk a Wendelstein 7-AS sztellarátoron az 1/3 plazmaszéli rotációs transzformációérték környezetében mért jó és rossz összetartású állapotok közötti átmenetben. Ebben az átmenetben a mágneses térszerkezet kismértékű változására*

*a plazma energiaösszetartási ideje kétszeresére változik. A jó és rossz összetartású kísérletsorozatokról származó, különböző fluktuációs diagnosztikák jelei közül a Mirnov-szondákból, a LOTUS kollektív lézerszórás kísérletből és a lítiumnyaláb-emissziós spektroszkópiából (Li-BES) származó információk közötti korrelációt vizsgáltuk. Az adatok feldolgozását a hagyományos korrelációs módszerek mellett folytonos idő-frekvencia transzformációk és*

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

*korrelációs technikák ötvözésével végeztük. Bemutatunk jó és rossz összetartású eseteket, és az eredmények alapján egy empirikus anomális transzportmodellt építünk fel.*

## Bevezetés

A fúziós plazmafizikán belül kulcsfontosságú az anomális transzportfolyamatok vizsgálata. A Wendelstein 7-AS sztellarátoron az 1/3 plazmaszéli rotációs transzformáció érték közelében mért jó és rossz összetartású állapotok közötti átmenet [1] jól mutatja az anomális transzportjelenségek rotációs transzformációra való érzékenységét. A plazmaszéli rotációs transzformáció ( $\tau_a$ ) kismértékű változására a plazma az energia-összetartási idő kétszeresre növekedésével reagál. Jó az összetartás, ha  $\tau_a = 0,344$ , míg  $\tau_a = 0,362$  esetében már rossz összetartást kapunk. Ebben a cikkben ezt az átmenetet tanulmányozzuk a MIR-1 poloidális Mirnov-szondákból kialakított gyűrű által detektált mágneses fluktuáció jeleinek feldolgozásával, valamint azzal, hogy kapcsolatot keresünk más transzportreleváns diagnosztikák jeleivel.

A Mirnov-szondajeleken látható felvillanásokat a tranziens magneto-hidrodinamikai (MHD) módusokkal hozták kapcsolatba. Régebbi feldolgozások során [2] azt találták, hogy ezek a tranziens MHD-módusok radiálisan lokalizáltak, és valószínűleg poloidális struktúrájuk van [3].

Korábbi megfigyelések során a következő, valószínűleg transzportjelenségekkel összefüggő tranziens jelenségeket találták a diagnosztikai jelekben:

- Felvillanások a Mirnov-szondák által mért poloidális mágneses tér fluktuációkban a 10–100 kHz frekvenciatartományban 100  $\mu$ s körüli karakterisztikus időtartammal [3, 4].

- Moduláció a LOTUS kollektív lézerszórással [5] mért milliméter nagyságrendű sűrűségfluktuáció amplitúdójában. Ezen modulációk karakterisztikus autokorrelációs ideje is 100  $\mu$ s körüli [6].

- Centiméter nagyságrendű lapulások az elektron-ciklotronemissziós spektroszkópiával mért hőmérséklet-profilban. A kapcsolódó hőmérséklet-moduláció autokorrelációs ideje szintén 100  $\mu$ s nagyságrendű.

- Tranziensek a lítiumnyaláb-emissziós spektroszkópia (Li-BES) által mért sűrűségprofilban. A karakterisztikus időskála szintén a pár 100  $\mu$ s-os tartományban van.

Az összes említett perturbáció időskálája 100  $\mu$ s nagyságrendű, de az nem egyértelmű, hogy ezek a jelenségek vajon egyetlen okra vezethetők-e vissza, vagy pedig függetlenek egymástól. Néhány megelőző elemzés már utalt arra, hogy kapcsolat van a jelenségek között; például korrelációt találtak a milliméter skálájú sűrűségfluktuációk amplitúdója és a Mirnov-szondajelek időfüggő varianciája között [6]. E tapasztalatok alapján a jelenségek magyarázatára *munkahipotézist* állítottunk fel. Eszerint egy transzportesemény részecskéket és energiát juttat egyik mágneses felületről a másikra, ily módon gyors profilváltozást okoz. A kapott profil eltér az MHD-egyensúlytól, amire a plazma MHD-hullámokkal válaszol. Ezek mágneses komponensét figyeljük meg a Mirnov-szondajeleken, sűrűségkomponensét pedig a Li-BES-mérésekben a

plazma szélénél. Az elektron-ciklotron emissziós spektroszkópiai mérések felfedték, hogy ezek a gyors profilváltozások véletlenszerű helyeken jelennek meg, így különböző MHD-módusokat kelthetnek. Ebben a modellben a tranziens MHD-hullám nem oka a transzportfolyamatnak, csak egy mellékhatása annak.

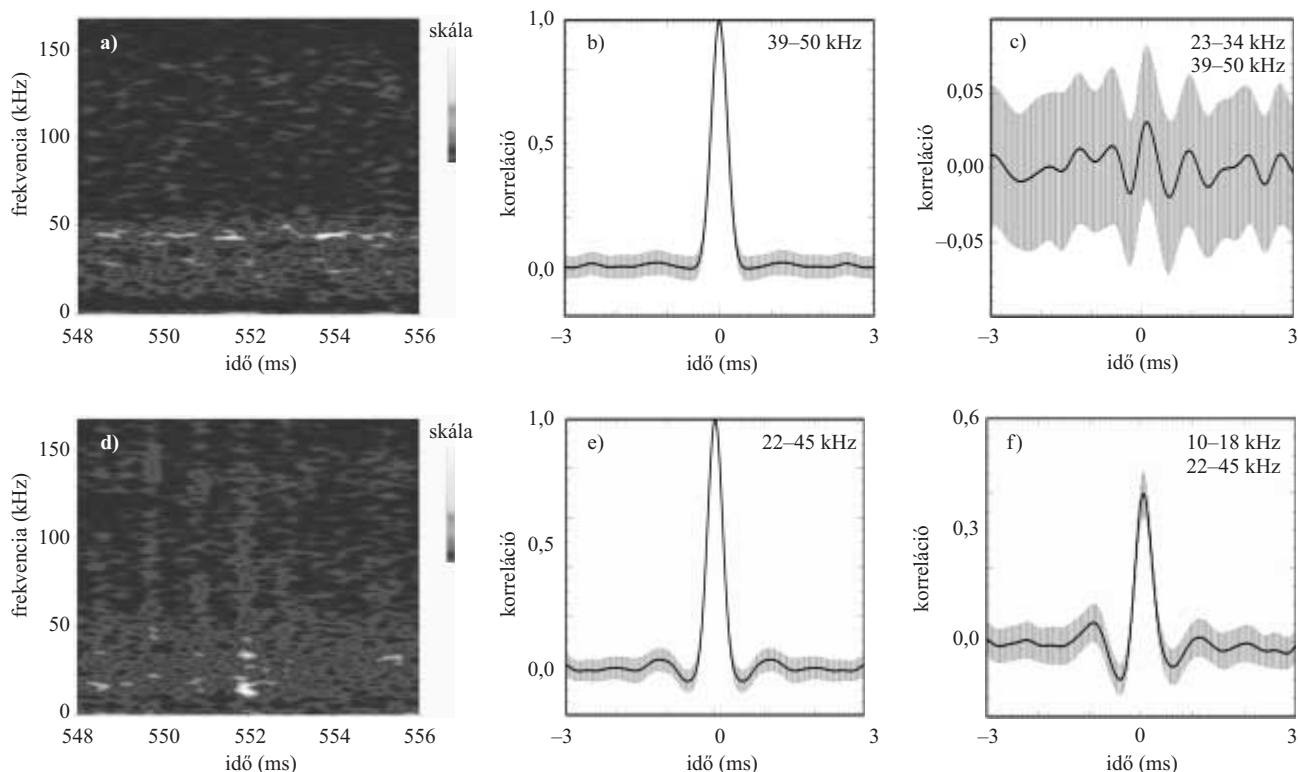
A hipotézis alátámasztására a különböző mért mennyiségek időbeli korrelációját kell megvizsgálni. Bár adja magát, hogy egyszerűen egy korrelációs feldolgozást végezzünk a különböző diagnosztikák jeleire, mélyebben végiggondolva láthatjuk, hogy különböző okoknál fogva ez nem lenne célravezető. Először is a Mirnov-szonda felvillanásai periodikusak, míg a profilváltozások nem azok. Egy kis remegés a Mirnov-szonda jeleinek fázisában teljesen eltüntetheti a korrelációt. Ilyen fázisremegést okozhat például a gerjesztő transzportesemény változó poloidális helye. Abból is nehézség adódik, ha a tranziens profillapulások különböző inverziós sugárral történnek. Ennek eredményeképpen az MHD-felvillanások változva lesznek pozitívan és negatívan korreláltak a lokális sűrűség- és energiaváltozásokkal. Ez szintén eltünteti a korrelációt.

A fenti megfontolásokból látszik, hogy új numerikus módszereket kell kifejleszteni és alkalmazni. A cikk első felében a különböző frekvenciájú mágneses térfluktuációk korrelációs vizsgálatára kifejlesztett új módszert ismertetjük. Következő lépésként az MHD-felvillanások és a sűrűségprofil-változások közötti korrelációs feldolgozást mutatjuk be.

## Korreláció a Mirnov-szondajelek sávteljesítményei között

Sztocasztikus jelek feldolgozásának hagyományos módja a spektrumösszetevők becslése, például a jel teljesítménysűrűség-függvényének becslése többnyire valamilyen gyors Fourier-transzformáció (*Fast Fourier Transformation*) alapú technikával. Míg a hagyományos Fourier-transzformáció végtelen hosszúságú Fourier-komponensekre bontja a jelet, addig a folytonos lineáris idő-frekvencia transzformációk, mint a rövid idejű Fourier-transzformáció vagy a folytonos *wavelet*-transzformáció, a jelet lokalizált idő-frekvencia atomokra, waveletekre bontja [7]. Ez nem egyszerű technika, mert a felbontás sikere a megfelelő idő-frekvencia atomok kiválasztásán múlik. A rövid idejű Fourier-transzformáció egyenletes idő-frekvencia felbontása jobban illett a Mirnov-szondajelekre, így ezt a transzformációt használtuk a folytonos *wavelet*-transzformáció helyett.

Első lépésként Gábor-atomokat használva – amelyeket Morlet-waveletnek is hívnak – kiszámoltuk a Mirnov-szondajelek spektrogramját (a rövid idejű Fourier-transzformációból számolt idő-frekvencia teljesítménysűrűség-eloszlást). Ezzel a technikával az *1.a* és *1.d ábrán* láthatóhoz hasonló kétdimenziós idő-frekvencia teljesítménysűrűség-eloszláshoz jutottunk, ami a jel spektrális összetételének időbeli változásaként fogható fel. Az *1.a ábrán* egy jó összetartású plazmakisülés, más néven lövés (52123 sz.), az *1.d ábrán* egy rossz összetartású lövés (52153 sz.) spektrogramjának részletét látjuk. Mindkét esetben leg-



1. ábra. a) és d): spektrogramrészletek fölül a jó és alul rossz összetartású esetben. b) és e): sávteljesítmény autokorrelációs függvények egy-egy kiválasztott frekvenciasávra hasonlóan a jó és a rossz összetartású esetben. c) és f): sávteljesítmény keresztkorrelációs függvények két-két kiválasztott frekvenciasáv között a jó és a rossz összetartású esetben.

alább két jól elkülönülő frekvenciasáv látható, ahol a jel energiája koncentrálódik, ám a frekvenciasávokban a jel nem folytonos, tüskékből és felvillanásokból áll. Az a tény, hogy a Mirnov-szondák jelteljesítménye frekvenciasávokba koncentrálódik, nem új felfedezés. Korábban is állították [8], hogy a változó poloidális plazmában – forgás, és az eltérő módusszámok miatt – a különböző sugáron keletkező módusok különböző frekvenciával jelennek meg. A további feldolgozáshoz frekvenciasávokat választottunk ki a teljes hosszúságú jelek spektrogramjaiból. A sávteljesítményeket a spektrogramok frekvenciasávokon belüli, frekvenciában történő felintegrálásával nyertük.

A [6] tanulmány, amely a milliméter skálájú sűrűség-turbulencia amplitúdójának időbeli változásaival foglalkozik, összefüggést talált a turbulenciában megfigyelt 100  $\mu$ s időtartam körüli kitörések és a poloidális mágneses tér perturbációi között. Ezért magától értetődő volt arra gondolni, hogy a sávkorlátozott teljesítmény változásai akkor csatolódnak össze, ha a transzportjelenségek a plazma sugarának elég nagy tartományán keresztülhúzódnak, vagyis a radiálisan lokalizált transzport eseményeknek közös oka van. Rossz összetartású plazmában a transzportfolyamatok felerősödnek, így itt erősebb korrelációt várunk a különböző frekvenciájú MHD-módusok amplitúdóváltozása között, mint jó összetartású esetben.

A fenti elképzelés tükrében először *szimulációval* *teszteltük* a sávteljesítmények szétválasztásának fenti módszerét. Különböző frekvenciájú jelek kitörésszerű burkolókkal történő modulálásával két vagy több frekvenciasávot szimuláltunk. A szimulált jelkomponenseket összeadtuk, és hozzáadtunk egy detektálási fehér zajt.

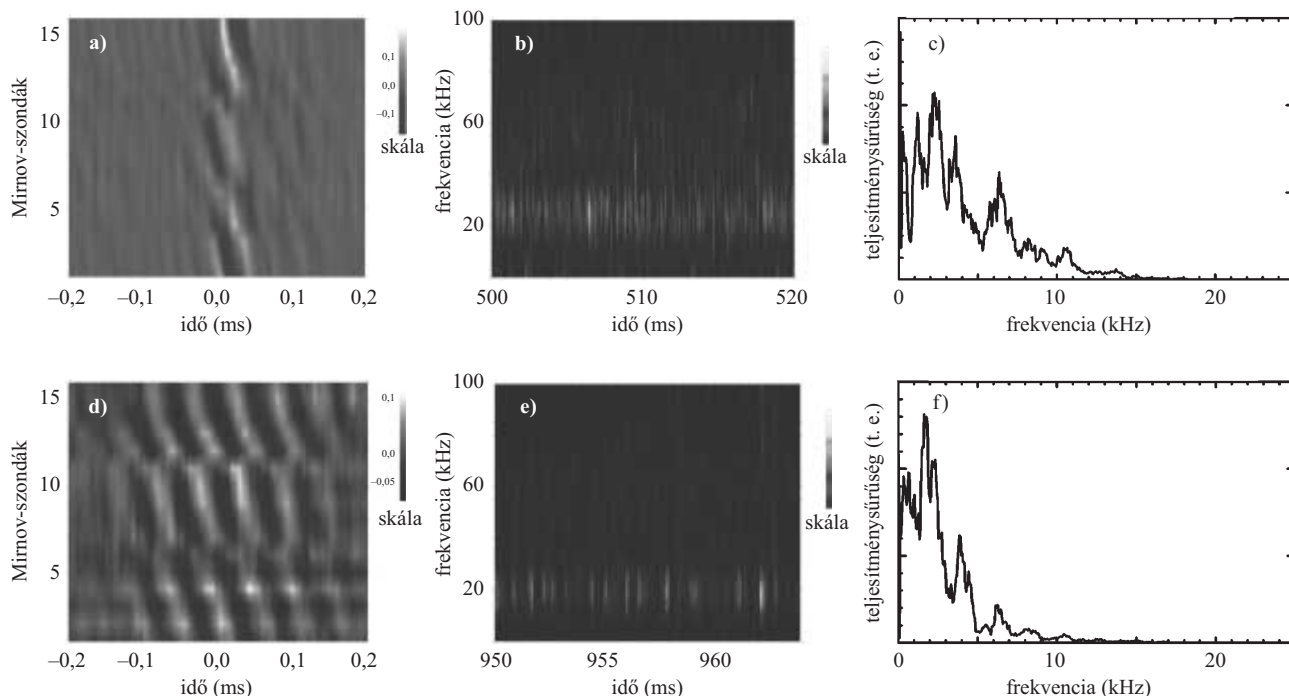
Rövid idejű Fourier-transzformáció használatával a szimulált jelet sikeresen szétválasztottuk összetevőire. A kinyert sávteljesítmény-jelek közötti korrelációt kiszámítva úgy találtuk, hogy a szimulált burkolók keresztkorrelációs függvényét jól visszakaptuk (részletek: [4]-ben).

A sávteljesítmények korrelációs függvényeit az 52123–52175 lövéssorozatban elemeztük. Ez a kísérletsorozat jó és rossz összetartású lövésekből állt négy plazmasűrűség mellett. A sávteljesítmények autokorrelációs függvényeiben is látunk eltérést (1.b és 1.e ábra), de az igazi különbség a különböző frekvenciasávhoz tartozó sávteljesítmények közötti keresztkorrelációs függvényekben mutatkozik. Jó összetartású plazmákban nulla vagy nagyon kis korrelációt találtunk (1.c ábra), rossz összetartású plazmákban viszont 0,5 körüli keresztkorreláció-maximumot látunk (1.f ábra). Az eredmények jól reprodukálódhatnak az azonos paraméterű lövésekre, és kvalitatívan nem függenek a plazma sűrűségétől sem.

A rossz összetartású lövésekben látható korrelációt magyarázhatja a sávteljesítmény-változások közös eredete, vagy esetleg a különböző frekvenciák közötti energiaátadás.

## A fluktuációk közös eredete, korreláció a különböző jelek között

A továbbiakban feldolgozott jelek a 47940 számú lövésből származnak, amelyben a plazmát lassan változtatott toroidális áram segítségével folyamatosan vitték át jó összetartású állapotból rossz összetartású állapotba. Ez



2. ábra. a) és d): Keresztkorrelációs függvények a Mirnov-szondajelek és a Li-BES 13-as csatornajele között a 47940 számú lövés jó (fölül) és rossz (alul) összetartású szakaszában. b) és e): a 8. Mirnov-szondajel spektrumai a 47940 számú lövés feldolgozott szakaszaira, jó és rossz összetartású esetekben. c) és f): a 15–30 kHz-es frekvenciasávhoz tartozó 8. Mirnov-szonda sávteljesítmények teljesítménysűrűség-függvényei a 47940 számú lövés feldolgozott szakaszaira, jó és rossz összetartású esetekben.

az  $\tau_a = 1/3$  körüli átmenettel kapcsolatban legtöbbet feldolgozott lövés, mert itt áll rendelkezésünkre a legtöbb diagnosztika.<sup>1</sup>

### Korreláció a Mirnov-szonda- és a Li-BES-jelek között

Korábban a racionális rotációs transzformáció körüli átmenettel kapcsolatos változásokat találtak a Li-BES-diagnosztika által mért sűrűségfluktuációkban [8]. Megmutatták, hogy a Li-BES által és a Mirnov-szondák által mért módus jellegű fluktuációk ugyanazon MHD-hullám különböző komponensei. Ennek egy bizonyítékát láthatjuk a 2.a és 2.d ábrákon a Mirnov-szonda nyers jelei és a Li-BES-diagnosztika 13-as csatornája (amely a plazma legkülső zárt fluxusfelületén belüli térrészen emittált fényt detektálja) között számolt keresztkorrelációs függvényeken.<sup>2</sup>

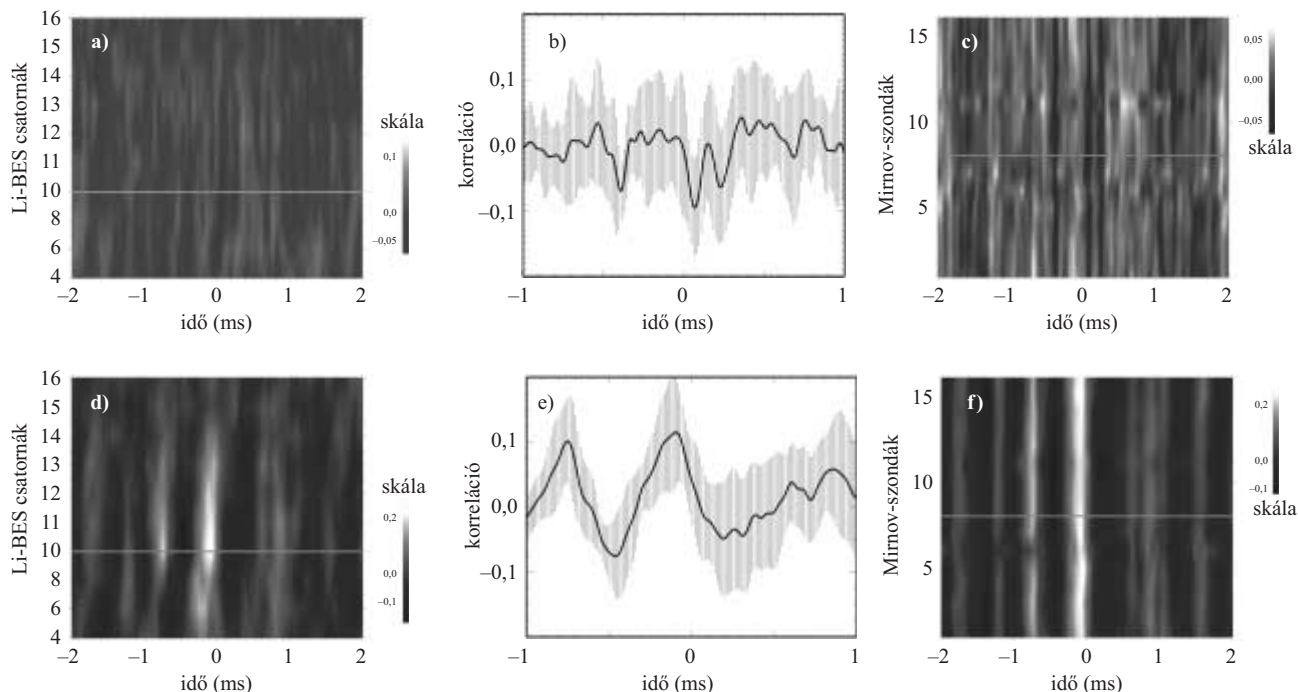
Két jellegzetességet láthatunk ezeken a keresztkorrelációs függvényeken. Az egyik az alapvető hullámzás 0,05 ms körüli periódusidővel, ami a 2.b és 2.e spektrogramokon is látható 20 kHz uralkodó frekvenciának felel meg. A 2.a és 2.d ábrákon látható különböző Mirnov-szondák

közötti fázistolást az MHD-módus poloidális forgása okozza. Ezek a jellegzetességek ugyanúgy jelen vannak a jó és a rossz összetartású állapotokban. A különbség a két keresztkorrelációs ábra között a struktúrák relaxációs hosszában van. Rossz összetartású esetben a struktúra a  $0 \pm 0,15$  ms tartományban látható, jó összetartású esetben a struktúra sokkal keskenyebb ( $\pm 0,04$  ms), és a zérustól kissé eltérő közepű. A kis időeltolás magyarázatával nem foglalkoztunk, mert a két jelet különböző ADC mintavételezte, és a szinkronizálás pontosságát nem tudtuk ellenőrizni. A lecsengés idejében látott különbség egyértelműen szignifikáns és további elemzést kíván. A keresztkorrelációs függvények lecsengésében látható időállandókat a Mirnov-szondajelek spektrogramjai is megfigyelhetjük (2.b és 2.e ábrák). Rossz összetartású plazmaállapotban ritkábban jönnek hosszabb felvillanások. A felvillanások gyakoriságára vonatkozó állítás kvantitatívan is vizsgálható a 15–30 kHz frekvenciasáv sávteljesítményének teljesítménysűrűség-függvényével (2.c és 2.f ábra).

Érdeemes megfigyelni a Mirnov-szondák jeleiből a 15–30 kHz frekvenciasávban kapott sávteljesítmények és a Li-BES-jelek között számolt keresztkorrelációs függvényeket (3. ábra). A bal oldali két ábrán (3.a és 3.d ábra) egy kiválasztott Mirnov-szonda (a 8-as számú) és a különböző Li-BES-csatornák közötti keresztkorrelációs függvények láthatók, míg a jobb oldali két ábrán (3.c és 3.f ábra) az egy kiválasztott Li-BES-csatorna (a 10-es számú) és az összes Mirnov-szonda közötti keresztkorrelációs függvényeket ábrázoltuk. Középen (3.b és 3.e ábra) a 8-as számú Mirnov-szonda és a 10-es Li-BES-csatorna közötti keresztkorrelációs függvények láthatók. Megfigyelhető, hogy a jó összetartású állapotban nincs szignifikáns korreláció a jelek között, és a keresztkor-

<sup>1</sup> Figyelembe véve, hogy mely időszakokról álltak rendelkezésünkre kvázistacioner jelszakaszok, a Mirnov-szondajelek Li-BES-jelekkel történő összehasonlításához a 0,50–0,52 s időtartományt választottuk a jó összetartású állapotból, és a 0,950–0,963 s tartományt a rossz összetartású szakaszból. A Mirnov-szondajelek LOTUS-jelekkel történő összehasonlításához a 0,42–0,56 s és a 0,9–0,96 s időtartományokat választottuk értelemszerűen a jó és rossz összetartású állapotokból.

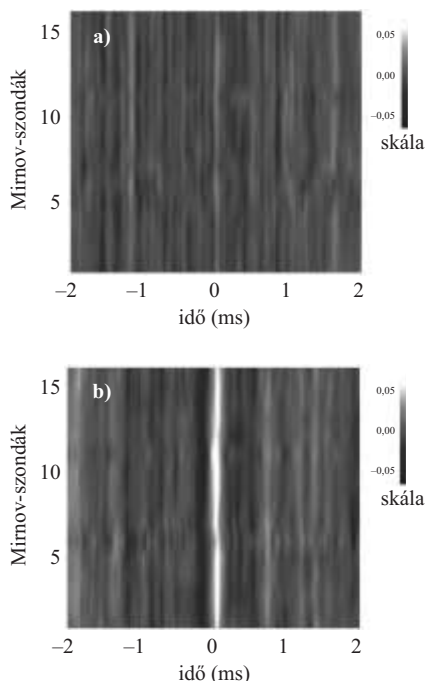
<sup>2</sup> A keresztkorrelációs függvények számolásában a cikkben található összes ábra esetén azt a konvenciót követtük, hogy az időtengely mindig a Mirnov-szondajel késését mutatja a Li-BES- és LOTUS-jelekhez képest.



3. ábra. Keresztkorrelációs függvények a Li-BES-csatornák jelei és a Mirnov-szondajelek 15–30 kHz-es frekvenciasávhoz tartozó sávteljesítményei között a 47940 számú lövés jó (föül) és rossz (alul) összetartású szakaszában. a) és d): keresztkorrelációs függvények a 8. Mirnov-szondajel sávteljesítménye és különböző Li-BES-csatornák között. b) és e): keresztkorreláció a Li-BES 10-es csatornajele és a 8. Mirnov-szondajel sávteljesítménye között. c) és f) keresztkorrelációs függvény a Li-BES 10-es csatornajele és a Mirnov-szondajel sávteljesítménye között. (Az utolsó zárt fluxusfelület a 10-es Li-BES-csatorna körül található.)

relációs függvények hullámzása a rövid idejű Fourier-transzformáció simításának megfelelő. Rossz összetartás esetén szignifikáns korrelációt találtunk az utolsó zárt fluxusfelület közelében mérő Li-BES-csatornák és az összes Mirnov-szonda sávteljesítménye között.

4. ábra. Keresztkorrelációs függvények a Mirnov-szondák jeleinek 15–30 kHz frekvenciasávhoz tartozó sávteljesítményei és a LOTUS lézerszórás 750 kHz frekvenciájú sávteljesítménye között jó (föül) és rossz (alul) összetartású esetben.



Fontos megértenünk ezen a keresztkorrelációs függvények jelentését. Itt egy adott frekvenciasávban mért mágneses móduszerű tevékenység intenzitásának kapcsolatát vizsgáljuk a hozzá hasonló időskálán változó sűrűségprofil-lapulásokkal, amelyeket a Li-BES-jelekben látunk. Az ily módon számolt keresztkorrelációs függvények tehát azt mutatják, hogy a sűrűségprofil-változások milyen kapcsolatban vannak az MHD-módusok gerjesztődésével.

A 3.e ábrán látható keresztkorrelációs függvény központi csúcsa negatív eltolást mutat, ami azt jelzi, hogy a Mirnov-szondákban mért felvillanások körülbelül 100  $\mu$ s-mal a profilváltozások *előtt* jelentkeznek. Ez azt jelezheti, hogy a modellünkkel ellentétben az MHD-tevékenység okozza a profil lapulását, mint azt a TJ-II szteellarátor eredményei is sugallták [9], ám ilyen következtetéseket stacioner lövések jobb statisztikájú feldolgozásával kell még alátámasztani.

#### Korreláció a Mirnov-szonda- és a LOTUS-jelek között

Ok-okozat szempontjából is érdekes megvizsgálni a Mirnov-szonda által érzékelt MHD-tevékenység intenzitásának és a LOTUS lézerszórással mért milliméter skálájú turbulencia intenzitásának időtartománybeli összefüggéseit.<sup>3</sup>

A jelek korrelációs függvényei a 4. ábrán láthatók jó és rossz összetartású állapotokban. Míg jó összetartás

<sup>3</sup> Ehhez a más feldolgozásokban [6] megszokott 700–800 kHz frekvenciasávot választottuk ki a LOTUS-jelekből, amelynek a sávteljesítményét a LOTUS-jelek feldolgozására kifejlesztett diszkrét ablakozott Fourier-transzformáció alapú programmal számoltuk. A Mirnov-szondajelekből a szokásos módszerrel a 15–30 kHz frekvenciasáv sávteljesítményét számoltuk ki.

esetén nem látunk kapcsolatot, rossz összetartású állapotban 100  $\mu$ s-os időskálán a Mirnov-szonda helyzetétől függetlenül érdekes struktúrát látunk. A Mirnov-szondajelben látható tranziens MHD-módus felgerjesztődése előtt a turbulencia erősödni, míg utána gyengülni látszik. Ez a tapasztalat alátámasztani látszik a széles körben elterjedt elképzelést, hogy az anomális transzportot a turbulenciából felövő transzportesemények okozzák, ám messzemenő következtetések levonása előtt még mindenképpen érdemes jobb statisztikát biztosító stationer lövéseket is feldolgozni.

## Összegzés

Rövid idejű Fourier-transzformációt használva kiszámoltuk a W7-AS sztellarátor Mirnov-szondajeleire a spektrogramokat az  $\tau_a=1/3$  körüli átmenet jó és rossz összetartású plazmaállapotaira, amelyekből ezután kinyertük a különböző frekvenciasávokhoz tartozó sávteljesítményeket. Azt találtuk, hogy a sávteljesítmény-jelek statisztikája (teljesítménysűrűség-függvény, autokorrelációs függvény) függ a plazma összetartásától.

Kiszámoltuk a Mirnov-szonda sávteljesítmények kereszt-korrelációs függvényét az ugyanakkor a jelnek más frekven-

ciákhoz tartozó sávteljesítményeivel és más diagnosztikák (Li-BES, LOTUS) jeleivel. Minden esetben szignifikáns korrelációt találtunk rossz összetartású esetben, és nem találtunk korrelációt jó összetartású esetben. Ez a tapasztalat azt bizonyítja, hogy rossz összetartású esetben nagy méretű komplex transzportesemények történnek. Ezen események valószínűleg a W7-AS sztellarátoron korábban megfigyelt ELM-szerű (ELM-like) struktúrák [10].

A Mirnov-szonda sávteljesítményei és az egyéb diagnosztikák (Li-BES, LOTUS) jelei között számolt kereszt-korrelációs függvények időkéteséseket mutatnak. Ez reményt ad arra, hogy állandó paraméterű lövések feldolgozásából számolt, jobb statisztikájú kereszt-korrelációs függvényekből akár ok-okozati kapcsolatokra is fény derüljön.

## Irodalom

1. R. BRAKEL et al. – Nuclear Fusion 42 (2002) 903
2. S. ZOLETNIK et al. – Phys. Plasmas 6 (1999) 4239
3. M. ANTON et al. – J. Plasma Fusion Res. 1 (1998) 259
4. G. POKOL et al. – ECA 27A (2003) P-3.7
5. M. SAFFMAN et al. – Rev. Sci. Instrum. 72 (2001) 2579
6. N.P. BASSE et al. – Phys. Plasmas, to be published (2004)
7. S. MALLAT: A wavelet tour of signal processing – Academic Press, 2001
8. S. ZOLETNIK et al. – Plasma Phys. Control Fusion 44 (2002) 1581
9. C. ALEJALDRE et al. – 19th International Conference on Fusion Energy OV/4-4 (2002)
10. M. HIRSCH et al. – ECA 22C (1998) 718

# »MIKÉPPEN A FÖLDÖN, AZONKÉPPEN AZ ŰRBEN IS«

– avagy elsődleges és másodlagos kozmikus sugárzás-dozimetria a Nemzetközi Űrállomáson és a földi kiegészítő vizsgálatok

Pálfalvi József, Szabó Julianna

KFKI Atomenergia Kutatóintézet

Eördögh Imre

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

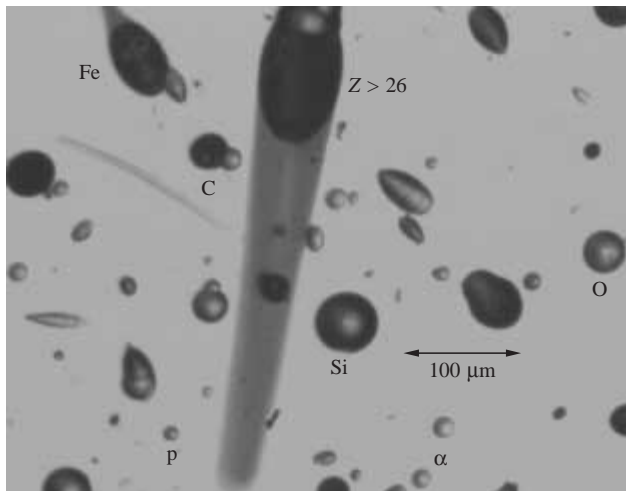
*A szerzőkből és munkatársaikból létrehozott csapat 2000 óta foglalkozik a Nemzetközi Űrállomáson (ISS) észlelhető kozmikus sugárzás vizsgálatával, szilárdtest-nyomdetektort felhasználó technikával. Ez a tevékenység a BRADOS-projektekben valósul meg. Fő célja az ISS szervizmoduljában az elsődleges kozmikus sugárzás, valamint a falban és szerkezeti anyagokban kiváltott másodlagos (főleg neutronokból álló) sugárzás térbeli eloszlásának és időbeli változásának vizsgálata. Az űrbeli mérések előkészítéséhez kapcsolódva a detektorok űrviszonyok közötti viselkedésének vizsgálatára különböző földi vizsgálatok és részecskegyorsítóknál végzett kalibrálások folynak. A mérésekből megállapítottuk, hogy az űrhajósok átlagos dózisterhelése 2001-ben a napi 523  $\mu$ Sv körüli értéket is elérhette, míg 2003-ban – főleg a csökkenő naptevékenység miatt – ez 320  $\mu$ Sv volt naponta.*

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

A kutatások 2002–2004. között a MŰI támogatásával folytak (TP–174).

A KFKI Atomenergia Kutatóintézet (AEKI) Sugárvédelmi Kutatócsoportjának (SK) munkatársai 1975 óta foglalkoznak atomi részecskék szilárdtest-nyomdetektorral történő vizsgálatával. A kutatócsoport nemzetközileg is elismert eredményeinek, valamint az Űrdozimetriai Csoport sikeres PILLE-programjának eredményeként az SK meghívást kapott több nemzetközi űrdozimetriai, illetve a Nemzetközi Űrállomáson (ISS) történő kozmikus sugárzás mérési programban való részvételre. Ezek: BRADOS (koordinátor: moszkvai Orvosi–Biológiai Problémák Intézete, IBMP), BIOPAN–RADO (koordinátor: Európai Űrkutatási Ügynökség, ESA és IBMP) és SORD–MATROSHKA (ESA-koordináció) programok. A mérőberendezések fejlesztéséhez és működésük ellenőrzésére földi kísérletek folynak különböző nagyenergiás gyorsítóberendezéseknél. Ebben az összefüggésben a földi kísérletek és módszertani ismertetés mellett a BRADOS-programokban való közreműködésünket és eredményeinket kívánjuk közreadni. Mindenekelőtt röviden megismertetjük az olvasót a szilárdtest-nyomdetektorokkal, és megadjuk néhány szakkifejezés jelentését is.





1. ábra. Különböző kozmikus részecskék keltette nyomok a detektorban. A nyomokat 6 normális NaOH-oldatban, 70 °C hőmérsékleten történő 20 óra maratás után rögzítettük 400-szoros nagyítású mikroszkóppal. A detektor 2001-ben összesen 248 napot repült az ISS-en. A képen megkülönböztethetünk többek között proton- és  $\alpha$ -nyomokat (p,  $\alpha$ ), kis rendszámú (Z) elemek (úm. C, O, Si, Fe) nyomait és egy még nem azonosított, nagy rendszámú és energiájú részecske (HZE) nyomát. A nyomok átmérője a rendszámmal, hossza pedig az energiával hozható összefüggésbe. (Felvétel: Pálfalvi, SK)

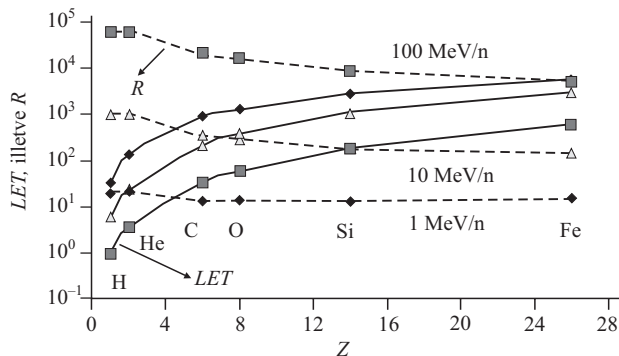
## Mi a szilárdtest-nyomdetektor?

Szilárdtest-nyomdetektorként viselkedhetnek természetes kristályok (olivin, csillám stb.) és bizonyos műanyagok (pl. cellulóz-nitrátok, polikarbonátok). Elektromosan töltött részecskéket azért képesek detektálni, mert a részecskék a detektor anyagába történő becsapódásukkor pályájuk mentén energiát adnak le, és ezáltal roncsolódást hoznak létre. Ez a részecske „(láb)nyoma”, amelynek szélessége ~10 nm-től ~100 nm-ig, hossza pedig néhány  $\mu\text{m}$ -tól néhány cm-ig terjedhet. A roncsolt zónában az anyag elveszíti eredeti tulajdonságait, és különféle kémiai behatásokkal szembeni ellenállóképessége lecsökken. Alkalmassal vegyszerrel eltávolíthatjuk az anyagot a roncsolt zónából és az azt közvetlenül körülvevő térrészből (maratás), és ezáltal a „(láb)nyom” felnagyítható, illetve láthatóvá tehető. Ehhez már csak egy megfigyelőeszköz szükséges, amely lehet egyszerű optikai mikroszkóp, vagy bonyolultabb, számítógéppel kombinált kép-analizátor. A keletkező nyomokból még a részecske egyes tulajdonságai (pl. fajta és energia) is meghatározhatók. Az 1. ábra ezt illusztrálja.

Az általunk használt detektorok 1 mm vastag, 10–25  $\text{cm}^2$  alapterületű PADC (poli-allyl-diglicol-carbonate) anyagból készült lapkákból állnak össze. A teljes vastagság egyes esetekben eléri a 25 mm-t is.

## Képanalizátor

A tanítható képanalizátor [1] meghatározza a kémiai maratás után kialakuló nyomok geometriai méreteit és optikai tulajdonságait. A nyomokat a mért paraméterek alapján előre meghatározott osztályokba sorolja, és elvégzi az egyes osztályokban a mért értékek statisztikus kiértékelését. Az egyes osztályok megfeleltethetők különféle eredetű



2. ábra. Számított LET (folytonos vonal) és hatótávolság (R, szaggatott vonal) értékek  $\text{keV}/\mu\text{m}$ , illetve  $\mu\text{m}$  egységben a Z rendszám függvényében, 100 MeV/n (■), 10 MeV/n (▲) és 1 MeV/n energiákra (◆).

tű nyomoknak, így a detektorra kerülő részecskék szétválaszthatók fajta és energiatartomány szerint. Ez fontos lépés, mivel az elsődleges kozmikus sugárzástól eredő nyomok így elhatárolhatók a másodlagosan keletkező neutronok által keltett nyomoktól, és külön-külön értékelhetők.

## Fizikai mennyiségek

- Hatótávolság (Range): a részecskének egy adott anyagban maximálisan megtehető úthossza. Jele R, mértékegysége  $\mu\text{m}$ , függ a részecske fajtájától és energiájától.

- Energia: a részecske kinetikus energiája. Jele E, mértékegysége keV, MeV, GeV. Néha az egy nukleonra eső energiát adjuk meg, ilyenkor jele  $E_n$ , szokásosan használt mértékegysége keV/n, MeV/n, GeV/n.

- Dózis: ez a szó sokféle mennyiséget takarhat. Itt az úgynevezett dózisegyenérték (dose equivalent) fogalommal azonosítjuk [2], jele H, mértékegysége a  $\mu\text{Sv}$ , mSv.

- Lineáris energialeadás (Linear energy transfer): a részecske pálya menti, egységnyi úthosszon leadott energiája. Jele LET, mértékegysége  $\text{keV}/\mu\text{m}$ .

- Relatív maratási sebesség: jele V,  $V = V_T/V_B$ , ahol  $V_T$  az anyag maratási sebessége a részecske pályája mentén, a roncsolt zónában és  $V_B$  az anyag normális maratási sebessége.

## Földi vizsgálatok

### Modellezés

A földi vizsgálatok között fontos helyet foglalnak el a matematikai modellezések, amelyek során, adott körülmények között, meghatározzuk az egyes részecskék pályáját, hatótávolságát, energialeadását. A modellezésnél természetesen figyelembe kell venni a detektor burkolatát, esetlegesen ismert egyéb körülményt, a detektor előtt lévő anyagréteget (védelmet) stb. A 2. és 3. ábrán bemutatjuk néhány elemre a 100 MeV/n energiáig terjedően számított R- és LET-függvényeket az általunk használt PADC-detektorban.

A 2. ábrán bemutatott adatokat a galaktikus eredetű kozmikus részecskék vizsgálatához szükséges kalibrációs kísérletek során használjuk fel, amikor az ismert részecske- és energiainformációkból meghatározzuk a nyomok

várható hosszát, átmérőjét valamint az energialeadást. A 3. ábra a detektoranyagban meglökött protonok által létrehozott nyomok kiértékelését segíti elő.

A PADC-detektorban a protondetektálás alsó energiahatárát (~120 keV) a hatótávolság, ( $R > 2 \mu\text{m}$ ), a felsőt (~8 MeV) pedig a  $LET > 6 \text{ keV}/\mu\text{m}$  határozzák meg. Ez azért van így, mert a felszínközeli, rövid nyomok a maratás során lekopnak, illetve ha a  $LET$  kicsi, akkor a leadott energia nem elég a nyom létrehozásához. Megfigyelhető, hogy a protonenergia növekedésekor a  $LET$  csökken. Nagyobb  $LET$ -hez nagyobb nyomátmérő tartozik.

### Kalibrálások

A modellezés mellett igen fontos annak vizsgálata, hogy az egyes nagyenergiás részecskék maratás után milyen nyomokat hoznak létre a detektoranyagban. A detektorokat gyorsítóknál besugározzuk ismert fajtájú és energiájú részecskével, reprodukálható módon kimarattjuk, és megmérjük a nyomok lehetséges méreteit. A nyomkialakulás kinematikai elméleti szerint tudjuk, hogy adott idő alatt kialakuló méretek hogyan függenek a nyom relatív maratási sebességétől [3]. Ha például a nyom hossza nem mérhető (ld. az 1. ábrán a Si-nyomot) a relatív maratási sebesség az alábbi egyenlettel határozható meg:

$$V = \frac{\sqrt{(1 - B^2)^2 + 4A^2}}{1 - B^2}, \quad (1)$$

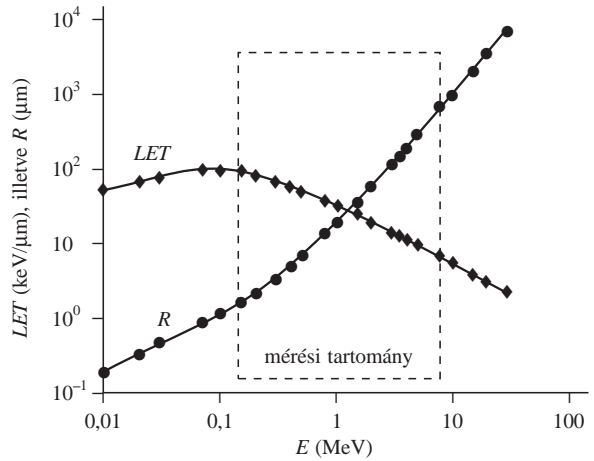
ahol  $A = a/2b$  és  $B = b/2b$  ( $a$  az ellipszis alakú nyom mért nagy-, a  $b$  a kistengelye,  $b$  a detektor felületéről lemaródott réteg vastagsága:  $b = V_b t$ ,  $t$  a maratás ideje). Ha a nyomhossz változása ismételt maratás során mérhető (ld. az 1. ábrán pl. a Fe-nyomot), akkor  $V$  meghatározására használható a (2) egyenlet:

$$V = \frac{dL}{db}, \quad (2)$$

Itt az  $L$  a maratott nyomhossz. Lényegében az  $L(b)$  függvény meredeksége megadja a  $V$ -t. Ha a  $LET$  elég nagy és a maratási idő is hosszú (>10 óra), akkor  $db$  helyettesíthető  $d(b/2)$ -vel (ld. az 1. ábrán a  $Z > 26$  nyomot). A  $V$  azonban a  $LET$  függvénye is, és a közöttük lévő összefüggés kísérletileg meghatározható. Ezt a  $LET - (V - 1)$  függvényt nevezzük kalibrációs görbének. Ennek alapján tudjuk az ismeretlen részecskéket azonosítani, energiájukat meghatározni. A méréseket és a számításokat a detektoron található összes részecskére elvégezve besorolhatjuk őket megfelelően választott  $\Delta LET_i$  intervallumokba. Az így nyert eloszlásfüggvényből ( $LET$ -spektrum) lehet a dózist számítani a (3) egyenlettel.

$$H = \frac{1}{A} 1,602 \cdot 10^{-6} \sum_i \Phi_i(LET_i) \overline{LET}_i Q_i(LET_i) \Delta LET_i, \quad (3)$$

ahol  $A$  a detektor teljes felülete  $\text{cm}^2$ -ben,  $\Phi_i(LET_i)$  az  $i$ -edik  $\Delta LET_i$  intervallumba eső részecskék száma, ahol  $\overline{LET}_i$  az átlag  $LET$  és  $Q_i(LET_i)$  a minőségi tényező [2]. Az  $1,602 \cdot 10^{-6}$  állandó a mértékegységek összehangolására szolgál, így a dózist  $\text{mSv}$ -ben kapjuk.



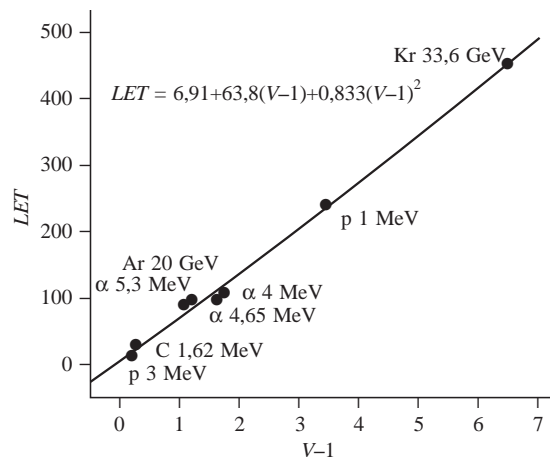
3. ábra.  $LET$  és hatótávolság ( $R$ ) protonokra, az energia függvényében

A 4. ábrán az általunk jelenleg használt kalibrációs görbét mutatjuk be. Mivel a detektor anyagi tulajdonságai – ha csekély mértékben is – változhatnak, ezért az ilyen célú vizsgálatokat rendszeresen ismételni kell. A pontosság növelhető a mérési pontok számának növelésével, vagyis további besugárzásokkal. Ez a módszer alkalmas a galaktikus eredetű kozmikus részecskék által leadott dózis meghatározására.

### A BRADOS-program

A BRADOS-programokat 2000-től a moszkvai Orvosi-Biológiai Problémák Intézete szervezi és irányítja. A program feladata a kozmikus sugárzás egyes összetevőinek biológiai objektumokra, elektronikai eszközökre, és nem utolsósorban az űrhajósokra gyakorolt hatásának vizsgálata az ISS-en, elsősorban az orosz „Zvezda” (Csillag) nevű szervizmodul belsejében. A programban a szervezőkön kívül több ország képviselteti magát. A detektorokat Szojuz és Progressz típusú űr-szállítójárművek viszik és hozzák. A detektorok a modul meghatározott pontjain vannak rögzítve, így információt nyerhetünk az űrállomás orientáció-

4. ábra. Különböző energiájú, ismert  $LET$ -ű protonokkal,  $\alpha$ -részecskével, illetve C-, Ar- és Kr-ionokkal besugárzott PADC-detektorokban kialakult nyomok méreteiből számított relatív maratási sebesség és a  $LET$  összefüggése. (6 órás maratási időre, 6 normális, 70 °C-os NaOH-oldatban.)



jából és a falvastagságából, valamint egyéb árnyékoló tényezőktől eredő sugárzási eltérésekre is.

Eddig 4 BRADOS-kísérletre került sor, ezek közül mi 2 mérésben vettünk részt. Ezek ismert adatai a következők:

#### BRADOS-1

- Földi indítás: 2001. február 24., dokkolás február 26. Jármű: Progressz M-44.
- Vissza: 2001. október 31. Jármű: Szojuz TM-32.

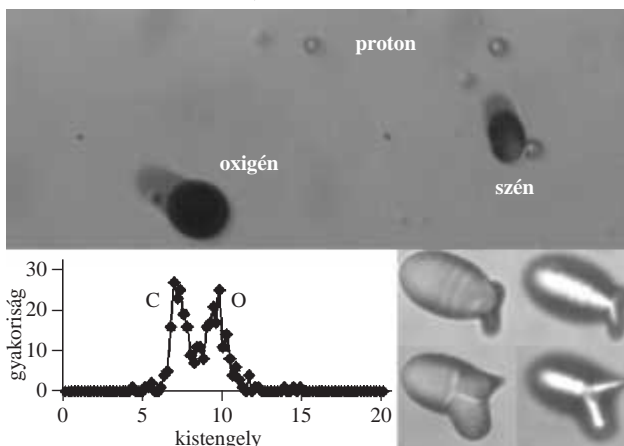
• Mérési pozícióban volt 248 napig, erre az időre esett a 11-éves napciklus maximális naptevékenysége.

• Pálya: legkisebb távolság 370–395 km között, legnagyobb távolság 400–420 km között, a földi egyenlítő síkjához viszonyított pályasík szöge  $51,8^\circ$ . A Földhöz képest az orientáltság nem állandó a teljes idő alatt.

#### BRADOS-3

- Földi indítás: 2003. február 2., dokkolás február 4. Jármű: Progressz M-10-247. Detektordobozok elhelyezése február 7. (*Nyikolaj Budarin*, 6. sz. legénység).
- Detektordobozok leszerelése (*Alexander Kaleri*, 8. sz. legénység) 2003. október 23. Visszaindulás és Földre érkezés: 2003. október 27. Jármű: Szojuz TMA-2.
- Mérési pozícióban volt 257 napig, csökkenő naptevékenység.
- Pálya: Legkisebb távolság 320–350 km között, legnagyobb távolság 360–380 km között, a földi egyenlítő síkjához viszonyított pályasík szöge  $51,8^\circ$ . A Földhöz képest az orientáltság állandó a teljes idő alatt.

5. ábra. A CERF berendezésnél neutronokkal besugárzott detektorokon észlelt meglökött hidrogén- (proton), oxigén- és szénatomok nyomai 6 órás maratás után (800-szoros nagyítás). A bal oldali besugárzás a protonnyomoktól eltérő nyomok kistengelyeloszlását mutatja. Az eloszlásgörbét szűrőként alkalmazva az űrállomáson exponált detektorokon kiválogathatók a meglökött magoktól származó nyomok. A jobb oldali besugárzáson nagyenergiás neutronok keltette  $^{12}\text{C}(n,n')^3\alpha$  magreakció termékei által keltett nyomok 20 órás maratás után (400-szoros nagyítás) a PADC-detektorban. A bal oldalon a mikroszkóp a detektor felületére, a jobb oldalon a keletkezési pontra van fókuszálva, ezáltal a részecskék útvonala kirajzolódik. Ebből a reakció típusa felismerhető. Megállapítható az is, hogy a reakció a lemaratott réteg alatti detektoranyagban történt, és egy, illetve két  $\alpha$ -részecske felfelé mozgott, így a maratás itt indult el. Hasonló képeket eredményeznek az egyéb reakciók is. Mivel a küszöbenergiák különbözőek, így a reakciók osztályozásával és leszámlálásával a neutronspektrum nagyenergiás (>5 MeV) része jól feltérképezhető. (Felvételek: *Pálfalvi*, SK)



1. táblázat

**A 120 keV – 20 MeV energiaintervallumban mért neutrondózisok a Zvezda-szegmensben**

pozíció: panelszám	443	240	110/1	457	318	110/2	átlag	vizsgált év
napi átlagdózis ( $\mu\text{Sv}$ )	52	39	47	54	73	63–68	56,6	2001
	–	44	–	35	35	27	35,3	2003

#### Neutrondózis meghatározása

Vállalt feladatunk elsősorban az űrállomás Zvezda (szerviz) moduljának belsejében az átlagos neutrondózis meghatározása. A neutronok nagy részét a galaktikus kozmikus sugárzás, illetve a naptevékenységből eredő nagyenergiás protonok hozzák létre különféle kölcsönhatások révén az űrállomás falában és egyéb alkotórészeiben. Kisebb részben a földi légkörben hasonló módon keletkező neutronok lépnek be az űrállomás terébe. A semleges neutronok kimutatása a detektor anyagában általuk keltett töltött részecskék detektálásával valósulhat meg. A PADC-detektor összetétele  $\text{C}_{12}\text{H}_{18}\text{O}_7$ , azaz mindössze három elemet tartalmaz: hidrogént, oxigént és szenet. A legvalószínűbb kölcsönhatás a H atommaggal való rugalmas ütközés, amelynek eredményeként kisebb-nagyobb energiájú proton jön létre (többszörös ütközés esetén protonok jönnek létre). A C- és O-magok meglökésekor is keletkeznek mozgó nehéz ionok, amelyek nyoma lényegesen rövidebb, de nagyobb átmérőjű, mint a protonnyomoké. Nagyenergiás neutronok a C- és O-magokkal nukleáris kölcsönhatásba is léphetnek és így – magreakciók révén – sokfajta töltött részecske jöhet létre (p, D, T,  $\alpha$ , Be stb.). Egy ilyen reakcióban keletkező részecskék nyomait felismerhetjük arról, hogy egy centrális pontból, az ütközés helyéről, különböző irányokba indulnak ki. (ld. az 5. ábrát).

A neutrondózis általunk használt meghatározásának alapja az, hogy az ismeretlen neutronterben (az űrállomáson) besugározott detektorokon mérhető információkat összehasonlítjuk ismert térben besugározott detektorok mért adataival [4]. Olyan ismert teret kell választani, amelyik jól közelíti a mérendő teret. Ilyen a Genfben lévő európai nukleáris központban (CERN) működő CERF-gyorsítóra telepített besugárzó rendszer, amelynek neutronspektruma (a neutronok energia szerinti eloszlása) a számítások szerint jól közelíti az űrállomáson várható neutronteret. Az itt végzett kísérletekkel meghatároztuk a detektor választást<sup>1</sup> a neutronenergia függvényében. Például az 5 MeV feletti gyorsneutronok átlagos fluensének megállapítása két reakción alapul: a neutronok által a detektor anyagában meglökött C- és O-magok, valamint a C- és O-magokkal létrejövő magreakciókból származó másodlagos töltött részecskék detektálása. Mindkét esetre meghatároztuk a választási értéket és az alábbiakat kaptuk:  $R_{\text{C-O meglökés}} = 2,4 \cdot 10^{-6}$ , illetve  $R_{\text{reakció}} = 4,8 \cdot 10^{-7}$ .

<sup>1</sup> A detektor „válaszán” az egy neutron által kiváltott reakciók számát értjük.

Az 1. táblázatban közöljük a két mérési sorozat eredményeképpen kapott neutrondózisokat. Összehasonlításként vegyük figyelembe, hogy földi körülmények között a környezeti sugárzásból naponta átlagosan 2,5  $\mu\text{Sv}$  dózist kapunk.<sup>2</sup> A dózisokat a rekonstruált spektrumból számítottuk. Az értékek összbizonytalansága körülbelül 30%. Néhány, a spektrumra jellemző fluxus ( $\Phi$ ) adat 2003-ban:

$$\Phi (>1 \text{ keV}) = 2,42 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\Phi (200 \text{ keV} - 20 \text{ MeV}) = 1,24 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

$$\Phi (>5 \text{ MeV}) = 0,32 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

## Galaktikus eredetű részecskék dózisa

A képanalizátor által elkülönített, a másodlagos neutronoknak tulajdonított nyomoktól eltérő nyomokat a *Kalibrálások* szakaszban részletezett módszerek felhasználásával vizsgáltuk, és a (3) képlettel meghatároztuk a galaktikus eredetű részecskéktől eredő dózist. Az összes mérési pozícióra nyert átlagérték: 2001-ben 138,8  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ , míg 2003-ban 122,1  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ . A becsült bizonytalanság körülbelül 35%. Ez három okra vezethető vissza:

- egyes nyomparaméterek (mélység, hossz) mérése sekély nyomokra, illetve közel merőleges részecskebeesés esetén nagy hibával jár,
- nagy a kalibrációs függvény bizonytalansága a magasabb LET-tartományban,
- a nyomok osztályozása során a képfelbontásból, illetve a digitalizálásból bekövetkező hiba.

## Következtetések

Modellszámítások alapján azt mondhatjuk, hogy mérőeszközünk a teljes neutrondózis ~60%-át adja meg. Ennek alapján a 2. táblázatban összesítettük a  $LET > 6 \text{ keV}/\mu\text{m}$ -nél nagyobb energialeadású részecskék okozta átlagdózisokat. A kis LET-ű sugárzások (főleg elektron és

<sup>2</sup> Ezt nevezzük háttérsugárzásnak.

2. táblázat

A 6 keV/ $\mu\text{m}$ -nél nagyobb energialeadású részecskék által okozott dózisteljesítmény az ISS-en  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$  egységben

vizsgált év	mért neutron-átlagdózis (60%)	teljes neutron-átlagdózis (100%)	galaktikus részecske eredetű átlagdózis	teljes átlagdózis $LET > 6 \text{ keV}/\mu\text{m}$
2001	56,6	94	139	233
2003	35,3	59	122	181

gamma) mérésére ez az eszköz nem alkalmas. Az ISS-en TL-technikával, a magyar PILLE készülékkel, 2001-ben végzett mérések szerint a kis LET-ű sugárzások okozta átlagdózis 290  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$  volt. Vagyis az asztronauták teljes dózisterhelése mintegy 523  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$  volt 2001-ben, sokkal magasabb, mint a sugárveszélyes munkahelyekre vonatkozó dóziskorlát.

Az átlagdózisok csökkentek 2003-ban. Ennek okát egyrészt azzal magyarázzuk, hogy a 11 éves napciklus azon fázisába értünk, amikor a naptevékenység csökken. Más részről pedig az űrállomás alacsonyabb pályára került, és pozíciója is stabilizálódott, miután egy 2001-ben meghibásodott giroszkópját megjavították.

## Irodalom

1. J. PÁLFALVI, I. EÖRDÖGH, K. SZÁSZ, L. SAJÓ-BOHUS: *New Generation Image Analyzer for Evaluating SSNTDs* – Radiat. Meas. 28 (1997) 849–852
2. *Fluence-based and Microdosimetric Event-based Methods for Radiation Protection in Space* – NCRP Report No. 137 (2001)
3. S.A. DURRANI, R.K. BULL: *Solid State Nuclear Track Detection* – International Series in Natural Philosophy, ed. D. Haar, Pergamon Press, U.K. 111 (1987) 80–83
4. J.K. PÁLFALVI, YU. AKATOV, J. SZABÓ, L. SAJÓ-BOHUS, I. EÖRDÖGH: *Evaluation of SSNTD Stacks exposed on the ISS* – Rad. Prot. Dos. 110 (1–4) (2004) 393–397

Munkánkról részletesebb, magyar nyelvű beszámolókat olvashatók a KFKI AEKI honlapján: <http://www.kfki.hu/~aekihp/>, valamint angol nyelven a következő web-oldalon: <http://plasma.oma.be/wrmiss/>

# A TRITEL HÁROMTENGELYŰ SZILÍCIUMDETEKTOROS TELESZKÓP FEJLESZTÉSE

Hirn Attila, Apáthy István, Bodnár László, Csőke Antal, Deme Sándor, Pázmándi Tamás  
KFKI Atomenergia Kutatóintézet

*Az űrhajósokat érő kozmikus sugárzás tulajdonságainak vizsgálatára a KFKI Atomenergia Kutatóintézetben jelenleg egy háromtengelyű, űrdozimetriai célú szilíciumdetektoros teleszkóp (TRITEL) fejlesztése folyik. A közeljövőben a Nemzetközi Űrállomás platformján helyet foglaló detektorrendszer feladata többek között a LET-spektrum*

*meghatározása, irányfüggésének vizsgálata, valamint az egyenértékű dózis meghatározása lesz. Jelen cikkben a rendszer logikai blokkvázlatát ismertetve bemutatjuk a TRITEL működési elvét, ezen belül kitérünk a részegység szerepére és elrendezésére. Röviden összegezzük a detektorrendszer fizikai méreteit és üzemi paramétereit (műszaki specifikáció), valamint kitérünk a jelenleg folyó, a TRITEL részegységeivel (detektorok, előerősítők, analizátorok stb.) kapcsolatos mérésekre is.*

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján

## Űrhajózás és kozmikus sugárzás

„A Föld az emberiség bölcsője, de nem tölthetjük egész életünket a bölcsőben.” *Konsztantyin Ciolkovszkij*nak, az űrhajózás atyjának szavai beigazolódni látszanak. Napjainkra az ember űrbéli jelenléte mindennapos, megszo-kottá vált, a Nemzetközi Űrállomáson a kétfős amerikai–oroszmisziók félévente váltják egymást.

Az elmúlt években a jelentősebb űrnagyhatalmak különböző, embert szállító Mars-expedíciók terveivel rukkoltak elő. Egy ilyen vállalkozást szükségszerűen több, huzamosabb ideig – akár 1–2 évig is – tartó Föld körüli emberes küldetésnek kell megelőznie, hogy az űrhajósokra gyakorolt hatásokat és a várható nehézségeket alaposabban megvizsgálhassuk.

Az űrhajósoknak számos kihívásnak kell megfelelniük a hosszú időtartamú emberes űrrepülések során. Ezek közül csak néhányat sorolunk fel:

- a súlytalanság biológiai hatásai (az izomrendszer fokozott sorvadása, csonttrikulás);
- a pszichés hatások (bezártság, monotonitás);
- a Föld körüli pályán tapasztalt „nappalok és éjszakák” gyors váltakozása stb.

Az űrhajósokat érő kozmikus sugárzás az egyik legjelentősebb kockázati tényező, hiszen az őket egy év alatt érő dózisterhelés a földi munkahelyek éves dóziskorlátjának tízszeresét is elérheti! Az űrhajósokra nem éves, hanem élettartamdózist határoznak meg, ezért lényegében a dózisterhelés korlátozza azt az időt, amelyet az űrhajósok az életük során összesen űrrepüléssel tölthetnek.

Bolygónk felszínén a nagy intenzitású kozmikus sugárzást a Föld mágneses tere és a mintegy 10 méter mély vízoszlopnak megfelelő árnyékoló hatású légkör több nagyságrenddel csökkenti. A tengerszint feletti magasság növekedésével a kozmikus sugárzás intenzitása nő, az űrállomások magasságában a növekedés a két nagyságrendet is meghaladja [1]. Adott pályamagasságon is jelentős eltérések jelentkezhetnek. Legjobb példa erre a délatlanti anomália (*South Atlantic Anomaly*, SAA). A délatlanti térség felett történő áthaladás során ugyanis a megnövekedett dózisteljesítmény miatt az űrhajósok dózisterhelése közel akkora, mint a Föld körüli pálya többi részén együttvéve.

A pályamagasságon, a földrajzi szélességen és az SAA-n való áthaladáson túl a sugárzási tér jellemzői nagyban függenek az űrállomás orientációjától is. Az űrhajósok által elszenvedett dózisértékek jelentősen eltérhetnek az űrállomás különböző helyein.

## A TRITEL detektorrendszer

A sugárzási tér jellemzői helyről helyre és időről időre is változhatnak mind az űrállomáson belül, mind pedig annak közvetlen környezetében. Ez utóbbinak a szerepe elsősorban az űrséták (*Extra-Vehicular Activity*, EVA) során fontos.

A KFKI Atomenergia Kutatóintézetben fejlesztés alatt álló TRITEL háromtengelyű szilíciumdetektoros teleszkóp elsődleges feladata a kozmikus sugárzás LET-spektrumának

meghatározása, valamint irányfüggésének vizsgálata lesz. A detektorokban leadott energia mérésével (fizikai dózis), valamint a LET-spektrumból meghatározott minőségi tényező segítségével az egyenértékűdózis is meghatározható.

## A TRITEL a Nemzetközi Űrállomáson (ISS)

A nemzetközi együttműködés keretében épülő második generációs – vagyis moduláris – űrállomás építése 1998-ban a Zarja orosz modul Föld körüli pályára állításával kezdődött meg. Azóta a folyamat – főként anyagi okok miatt – sajnos jelentősen lelassult. Az ISS-en a Columbia űrrepülőgép 2003. év eleji katasztrófája miatt napjainkban mindössze kétfős amerikai–oroszmisziós legénység dolgozik.

Az űrállomáson folyó dozimetriai mérések egyrészt a dózistérkép elkészítését – azaz a dózisteljesítmény helyfüggésének meghatározását – és a dózisteljesítmény időbeli változásának nyomon követését szolgálják, másrészt biztosítják az űrhajósok személyi dozimetriáját.

A KFKI AEKI-ben fejlesztett Pille hordozható TL (termolumineszcens) doziméter az űrállomáson folyó személyi dozimetriai rendszer szerves részévé vált. A közeljövőben ezt egészítheti ki a TRITEL háromtengelyű szilíciumdetektoros teleszkóp. A rendszer az űrállomás külső platformján, a korábbi Matroska-kísérlet helyén foglal majd helyet. A felbocsátásra 2–3 éven belül sor kerül.

## A teleszkópos elrendezés

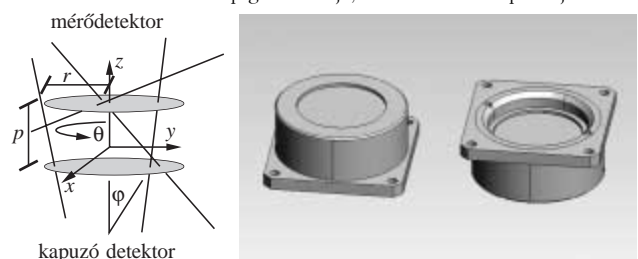
A három tengely teleszkópjait két-két, egymással párhuzamosan elhelyezkedő, Canberra gyártmányú, közel 300  $\mu\text{m}$  vastagságú és 450  $\text{mm}^2$  aktív felületű, teljesen kiürített rétegű szilícium félvezető detektor alkotja (1. ábra).

A két detektor közül csak az egyik – a mérődetektor – szolgál a leadott energia mérésére, a másik – a kapuzó detektor – a geometriának köszönhetően biztosítja egyrészt a beérkező részecske irányának kijelölését, másrészt az adott energiájú, de különböző szögben beérkező részecskék által leadott energia kis szórását. Az optimális geometriai elrendezés meghatározásánál a rendszer érzékenységének maximuma, illetve izotróp sugárzási térben való egyenletessége voltak a fő követelmények [1]. Ennek megfelelően, ideális esetben a detektorok  $r$  sugarának meg kell egyeznie az egymástól mért  $p$  távolsággal.

A kozmikus sugárzási teret nagyobb részét protonok,  $\alpha$ -részecskék és kisebb tömegszámú (főként C-, N- és O-) ionok alkotják.

Az ismertetett geometria mellett, az ICRU49 adatbázis alapján történt számítások szerint az említett részecskék ál-

1. ábra. A teleszkóp geometriája, illetve a detektorpár rajza



1. táblázat

A napi telemetriaigény				
	db	csatorna	méret/csat. (byte)	méret (byte)
energiaszpektrum	6	32	2	384
időspektrum	1	1440	2	2880
dózis	6		2	12
egyéb				512
összesen max.				4096

tal a detektorban leadott energia 100 keV (a detektor felületére merőlegesen beérkező relativisztikus proton) és 100 MeV között változhat [1]. Az ennél nagyobb energiát leadó – jóval kisebb gyakoriságú, ugyanakkor nagy LET-értékű – nehézionok járuléka egy csatornába kerül. A LET-spektrumot a koincidencia amplitúdóspektrumból, valamint a detektorban megtett átlagos útból határozzuk meg az energiakalibrációt követően. Az elnyelt dózist a detektor tömegében leadott – elnyelt – energiából kaphatjuk meg.

### A jelfeldolgozó rendszer felépítése

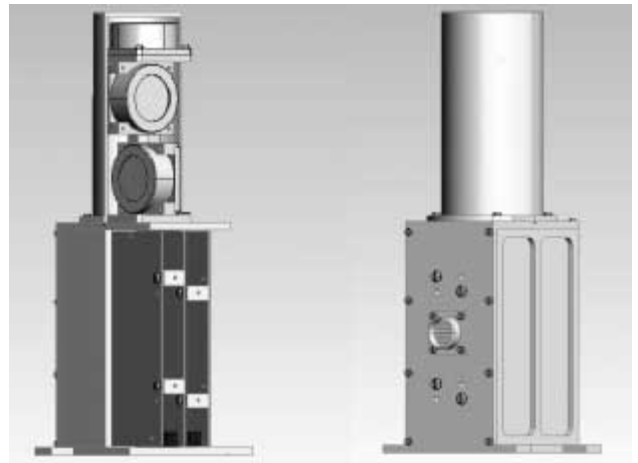
A TRITEL  $x$ ,  $y$  és  $z$  tengelyei a jelfeldolgozást tekintve teljesen megegyeznek. Detektorpáronként a mérő- és kapuzó detektorok kimenetei töltésérzékelő előerősítőkön keresztül, valamint jelformálás és erősítés után koincidenciakörre kerülnek. A három koincidenciakör jeléből a TRITEL még egy digitális jelet állít elő, a dél-atlanti anomálijeleket (ld. később). Minden csatorna mérődetektorának analóg jele (csúcsdetektáló és tartó áramkörön keresztül) flash típusú amplitúdóanalizátorra kerül, de csak abban az esetben, ha a hozzá tartozó koincidenciakör is megszólalt (azaz mindkét detektorba érkezett jel). Az amplitúdóanalizátor az amplitúdónak megfelelő csatorna címét a koincidencia és a dél-atlanti anomálijellel együtt egy digitális multiplexerre küldi, valamint alapállapotba hozza a csúcsdetektort.

A dél-atlanti anomália (SAA) azonosítása időanalizátor segítségével történik. Egy számláló 10 másodperces mérésekben méri a három koincidenciakörből jövő jelek gyakoriságát, és amennyiben ez az érték meghalad egy bizonyos  $\lambda$  értéket, az azt követő beütések az SAA-spektrumokhoz és -dózisértékekhez járulnak hozzá egészen addig, amíg a gyakoriság ismét  $\lambda$  alá nem csökken. A 10 másodperces mérések miatt az SAA-tartomány kezdetének és végének meghatározásában jelentkező több másodperces csúszást az adatok kiértékelésénél figyelembe kell venni.

A számláló másodpercenként 1000 jelet képes fogadni, ezért a lehetséges nagyobb impulzusgyakoriságok miatt a számláló elé egy osztót ( $\chi$ ) iktatunk be. A  $\lambda$  és  $\chi$  paraméterek értéke a Földről, a telemetrián keresztül korábbi időspektrum-mérések alapján változtatható. Az időspektrum egyes csatornáiban a 60 s (hat egymást követő 10 s-os mérés) alatt beérkező koincidenciaimpulzusok számát regisztráljuk.

Az amplitúdóanalizátorok – a három tengelynek ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) és az SAA-n belüli, illetve az SAA-n kívüli megkülönböztetésnek megfelelően – naponta hat (koincidencia) spektrumot és hat dózisértéket szolgáltatnak. A lineáris energiaspektrumokat – adatméret-csökkentés céljából – a kiolvasás után 32 csatornás kvázilogaritmikus spektrumokká alakítjuk. A csatornakiosztást úgy célszerű megválasztani, hogy a kapott minőségi tényező pontatlansága minimális legyen [1]. Ehhez viszont a spektrum előzetes ismerete szükséges. A mérődetektorokban elnyelt energiából a detektorban elnyelt fizikai dózist számítjuk.

A hat amplitúdóspektrum, az időspektrum és a hat dózisérték az egyéb adatokkal – például dátum, hőmérséklet, paraméterek stb. – együtt napi 4 kB adatmennyiséget tesz ki (1. táblázat), ami egy 64 kB-os átmeneti



2. ábra. A TRITEL felépítése. A részegységek 0,5–1 g/cm<sup>2</sup> vastagságú (felületi sűrűségű) alumíniumházban foglalnak helyet, ennek árnyékoló hatása az EVA-n, azaz űrsétán résztvevő űrhajósok esetében az űruha nyújtotta védelemnek felel meg. A rendszer teljes térfogata 840 cm<sup>3</sup>, tömege nem haladja meg az 1 kg-ot.

memóriába kerül. Bár az adatok letöltésére várhatóan naponta sor kerül, a memória mérete a biztonság kedvéért 16 nap adatainak tárolására elegendő.

A rendszer telemetriaigényét úgy terveztük, hogy az még egy esetleges későbbi Mars-szondán elhelyezett egységként is kielégíthető legyen.

### A TRITEL elrendezése és a műszaki adatok

A TRITEL detektorrendszerének felépítése a 2. ábrán látható. A műszert a detektorpárokat (1. ábra) függőlegesen elrendezésben tartalmazó henger, valamint az elektronikát magában foglaló doboz alkotja. Ez utóbbit rögzítik az űrállomás platformjához.

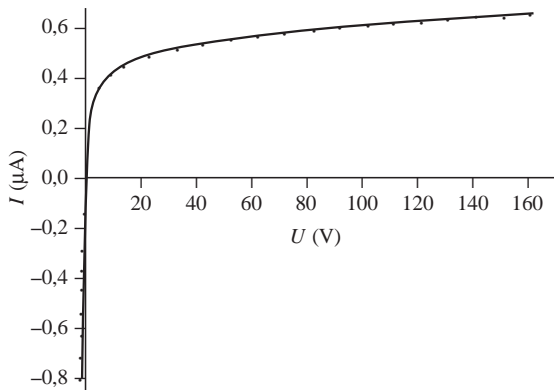
A műszer az űrállomáshoz rögzített, így maga az űrállomás az egyik irányból mindig leárnyékolja a TRITEL-t. Mivel az űrhajósok által elszenvedett egyenértékűdózisra vagyunk kíváncsiak, ez nem okoz gondot. Az űrhajósok űrsétáik (pl. szerelési munkálatok) során ugyanis mindig az űrállomás falához közel tevékenykednek, így reális képet csak akkor kaphatunk, ha az űrállomás falának árnyékoló hatását is figyelembe vesszük.

A detektorok működésének hőmérséklet-tartománya –40 °C-tól 20 °C-ig, az elektronikus egységeké –20 °C-tól 40 °C-ig terjed. Ennek biztosítása a világűr zord körülményei között a hőszabályozó-rendszer feladata lesz. A fűtést jobban igénylő elektronikus egységek ezért is helyezkednek el az űrállomás falához közelebb.

### A detektorrendszerrel kapcsolatos mérések, tesztek

A rendszer logikai blokkvázlatának megvalósításával párhuzamosan elkezdődött a TRITEL detektorainak, valamint elektronikájának bemérése.

A jelnyugtáknak a detektorfeszültségtől való függését  $\alpha$ -sugárforrással történő elő-, illetve hátoldali besugárzással vizsgáljuk teljesen kiűrtett rétegtű detektornál. A fel-

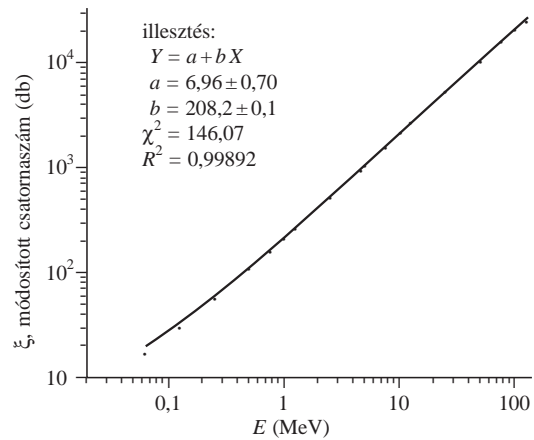


3. ábra. Az RFT-MKD TYP70336 2018 Si-detektor feszültség-visszaram karakterisztikája

bontóképesség-változás nyomon követése pedig a detektor feszültség-visszaram karakterisztikáját kiegészítve segíti az optimális munkapont pontos kijelölését [2]. A 3. ábrán egy RFT-MKD szilícium félvezető detektor karakterisztikáját vettük fel. Jól látható, hogy a visszaram nagysága a működési tartományban alacsony és közel állandó (0,5–0,6 mA). A letérési feszültséget 170 V-ig nem értük el.

Mivel a detektorokban leadott energia három nagyságrenden belül változhat, így az egyes elektronikus eszközöknek (pl. előerősítő, analízátor) 1:1000-es dinamikatartománnyal kell rendelkezniük. Ennek ellenőrzésére impulzusgenerátoros beméréseket végzünk.

A Canberra 2003BT előerősítő és az InSpector analízátor bemérése folyamán többször is meg kellett változtatni az erősítést, így a leolvasott csatornaszámokat is módosítani kellett az erősítések arányában (pl. fele akkora erősítés esetén kétszer akkora csatornaszám-értéket kell vennünk). Az 4. ábrán ez a „módosított csatornaszám” ( $\xi$ ) szerepel a bejövő energia függvényében (log-log). A mérés azt mutatta, hogy a kívánt jelegyenérték-tartományban (100 keV – 100 MeV) a zajszint felett a rendszer linearitása a mérés hibahatárán belül biztosítható. A cél az, hogy a TRITEL-be kerülő, fejlesztés alatt álló elektronikus egységek részére referencia álljon rendelkezésre.



4. ábra. A Canberra 2003BT előerősítő + InSpector amplitúdóanalízátor linearitásának vizsgálata

A koincidenciakör tesztelése úgyszintén impulzusgenerátorral történik. Ennek a vizsgálatára irányuló mérések még hátravannak.

## Összefoglalás

Az űrhajósokat érő sugárhatás (egyenérték dózis) közvetlen mérésére szolgáló LET-spektrométer kifejlesztése mind az AEKI, mind a magyar űrkutatás egésze szempontjából minőségileg új lehetőséget jelent. Két-három éven belül az orosz űrkutatók (az Orvosbiológiai Problémák Intézete, az Orosz Űrkutatói Iroda, ill. az Enyergija cég) [1] repülési lehetőséget biztosítanak a TRITEL számára a Nemzetközi Űrállomás külső platformján, valamint a későbbiekben egy Mars-szonda fedélzetén is.

## Irodalom

- PÁZMÁNDI T.: *Űrdozimetria báromtengelyű szilíciumdetektoros teleszkóp és a Pille bordonozható TLD rendszer alkalmazásával* – PhD értekezés, BME NTI, 2003.
- SÁGI L., DEME S.: *A teljesen kiűrtített rétegű szilíciumdetektor vizsgálata* – *Izotóptechnika* 28/1 (1985) 21–27

# RÖNTGENSPEKTROSKÓPIAI MÓDSZEREK AZ AKTINIDÁK KÖRNYEZETI HATÁSÁNAK VIZSGÁLATÁBAN

Alsecz Anita, Osán János, Török Szabina

KFKI Atomenergia Kutatóintézet, Sugárvédelmi és Környezetfizikai Laboratórium

Atomfegyver-kísérletekből, a nukleáris üzemanyagciklus baleseteiből, illetve tűzzel és robbanással járó balesetektől nagy aktivitáskoncentrációjú – úgynevezett „forró” – részecskék kerülhetnek ki a környezetbe. A kikerült forró részecskék radiotoxicitásának felméréséhez nemcsak radioaktivitásuk, hanem fizikai és kémiai jellemzésük is nagyon fontos. Környezeti eredetű és

reaktorvízből szűrt forró részecskéket vizsgáltunk szilárd fázisú urán és plutónium oxidációs állapotának meghatározása céljából.

A forró részecskék detektálása autoradiográfiával és pásztázó elektronmikroszkóppal történt. Az aktinidák kémiai állapotának meghatározásához kutatócsoportunk roncsolásmentes módszert alkalmazott, a röntgenabszorpciós spektrum élközei finomszerkezetén alapuló (XANES) spektrometriát, amely a vizsgált elem oxidációs állapotán kívül a lokális környezetről is információt nyújt.

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján

Forró részecskék U-L<sub>3</sub> μ-XANES spektrumainak illesztési eredményei

Minták és standardok	U(IV) %	U(VI) %	$I_{w(IV)}$	$I_{w(VI)}$	$\sigma_w$	$I_{s(IV)}$	$I_{s(VI)}$	$\sigma_s$	RMS
UO <sub>2</sub> (standard)	98	2	0,809	0,014	6,704	0,106	0,009	6,338	0,00015
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> (standard)	29	71	0,348	0,857	7,351	0,006	0,071	5,844	0,00026
P1 (atomerőművi dörzsminta)	71	29	0,844	0,341	5,350	0,104	0,029	4,642	0,00120
P2 (atomerőművi dörzsminta)	60	40	0,725	0,483	6,837	0,001	0,002	8,744	0,00072
M1 (atomerőművi korróziós szemcse)	36	64	0,459	0,815	5,662	0,152	0,243	6,056	0,00196
K1 (környezeti részecske)	91	9	0,73	0,07	6,97	0,09	0,05	6,36	0,00011
K2 (környezeti részecske)	91	9	0,78	0,08	7,12	0,09	0,05	6,34	0,00011
K3 (környezeti részecske)	100	0	0,91	0,00	6,28	0,10	0,00	5,71	0,00019
K4 (környezeti részecske)	75	25	0,75	0,25	7,10	0,07	0,02	5,62	0,00014

A röntgenabszorpciós módszer akkor is alkalmazható, amikor az aktinidák mikroszkopikus mintatérfogatban koncentráltan vannak jelen. A XANES-mérések során az urán és a plutónium +4 és +6 oxidációs állapotú formáinak arányát határoztuk meg. Méréseink megmutatták, hogy ezek az arányok a részecskék eredetétől függően erősen különböznek lehetnek.

Környezeti mintáink atombombát szállító repülőgéppel járó balesetének helyszínéről származnak, ahol az üledékben az aktivitáskoncentráció heterogén, és ez forró részecskék jelenlétére utal. A becsapódási ponton a plutóniummal erősen szennyezett üledék <sup>239,240</sup>Pu aktivitáskoncentrációja 60 kBq/m<sup>2</sup> volt.

## Anyag és módszer

### Minták

Az atomerőműből származó minták, melyeket a mikronyalábos röntgenabszorpciós méréseknél használtunk, nyomottvízes atomerőmű pihentető medencéjéből származnak. A mintában lévő radioaktív részecskéket a BME munkatársai autoradiográfiával azonosították, továbbiakban csak ezeken a részecskéken végeztünk méréseket. Az autoradiogramon sötét foltokként megjelenő nagy aktivitású helyek azonosítása után a Nuclepore-szűrőből kivágtuk a részecskéket tartalmazó kisebb darabokat, így a röntgenspektroszkópiai méréseknél a forró részecskék keresése 1 mm sugarú környezetre korlátozódott. A kiválasztott területeken a jelentősebb röntgenintenzitást kibocsátó részecskéről vettünk fel fluoreszcens és abszorpciós spektrumot.

A plutónium környezeti viselkedését nem nukleáris balesetben kijutott nukleáris töltet mikroszkopikus részecskéin vizsgáltuk, a töltetet szállító repülőgéppel balesetének helyszínén vett üledékmintákból. A környezeti forró részecskéket γ-spektroszkópiával és morfológiai vizsgálatokkal lokalizálták.

### Alkalmazott mérési módszer

Az abszorpciós méréseket szinkrotronforrásnál, a HASYLAB L nyalábcsatornáján végeztük [1].

10<sup>-4</sup> energiafelbontású Si(111) kettős monokromátor állított elő hangolható monokromatikus nyalábot az eltérítő mágnes fehér sugárzásából. Ennél a beállításnál az 1×1 mm<sup>2</sup>-es nyaláb fókuszálására polikapilláris féllencse (X-ray Optical Systems, USA) szolgált, amellyel 15 μm nyalábméret volt elérhető. Fluoreszcens módban történt az abszorpciós spektrumok felvétele, a Si(111) monokromátor léptetésével hangolva a gerjesztő energiát a plutónium L<sub>3</sub> abszorpciós éle (18060 eV), valamint az urán L<sub>3</sub> abszorpciós éle (17167 eV) környezetében. A fluoreszcens röntgenfotonok detektálása a bejövő nyalábhöz képest 90°-os szögben elhelyezett energiadiszerzív GRESHAM Si(Li)-detektorral történt. Uránstandardként U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> és UO<sub>2</sub> részecskéket, valamint vékony UF<sub>4</sub>-fóliát (34 μg/cm<sup>2</sup>, Micromatter) használtunk, plutónium-standardként Pu(III)-, Pu(IV)-, valamint Pu(VI)-kristályokat. A mérést 0,5–2 eV-os lépésközzel végeztük, a kisebb lépésközt az abszorpciós él közelében használtuk. A standard részecskék 5 és 20 μm átmérőjűek voltak. A mérési idő 5–20 s közt változott, a vizsgált elemek koncentrációjának függvényében.

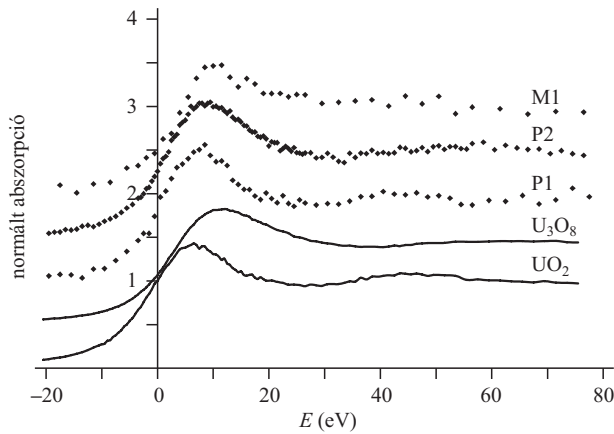
Amikor környezeti (és más eredetű) mintákban a különböző elemek oxidációs állapotát vizsgáljuk, figyelembe kell vennünk, hogy a mintákban a vizsgált elem általában többféle módosulat keverékeként van jelen. A vizsgált minták XANES-elemzésének célja az adott elem kémiai környezetének meghatározása. Ez lehet az oxidációs állapot, illetve a lehetséges vegyület, amely az adott elemet tartalmazza. A második esetben arra az információra van szükségünk, hogy a vizsgált mintafajtában az adott elem milyen vegyületekben található meg. Ekkor mindegyik vegyületből standard mérésre van szükségünk, az ismeretlen minta spektrumát pedig a standard spektrumok lineáris kombinációjából állíthatjuk elő. Ehhez a módszerhez a spektrumokat elég kis lépésközzel kell felvenni, különösen az élközeli szerkezeteknél.

## Eredmények

### Az urán és a plutónium oxidációs állapotának vizsgálata forró részecskékben

A kiválasztott 5–70 μm átmérőjű forró részecskékben az urán és plutónium oxidációs állapotának meghatározásához μ-XANES spektrumokat vettünk fel az urán és plutónium L<sub>3</sub> élének környezetében. A spektrumok kiértékelését a legkisebb négyzetek módszerével végeztük, analitikus függvényekkel történő illesztést alkalmaztunk [2].





1. ábra. Atomerőművi egyedi részecskék U-L<sub>3</sub> μ-XANES spektruma

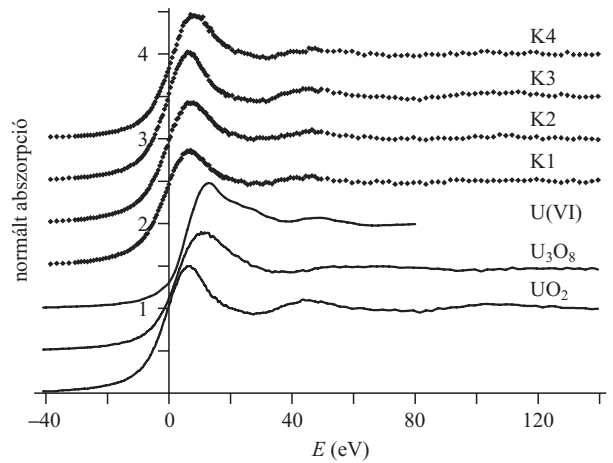
A standard részecskék és a vékony fóliák mért spektrumain kívül a Duff és munkatársai [3] által az NSLS szinkrotronforrásnál mért U(IV) és U(VI) standard spektrumokat is felhasználtuk a részecskékben található urán oxidációs állapotának meghatározásához. A plutónium oxidációs állapotának meghatározásához a *Christos Apostolidis* által készített plutóniumstandardokról μ-XANES spektrumokat vettünk fel. A fehér vonal és a többszörös szórás csúcs energia- és vonalszélesség-értékeit, valamint az arctg lépésfüggvény paramétereit a standard spektrumokból határoztuk meg, külön az U(IV) és U(VI), illetve Pu(IV) és Pu(VI) formára. A forró részecskékben a különböző oxidációs állapotú formák arányának megállapításához ezeket a paramétereket elemenként állandónak vettük az illesztési függvényben.

#### Az urán oxidációs állapotának vizsgálatára forró részecskékben

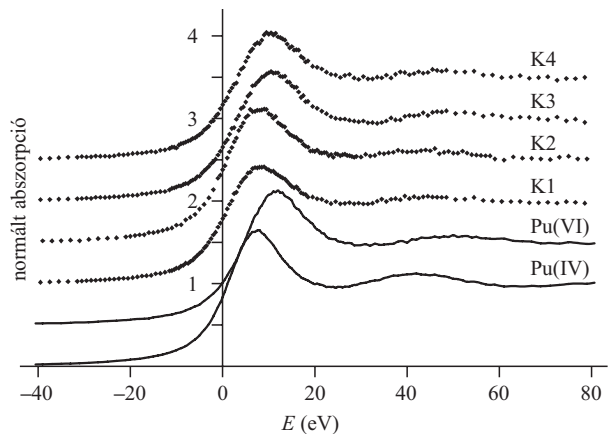
Az 1. táblázatban a kiválasztott atomerőművi és környezeti forró részecskékre vonatkozó illesztési eredményeket foglaltuk össze, ahol  $I_w$  és  $I_s$  a fehér vonal és a rezonanciaszórás csúcs intenzitása,  $\sigma_w$  és  $\sigma_s$  a hozzájuk tartozó szélességek. A (IV) és (VI) indexek az oxidációs állapotot jelentik. Az illesztés minőségét az eltérésnégyzetek átlagának négyzetgyökével (RMS, *root-mean-square*) jellemeztük. A kiválasztott atomerőművi részecskék U-L<sub>3</sub> μ-XANES spektrumait az 1. ábrán mutatjuk be.

A dörzsmintán található két, 5 μm körüli átmérőjű forró részecskében (P1, P2) az urán 30–40%-ban a mobilisabb U(VI), míg 60–70%-ban a kevésbé mobilis U(IV) formában volt jelen. Az M1 jelű, szintén ~5 μm átmérőjű korróziós szemcsében az urán 60–70%-ban a mobilisabb U(VI), vagyis legvalószínűbben U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> állapotban fordult elő.

Környezetbe kikerült forró részecskékben az uránt túlnyomórészt a kevésbé mobilis formában találtuk. Négy környezeti egyedi részecske, valamint uránstandardok μ-XANES spektruma látható a 2. ábrán.



2. ábra. Környezeti egyedi részecskék U-L<sub>3</sub> μ-XANES spektruma



3. ábra. Környezeti egyedi részecskék Pu-L<sub>3</sub> μ-XANES spektruma

Az atomerőművi egyedi részecskéket összehasonlítva a környezeti forró részecskékkel megállapítható, hogy az urán többnyire a kevésbé mobilis U(IV) formában volt jelen mind a környezeti, mind az atomerőművi forró részecskékben. Az U(IV) aránya a környezeti részecskékben nagyobb volt, mint a reaktor eredetű részecskékben. Az atomerőművi forró részecskékben 30–70%-ban mobilisabb U(VI)-ot is találtunk.

#### A plutónium oxidációs állapotának vizsgálatára forró részecskékben

A plutónium oxidációs állapotának vizsgálatára csak környezeti egyedi részecskékben volt lehetőségünk. Környezeti részecskékben két elkülönülő csoportot figyeltünk meg. Az egyik csoport a Pu(IV)-es, míg a másik csoport a Pu(VI)-os oxidációs formát tartalmazta. A 2. táblázatban a

2. táblázat									
Forró részecskék Pu-L <sub>3</sub> μ-XANES spektrumainak illesztési eredményei									
minták	Pu(IV) %	Pu(VI) %	$I_{w(IV)}$	$I_{w(VI)}$	$\sigma_w$	$I_{s(IV)}$	$I_{s(VI)}$	$\sigma_s$	RMS
K1 (környezeti részecske)	92	8	0,61	0,05	7,13	0,06	0,03	7,47	0,00006
K2 (környezeti részecske)	97	3	0,79	0,03	7,11	0,10	0,00	11,40	0,00017
K3 (környezeti részecske)	25	75	0,23	0,69	6,99	0,01	0,10	7,20	0,00014
K4 (környezeti részecske)	33	67	0,29	0,57	7,15	0,05	0,05	9,11	0,00018

kiválasztott környezeti forró részecskékre vonatkozó illesztési eredményeket foglaltuk össze. A 3. ábrán környezeti részecskék és Pu-standardok  $\mu$ -XANES spektruma látható.

A különböző környezeti forró részecskék mérésének eredményeként a vizsgált részecskékben nem találtunk korrelációt az ugyanazon részecskékben jelen levő urán és plutónium oxidációs állapota között.

## Összefoglalás

A röntgenabszorpciós spektrometria alkalmas aktinidák kémiai állapotának roncsolásmentes meghatározására folyadék- és szilárd mintákban. Különböző eredetű forró részecskéket összehasonlítva, a környezeti és atomerőművi forró részecskékben az urán nagyobb arányban a kevésbé mobilis U(IV) formában volt jelen, viszont az atomerőművi forró részecskékben a nagyobb arányban jelen levő U(IV) mellett a mobilisabb U(VI) is 30–70%-ban megjelent. Környezeti egyedi részecskékben a Pu(IV)

és Pu(VI) egyaránt előfordult, mint domináns forma, így a plutónium oxidációs állapotának meghatározása után a vizsgált részecskéket egyértelműen két különálló csoportra lehetett osztani: az egyik csoportra a Pu(IV), míg a másik csoportra a Pu(VI) forma volt jellemző. Ugyanazon vizsgált részecskékben a plutónium és az urán oxidációs állapota között nem találtunk korrelációt. A módszer hasznos információt nyújthat radioaktív hulladékok elhelyezésével kapcsolatos kutatásokhoz.

## Köszönetnyilvánítás

Megköszönjük *Kerkápoly Anikó*-nak és *Vajda Nórá*-nak az atomerőművi minták előkészítését.

## Irodalom

1. G. FALKENBERG, O. CLAUSS, A. SWIDERSKI, TH. TSCHENTSCHER – X-Ray Spectrom. 30 (2001) 170–173
2. J. OSÁN, B. TÖRÖK, S. TÖRÖK, K.W. JONES – X-Ray Spectrom. 26 (1997) 37–44
3. M.C. DUFF, D.E. MORRIS, D.B. HUNTER, P.M. BERTSCH – Geochim. Cosmochim. Acta, 64 (2000) 1535–1550

# MINTAELOKÉSZÍTÉSI MÓDSZEREK $^{226}\text{Ra}$ ÁSVÁNYVIZEKBŐL INDUKTÍV CSATOLÁSÚ PLAZMA-TÖMEGSPEKTROMETRIÁVAL TÖRTÉNŐ MEGHATÁROZÁSÁRA

Varga Zsolt

MTA KK Izotópkutató Intézet

Myroslav V. Zoriy, J. Sabine Becker

Research Centre Jülich (Németország)

*A hosszú felezési idejű mesterséges és természetes radionuklidok meghatározásának leghatékonyabb módszere napjainkban az indukcióval csatolású plazma-tömegspektrometria (ICP-MS). Jelen munkánk célja egy gyors és egyszerű módszer kidolgozása volt  $^{226}\text{Ra}$  környezeti mintákból, elsősorban ásványvizekből történő meghatározására. Többféle minta-előkészítést megvizsgálva a leggyorsabb és legegyszerűbb módszernek egy saját készítésű,  $\text{MnO}_2$  alapú membránszűrőn adszorpcióval történő dúsítás, majd ezt követő extrakciós kromatográfiás elválasztás ( $\text{Sr.Resin}^{\text{TM}}$ ) kombinálása bizonyult. A módszer kimutatási határa ( $3\sigma$ ) 0,02 fg/ml, a meghatározás pontossága 1,7%, precizitása (RSD,  $n = 10$ ) 2,1%. A minta-előkészítés és mérés 5 minta esetén körülbelül 4 órát vesz igénybe, így lényegesen gyorsabb a hagyományosan használt radiokémiai módszereknél.*

## A $^{226}\text{Ra}$ jelentősége

Az ultranyomelem-tartományban előforduló hosszú felezési idejű radionuklidok pontos meghatározása az anali-

tika nehéz feladatai közé tartozik [1]. A mesterséges eredetű radionuklidok mellett (pl.  $^{236}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ) különösen fontos a természetes radionuklidok, köztük a  $^{226}\text{Ra}$  pontos és megbízható mérése. A természetben kis koncentrációban előforduló, az  $^{238}\text{U}$  bomlásából származó, viszonylag hosszú felezési idejű  $^{226}\text{Ra}$  ( $T_{1/2} = 1600$  év) fontos nyomjelző geológiai és környezeti folyamatokban, például a magmatikus folyamatok jellemzésében [2], geokronológiában [3] és hidrológiai rendszerekben [4]. A szervezetbe került  $^{226}\text{Ra}$  egy része – a kalciummal való metabolikus hasonlósága miatt – beépül a csontokba, ezért csak lassan ürül ki. Emiatt, valamint nagy fajlagos aktivitása ( $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq/g) és jelentős dóziszjárulék miatt kiemelt jelentősége van a sugárvédelmi és egészségügyi szempontoknak [5, 6]. Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) által a  $^{226}\text{Ra}$  és a  $^{228}\text{Ra}$  együttes mennyiségére ivóvizekben megszabott határérték 5 fg/ml. Kiemelten fontos az ásványvizek rádiumtartalmának figyelése, mivel azok rádiumtartalma magasabb, mint a felszíni vizeké, különösen akkor, ha az ásványvizet tartalmazó geológiai közeg urántartalma magas [7, 8]. A mérésre használt módszernek gyorsnak, egyszerűnek, megbízhatónak és – lehetőség szerint – minél olcsóbbnak kell lennie.

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

1. táblázat

Az  $m/z = 226$  tömeg/töltés hányadosnál esetlegesen előforduló izobár interferenciák

interferens	szükséges felbontás ( $m/\Delta m$ )	látszólagos $^{226}\text{Ra}$ -koncentráció (fg/ml)
$^{88}\text{Sr}^{138}\text{Ba}^+$	1054	0,95
$^{87}\text{Sr}^{139}\text{La}^+$	1076	0,6
$^{86}\text{Sr}^{140}\text{Ce}^+$	1072	0,75
$^{206}\text{Pb}^{18}\text{O}^+$	4557	2,4
$^{186}\text{W}^{40}\text{Ar}^+$	2080	5,4
$^{209}\text{Bi}^{16}\text{O}^+\text{H}^+$	5347	23
$^{97}\text{Mo}^{129}\text{Xe}^+$	1053	0,35
$^{94}\text{Mo}^{132}\text{Xe}^+$	1046	0,35
$^{92}\text{Mo}^{134}\text{Xe}^+$	1060	0,35
$^{95}\text{Mo}^{131}\text{Xe}^+$	1054	0,35
$^{98}\text{Mo}^{128}\text{Xe}^+$	1044	0,35
$^{96}\text{Mo}^{130}\text{Xe}^+$	1041	0,35
$^{100}\text{Mo}^{126}\text{Xe}^+$	1058	0,35

## A $^{226}\text{Ra}$ mérésére használt módszerek

Környezeti minták  $^{226}\text{Ra}$ -koncentrációjának meghatározására számos analitikai technikát alkalmaznak. Leggyakrabban radioanalitikai módszereket, köztük direkt alfa-spektrometriát [9, 10], radonemanációt [11], gamma-spektrometriát [12] és folyadékszcintillációt [13] használnak. Ezen technikák hátránya, hogy sokszor hosszadalmas és bonyolult minta-előkészítést igényelnek, hosszú ideig tart a mérés, vagy nem eléggé érzékenyek. A tömegspektrometriás módszerek közül gyakran használnak termikus ionizációs tömegspektrometriát (TIMS) is [3], amelynek ugyan kitűnő kimutatási képességei vannak, de amelyhez szintén szükséges a  $^{226}\text{Ra}$  dúsítása és elválasztása a mátrixtól.

Az ICP-MS készülékek (különösen a nagy felbontású, kettős fókuszálású berendezések) kitűnő érzékenységek és kimutatási határak, megfelelő pontosságuk és precizitásuk, illetve a viszonylag egyszerű minta-előkészítés révén az elmúlt években széles körben elterjedtek a hosszú felezési idejű nuklidok mérésének területén [1]. A berendezés kitűnő kimutatási képességei ellenére (a  $^{226}\text{Ra}$  kimutatási határa ( $3\sigma$ ) nagy tisztaságú vízben 0,22 fg/ml) szükség van a  $^{226}\text{Ra}$  dúsítására és elválasztására. Ennek oka a környezeti minták igen kis  $^{226}\text{Ra}$ -koncentrációja, valamint az  $m/z = 226$  tömeg/töltés hányadosnál esetlegesen előforduló izobár interferenciák, amelyek pozitív hibát eredményeznek. Az 1. táblázat tartalmazza az egyes interferenciák által okozott úgynevezett látszólagos koncentrációt, ami megmutatja, mekkora (látszólagos)  $^{226}\text{Ra}$ -koncentrációt eredményez 100 ng/ml interferáló anyag.

## A $^{226}\text{Ra}$ elválasztására és dúsítására használt módszerek

A  $^{226}\text{Ra}$  elválasztására és dúsítására számos eljárást szoktak használni, például  $\text{BaSO}_4$ -tal együtt történő leválasztást [14], kationcserét [15], extrakciós kromatográfiát [16], fo-

lyadék-folyadék extrakciót, Ra-specifikus szervesen adszorberet [17] vagy membránt [18]. Ezek a módszerek sokszor eredményesen alkalmazhatók, azonban komplex vagy nagy ionerősségű minták esetében nem eléggé robusztusak, bonyolult és hosszadalmas a minta-előkészítés, esetleg drága és speciális anyagokat, felszerelést igényelnek. Az adott minta-előkészítés kiválasztását természetesen meghatározza az alkalmazott mérési módszer.

Az elválasztásra hatékonyan használható a  $\text{MnO}_2$ , amely a rádiumot szelektíven adszorbeálja [19]. A  $\text{MnO}_2$  hordozója lehet szálas szerkezetű, membrán vagy pórusos szemcse alapú, a hordozó anyaga poliamid vagy poli-akrilnitril. Az adszorpciót befolyásolja a minta pH-ja, az adszorbens  $\text{MnO}_2$ -tartalma (kapacitás és kinetika), hőmérséklet, a minta egyéb komponensei (főleg  $\text{Ca}^{2+}$ - és karbonáttartalom) [9, 19, 20]. A  $^{226}\text{Ra}$  leoldása az adszorbensről történhet a  $\text{MnO}_2$  teljes feloldásával, komplexképző használatával vagy pH beállításával.

A  $\text{MnO}_2$ -vel történő dúsítás és minta-előkészítés után az ICP-MS eredményesebben alkalmazható a Ra-tartalom meghatározására, mint más radioanalitikai módszerek (pl. alfa-spektrometria), mivel nincs szükség vékony mintára. Ezért nagyobb mennyiségű adszorbens használható, az adszorpcióhoz szükséges idő jelentősen lecsökken, és a kimutatási határ is csökken.

## $^{226}\text{Ra}$ meghatározása ICP-MS módszerrel

### Ásványvizek minta-előkészítése

Többféle minta-előkészítési módszer kipróbálása és tesztelése után a leghatékonyabbnak és legegyszerűbbnek egy kétlépéses eljárás bizonyult (1. ábra). A dúsításra és a mátrix főbb alkotóinak elválasztására szolgál egy saját készítésű,  $\text{MnO}_2$  alapú membránszűrőn történő adszorpció (1. lépés), ezt követi a stroncium, az ólom és a bárium egy részének (zavaró interferensek) eltávolítására szolgáló extrakciós kromatográfiás elválasztás Sr.Resin<sup>TM</sup> (Eichrom) gyantán (2. lépés). A módszer előnye a többi minta-előkészítési módszerrel szemben az egyszerűsége és robusztusága. Az elválasztást befolyásoló főbb paramétereket (a pH-t, a  $\text{MnO}_2$  alapú membrán készítését és az elválasztási profilt) standard minták segítségével optimalizáltuk.

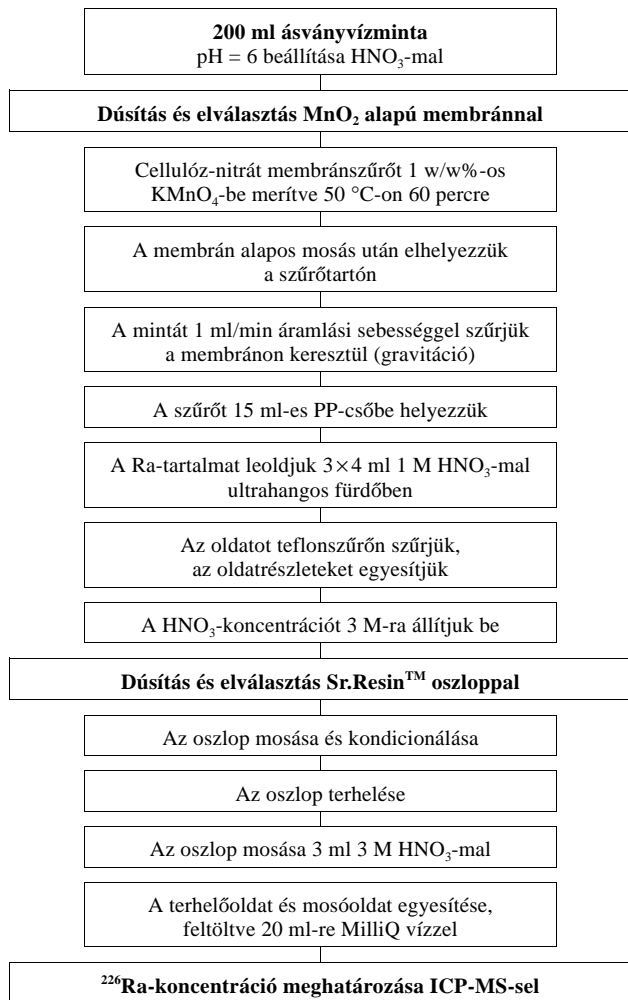
A  $^{226}\text{Ra}$  meghatározása előtt az ásványvizekből párhuzamos mintát vettünk, majd tízszeres hígítás és 2 w/w%  $\text{HNO}_3$ -tartalom beállítása mellett meghatároztuk a minták uránkoncentrációját és izotóparányát. Az izotóparány készülék okozta torzítását (*mass bias*) exponenciális korekciót alkalmazva 1 ng/ml NIST U350 standard oldat felhasználásával korrigáltuk.

A minta-előkészítés és a  $^{226}\text{Ra}$ -meghatározás 5 minta esetén körülbelül 4 órát vesz igénybe, így lényegesen gyorsabb a hagyományosan használt radiokémiai módszereknél.

### Felhasznált készülékek, eszközök és vegyszerek

A  $^{226}\text{Ra}$ - és urántartalom meghatározásához kettős fókuszálású fordított Nier-Johnson-geometriájú ICP-MS készüléket (ELEMENT, ThermoElectron, Bréma, Németország) használtunk.

Földelt Pt-elektroddal árnyékolt ICP plazmaégőt (Guerdelectrode<sup>TM</sup>, Finnigan MAT) alkalmaztunk a mérések során. A mintabevitelt PFA-100 mikroáramlású porlasztóval (Elemental Scientific Inc., Omaha, NE, USA) és perisztaltikus pumpával (Perimax 12, Spetec GmbH, Erding, Németország) végeztük.



1. ábra. A minta-előkészítés folyamatábrája

A méréseknél Sr, Ba, Mo, La, Ce, Pb, W, Bi és U monoelemes standardoldatot (Merck, Darmstadt, Németország), <sup>226</sup>Ra standardoldatot (NIST, Gaithersburg, MD, USA) használtunk. A hígításokat nagy tisztaságú (18 MΩ cm<sup>-1</sup>), Milli-Q-Plus víztisztítóval (Millipore, Bedford, MA, USA) előállított vízzel végeztük, a mérések előtt a minták HNO<sub>3</sub>-tartalmát 2 w/w%-ra állítottuk be.

A minta-előkészítéshez használt vegyszerek és reagensek *supra-grade* (Merck) tisztaságúak. A minta-előkészítéshez alkalmazott membránszűrő anyaga cellulóz-nitrát (Millipore, Bedford, MA, USA).

### A módszer jellemzői

A minta-előkészítés alkalmasságát és robusztusságát 9 párhuzamosan mért, 5 fg és 50 fg <sup>226</sup>Ra hozzáadásával készített (*spike-olt*) laboratóriumi szintetikus ásványvízminta mérésével vizsgáltuk. Az átlagos visszanyerés 69±8% (5 fg <sup>226</sup>Ra esetén) és 72±6% (50 fg <sup>226</sup>Ra esetén) volt. A mérések kiértékelésekor az átlagos 71,5%-os visszanyerés értéket használtuk a mért <sup>226</sup>Ra-koncentrációérték korrekciójára. Fontos megjegyezni, hogy – bár a módszer hathatós, amit a visszanyerési értékek kis szórása is jelez – nagyobb oldottanyag-tartalmú minták mérésénél (pl. tengervíznél) pontosabb eredményt érhetünk el, amennyiben nyomjelzőt (például <sup>228</sup>Ra) vagy párhuzamosan előkészített és mért, ismert mennyiségű <sup>226</sup>Ra hozzáadásával készített (*spike-olt*) mintát használunk a visszanyerés pontosabb

2. táblázat			
A minta-előkészítés elválasztási tényezői			
elem	koncentrációja a tesztoldatban (ng/ml)	koncentrációja a minta-előkészítés után (ng/ml)	elválasztási tényező
Sr	10	0,03±0,002	330
Mo	10	0,012±0,001	850
Ba	10	3,1±0,09	3,2
Pb	10	0,17±0,01	60
Bi	10	0,013±0,003	770
W	10	0,014±0,002	720

számításához. A módszer kimutatási határa (3σ) 0,02 fg/ml, meghatározási határa (10σ) 0,06 fg/ml. A minta-előkészítés dúsítási tényezője 10. A meghatározás pontossága (RSD, n = 10) 1,7%, precizitása (RSD, n = 10) 2,1% 25 fg/ml <sup>226</sup>Ra-koncentrációjú standard mérésekor. Tesztoldat felhasználásával vizsgáltuk, hogy a módszer mennyire alkalmas az esetlegesen zavaró elemek elválasztására. Ezeket az elválasztási tényezőket (*decontamination factor*) mutatja be a 2. táblázat. A hatékony elválasztás miatt a mérés során nem lép fel interferencia.

### A módszer alkalmazása

A módszert alkalmaztuk kereskedelmi forgalomban kapható ásványvizek (MW-1–MW-9), Erzgebirge (Németország) környéki „rádiomos forrás” mellől származó talajvízminták (GW-1–GW-4), valamint hagyományos csapvíz elemzéséhez. A mérési eredményeket mutatja be a 3. táblázat.

3. táblázat		
<sup>226</sup> Ra- és U-mérések eredményei		
minta	<sup>226</sup> Ra-koncentráció (fg/ml)	U-koncentráció (ng/ml)
MW-1	<0,02	0,022±0,003
MW-2	0,8±0,2	0,111±0,001
MW-3	1,4±0,2	0,73±0,02
MW-4	<0,02	0,020±0,004
MW-5	0,7±0,2	0,37±0,01
MW-6	1,6±0,4	0,79±0,01
MW-7	<0,02	0,010±0,001
MW-8	10,3±0,5	17,3±0,51
MW-9	14,2	19,2±0,42
GW-1	2,1±0,2	0,71±0,02
GW-2	0,9±0,1	0,29±0,01
GW-3	1,7±0,2	0,52±0,01
GW-4	4,8±0,3	5,2±0,3
Csapvíz	<0,02	0,481±0,006

A vizsgált vizek  $^{226}\text{Ra}$ -tartalma két minta (MW-8, MW-9) kivételével az EPA által megadott határérték alatti. Ez utóbbi minták viszont az ajánlott maximális  $^{226}\text{Ra}$ -koncentrációértéket két-háromszorosan is meghaladják.

A minták rádiumtartalma arányos az urántartalommal (3. táblázat). A mért  $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$  arány 0,00715 és 0,00727 (relatív szórás 0,08–0,3%) között változott, ami megerősíti a természetes eredetet.

A mérési eredményeket felhasználva a WHO ajánlásai alapján kiszámítottuk napi 1 liter ásványvíz elfogyasztásának hozzájárulását az effektív dózishoz ( $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ). Azt kaptuk, hogy az ásványvíztől származó többletdózis nem haladja meg a WHO által ajánlott 0,1 mSv össz-alfa-értéket, kivéve a két,  $^{226}\text{Ra}$ -határértéket túllépő ásványvíz esetét. Fontos azonban megjegyezni, hogy az ásványvizektől származó dózis-hozzájárulás lényegesen nagyobb lehet, ha az ásványvíz  $^{226}\text{Ra}$ -tartalma a határértéknél nagyobb (pl. MW-8 és MW-9), illetve, ha a feltételezett napi 1 liternél nagyobb az ásványvízfogyasztás.

A kidolgozott módszer alkalmas nemcsak ásványvizek, hanem egyéb környezeti minták  $^{226}\text{Ra}$ -tartalmának pontos meghatározására is. Gyorsasága és egyszerűsége révén alkalmas ásványvizek ellenőrzésére.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők megköszönik C. Pickhardt, P. Ostapczuk, R. Hille (FZJ Jülich), L. Halicz, I. Segal (Geological Survey of Israel) a munka elvégzése során nyújtott segítségét, valamint Bíró Tamás (MTA KK Izotópkutató Intézet) folyamatos támogatását és segítségét.

## Irodalom

1. J.S. BECKER, H.-J. DIETZE (eds.): *Mass Spectrometry of Long-Lived Radionuclides* – in: Encyclopedia of Analytical Chemistry, 2000.
2. PIETRUSZKA et al. – Chem. Geol. 188 (2002) 171–191
3. B. GHALEB et al. – J. Anal. At. Spectrom. 19 (2004) 906–910
4. W.S. MOORE – Nature 380 (1996) 612–614
5. WHO (World Health Organization): *Guidelines for Drinking Water Quality* – 1993.
6. T. KOVÁCS et al. – Radiation Protection Dosimetry 108 (2004) 175–181
7. S. JOANNON et al. – J. Anal. At. Spectrom. 16 (2001) 32–37
8. J.C. PARK et al. – J. Anal. At. Spectrom. 14 (1999) 223–227
9. K. MORVAN et al. – Anal. Chem. 73 (2001) 4218–4224
10. J. EIKENBERG et al. – J. Environ. Radioactivity 54 (2001) 109–131
11. H.F. LUCAS – Rev. Sci. Instrum. 28 (1957) 680–683
12. B. KAHN et al. – Health Phys. 1 (1990) 125
13. J. AUPAIS et al. – Anal. Chem. 70 (1998) 2353–2359
14. A. BAEZA et al. – Radiochim. Acta 83 (1998) 53–60
15. V.F. HODGE et al. – Radiochim. Acta 64 (1994) 211
16. D. LARIVIÈRE et al. – J. Anal. At. Spectrom. 18 (2003) 338–343
17. L. MAGGI et al. – Analyst 126 (2001) 399–404
18. S. PURKL et al. – J. Radioanal. Nucl. Chem. 256 (2003) 473–480
19. H. SURBECK – Int. J. Appl. Radiat. Isot. 53 (2000) 97–100
20. D.S. MOON et al. – Int. J. Appl. Radiat. Isot. 59 (2003) 255–262

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# NUKLEÁRIS MŰVELTSÉG MEGALAPOZÁSÁNAK LEHETŐSÉGE 13–16 ÉVES KORÚ TANULÓKNÁL

Szűcs József

Pécsi Tudományegyetem Fizikai Intézete

## Előzmények, oktatási feltételek

A magyar fizikaoktatás modernizálása az 1970-es évek közepén indult meg. A modernizálás egyik szellemi atyja Marx György akadémikus, az ELTE Atomfizika Tanszékének tanszékvezető professzora volt. Ő volt az, aki az angolszász iskolák integrált természettudományi oktatási módszerét nemcsak adaptálta a magyar iskolarendszerre, hanem tovább is fejlesztette azt. Fizika, kémia és biológia szakos középiskolai tanárok lelkes csoportjával nyaranta módszertani továbbképzéseket vezetett *Anyagszerkezet* címmel Jászberényben, Nagykanizsán, Győrben és Gyöngyösön. Ezek a továbbképzések igazi alkotóműhelyként virultak a gyakorló tanárok aktív közreműködésével. Ezen a tanácskozáson vitatták meg és összegezték az év közben folyó kísérleti oktatás tapasztalatait. Az évek során kikristályosodott módszerek és a tananyag végül 1978-ban

bekerült az általános iskola 6. osztályában induló, majd a középiskolában folytatódó új fizika tantervekbe. A középiskolai fizika tananyagban, a korábbi tantervekhez képest, az integritás mellett jelentősebb szerepet kapott a magfizika is, kiemelve annak gyakorlati vonatkozásait, a nukleáris energiatermelés jelentőségét és előnyeit. Ennek akkor kiemelt aktualitása volt, hiszen sorban indultak, szinte évente egymást követően, a paksi blokkok. Abban az időben mindenki számára úgy tűnt, nem lesz baj a felnövekvő nemzedék nukleáris műveltségével. A fizikatanárok Bécs felé mutogattak (amelynek közelében felépült atomerőmű beindítását egy osztrák népszavazás leállította), és büszkéek voltak a magyar tanulók és a lakosság természet-tudományos (és nukleáris) informáltságára.

A rendszerváltást követően nagyot fordult a világ az oktatás területén is. A fizika oktatása – a többi természet-tudományos tantárggyal együtt – egyre inkább háttérbe szorult a nyelvi, a számítástechnikai és a humán tananyagokkal szemben. Háttérbe került a korábban jól kidolgozott integrált oktatás koncepciója is. Ekkor a Marx György

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

vezette tanári csoport – igyekezőn megőrizni a fizikaoktatás tekintélyét – a hangsúlyt a modern fizika oktatására helyezte, kiemelve a nukleáris műveltség fontosságát. Példaértékű, egyéves időtartamú tanári továbbképzések keretében a „nukleáris tanárok” gyakorlatokkal egybekötött elméleti képzéseken és szakmai kirándulásokon vehettek részt. A tanári csoportok eljutottak Csernobilba, a szlovákiai atomerőművekbe, a romániai nehézvíz-gyárba és a genfi CERN-be is. A továbbképzés bővített szintű sugárvédelmi képesítést is adó vizsgával zárult. Így minden részt vevő tanár fizikaóráin hivatalosan is végezhetett radioaktív méréseket.

A jelenlegi, gyakran változó iskolai tantervekben – Nemzeti Aaptanterv, Kerettanterv – szerepel ugyan a nukleáris műveltségi terület mint fontos színtér a műveltségi területek fejlesztésénél, mégis problémássá vált annak hatékony művelése. Az iskolai fizikaoktatás hétről öt évre lecsökkent tanévei és megcsappant órakeretei mellett a fizikaórákon a tanárok nem tudnak kellő hangsúlyt fektetni a nukleáris műveltség megalapozására. Nem szolgálja megfelelően a pozitív tanulói attitűd kialakítását az sem, hogy az atom- és magfizikai ismeretek a fizika tananyagban kizárólag az utolsó évben szerepelnek. A 11. évfolyamon kerül részletesebben szó az atomenergia mibenlétének és biztonságos felhasználásának tárgyalására. Így csupán egy év áll rendelkezésre a tanulók nukleáris ismereteinek kellő megalapozására, ez pedig kevés az előítéletek, a felesleges (olykor babonás) félelmek eloszlatásához, a nukleáris műveltség megalapozásához.

Ugyanakkor, az oktatási tapasztalatok szerint, a nukleáris ismeretek iránt megvan a 13–16 éves tanulói korosztály kíváncsisága, kellő érdeklődése – az ismertetésre kerülő oktatási kísérlet is ezt bizonyítja. Ezért a legalapvetőbb nukleáris ismeretek megfelelő módszerekkel történő tanítása, a nukleáris műveltség korai megalapozása nem lehet gond a szóban forgó tanulói korcsoportnál, ehhez csupán a kellő oktatási tér (tantárgy és órakeret), valamint megfelelő tanügyi és tanári szándék és elhatározottság szükséges.

## A fizika tantárgy presztizse, társadalmi attitűd

Az elmúlt években a fizika tantárgy súlya, a fizikatanárok presztizse tovább csökkent. Ennek oka összetett: az egyik ok az előzőekben említett tanév- és órakeretvesztésben keresendő, amely azután a kötelező fizika érettségi és felvételi vizsga megszűnéséhez is vezetett. Nem kevésbé fontos szerepet játszik a tantárgy oktatási térszűkítésében a természettudományos műveltség iránti társadalmi igény csökkenése, a műszaki végzettségű szakemberek iránti kereslet megcsappanása, és a divatos – nem műszaki és természettudományos – szakmák iránti kereslet ugriásszerű növekedése.

Az atomenergiához, az atomerőművekhez való társadalmi attitűd világviszonylatban rossz. Ez nálunk, Magyarországon sincs már másként. Hol van már a 80-as évek elejének optimizmusa? A mai helyzetet jól példázza a 2003. évi áprilisi paksi üzemzavar társadalmi megítélésében és elfogadásában mutatkozott zűrzavar is. Ezért lényeg-

es, hogy lássuk: a nukleáris ismeretek szélesebb körű iskolai oktatása, a nukleáris alapműveltség korai megalapozása egyaránt érdeke a fizikaoktatásnak – a téma iránt mutatott tanulói és társadalmi érdeklődés növelheti a tantárgy és egyúttal a fizikatanár presztízsét – és az egész társadalom egészének is. Fontos a nukleáris analfabetizmus felszámolása azért, hogy a jövő nemzedék pozitív (értő) hozzáállással képes legyen objektív, demokratikus döntéseket hozni a hazai nukleáris energiatermelést és egyéb nukleáris technikákat érintő lényeges kérdésekben.

## Oktatási kísérlet Paks és környékének iskoláiban

A szerző, jól ismerve a fent vázolt oktatási helyzetet (maga is hozzátartozik a „nukleáris tanárok” csoportjához), mintegy egy évtizeddel ezelőtt az általános iskolai fizikaórák keretei között nukleáris alapismereteket tartalmazó tananyagot állított össze a 12–14 éves tanulók nukleáris műveltségének megalapozása céljából. Kezdeményezését több Fizikatanári Ankéton ismertette, elképzelését gyakorló tanárok lelkesen fogadták, a kísérletet sok iskolában kipróbálták, és megvalósíthatónak ítélték. Ennek ellenére a reformjavaslat azóta sem épült be a fizika tantervekbe.

A Paksi Atomerőmű Rt. támogatásával öt éve folyik oktatási kísérlet Paks és környékének úgynevezett TEIT (Társadalmi Ellenőrző és Információs Társulás) településein mintegy tizenöt általános és középiskolában, a nukleáris alapismeretek tanítási módszereinek és a nukleáris műveltség megalapozásának vizsgálatára. A kísérletbe az iskolák azon fizikatanárai kapcsolódtak be, akik vállalták, hogy a kísérlet tananyagát a fizika tantárgy tanításának keretei között dolgozzák fel, beillesztve a helyi tantervekbe. A feldolgozás lehet tanórákon, vagy szakköri kiscsoportos foglalkozásokon. A tananyag feldolgozása oktatási segédanyagok (tankönyvsegédlet, munkafüzet, CD, PA Rt. honlapja) felhasználásával történik. A tanárok fáradtságos, újszerű módszerek alkalmazását igénylő munkáját szakmai megbeszélések, tapasztalatcserék segítik. A kísérlet szakmai irányítását a szerző végzi, a tanárokkal a folyamatos kapcsolatot személyes találkozásokkal és elektronikus úton tartja fenn. Az utóbbi három évben az elért eredmény mérésére, a tanulói motiváció fokozására a tanév végén a PA Rt. Látogató Központjában az iskolák legjobb tanulóiból összeálló csapatok részvételével játékos vetélkedőre került sor.

## Az oktatási kísérlet tananyaga

A nukleáris műveltség megalapozását szolgáló legfontosabb alapismeretek kísérleti tanítása az iskolákban a szerző által összeállított oktatási segédletek [1, 2] alapján folyik. A segédkönyvet – a PA Rt. anyagi támogatásával – minden, a kísérletben részt vállaló tanár és tanuló megkapja. Az oktatási segédletek tananyaga egy-két tanítási óra alatt feldolgozható egységekre bontott, egységenként tartalmazva az új ismereteket, az összefoglalást, az ellen-

1. táblázat		
Második nukleáris vetélkedő (Paks, Tájékoztató és Látogató Központ, 2003. május 16.) forgatókönyve		
$10^{00} - 10^{15}$		Csapatok bemutatkozása
$10^{15} - 10^{30}$	I. forduló	Nukleáris totó
$10^{30} - 10^{40}$	II. forduló	Láncreakció
$10^{40} - 11^{00}$	III. forduló	Keresd a választ!
$11^{00} - 11^{20}$	IV. forduló	Atompárbaj

őrző és a gondolkodtató kérdéseket. A tananyag az alábbi témakörökből áll.

- *Az atomok létezésének bizonyítékai, atomok tömege és mérete* (Dalton atomhipotézise, bizonyítékai. Az atomok tömege, mérete.)
- *Az atomok belső szerkezete* (Az atomok sugárzása, az elektronok felfedezése, atommodellek. Az atommag és belső szerkezete.)
- *A nukleonok közötti kölcsönhatás* (Az atommag kötési energiája. Az atommag mérete, sűrűsége. Nukleonok közötti kölcsönhatás, kötési energia.)
- *Magenergia felszabadulásának lehetőségei* (Az atommagok fúziója és hasadása, radioaktivitás.)
- *Az atomreaktorok felépítése és működése* (Urán atommag hasadása, láncreakció, atombomba. Az atomreaktor felépítése és működése.)
- *Atomerőmű működése, környezeti hatásai* (Az atomerőmű elvi felépítése, biztonsága és környezeti hatásai.)
- *A radioaktív sugárzások keletkezése, mérése és hatásai* (Radioaktív sugárzások keletkezése, fajtái, hatásai, tulajdonságaik. A sugárzás törvénye és mérése.)
- *A sugárzások hatása az élő szervezetre, sugárzás és az élet* (A sugárzás biológiai hatásának fizikai alapja. A hatás mérése, sugárdózisok.)

## Módszerek és eredmények

Bár a kísérlet tananyaga a tanulók érdeklődését felkelti, mégis nagy körültekintéssel kell kiválasztani azokat az oktatási módszereket, amelyek figyelembe veszik a tanulók életkori sajátosságait. Szerencsére a tanárok gyakorlott pedagógusok, így jó érzékkel alkalmazzák a közösen megbeszélte módszereket a több helyen elvontnak tűnő tananyag feldolgozásában. Fontos szempont, hogy a gyerekek öntevékenységre építsünk, ahol manuális, mechanikai vagy számítógépes modellezéssel érhető el az elvont fogalmak, törvényszerűségek megértése. Fontos szerepet játszik az internetes információszerzés is, itt elsősorban a PA Rt. honlapjára építenek a tanárok.

Tanulói motiváció és kontroll szempontjából jó kezdeményezésnek bizonyult a tanév végi nukleáris vetélkedők megrendezése. Erre minden iskola a legjobb tanulóból összeállított háromfős csapatot küld. A csapattagok kiválasztása az iskolákban házi versenyek, felmérő tesztek alapján történik. Így az iskolai csapatba való bejutás, a vetélkedőn való részvétel lehetősége ösztönzően hat a kísérletben részt vevő valamennyi tanulóra.

2. táblázat		
2003. évi nukleáris vetélkedő „Nukleáris Totó” tesztkérdései		
<i>Körülbelül hányszor kisebb átmérőjűek az atommagok, mint az atomok?</i>		
1. Kb. ezerszer	2. Kb. néhány tízezerszer	X. Kb. milliószer
<i>Milyen részecskéket tartanak fogva az atommagok?</i>		
1. Neutronokat és protonokat	2. Csak neutronokat	X. Neutronokat, protonokat és elektronokat
<i>Milyen fizikai kölcsönhatások vannak az atommagon belül?</i>		
1. Gravitációs és elektromos	2. Elektromos, gravitációs és nukleáris	X. Nukleáris és gravitációs
<i>Mely kölcsönhatás biztosítja a magok nagy kötési energiáját?</i>		
1. A gravitációs kölcsönhatás	2. Elektromos kölcsönhatás	X. Nukleáris kölcsönhatás
<i>Az atomreaktorokban milyen módon szabadul fel a magenergia nagy része?</i>		
1. Maghasadás útján	2. Magfúzió útján	X. Radioaktivitás útján
<i>A Paksi Atomerőmű egy reaktora körülbelül mennyi villamos energiát ad 1 óra alatt?</i>		
1. Kb. 460 millió kWh-t	2. Kb. 460 ezer kWh-t	X. Kb. 460 milliárd kWh-t
<i>A világon jelenleg körülbelül hány energiatermelő atomreaktor működik?</i>		
1. Kb. 100	2. Kb. 450	X. Kb. 1000
<i>Európában hol van legtöbb energiatermelő atomreaktor?</i>		
1. Franciaország	2. Németország	X. Nagy-Britannia
<i>A világ melyik országában állítanak elő legtöbb villamos energiát atomerőműekben?</i>		
1. Japán	2. Oroszország	X. USA
<i>Évente átlagosan mekkora dóziségyenértéket kapunk a háttérsugárzásból?</i>		
1. 2–3 mSv-et	2. 20–30 mSv-et	X. 200–300 mSv-et
<i>Körülbelül mekkora a radioaktív sugárzások közvetlen hatásának küszöbdózisa?</i>		
1. 2–3 mSv	2. 20–30 mSv	X. 200–300 mSv
<i>Hol nem használnak a gyakorlatban nukleáris technikát?</i>		
1. Élelmiszerek tartósítására	2. Gyógyászatban	X. Növényvédőszerknél

A nukleáris vetélkedők megrendezésére április, május hónapban kerül sor a PA Rt. Tájékoztató és Látogató Központja vendéglátásában. Az ünnepélyes külsőségek, a tanulók, tanárok megvendéglése, a győzteseknek járó értékes tárgyjutalmak nagyban hozzájárulnak a vetélkedő sikeréhez.

Érdekesképpen megjegyzem, hogy a tanévzáró vetélkedő még 2003-ban sem maradt el. Ugyanolyan vidám hangulatban, kilenc iskola részvételével rendeztük meg május 16-án, alig négy héttel a súlyos üzemzavar után. Abban az időben sokan még az atomerőmű mellett húzódozó 6-os főúton is félve haladtak gépkocsijukkal. Ez is nyilvánvaló bizonyíték az oktatási kísérlet eredményességének, és annak, hogy a megalapozott szakmai ismeret-

tek segítenek leküzdeni az atomenergiától való megalapozatlan félelmeket még ilyen fiatal korban is.

Az év végi erőpróbák nem véletlenül viselik a vetélkedő – nem pedig a tanulmányi verseny – nevet. Ezzel is ki szeretnénk fejezni, hogy nem az írásos vagy számítós tudásfelmérés a cél, hanem inkább kvíz jellegű, játékos erőpróbáról van szó, amely a tanulókkal szemben többirányú követelményt támaszt. A vetélkedő több fordulóból áll, amelyek lehetőleg más-más oldalról teszik próbára a résztvevőket. Így megtalálhatók benne gyors villámkérdések, feleletválasztós nukleáris totó vagy sorkérdések, játékos keresztrejtvény-megfejtések. A vetélkedő fontos része az a forduló, ahol a csapattagoknak a Látogató Központ bemutató termében kell valamilyen információt megtalálniuk, és arról a vetélkedő helyszínén beszámolni. Ezzel a fordulóval a tanulókat arra készítjük, hogy már korábban, a felkészülés során látogassák a bemutatótermet, hasznos információkat gyűjtsenek, és tájékozódjanak a terem tematikus elrendezésében. Az 1. és 2. táblázatban a 2003. évi vetélkedő forgatókönyve és az I. forduló kérdései láthatók.

A 2003. évi vetélkedőn a következő iskolák szerepeltek: I. István Szakközépiskola (Paks-Biritó), Vak Bottyán Gimnázium (Paks), Móra Ferenc Általános Iskola (Paks), Deák Ferenc Általános Iskola (Paks), Hermann Ottó Általános Iskola (Paks), Gerjén Általános Iskola (Gerjén), Pusztahencsei Általános Iskola (Pusztahencse), Uszódi Általános Iskola (Uszód), Kalocsai Belvárosi Általános Iskola (Kalocsa)

## Az oktatási kísérlet tapasztalatai, távlatok

A kísérlet tapasztalatainak ismertetése előtt idézzük a Nobel-díjas *Szent-Györgyi Albert* szavait:

„Azzal a babonával is szakítanunk kell, hogy a gyermek nem tekinthet be a tudomány legmodernebb eredményeibe, és csupán az emberi tudás primitív, magukban értelmetlen töredékei valók neki.”

# ORVOSI FIZIKA ÉS A KÖZÉPISKOLAI MAGFIZIKA-OKTATÁS

Mester András  
Diósgyőri Gimnázium, Miskolc

## A fizika népszerűsítése

Szinte közhely már, hogy az utóbbi időben sokat csökkent a fizika népszerűsége a középiskolákban. Ez világszerte, nem csak Magyarországon van így. Egyre több próbálkozás van a tantárgy régi presztízsének a visszaállítására. A fizika oktatásával kapcsolatos hazai és nemzetközi konferenciákon az egyik leggyakrabban elemzett probléma a fiatalok természettudományok iránti érdeklődésének csökkenése. A fizika megítélésének javítása érdekében természetesen a tanárok tehet-

A kísérlet bebizonyította, hogy Szent-Györgyi Albertnak igaza van. A tanulók képességei – amelyeket a téma iránti érdeklődés is támogat – elegendőek ahhoz, hogy a nukleáris alapismeretekkel már az iskolai oktatás korábbi szakaszában megismerkedjenek. Így időben lehet elkezdni a nukleáris műveltség elsajátításának hosszan tartó folyamatát.

A továbblépés már nem olyan könnyű. Jó lenne felismerni a fizika tantervek készítőinek, és a fizikatanároknak is, hogy csak úgy léphetünk előre a tantárgyak közötti versenyben, ha a megváltozott körülményekhez alkalmazkodva, módosított tananyagot tanítunk (egyelőre a rendelkezésre álló, ránk szabott órakeretben). Ha a korszerűsített tananyag az oktatási berkekben pozitív visszhangra talál és széles körben elfogadottá válik, akkor talán több órát is kaphat a fizika a tantárgyak órakeretversenyében. Így bízhatnánk abban, hogy a jövő polgárait az iskolai oktatás olyan pozitív attitűddel bocsátja majd útjukra, amellyel bátran vállalnák a nukleáris energiatermelési alternatívát – egyéb energiatermelő alternatívák mellett –, és hinnének a nukleáris hulladékok biztonságos kezelhetőségében.

Talán egyszer sikerül ezeket a ma még utópiának tűnő célokat elérni. Addig pedig apróbb lépésekben kell előre menni: jó lenne például még több iskolában kipróbálni a nukleáris alapismeretek tanítását. Ebben érdekeltté kellene tenni a fizikatanárt, és talán más szakos (földrajz, biológia, környezettan, kémia) tanárokat is. Keresnünk kell további hatékony módszereket a tananyag oktatására, a pozitív attitűd kialakítására.

## Irodalom

1. SZÜCS JÓZSEF: *Atomokról, sugárzásokról, magenergiáról alaplapon* – Comenius Bt., Pécs, 1999
2. SZÜCS JÓZSEF: *Ismerkedés az atomi világgal, környezetünk fizikai sugárzásaival* – Comenius Bt., Pécs, 1999

nek a legtöbbet, hiszen ők állnak közvetlen kapcsolatban a tanulókkal.

A konferenciákon sok az új törekvés. A hagyományos kísérleti bemutatók mellett egyre több kísérletet demonstráló *showműsort*, népszerű témát tárgyaló *látványos* prezentációt lehet látni. A showműsorok és a látványosság az előadás stílusát érintik, a stílus mellett azonban legalább olyan fontos a tartalom is. Olyan témáknak kellene szóba kerülniük a fizikaórán, amelyek a mindennapi életből valók és igazán érdeklik a tanulókat. Az a tapasztalatom, hogy a magfizikával és az orvosi fizikával kapcsolatos területek ilyenek, ezért az alábbiakban néhány, ezekhez kapcsolódó lépésről szeretnék beszámolni.

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.



## Orvosi fizika és magfizika az iskolában

Néhány évvel ezelőtt kezembe került egy nukleáris medicinával foglalkozó tankönyv, amely ötletet adott e terület középiskolában való tárgyalására. A radioaktív izotópok alkalmazása, az MRI (*Magnetic Resonance Imaging* = mágneses rezonanciatomográfia) és a PET (pozitron-emissziós tomográfia) szinte mindenkit érdekel, de a gyerekek általában nagyon keveset tudnak róla.

Az orvosi fizika iskolai tárgyalása másokat is foglalkoztat. Ezt igazolja, hogy a 2003-ban Hollandiában tartott *Physics on Stage 3* Nemzetközi Fizikatanári Konferencián több előadás hangzott el a témával kapcsolatban, valamint az is, hogy egy külön műhely is alakult az orvosi fizika tárgyalására *A radioaktivitástól a képalkotásig* címmel. A műhelyt szervező holland kollégák még egy kiadványt is megjelentettek *The Glass Patient* (Az átlátszó beteg) címmel. Az sem volt véletlen, hogy a Philips cég orvosi diagnosztikai eszközöket mutatott be a fizikatanároknak.

A továbbiakban – saját példákon keresztül – bemutatom, hogy a magfizika egyes problémáinak iskolai tárgyalása hogyan valósulhat meg az orvosi alkalmazások segítségével. Illusztrálom, hogy milyen mélységig tudjuk tárgyalni az egyes területeket. Nem térek ki azonban a röntgen- és az ultrahangos diagnosztikára.

## Érettségi követelmények magfizikából

Mielőtt rátérnék az általam végzett munkák ismertetésére, emlékeztetek arra, hogy milyen érettségi követelmények vannak jelenleg magfizikából.

Az Oktatási Minisztérium honlapján a következők olvashatók:

### 1.3.4 Nukleáris kölcsönhatás

Tantárgyi ismeret és készség: Tudja jellemezni a nukleáris (erős) kölcsönhatást (milyen objektumok között lép fel, hatótávolság, távolságfüggés kvalitatív módon).

Kapcsolat: Milyen nukleáris folyamatok zajlanak le a csillagok belsejében? • Mi a magfúzió és a maghasadás? • Milyen előnyei és hátrányai vannak a különböző energianyeresi módoknak (megújuló és nem megújuló energiaforrások)?

### 8.1 Elemi részek

#### 8.1.1 Az elemi töltés

Tantárgyi ismeret és készség: Ismerje az elektron, proton, neutron legfontosabb tulajdonságait (töltés, tömegeik egymáshoz viszonyított aránya). Ismertesse az ion fogalmát, és olyan jelenségeket, melyek ezzel magyarázhatók.

Kapcsolat: Hogyan bizonyítható az elektron és a proton léte? • Az atom fölépítése a Rutherford-modellben.

#### 8.2.3 A mag szerkezete

Tantárgyi ismeret és készség: Ismerje az atommag összetételét. • Tudja megkülönböztetni a legfontosabb magreakciókat (radioaktív bomlások, maghasadás, magfúzió). • Konkrét, felírt magreakciót tudjon besorolni ezek közé. • Ismerje a radioaktív sugárzások fajtáit, fizikai jellemzőit, élettani hatásait, tudjon példákat mondani felhasználásukra. Ismerje a sugárvédelem

alapjait. • Ismerje az izotóp fogalmát, tudjon példákat mondani gyakorlati felhasználásukra.

Kapcsolat: Mi történik a csillagokban fejlődésük különböző szakaszaiban? • Mi a mutagén és rákkeltő hatás következménye?

## Orvosi fizika és magfizika a fizikatanári ankéton

2004 tavaszán egyike voltam a *47. Országos Középiskolai Fizikatanári Ankét és Eszközkiállítás* szervezőinek, így örömmel vettem, hogy az általam javasolt orvosi képzési eljárások bekerültek az akkreditált továbbképzés témái közé. (Az orvosi alkalmazások mellett szó volt egyéb magfizikai témákról is, például a paksi üzemzavarásról.) A visszajelzésekben úgy tűnik, hogy szerencsés volt a választás.

A következő, magfizikával kapcsolatos előadások hangzottak el a 47. Fizikatanári Ankéton:

*Vittay Pál* (ORSI): *A képalkotó diagnosztika legígéretesebb eszköze, az MRI*

*Radnai Gyula* (ELTE): *Teller Ede és a magyar középiskola*

*Trón Lajos* (DE PET Centrum): *Pozitronemissziós tomográfia (PET)*

*Kerényi László* (Városi TV Kht., Miskolc): *Orvosi diagnosztikáról a Miskolci Televízióban*

*Ballai László* (OKKI-OSKI): *Orvosi diagnosztikai sugárforrások műszaki sugárvédelme*

*Sütkösd Csaba* (BME): *Magfizika és az Élet – a Szilárd Leó Fizikaverseny néhány feladatának tükrében*

Az egyéb programok is kapcsolódtak az orvosi fizikához, illetve a magfizikához:

Az érdeklődők meglátogathatták a Megyei Kórház sugárterápiás intézetét, ahol megismerkedhettek a korszerű terápiás berendezésekkel (lineáris gyorsító, kobaltágyú, üregi besugárzás, számítógépes besugárzástervezés).

*Aszlódi Attila* (BME) nagy érdeklődéssel kísért műhelyfoglalkozást tartott a paksi üzemzavarásról.

Sikeres volt a nukleáris asztrofizikával foglalkozó *Az elemek keletkezése* című DVD (ATOMKI, Debrecen) bemutatója egy műhelyfoglalkozás keretében.

## Tehetséggondozó műhelyek

A *2003/2004 tanévben* egy középiskolások számára indított tehetséggondozó műhely témájául az orvosi fizikát választottam, amely láthatóan nagyon érdekelte a tanulókat. A műhely tematikája a következő volt:

- Képzési eljárások (10 óra)
  - Ultrahangos vizsgálati módszerek
  - Röntgendiagnosztika
  - Komputertomográfia
  - Mágneses rezonancia
  - Pozitronemissziós tomográfia
- Nukleáris medicina (3 óra)
- Sugárterápia (3 óra)
- Kórházlátogatás (10 óra)

*A kitűzött oktatási célok az alábbiak voltak:*

Az orvosi diagnosztikában egyre több, az orvosok munkáját segítő eszköz jelenik meg. Ezek mindennapi életünk részévé váltak, és az a tapasztalat, hogy a tanulók érdeklődnek a modern orvosi eszközök iránt. A cél az volt, hogy a berendezések működésének fizikai alapjait ismerjék meg a tanulók. A fenti témák feldolgozásával a modern fizika szinte minden területét érintettük. A kórházlátogatók nagyon sokat segítettek az elméletben megtanult alapok gyakorlati alkalmazásának a megismerésében.

A 2004/2005 tanévben iskolánk ismét elnyerte a tehetséggondozó műhely működtetésére kiírt pályázatot, ahol a *magfizikát* választottam témaként. Itt röviden ismét szó lesz az orvosi alkalmazásokról is. Témák:

- A radioaktivitás alapfogalmairól kicsit részletesebben
- Radioaktivitás az élő szervezetekben
- Radioaktivitás az orvostudományban
- Radioaktivitás környezeti hatásai
- Radon és radonszennyezés
- Radioaktív kormeghatározás
- Maghasadás, magfúzió
- Atomreaktorok, reaktorbalesetek
- Sugárvédelem
- Egy kis részecskefizika, ismerkedés a CERN kutatásaival
- Magfizikával kapcsolatos feladatok megoldása

## Orvosi fizikai témák mint „alkalmazási példák” az iskolai fizikaoktatásban

Sajnos az új tantervekben csökkent a fizikaórák száma. Ezért minden lehetőséget meg kell ragadnunk, hogy olyan módon és olyan területeket érintve tanítsunk, hogy az lekösse a tanulókat, és az elhangzottak meg is marad-

janak bennük. A fizikaórákon elhangzottakat a diákok gyakran elvontnak, az élettől távolinak tekintik. Az orvosi alkalmazások ismertetésével *nem kell eltérnünk a tananyagtól*, mindössze annyit kell tennünk, hogy a tananyag tárgyalásakor az egészségügyben alkalmazott példákat említünk.

Néhány kiragadott ötlet arra, hogy a különböző orvosi alkalmazások ismertetése kapcsán a magfizika mely területeit érinthetjük:

- A radioaktív sugarak fajtái közötti különbség kiválóan érzékeltethető az izotópdiagnosztika és a sugárterápia tárgyalásával. Ennek kapcsán fel lehet hívni a figyelmet a kis, közepes és nagy áthatolóképességű sugárzások, az alfa-, béta- valamint a kis és nagy energiájú gamma-sugarak közötti lényeges különbségekre.
- Tapasztalat, hogy a különböző kezelésekhöz alkalmazott izotópokat könnyebben megjegyzik a diákok.
- A sugárterápiás kezelésekre jó példát adnak a *gyorsítók* alkalmazására.
- A mágneses rezonancia (MRI) tárgyalása lehetőséget ad a magspin, a mágneses momentum tárgyalására.
- A PET említésekor kitérhetünk a mesterséges radioaktivitás, az antirészecskék (pozitron), a foton és az annihíláció fogalmára, de ennek kapcsán beszélhetünk a ciklotronról is mint a pozitronkibocsátó izotópok előállításának legfontosabb eszközéről.

*Összefoglalva*, úgy gondolom, hogy az orvosi fizika és az orvosi műszerek a fizika érdekesebbé és vonzóbbá tételét segítő példák és alkalmazásoknak szinte kimeríthetetlen tárháza. Ezt a lehetőséget a jövőben sokkal nagyobb mértékben és sokkal szélesebb körben ki kellene használnunk tanítványaink motivációjára, és a fizika népszerűsítésének megállítására.

# A KÖZÉPISKOLAI FIZIKAOKTATÁS PROBLÉMÁI EGY FELMÉRÉS TÜKRÉBEN

Radnóti Katalin  
ELTE, TTK, Főiskolai Fizika Tanszék

*Magától értetődő, hogy a műszaki tudományok eredményes tanulmányozásához elengedhetetlen az alapvető fizikai törvényszerűségek biztos tudása. Napjainkban azonban az egyszerű állampolgári létbe is szükségessé bizonyos fizikai jellegű ismeretek. Ezért fontos a tantárgy közoktatásban elfoglalt helyzetét folyamatosan nyomon követni. A hazai felmérések szerint, sajnos, a fizika egyike azoknak a tantárgyaknak, amelyet a diákok legkevésbé szeretnek, sőt, ez a tantárgy tekinthető a természettudományos nevelés egyik legproblematicusabb területének [1, 2]. Ennek alátámasztására mutatunk be néhány jellegzetességet az Oktatási Minisztéri-*

*um megbízásából az Országos Közoktatási Intézet szervezésében lebonyolított, obszervációs munka részeként elvégzett középiskolai felmérés eredményeiből.*

## A mintavétel

A tantárgyi obszervációs munkálatok folytatásaként 2003 szeptemberében kérdőíves adatgyűjtést végeztünk két-száz, különböző típusú (hat- és nyolcosztályos gimnázium, négyosztályos gimnázium, szakközépiskola és szakiskola) középiskola bevonásával az ország minden tájáról. Összesen 155 iskola véleménye érkezett vissza. A korábban, 2002-ben történt, általános iskolai tanárok között készített hasonló jellegű felmérésben 152 kolléga

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

„Véleménye szerint mennyire tartják fontosnak a fizikát?”				1. táblázat
	általános iskola	összes tantárgy átlaga az általános iskolában	középiskola	összes tantárgy átlaga a középiskolákban
szülők	3,28±0,73	3,53	2,92±0,71	3,34
gyerekek	3,23±0,70	3,60	2,64±0,73	3,17

Megjegyezzük, hogy a tantárgyi megítélés *minden* tantárgy esetében romlik, de mértékükben eltérnek egymástól. A fizika esetében ez a romlás drámainak nevezhető, hiszen már eleve is rosszul kezd, és sajnos még abból is sikerül visszaesni. Ez a tendencia csak akkor fordulhatna meg, ha *a következő években a fizika mint iskolai tantárgy jelentős megújuláson menne át!*

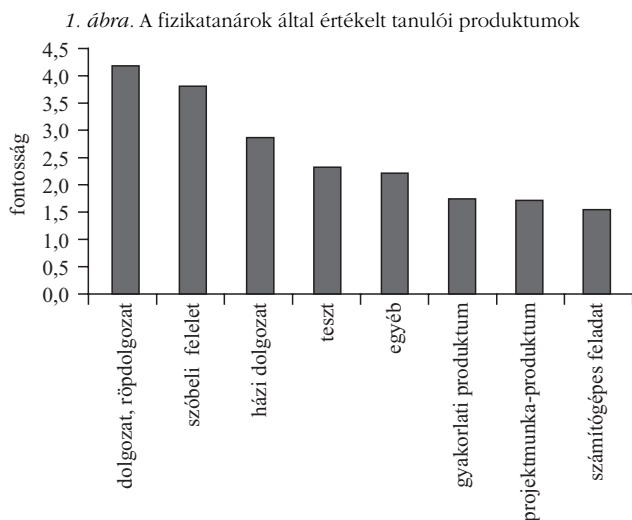
válaszait elemeztük, amelyről a tavalyi évben adtunk rövid összefoglalást [2]. Jelen tanulmányban többször hivatkozunk majd ezen adatgyűjtésünk eredményeire is, illetve felhasználjuk ezeket a középiskolai felméréssel való összehasonlításra. A kérdések két csoportra oszthatók: az első kérdéscsoportot – szaktárgyától függetlenül – minden tanárnak feltettük, a második kérdéscsoportot csak a fizikát tanító tanárok kapták.

## A tantárgyat érő kihívások

A korábbi, általános iskolai felméréshez hasonlóan a középiskolai tanárokat is megkérdeztük arról, hogy véleményük szerint a szülők és a gyerekek mennyire tarthatják fontosnak az általuk tanított tárgyat. Az értékelést ötfokozatú skálán kértük. A fizikára vonatkozó eredményeket – összehasonlítva a korábbi, általános iskolai felmérés eredményeivel – az 1. táblázat foglalja össze.

Jól megfigyelhető, hogy (a tanárok véleménye szerint) mind a középiskolások szülei, mind pedig maguk a gyerekek kevésbé tartják fontosnak a fizikát a középiskolában, mint az általános iskolában. Az eltérések szignifikánsak. Érdekes megjegyezni, hogy nem volt olyan tanár, aki úgy gondolta volna, hogy a tanítványai „nagyon fontos”-nak tartanak a fizikát, vagyis nem szerepelt 5-ös válasz!

Az is észrevehető, hogy a tantárgy megítélése a gyerekekénél erőteljesebben romlik, mint a szülőknél. Ez pedig kedvezőtlen tendenciát jelez a tantárgy jövőjére. *Számítani lehet tehát arra, hogy a későbbiekben a mostani középiskolások gyerekei esetleg még kevésbé fogják kedvelni a fizikát.*



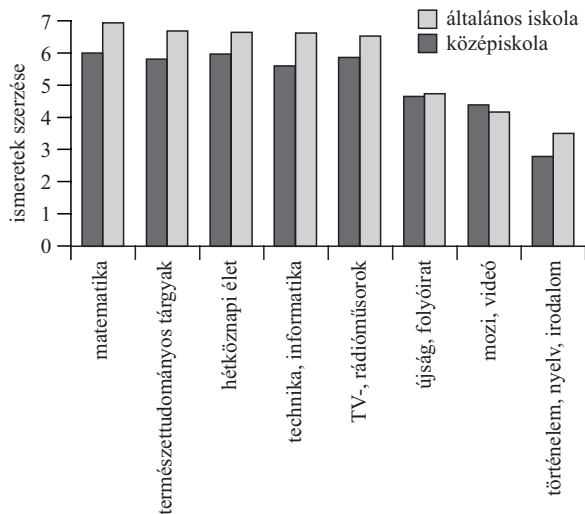
## Didaktikai, módszertani vonatkozások

A kollégáknál arról is érdeklődtünk, hogy óráikon milyen gyakran alkalmaznak különböző munkaformákat. Az eredmények alapján megállapíthatjuk, hogy nagy részük *igen ritkán alkalmaz korszerű munkaformákat*. A csoportmunkát 81%-uk soha vagy legfeljebb néha alkalmazza. Az is látható, hogy a középiskolai tanárok még az általános iskolai kollégáknál is gyakrabban alkalmazzák a frontális óra-vezetést és ritkábban a különböző kollektív munkaformákat. Viszont szignifikánsan többet foglalkoztatják a tanulókat különböző, önállóan megoldható feladatokkal.

## A fizikatanárok által értékelt tanulói produktumok

Kíváncsiak voltunk arra is, hogy a tanárok milyen jellegű tanulói produktumokat értékelnek. A válaszokból (1. ábra) a hagyományos értékelési formák túlsúlya látszik, a különböző dolgozatok, majd a szóbeli felelet. Az önálló feladatmegoldások, esetleg házi dolgozatok szerepe kisebb, és jelentősen elmaradnak a lehetőségektől a különböző gyakorlati produktumok értékelései. Pedig a fizika esetében ezekre lenne lehetőség, sőt ezek kifejezetten szükségesek egy-egy gyakorlati téma, például kísérlet feldolgozása során. Sok olyan gyerek van, akik esetleg nehezen tudnak szóban vagy írásban megnyilatkozni, de remek gyakorlati érzékük van kísérletezésnél, vagy valamilyen produktum otthoni előállításánál. Ne gondoljuk azt, hogy ezekkel a tevékenységekkel nem tanul a gyerek! Sőt, a fizika kifejezetten olyan tudomány, ahol az elméleti megfontolásoknak éppen a gyakorlati vonatkozások esetében van jelentősége. Az ilyen, inkább gyakorlati érzékkel, mint verbális képességekkel rendelkező tanulókat ennek elismerésével lehetne motiválni a fizika tanulása iránt. Az iskoláztatás ideje alatti sikerélmények meghatározóak lehetnek abban, hogy felnőttként miként viszonyul majd az egyes területekhez (pl. a természettudományokhoz), illetve hogy felnőttként is hajlandó lesz-e – szükség esetén – visszaülni az iskolapadba.

Az eddigiekben a kérdőív azon részét elemeztük, ahol a kérdések szaktól függetlenül, minden tanár számára, azonosak voltak. A kérdőívben szerepeltek olyan kérdések is, amelyeket kizárólag fizikatanároknak tettünk fel. Az összehasonlíthatóság miatt ugyanazokat a kérdéseket használtuk, mint a korábbi, általános iskolai felmérésben. A következőkben ezekre a kérdésekre adott válaszok elemzése olvasható. Az előzőektől eltérően itt nem 5 fokozatú skálán kellett válaszolni, hanem 10 fokozatún. A



2. ábra. A tanulók máshonnan szerzett ismereteinek felhasználása

következő három kérdéssorra adott válaszokat tanulmányozva azt lehet mondani, hogy a tanárok 8, 9, illetve 10 értékeket írtak be, amikor a válaszlehetőséggel szinte teljes mértékben egyetértenek. „Közepes” egyetértést, 5, 6 osztályzat jellemez, míg az 5 alatti értékek esetében gyakorlatilag elutasítják az általunk megfogalmazott választ.

### A tanulók máshonnan szerzett ismereteinek felhasználása

Ebben a kérdésben arra voltunk kíváncsiak, hogy a tanulók mely területekről hoznak magukkal olyan ismereteket, amelyeket a fizika tantárgy tanulása során fel tudnak használni. Ez azért fontos, mivel a gyerekek nem csak az isko-

labán tanulnak. Jó, sőt kifejezetten fontos, ha a máshonnan származó ismereteket az iskola a gyerekek számára megfelelő helyen beépíti, felhasználja, sőt, sok esetben pontosítja, rendszerbe foglalja azokat. A válaszok sajnos nem tűnnek túl biztatóknak (2. ábra). A középiskolai értékek általában alacsonyabbak az általános iskolai tanárok válaszártékeinél. Az eltérések szignifikánsak, kivéve az „újság, folyóirat” és a „mozi, videó” esetét, amelyek mindkét esetben nagyon alacsonynak mondhatók.

A hat- és nyolcosztályos gimnáziumok esetében a technika és informatika tantárgyban tanult ismereteket szignifikánsan alacsonyabb mértékben alkalmazzák az oktatómunka során:  $4,70 \pm 1,73$ . Az újságok, folyóiratok adta lehetőségeket pedig a szakiskolai kollégák használják ki szignifikánsan alacsonyabb mértékben:  $3,31 \pm 2,36$ .

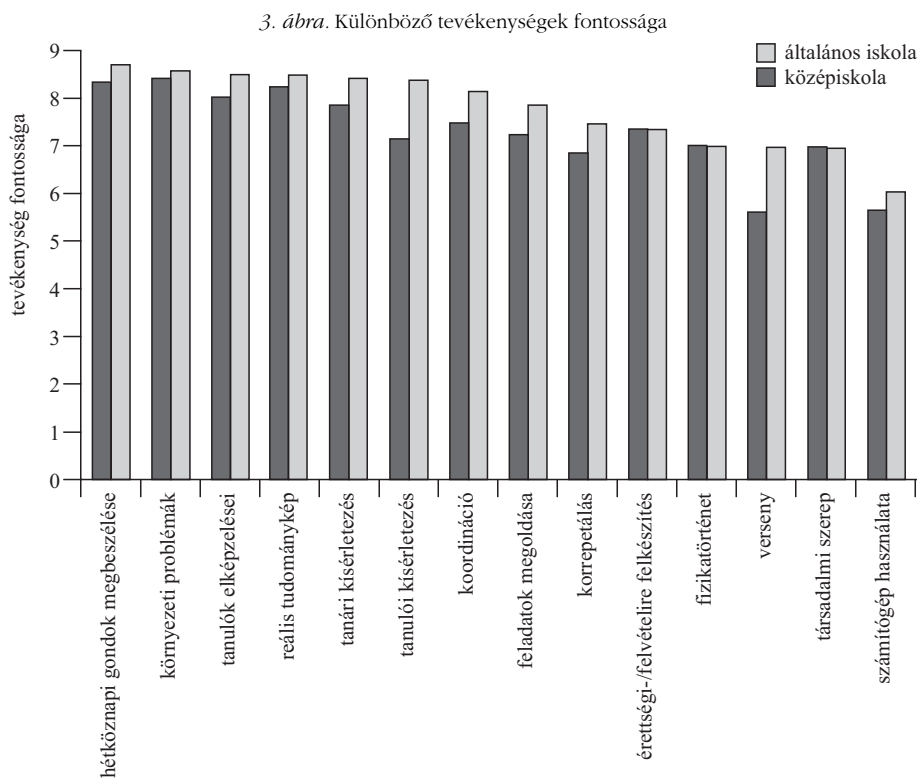
### Különböző tevékenységek fontossága

Öröndetes látni (3. ábra), hogy a középiskolai kollégák mennyire fontosnak tartják *általánosságban* az általunk felsorolt szempontokat (nincs 5 alatti átlag), bár itt is elmondható, hogy általában alacsonyabb átlagok születtek, mint az általános iskolai tanárok esetében. Komoly, szignifikáns eltérés van a tanulmányi versenyekre való felkészítés fontosságának megítélésében. Ezt a feladatot a középiskolában tanító kollégák általában nem tartják igazán fontos feladatnak.<sup>1</sup>

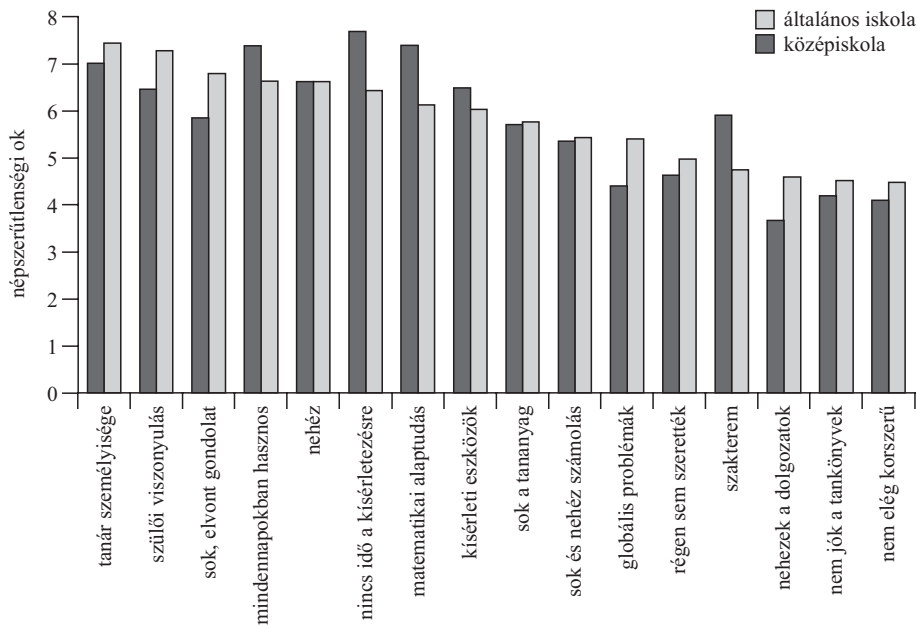
*Eddig azt gondoltuk, hogy a tehetésgondozás területei* *rendben van* annak ellenére, hogy a fizika tantárgygal, annak megítélésével komoly problémák vannak. Ez súlyos probléma, mely eddig nem igazán látszott ilyen nagyra. Az országban sok helyi és országos verseny van, de úgy látszik, a tanárok energiájából alig telik a versenyfelkészítésre.

Szignifikáns eltérés van a *tanulói kísérletezés* fontosságának megítélésében is. A középiskolai kollégák szerint ez nem olyan fontos (!). A *számítógép használata* is kiugróan alacsony értéket mutat, ami az általános iskolai kollégák véleményével gyakorlatilag azonos, s nincs szignifikáns különbség a megítélésben.

A *feladatok megoldását* érdekes módon az általános iskolai kollégák szignifikánsan fontosabbnak tartják. A fizika és a többi tantárgy koordinációja is az általános iskolai tanároknál tűnik fontosabbnak.



<sup>1</sup> Kivételt képeznek a hat- és nyolcosztályos gimnáziumban tanítók. Az ő átlaguk  $6,96 \pm 1,71$ , mely szignifikánsan nagyobb az átlaghoz viszonyítva, bár valójában ez sem magas. Még ez is kicsit alacsonyabb az általános iskolai kollégákéhoz képest, de ez az eltérés nem szignifikáns különbség.



4. ábra. A népszerűtlenség lehetséges okai

### A népszerűtlenség lehetséges okai

Kérdésünkben azt firtattuk, hogy a felsorolt lehetőségeket milyen mértékben teszik felelőssé a tanárok a fizika tantárgy népszerűtlenségéért (4. ábra). Elmondható, hogy a kérdés megítélésében a legkevésbé egységes a tanárok véleménye, itt a legnagyobbak a szórásértékek. Néhány érdekes ellentmondásra is fény derül az adatok elemzésekor. A közös rész hasonló jellegű kérdésre 47,7%-ban azt választották a tanárok, hogy a legnagyobb probléma az időhiány. Itt viszont nem tartják soknak a tananyagot ( $5,70 \pm 3,06$ ), bár itt is elég nagy a válaszok szórása.

Sokan gondolják, hogy fontos a tanár személyisége, a szülők viszonyulása a tantárgyhoz. Ugyanakkor nem gondolják, az általános iskolai tanárokkal egyetértésben, hogy a fizika valóban nehéz tantárgy ( $6,61 \pm 2,62$ ).

Abban sem értenek velem egyet a kollégák, hogy a fizika sok elvont gondolatot tartalmaz ( $5,84 \pm 2,62$ ), sőt szignifikánsan alacsonyabb válaszok születtek, mint az általános iskolai tanárok esetében. Azt sem gondolják, hogy sok a nehéz számolásos feladat, és legkevésbé sem gondolják, hogy nehéz jó jegyeket szerezni ( $3,67 \pm 2,19$ ). Ez ugyancsak szignifikánsan alacsonyabb érték az általános iskolai kollégáknál. Ebben a kérdésben a kollégák 20%-a egyáltalán nem ért velem egyet, mivel az 1-et jelölte meg.

Szignifikánsan magasabb értékek születtek viszont a kísérletezés lehetőségeivel kapcsolatban, a gyerekek matematikai alaptudásának megítélésében és a mindennapi életben való használhatóság tekintetében.

A tanárok válaszait elemezve látható, hogy szerintük a fizika tantárgy így jó, ahogy van. Azzal az állítással, hogy a fizika tantárgy nem eléggé korszerű, a kollégák 20%-a egyáltalán nem ért egyet, az 1-et jelölte meg. A kísérletezéshez szükséges feltételeket sem ítélik túl rossznak, bár a szórás elég nagy. Ugyanakkor a tanárok is tudják, hogy a fizika népszerűtlen, hiszen a tantárgy fontosságát firtató kérdéseinkre ők választották azt, hogy a gyerekek szerint nem fontos tantárgy. Mi lehet ezen ellentmondás oka?

A fizikatanár valószínűleg már diák korában is szerette és értette a fizikát. Így nem tudja elképzelni, hogy azon mit nem lehet érteni. Sőt, az is lehetséges, hogy sokuknak éppen a történelem, az irodalom ment nehezebben, és éppen a matematikát és a fizikát érezte jobban megfoghatóbbnak, objektívebbnek. Látunk kell azonban, hogy az emberek jelentős része nem így gondolkodik. Könnyebb számukra olyan dolgokról beszélni, amelyek nem igényelnek a természettudományra jellemző logikus, világos és pontos gondolkodásmódot.

A fizikai problémák megoldása többlépcsés gondolkodást kíván. Az ismeretek alkalmazási fázisában a feladatok konkrét

kérdésétől először el kell jutni a formális szinten megfogalmazott törvényszerűséghez. Majd ezt elemezve meg kell keresni a kapcsolatot a feladatban szereplő tényekkel. Végül vissza kell térni a konkrét szintre, hogy válaszolni tudjanak a feltett kérdésre. A gyerekek tehát többször kell váltania a gondolkodási műveletek szintjei között. Valószínűleg segíthet az, ha ezeket a váltásokat a tanárok megbeszélik a tanulókkal, így tudatosítva azokat, mintegy metakognitív tudásrendszert létrehozva.

A fizikai jelenségekkel kapcsolatban – iskolán kívüli forrásokból – a tanulók számtalan félreértelmezéssel találkozhatnak, illetve magában az oktatási folyamatban is alakulhatnak ki tévképzeteik. Ezeket a tanárok a frontális feldolgozás közben valószínűleg észre sem veszik [4]. Csak annyit tapasztalnak, hogy hiába írták meg szerintük „a világ legkönnyebb dolgozatát”, a gyerekek mégis gyenge eredményeket értek el. Majd elkezdik a következő anyagrészt tanítását, s ezzel sok tanuló lemaradását tovább halmozzák.

A problémán sokat segítenek, ha a tanárok gyakrabban alkalmaznák a kollektív munkaformák különböző lehetőségeit. Amikor az egyes csoportokhoz odamennek és belehallgatnak a csoportmegbeszélésekbe, sok félreértelmezésre, megértési nehézségre rá lehet bukkanni, amelyeket azután közösen, frontális módon ismét át kell beszélni.

A fent említett ellentmondás és annak az itt vázolt valószínű okai azt mutatják, hogy a fizikatanár-társadalomnak komoly módszertani megújulásra is szüksége lenne.

### Irodalom

- CSAPÓ BENŐ: A tantárgyakkal kapcsolatos attitűdök összefüggései – Magyar Pedagógia 100/3 (2000) 343–366
- Takács Viola: Baranya megyei tanulók tudásstruktúrái – Iskolakultúra, Pécs, 2003.
- RADNÓTI KATALIN: Fizika – Tartalmak és módszerek az ezredforduló iskolájában, szerk.: Kerber Zoltán, Országos Közoktatási Intézet, Budapest, 2004, 156–183
- TÓTH ZOLTÁN: A természettudományos fogalmak tanítási problémái – A tanári mesterség gyakorlata, szerk.: Katonai András, Ládi László, Széplaki György, Szombatiné Kovács Margit, Nemzeti Tankönyvkiadó, ELTE Tanárképző Főiskolai Kar, Budapest, 2002, 287–292

# PROMÉTHEUSZ MEGMAGYARÁZZA

– gondolatok a közvélemény felelős tájékoztatásáról

Szentgyörgyi Zsuzsa  
a Magyar Mérnök Akadémia tagja

Ezen a fórumon aligha kell bizonygatni az atomenergia hasznosságát. Más a helyzet a társadalommal, vagy egyszerűbben szólva, a „laikus”, a nem hozzáértő emberekkel. Nekik igenis bizonyítékokat kell felsorakoztatnunk, többször ismételve, szorongó kérdéseikre mindig tisztességgel válaszolva kell magyaráznunk. Márpedig ne feledjük, valamiképpen mindnyájan laikusok vagyunk, hiszen összes tudásunk, hozzáértésünk csak nagyon kis szeletét birtokoljuk mélyebben. Emellett az ismeretek talán 30–40%-ához konyítunk is, a többiben azonban teljesen tudatlanok vagyunk. Egy, a nukleáris technikában mélyen járatos szakértő például valószínűleg igen keveset tud a hettiták birodalmáról, a Ming-dinasztia korának kézművességéről, a kutyák anatómiájáról, Baruch Spinoza leveleiről. De legalább – többnyire – hallott róla. Csakhogy ezen kívül még rengeteg olyan ismeret létezik, amiről – minden bizonnyal – valóban semmit sem tudunk.

Hogyan várhatjuk el a nálunk kevésbé tanult, nemhogy egyetemet nem végzett, hanem az általános iskolában tanultakat is már rég elfelejtő emberektől, vagy akár a magasabb szinten képzettektől, akik éppenséggel bölcsészetet, esetleg zenét tanultak – vagyis a társadalom döntő részét kitevő emberektől –, hogy megértsék, az atomtechnika több előnyt jelent számukra, mint amennyi veszélyt.

Természetesen hordoz veszélyeket is. Ugyanúgy, mint a tudás, főleg a technika minden ága, amit az emberiség használ. Igaza volt Zeusznak, amikor a lázadó Prométheuszt oly szörnyűségesen büntette azért, hogy ellopta a tüzet az istenektől. Igaza volt, hiszen a tűz nemcsak melegít maga körül, nemcsak izesre süti az elejtett állat húsát, hanem – szabadjára engedve – kegyetlenül pusztít. A tűz hatalom is – a kiválasztottak, az istenek hatalma volt –, akár csak a nagyhatalmaké az atombomba, a békés célú atomenergia szörnyűséges testvére. A tűz csiholóiként – modern Prométheuszként – a nukleáris technika szakembereinek kell tehát megértetniük, jól érthetően és egyszerűen, de nem primitíven, a laikus számára is el- és befogadhatóan, hogy ez a tűz, az atomenergia biztonságos, és még a hamuja és salakja – a sugárzó hulladékok – sem hordoz közvetlen veszélyeket, mert jól kezelhető és tárolható. Ehhez meg kell tanulnunk, hogy ismereteinket jól megfogalmazva közvetítsük a társadalomhoz, vagyis meg kell tanulnunk (köz)érthetően írni, beszélni, érvelni.

A magyar társadalom józanul és értelmesen viselkedik az atomtechnika ügyében. Több oka lehet ennek. Egyrészt, a mi kicsinyke országunk, hál' istennek nem részese, tettestársa az atombomba létrehozásának – legfeljebb

csak közvetve, meglehetősen áttételesen. A Los Alamosban ügyködő marslakókra – *Neumannra, Kármánra, Szilárdra*, az ifjú *Tellerre* meg még azokra a magyarokra, akik a második-harmadik vonalban dolgoztak ott – inkább büszkék vagyunk, és nem tettestársakként tekintünk rájuk. Másrészt, a korábbi magyar oktatási rendszert dicsérhetjük, amely nagy hangsúlyt fektetett a természettudományokra, s ezáltal megtanított gondolkodni, tényekre, folyamatokra figyelni, és a problémákat megoldani. A most élő idősebb és középkorú nemzedék ilyen oktatást-nevelést kapott. Most éppen ezt az oktatási rendszert – különösen a felsőoktatást – készülnek szétrombolni nagyon „modernül” gondolkodó, nagyokos politikusok. A fizikaoktatás visszaszorítása az általános- és középiskolákban félelmetes jelzés, amely hosszú időkre kihatóan teszi tönkre a magyar társadalom tudását, alkalmazkodását a folyamatosan és gyorsan változó technikához.

Mérnökként tényekre, mérési adatokra szeretek támaszkodni ahhoz, hogy kijelentéseket tehessek. Nos, a magyarok józanságát mérésekkel is bizonyítani lehet. A Paksi Atomerőmű Rt. évente ad megbízást professzionális közvélemény-kutató cégeknek. Nagyon tanulságos, hogy a magyar társadalom szerkezetét adekvátn tükröző több mint ezer megkérdezett mennyire józan válaszokat adott. Például a döntő többség, háromnegyedük, *egyetért* azzal, hogy Magyarországon működik atomerőmű. Fontos tény, hogy tavaly júniusban, tehát alig egy-két hónappal a drámai üzemzavar után is mindössze két százalékkal esett vissza a támogatók aránya. Pedig lehetett volna nagyobb is a visszaesés annak tükrében, hogy az első napokban milyen zavarosan és megkésvé tájékoztatták a közvéleményt. A magyar társadalomnak az atomenergia hasznosságáról vallott határozott meggyőződésében benne rejlik az előző évek kiváló *public relation* munkája. Hasonlóképpen a jó tájékoztatás beérő gyümölcse, hogy a megkérdezettek fele *támogatná* új atomerőművi blokk építését a már meglévők mellé, és csak 38% ellenzi azt.

A jó tájékoztatás véleményformáló erejét mutatják más felmérések is, egyebek között az EU „régí” tagországai-ban. A sugárzó hulladékok kezelése, elhelyezése, biztonsága talán a legkényesebb része az atomenergia elfogadottságának. Arra a kérdésre, hogy ha ezek biztonságosan megoldottak, meghagyná-e opcióként az EU-ban a nukleáris energiatermelést, a finnek kétharmada válaszolt egyetértően, míg a spanyoloknak csupán egyharmada. A tájékozottság jól korrelál ezzel a véleménykülönbséggel: míg a finnek mintegy 40%-a érzi magát nagyon vagy eléggé jól informáltnak a radioaktív hulladékokat illetően, a spanyoloknál mindössze 12% körül jár ez az arány, és az utóbbiak csaknem 85%-a nem eléggé, sőt kifejezet-

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2–3.) elhangzott előadás alapján.

ten nem informálnak tartja magát. Vegyük észre, hogy még a finnknél is akad tennivaló, hiszen 42%-uk nem érzi magát eléggé informálnak.

Van azonban a tájékoztatásnak egy másik, sajnos igen-csak gyenge oldala is. Ez a *média* magatartása, hozzáállása. Keserves saját tapasztalatom alapján állíthatom, nagyon nehéz, nemegyszer lehetetlen az atomenergia hasznosságát, vagy a radioaktív hulladékok biztonságos kezelését józanul taglaló írást elhelyezni. A tavalyi paksi üzemzavar sokszoros publicitást kapott az olyan elemzésekhez képest, amelyek például a légkörszennyezés szempontjából fontos alternatívaként tárgyalják az atom- vagy a vízenergiát. Belátom, az nem hír, ha valaki szereti szüleit, látogatja őket, gondoskodik róluk. Ellenben, ha kutyaóiban tartja apját, egyből ráugrik a sajtó valamennyi ága. Ebben a negatív magatartásban nyilvánvalóan szerepet játszik az, hogy a média vezetői úgy gondolják, az eladhatóságot, a nézettséget a szenzáció állandó hajszolása emeli meg. Vonakodásukat erősíti az a tény, hogy a szerkesztők java része bölcsész „származék”, többnyire annak is az intolleráns radikális része, akik fennen büszkélkednek természettudományos műveletlenségükkel.

A média mellett szólni kell még a társadalmat befolyásoló másik lényeges szereplőről, a közhatalmat megtestesítő *kormányról* és a *parlamentről*. Az idézett felmérés szerint a válaszadók döntő többsége, 85%-a vélte úgy – alig egy-két hónappal a paksi üzemzavar után (2003 júniusában) –, hogy a kormánynak feladatai vannak az elhárításában.

Egyébként is, a kormányt felelősnek tartják a nukleáris technika ellenőrzésében (83%) és – érdekes módon – a tájékoztatásban is (2003/2004: rendre, 63 és 68%). Különösen figyelemre méltó az, hogy a társadalmat leképező válaszadók az *ellenzék*et sem mentik föl a felelősség alól, ugyanis jelentékeny részük véli úgy, hogy az ellenzéknek *támogatnia* kell a kormányt a zavarelhárításban, illetve megfelelő módon figyelmeztetnie kell.

De ne csak a sötét oldalról, a gondokról szóljak. Nagyon lényeges, tisztességes törekvések tapasztalhatók a tájékoztatásban mind az atomerőmű, mind a nukleáris hulladék kezeléséért felelős társaság részéről. Ellenőrző társadalmi testületek kapnak folyamatosan információkat, látogatóközpontok, bemutatóparkok tárják ki a kapukat az érdeklődők számára. Ingyenes lapokban ismerkedhetnek a régió lakosai a legújabb eseményekkel, elképzelésekkel, tervekkel. Nem meglepő, hogy éppen a közvetlenül szomszédos térségek lakói a leginkább elfogadók, hiszen ők a legtájékozottabbak, és amellet nekik hoz munkalehetőségeket is a nukleáris technika.

A sztori végül is hepienddel zárul. Héraklész megsza-badítja az emberiség jötevőjét, a bölcs titánt a máját csipkedő saskeselyűtől, leszedi őt a Kaukázus sziklájáról. Az emberek immár bátran, szabadon használhatják a melegítő-világító, de egyúttal rettenetes pusztításra is képes tüzet. A tűz csiholóinak azóta is fontos kötelességük, hogy állandó magyarázattal szolgáljanak a többieknek, mit ad nekik a megszelídített tűz, és miként kell vele bánni.

## MINDENTUDÁS AZ ISKOLÁBAN

# AZ ATOMMAGTÓL A KONNEKTORIG

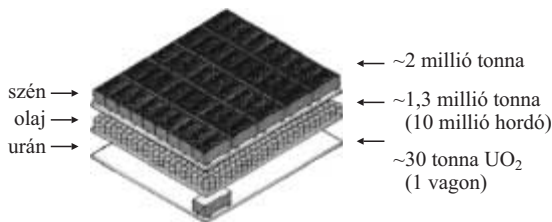
Az 1980-as években bukkant fel Németországban egy matrica: „*Pokolba az erőművekkel, nálunk az áram a konnektorból jön!*” Az ironikus szöveggel a matrica készítője az erőművek ellen tiltakozókat szeretne volna gondolkodásra készíteni. Gyakran előfordul, hogy szinte magától értetődőnek veszünk olyan dolgokat, amelyek mögött a modern tudomány eredményei és hatalmas műszaki-technikai háttér áll. Ezek közé tartozik a villamos energia. Az idézett matrica egyik üzenete éppen az, hogy a villamos energia nem energiaforrás, hanem energia**bor**dozó. Ahhoz, hogy „áram jöjjön a konnektorból”, az energiát valamilyen primer energiaforrásból elő kell állítani, villamos energiává kell alakítani, ezután viszonylag egyszerű eszközökkel és kis veszteséggel továbbítani kell a felhasználás helyére.

Itt álljunk meg egy pillanatra! Elő kell állítani? De hiszen az iskolában tanultuk az energiamegmaradás tételét, és azt hogy örökmozgók – energiaforrás nélkül működő gépek – nem léteznek! És mi is az a fogalom, hogy „energiaforrás”? Van valami, ami csak úgy, magától energiát ad? A fizika arra tanít minket, hogy az energiát csak a

különböző „formái” között lehet oda-vissza alakíthatni (mechanikai, potenciális, kémiai, belső energia, hő formájában közölt energia stb.). Amikor tehát energiaforrásként használunk egy anyagot, akkor abból a benne már valamilyen formában tárolt energiát ravasz trükkökkel más, általunk használható formára – például hővé, vagy villamos energiává – alakítjuk.

## Fosszilis energia

Napjaink legfontosabb energiaforrásai közé tartozik a kőszén, a kőolaj és a földgáz, amelyeket közös néven fosszilis energiaforrásoknak hívunk. Ezek az anyagok sok millió évvel ezelőtt élt élőlényekből keletkeztek, amelyek a Nap energiáját használták fel testük felépítésére, miközben szén-dioxidból és vízből magasabb energiatartalmú szerves vegyületeket állítottak elő. Amikor tehát a szenet, földgázt, kőolajat (vagy annak származékait) elégetjük, tulajdonképpen azt az energiát nyerjük vissza, amelyet a Nap sugárzott le a Földre sok millió évvel ezelőtt.



1. ábra. Ugyanannyi energia megtermeléséhez szükséges szén, olaj és urán

A Föld a jelenlegi fosszilis tüzelőanyag-készletét százmillió évekig gyűjtögette. Ennek nagybani kitermelése és felhasználása a XIX. században kezdődött el. Ötszáz év múlva azonban már nem lesz ipari méretekben használható fosszilis tüzelőanyag, még a legoptimistább becslések szerint sem. Amit tehát a Föld százmillió évekig gyűjtögetett, azt a civilizáció milliószer gyorsabban, néhány száz év alatt elhasználja. Egy másik veszélyre is gondolnunk kell. A fosszilis tüzelőanyagok elégetésével nemcsak az energiát nyerjük vissza, hanem a millió évek alatt az atmoszférából kivont széndioxidot is szükségszerűen visszaeresztjük – ugyancsak milliószer gyorsabban – az atmoszférába. Ez jelentősen módosítja a légkör összetételét, és üvegházhatást okoz. A néhány száz év olyan rövid idő a Föld történetében, hogy ilyen gyors változáshoz a Föld érzékeny egyensúlyokon alapuló rendszerei nem tudnak alkalmazkodni, és ez klímakatasztrófához vezethet.

## Atomenergia

A Föld anyaga négy és félmilliárd évvel ezelőtt szupernóva-robbanásban keletkezett. Ebben a hatalmas energiákat felszabadító csillagkatasztrófában olyan atommagok is létrejöttek, amelyekben a protonok és a neutronok magas energiaszintekre szorultak. Ezek között vannak olyanok is, amelyeket a magerők még éppen összetartani, ezért évmilliárdok alatt sem bomlottak el. A Földön természetes állapotban található legnehezebb elem, az *urán* atommagjában van a legtöbb proton és a legtöbb neutron, ezért ott szorult a legtöbb részecske magas energiaszintre. Az atomreaktorokban ezeket a nagy atommagokat hasítjuk szét kisebb részekre. A maghasadás után létrejött kisebb atommagokban a protonok és a neutronok alacsonyabb energiájú állapotba kerülnek, és így az uránatommagba szorult csillagenergia egy részét visszanyerjük. Amikor tehát az uránt használjuk energiaforrásként, tulajdonképpen a Föld anyagát létrehozó szupernóva-robbanás energiamorzsáit hasznosítjuk.

## Maghasadás és sűrű energia

Az atomreaktorban az energiatermelés alapfolyamata a maghasadás. Ennek során két kisebb atommag és néhány szabad neutron is keletkezik, valamint sok energia szabadul fel.

Egyetlen ilyen folyamat sokmilliószor annyi energiát ad, mint egyetlen szénatom „elégetése”. Ez azt jelenti,

hogy ugyanannyi energia megtermeléséhez *sokmilliószor kevesebb uránra* van szükség, mint szénre. Azaz néhány gramm uránból elő tudjuk állítani azt az energiát, amelyhez egyébként több tonna szén (kőolaj, földgáz) elégetésére lenne szükség (1. ábra). Ezen túlmenően, az urán hasadásakor nem keletkezik üvegházhatást okozó szén-dioxid sem.

A kis üzemanyag-szükséglet miatt az atomenergia *olcsó*, hiszen ugyanannyi energia megtermeléséhez sokkal kisebb mennyiségű anyagot kell bányászni, feldolgozni, szállítani, mint a fosszilis erőművekben. Könnyen lehet sok évre szóló üzemanyag-*tartalékot* is felhalmozni és tárolni, hiszen nem foglal nagy helyet. Ez az energiaellátás hosszú idejű (és a mindennapi piaci áringadozásoktól és politikai viharoktól független) *biztonságát* teremti meg egy országnak.

Az urán azonban magától nem hasad szét, ehhez külső hatásra van szükség. E célra leginkább a neutronok felelnek meg. A neutron elektromosan semleges, ezért könnyen az atommag közelébe tud férkőzni, nem taszítja el az atommag nagy pozitív elektromos töltése. Az atommag közelében „ácsorgó” neutron a mag véletlenszerűen befoghatja, és az erős magerők a maghoz köthetnek. Minél tovább tartózkodik egy neutron a mag közelében, annál nagyobb a valószínűsége annak, hogy ez a befogódás megtörténik. Ezért a „lassú” neutronok *sokkal jobbak* ilyen célra, mint a nagy energiájú, gyors neutronok.

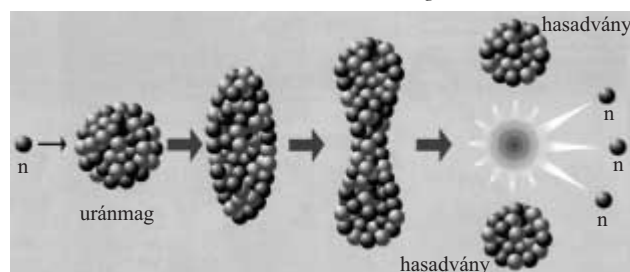
A neutron kötési energiája miatt a neutron befogása után létrejött atommag magasabb energiájú, „gerjesztett” állapotban keletkezik. Az  $^{235}\text{U}$  atommagnál (amely a természetben található uránnak mindössze 0,71%-a) ez a többletenergia éppen elegendő arra, hogy a maghasadás folyamatát elindítsa (2. ábra). A természetes urán legnagyobb részét kitevő  $^{238}\text{U}$  nem tud elhasadni a neutron befogása után, ezért egyes erőművek üzemanyagában a  $^{235}\text{U}$  arányát 3–5%-ra felnövelik, az üzemanyagot „dústítják”.

## Láncreakció

A maghasadást neutron indítja el, és a folyamatban átlagosan kettőnél valamivel több neutron is keletkezik (2. ábra). Ha minden maghasadás után pontosan két neutron okoz újabb maghasadást, akkor egyetlen neutronból az első „generációban” két maghasadás, a másodikban négy, a harmadikban nyolc stb. jönne létre.

Tíz generáció után  $2^{10}$  ~1000-szeresre nőne a neutronok száma – és ezzel a felszabaduló energia mennyisé-

2. ábra. Neutronnal kiváltott maghasadás





ge is. Húsz generáció után pedig már milliószorosa lenne a folyamat által felszabadított energia. Könnyen belátható, hogy ilyen módon igen rövid idő alatt el lehet érni a makroszkopikus mennyiségű energia felszabadításához szükséges számú maghasadást. A neutronok ilyen módon történő sokszorozódását *neutronos láncreakciónak* nevezzük. Ennek ötletét *Szilárd Leó* szabadalmaztatta 1934-ben.

## A moderátor mint a láncreakció katalizátora

A nagy energiaszabadulással járó maghasadásban a keletkező neutronok is nagy energiát kapnak. A maghasadást azonban – mint láttuk – nagy valószínűséggel csak a lassú neutronok tudják létrehozni. A keletkezett neutronokat le kell tehát lassítani, és erre a könnyű atommagokkal való ütköztetés ad lehetőséget. Ilyen célra olyan anyagok megfelelőek, amelyek nem nyelik el a neutronokat, de atommagjainak a neutronok nagy energiát tudnak átadni ütközéskor. Az ilyen anyagokat *moderátornak* hívják. A víz a legolcsóbb ilyen anyag, amely nagy proton tartalma miatt jó neutronlassító. Sajnos a víz protonjai nemcsak lassítják a neutronokat, hanem el is nyelnek belőlük (deutérium keletkezik), ezért normál (könnyű) víz moderátorral működő atomerőműveknél (ilyen a Paksi Atomerőmű is) az üzemanyagot dúsítani kell. Sokkal jobb (de sokkal drágább) moderátor a nehézvíz, és a nagy tisztaságú grafit. Grafittal vagy nehézvízzel moderált erőművekben már dúsításra sincs szükség, természetes összetételű urán is használható.

Grafittal lassították a neutronokat a történelem első atommáglyájánál Chicagóban 1942-ben, de ilyenek még napjainkban is működnek néhány helyen (ilyen volt pl. a csernobili atomerőmű reaktora is). Nehézvízzel lassítják a neutronokat közelünkben, a romániai Cernavodában működő CANDU (CANadian Deuterium Uran) típusú reaktorok.

Fontos megérteni, hogy a moderátor jelenléte *segíti* a láncreakciót, ahogyan egy katalizátor is segít egy kémiai reakción. Emiatt a moderátornak fontos biztonsági szerepe is van. Ha reaktorunk teljesítménye nő, növekszik a hőmérséklet, a moderátor hőmérséklete is nő, a hőmozgás miatt

egyre gyorsabban mozgó moderátor-atommagokkal ütköző neutronok nem tudnak annyira lefékeződni. A gyorsabb neutronok viszont rövidebb ideig tartózkodnak az atommagok közelében, ezért kisebb valószínűséggel hoznak létre maghasadást. Ez negatív „visszacsatolást” jelent: *a hőmérséklet növekedése fékezi a láncreakciót*. Ha pedig a moderátor olyan, hogy még el is tud forni (pl. víz vagy nehézvíz), akkor a forráspont fölött megszűnik a neutronok lefékezése, és a láncreakció magától leáll, hiszen gyors neutronokkal nem működik. Ez a vízzel (vagy nehézvízzel) moderált atomreaktorokat különösen biztonságossá teszi. A grafit moderátorú reaktoroknál ez a hatás nem érvényesül (hiszen ott a grafit nem „forr el”, hanem magas hőmérsékletelig ott marad); ezek kevésbé biztonságosak.

## Radioaktivitás az atomreaktorokban

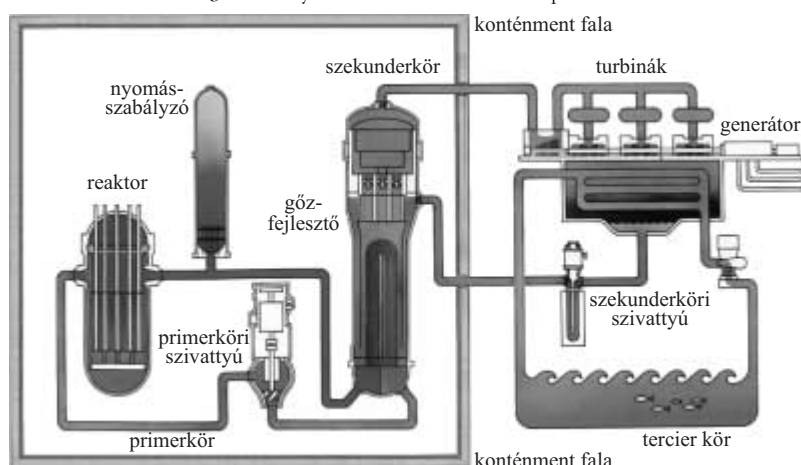
A maghasadás során keletkezett kisebb atommag-töredékek (hasadványok és hasadási termékek) erősen radioaktívak, ezért az atomreaktor belsejében üzem közben radioaktivitás halmozódik fel. Az atomreaktorok legnagyobb veszélye az, hogy ezek a radioaktív anyagok kiszabadulnak, a környezetbe kerülnek, és ott az élővilágot károsítják. Ennek elkerülésére az atomerőművekbe többszörös védelmet építenek.

Az üzemanyagot olyan pasztillákba sajtolják, amelyek a keletkezett hasadási termékek legnagyobb részét megkötik, nem engedik szétterjedni. Következő védelemként a pasztillákat magas olvadáspontú, légmentesen lehegesztett csövekbe zárják. Ami a pasztillákból mégis kijön, azt ezek a burkolatok fogva tartják. Az üzemanyagpálcákat a zárt primerkörben keringő hűtőközeg (pl. víz) hűti, amely még mindig nem érintkezik a környezettel, ezért a pálcák esetlegesen megsérült burkolatán átszivárgó radioaktivitás a primerkörből már nem juthat tovább.

Ha a primerkör vastag acél csővezetéke is megsérülne és a primerköri víz kiömlene, a radioaktivitást az egész rendszer körül fogó vastag, hermetikusan lezárt, betonból és acélból készült építmény tartja vissza. Az újabb atomerőművekben ezt a – *konténmentnek* nevezett – burkolatot úgy méretezik, hogy még egy vadászpülőgép becsapódásának is ellent tudjon állni.

A vízzel moderált atomerőművek legnagyobb balesete 1979-ben Harrisburg (USA) mellett következett be (TMI-2). Nem véletlen, hogy ennél a balesetnél sem került ki a környezetbe a lakosságra veszélyes mennyiségű radioaktivitás, pedig – operátori hibák miatt – az aktív zóna összeolvadt, és a reaktor végérvényesen károsodott. A csernobili balesetet külön kell kezelnünk, hiszen egyrészt nem vízzel moderált atomerőműben következett be (tehát a fentebb említett okok miatt a biztonsági szintje alacsonyabb), másrészt pedig az aktív zóna körül nem volt konténment, ami megvédte volna a környezetet. Az ilyen reaktorok veszélyeire a *Teller Ede* által veze-

3. ábra. Nyomottvízes atomerőmű felépítése



tett amerikai reaktorbiztonsági bizottság már az 1950-es évek közepén felhívta a figyelmet, és ezért nyugaton fokozatosan leállították a grafitral moderált, vízzel hűtött reaktorokat. Ma már csak a volt Szovjetunió területén működik még néhány, de ezek leállítását is tervbe vették.

## Atomenergiától a villamos energiáig

A láncreakcióban felszabaduló energia legnagyobb része a keletkezett hasadványok mozgási energiájának formájában jelenik meg. Ezek még az üzemanyagban lefékeződnek, és az üzemanyagot melegítik. Az üzemanyagpalcákat a primerkörben keringő hűtőközeg hűti, és viszi tovább hő formájában az ott felszabadult energiát (3. ábra).

Ezzel a hővel a gőzfejlesztőben vizet forralunk, és ez a „szekunderköri” gőz forgatja meg a gőzturbinákat, ahol az energia egy része mechanikai mozgássá – a turbina forgásává – alakul. A turbinák generátorokat hajtanak, amelyek a mozgási energiát tovább alakítják villamos energiává. A villamos energiává nem alakítható „hulladék” hőt a terciér hűtőkör viszi el és adja le a környezetnek (ennek egy részét esetleg hő formájában tovább lehet hasznosítani, pl. lakótelepek fűtésére).

## Kockázatok

Minden emberi tevékenység – így a villamosenergia-termelés is – kockázattal jár. Évente sok százan halnak meg a világon szénbányákban bekövetkező balesetek miatt. A kőolajat szállító tankhajók baleseteinél a tengerbe ömlő hatalmas mennyiségű olaj helyrehozhatatlan környezeti károkat okoz. Senki sem mérte még fel, hogy évente hány áldozatot szednek a gázrobbanások. Az évente millió tonnaszámba az atmoszférába bocsátott szén-dioxid a Föld légkörének egyensúlyát fenyegeti.

Az atomenergia – felelősséggel és szakértelemmel üzemeltetve – megbízható, biztonságos, olcsó és környezetbarát energiaforrás. Az atomenergián alapuló villamosenergia-termelés kockázata jelenleg kisebb, mint a fent említett kockázatok. Üzemzavarok, balesetek természetesen minden tevékenység közben előfordulhatnak, ezeket az atomenergia-termelésből sem lehet teljesen kizárni. Hatásaikat azonban gondos tervezéssel és megfelelő biztonsági kultúrával alacsony szintre lehet szorítani. Az autóközlekedésnek, a repülésnek is vannak kockázatai, az emberiség mégsem mond le ezekről a hasznos tevékenységekről, hanem megpróbálja őket biztonságosabbá tenni. Miért éppen az atomenergiával kellene másképpen cselekedni?

Sükösd Csaba

BME Nukleáris Technika Tanszék

## HÍREK – ESEMÉNYEK

# AKTINIDÁK ÉS HASADÁSI TERMÉKEK PARTICIONÁLÁSA ÉS TRANSZMUTÁCIÓJA KONFERENCIA

Las Vegas, Nevada, USA, 2004. november 9–11.

*Az utóbbi másfél évtizedben rendkívül megnőtt az érdeklődés a használt nukleáris fűtőanyagok újbóli hasznosítása iránt, hogy így csökkentse az atomenergia környezeti terhelését. Ezért kétévenként az OECD/NEA szervezésében információs találkozót tartanak, ahol képet adnak a világban folyó ilyen irányú kutatásokról. Az információk kiterjednek az elválasztási technológiákra, az ezekhez kapcsolható fűtőelemgyártásra, transzmutációs eszközökre: kritikus, és gyorsítóval hajtott szubkritikus reaktorokra.*

A találkozó fő témái

*Nemzeti és nemzetközi P&T (partíciós és transzmutációs) programok áttekintése*

Japánban 15 éve fut az OMEGA-program, amelynek lényege egy kétrétegű üzemanyagciklus megvalósítása.

A III. Nukleáris Technikai Szimpóziumon (Budapest, 2004. december 2-3.) elhangzott előadás alapján.

Ennek első rétegében a fűtőelemciklus a friss üzemanyag könnyűvízes reaktorokban való „égetéséből”, valamint vizes reprocesszállással előállított MOX üzemanyag (mixed oxide: urán- és plutónium-oxidot is tartalmazó fűtőelem) szintén vizes reaktorokban való égetéséből áll. A második rétegben száraz reprocesszállással a maradék transzuránokat nitrid fűtőelemekbe pakolják, és ezeket ADS-ben (accelerator driven system = gyorsítóval hajtott rendszerek) kívánják újrafelhasználni.

Koreában egyenlőre nincs sem dúsítás, sem elválasztás, de távlati tervek vannak elektrokémiai elválasztásra, valamint a HYPER nevű, ólom–bizmut hűtésű szubkritikus rendszerre.

Oroszországban több helyen is foglalkoznak szubkritikus rendszerek tulajdonságait akarják vizsgálni kísérleti berendezések építésével. Ezenkívül kidolgozták egy sóoldékos mozgó üzemanyagú reaktor koncepciót.

Az Egyesült Államokban a Nemzeti Energiapolitikai Program keretében egyre nagyobb szerepe lesz a nukleá-

ris energiának. Ennek keretében a fűtőelemciklusok zárására alkalmas technológiák is szóba kerülnek. Széles körű kutatások folynak partíciós technológiák és fűtőelemgyártás területén. Pb–Bi hűtőközeggel, hélium és szén-dioxid hűtésű gyorsreaktorokkal is foglalkoznak. Ez az AFCI (*Advanced Fuel Cycle Initiative*) program.

Az *Európai Unióban* az EUROTRANS projekt adja a kutatás keretét. E program fő feladata az ADS-ekkel kapcsolatos vizsgálatok. Széles körű együttműködésben dolgoznak különböző laboratóriumok a gyorsító céltárgyával összefüggő problémákon, a céltárgy és a szubkritikus rendszer összehangolásán stb.

#### *Transzmutációs üzemanyagciklusok és geológiai tárolók*

Több előadásban is szóba került, hogy a végleges elhelyezés szempontjából is rendkívül fontos a particionáláson alapuló többszörös üzemanyagciklus. A geológiai tárolók fő problémáját a radioizotópok, különösen a transzuránok bomlásából eredő hőfejlődés okozza. Ezért mindenképpen szükséges a transzuránokat újrafelhasználni (*recycling*), másképp a geológiai tároló hamarosan szűkös lesz.

#### *Transzmutációs berendezések üzemanyagai*

Több elméleti és kísérleti témájú előadás szólt a transzmutációs berendezések üzemanyagainak tulajdonságairól valamint gyártástechnológiai kérdésekről.

#### *Kísérleti és elméleti tevékenység a transzmutáció körében*

A karlsruhei intézetben kísérleti és elméleti kutatásokkal tanulmányozzák az ólom–bizmut hűtés termohidraulikáját. Ehhez a KALLA berendezést használják, amellyel a MEGAPIE (*MEGAwatt Pilote Experiment*) projektet készítik elő.

A Phénix (Franciaország) gyorsreaktor utolsó két ciklusában 2007-ig besugárzásokat fognak végezni új típusú, nagy transzurántartalmú oxid, nitrid, fémötvözet és kerámia fűtőelemekkel (FUTURIX–FTA program).

#### *Gyorsítóval hajtott transzmutációs berendezések*

Mint említettük, az európai kutatások középpontjában a gyorsítóval hajtott szubkritikus rendszerek (ADS), elsősorban a Pb–Bi hűtésűek állnak.

Reaktorfizikai szempontból fontos probléma a szubkritikus rendszer és a forrás összekapcsolása. Amíg Európában spallációs forrásban gondolkodnak (TRADE program Olaszországban), addig az USA-ban elektrongyorsító neutronforrást használnak ilyen kísérletekhez (RACE program).

#### *Nukleáris hulladékkezelés regionális koncepciója*

Egy előadás kvantitatív módon tárgyalta a regionális együttműködés lehetőségét és perspektíváit. Kétfajta ország van:

„A” típusú ország: nyitott üzemanyag ciklus, felhalmozódó transzuránok,

„B” típusú ország: zárt üzemanyagciklus.

Az előadás bemutatta azt a hosszú távú (2100-ig terjedő) stratégiát, amelynek alapján a két ország optimális feltételek mellett tudja transzmutilni, azaz minimalizálni radioaktív hulladékát.



A találkozói előtti napon lehetőségünk volt a Yucca-hegységben épülő végső hulladékártoló alagútjának megtekintésére.

Vértes Péter

KFKI Atomenergia Kutató Intézet

## KITÜNTETÉSEK

2005. március 14-én *Magyar Bálint* oktatási miniszter kitüntetésekkel adta át március 15-e alkalmából a Néprajzi Múzeumban, melyeket *Mádl Ferenc* köztársasági elnök adományozott.

A *Magyar Köztársasági Érdemrend lovagkeresztje* kitüntetést kapta:

CSERMEY PÉTER biokémikus, az ELTE egyetemi tanára, az orvostudomány doktora, aki a *Kutató Diákokért Alapítvány* vezetésével évente sok tehetséges fiatalnak biztosítja a tudományos kutatómunkába való bekapcsolódás lehetőségét, már igen fiatal korban;

JÉKI LÁSZLÓ, az MTA Központi Fizikai Kutató Intézetének tudományos főmunkatársa, a fizikai tudomány kandidátusa, akit ismeretterjesztő írásaiból, előadásaiból, a természettudományos eredmények terjesztéséből és az áltudományok elleni harcból ismerhetnek a *Fizikai Szemle* olvasói.

A *Magyar Köztársasági Bronz Érdemkereszt* kitüntetésben részesült:



Csermely Péter



Jéki László



Jarosievitz Beáta

Foto: Kármán Tamás

JAROSIEVITZ BEÁTA, a II. kerületi Ady Endre Fővárosi Gyakorlókollegium tanára, akinek a nevével az elmúlt években a *Life in the Universe*, a *Napállandó mérése* és a *Vénusz-átvonulás* megszervezésének kapcsán találkozhattak a *Fizikai Szemle* olvasói.

Valamennyi kitüntetettnek gratulálunk és további sikeres munkát kívánunk.

## Magyar fizikatanár nemzetközi sikere

KISPÁL ISTVÁN (Dunaújvárosi Széchenyi István Gimnázium) a nemzetközi *Celebrate* projekt kapcsán készített kiváló digitális tananyagaiért a tanárok és iskolák számára kiírt *E-learning Awards 2004* európai iskolahálózati ver-

senyen elnyerte a *legjobb tananyagnak járó díjat*. A díjat november 18-án, Prágában, az *Eminent* konferencián adta át a cseh oktatási miniszterhelyettes, az európai iskolahálózat igazgatója, és a díjat felajánló Microsoft területi igazgatója. Gratulálunk a szép sikerhez, és további sok sikert kívánunk!

# A KVANTUMOPTIKA ÉS -ELEKTRONIKA LEGÚJABB EREDMÉNYEI

az ELFT Atom-, Molekulafizikai és Kvantumelektronikai Szakcsoport Tavaszai Iskolája  
Hotel Uni, Balatonfüred, 2005. május 31. – június 3.

### Regisztráció

Név, munkahely vagy lakcím, választott elérhetőség (e-mail és/vagy telefon és/vagy fax) megadásával az alábbi e-mail címre *vagy* fax számra:

E-mail: amke.iskola@titan.physx.u-szeged.hu

Fax: (62) 544658

– Amennyiben 3 munkanapon belül nem kap választ az Ön által megadott elérhetőségi módon, akkor kérjük, ismételje meg regisztrációját.

– Ha átutalással kíván fizetni, kérjük, tüntesse fel a számla címzettjét és címét is.

### Részvételi díj

2005. május 17-ig: 52500 Ft, 2005. május 18-tól, illetve a helyszínen: 55000 Ft. Extra kiadvány: 3000 Ft/db, egy-egy nap felár: 4000 Ft/nap

### A díj tartalmazza

Az iskolán való részvételt • az előadások kivonatát könyv alakban • szállást 2, illetve 3 ágyas fürdőszobás szobákban • büféreggelit • ebédet (3 fogás + ásványvíz) • vacsorát (+ ásványvíz) • kávészünetekben: kávé, teát, üdítőt, aprósüteményt • szauna, konditerem és a hotel strandjának használatát • zárt parkoló használatát • 15% OM-kötelezett elvonást • 25% ÁFA-t.

### Fizetési mód

Átutalással (a Szegedi Tudományegyetem számlaszámára<sup>1</sup>) vagy készpénzzel a helyszínen.

### Kérdések, megjegyzések

E-mail: amke.iskola@titan.physx.u-szeged.hu, fax: (62) 544-658.

Bővebb információ található a <http://www.kfki.hu/elftkvan/> helyen.

<sup>1</sup> A számlaszámot és a „Közlendők”-be írandó számot a második körlevélben tesszük közzé.

### Az iskola tudományos programja

2005. május 31., kedd

Béérkezés, regisztráció: 13.00-tól

16.00 Megnyitó

16.05 A foton 100 éve (*Varró Sándor*, SzFKI)

17.00 Tea (kávé)

17.15 Lézeres hűtés rezonátorban (*Domokos Péter*, SzFKI)

18.00 Kvantumrendszerek kontrollja (*Szabó Gábor*, SzTE OKT)

19.00 Vacsora

2005. június 1., szerda

9.00 Az integrált optika elemei (*Mojzes Imre*, BME MHT)

9.45 Lineáris terjedés, fókuszálás, erősítés és mérés (*Osvay Károly*, SzTE OKT)

10.30 Kávészünet

11.00 A kvantummechanikai összefonódottság (*Konior-czyk Mátyás*, SzFKI)

11.45 Infravörös impulzusok mágneses molekulákból (*Benedict Mihály*, SzTE EFT)

13.00 Ebéd

### Délután

16.00 Tea (kávé)

16.30 Frekvenciakonverzió és THz-es sugárzás előállítása (*Hebling János*, PTE KFT)

17.15 Nemlineáris mikroszkópia és biológiai–orvosi alkalmazásai (*Szipőcs Róbert*, SzFKI & KOKI)

18.00 Femtoszekundumos oszcillátorok és fázisstabilizálás (*Dombi Péter*, TU Wien & SzFKI)

19.00 Vacsora

2005. június 2.

9.00 Részecskegyorsítás lézerplazmában (*Földes István*, RMKI)

9.45 Magasrendű harmonikusok generálása és alkalmazása (*Varjú Katalin*, Univ. Lund & SzTE OKT)

- 10.30 Kávészünet  
 11.00 Markovi folyamatok leírása, nyílt kvantumrendszerek (*Ádám Péter*, SzFKI)  
 11.45 Nem-Markovi folyamatok tárgyalása (*Diósi Lajos*, RMKI)  
 13.00 Ebéd

#### *Délután*

- 16.00 Tea (kávê)  
 16.30 Rezonátorlecsengési spektroszkópia (*Bánó Gergeley, Kutasi Kinga*, SzFKI)  
 17.15 Az integrált optika biofizikai alkalmazásai (*Dér András*, SzBK)  
 18.00 Rövid impulzusok generálása félvezető lézerekkel (*Serényi Miklós*, MFA)  
 19.00 Vacsora

2005. június 3.

- 9.00 Többfotonos folyamatok és attoszekundumos jelenségek (*Farkas Győző*, SzFKI)  
 9.45 Lézerindukált röntgensugárzás és röntgenlézerek (*Földes I.*, RMKI, *Simon Péter*, LLG Göttingen, *Szatmári Sándor*, SzTE KFT)  
 10.30 Kávészünet  
 11.00 Atomi rendszerek koherens manipulációja (*Djotyán Gagik*, RMKI)  
 11.45 Hideg atomok (hűtés, csapdázás, BEC) (*Sörlei Zsuzsa*, RMKI)  
 13.00 Zárszó  
 13.10 Ebéd

*Osvay Károly*  
 ELFT AMKE titkára

## NÉGYSZÖGLETES KERÉK

### 136. PROBLÉMA

Van egy négyzet alakú telkünk, 100 méter hosszú kerítéssel körbekerítve. A föld ára a kerítésen belül négyzetméterenként 100 \$, a kerítésen kívül pedig 200 \$. Lehetőségünk van a kerítés áthelyezésére oly módon, hogy a kerítés hossza, továbbá a telek valamelyik átlójának két végpontja változatlan maradjon.

Hogyan módosítsuk a telkünk hátárát, ha a legnagyobb nyereséget szeretnénk elérni? (A feladat elemi úton, fizikai megfontolások felhasználásával is megoldható!)

(*Vladimir Sedach*, Seattle, USA)

### A 136. PROBLÉMA MEGOLDÁSA

Egy közgazdasági maximum-problémával állunk szemben, amely matematikai szempontból úgynevezett mellékfeltétellel rendelkező variációs probléma. Milyen alakú legyen a kerítés az eredeti telken belül, illetve azon kívül, hogy az általa határolt területeknek a négyzetméterárral súlyozott összege (tehát egy, a kerítés alakjától függő szám, a kerítést megadó függvény „funkcionálja”) a lehető legnagyobb legyen, miközben a kerítés bizonyos pontjai előírt helyen kell legyenek, és a kerítés hossza is adott értékű.

Ez látszólag igen bonyolult feladat! A variációs számítás matematikájában jártasak megpróbálhatják felírni a probléma Euler–Lagrange-egyenletét, a mellékfeltételt Lagrange-multiplikátorral vehetik figyelembe. Az így adódó nemlineáris differenciálegyenletet megoldva eljuthatnak a megoldáshoz, de lehetséges, hogy az optimális telekhatár megkeresésére fordított idő és energia (tehát pénz) több lesz, mint az optimalizálás során elért nyereség!

Keressünk inkább – a feladat végén szereplő útmutatásnak megfelelően – valamilyen egyszerűbb eljárást! A fizikában gyakran találkozunk szélsőérték- és variációs problémákkal, ezek általában minimumfeladatok (pl. a legkisebb hatás elve, vagy az energiaminimum-elv). Ha találunk egy olyan fizikai rendszert, amelynek az energiája a jelen problémában szereplő módon, tehát területek súlyozott összegeként számolható, akkor ezen rendszer egyensúlyi állapota – amelyet szerencsés esetben más módszerrel is meg tudunk határozni – egyúttal megoldhatja a közgazdasági feladatunk megoldását is.

A vékony hárták (pl. szappanhárták) energiája a felületükkel (területükkel) arányos, az arányossági tényező a felületi feszültség. Ha azt szeretnénk elérni, hogy valamilyen körülkerített terület a lehető legnagyobb legyen, és ezt minimumfeladatként akarjuk megfogalmazni, akkor követeljük meg, hogy a kerítésen kívüli terület legyen a lehető legkisebb. A területek súlyozott összegének minimumát fizikailag úgy valósíthatjuk meg, hogy az egyes területeket különböző felületi feszültségű folyadék hártájával borítjuk le, a mellékfeltételt (a kerítés hosszára vonatkozó követelményt) pedig egy hajlékony, de nyújthatatlan fonállal „oldhatjuk meg”.

Ezzel a trükkkel az eredeti közgazdasági feladatot a következő fizikai problémára vezettük vissza:

### 137. PROBLÉMA

Van egy négyzet alakú drótkeretünk, melyre vékony, hajlékony és nyújthatatlan cérnaszálból készített hurkot helyezünk. A zárt hurok hossza megegyezik a négyzet kerületével, és a hurok két áttellenes (egymástól ugyanakkora hosszúságú cérnaszálakkal elválasztott) pontját a drótkeret valamelyik átlójának két végpontjához rögzítjük.

A drótkeretet egy másik (vele egy síkban fekvő, és mondjuk ugyancsak négyzet alakú) nagyobb drótkeretbe foglaljuk, és az egész elrendezést szappanoldatba mártjuk. A kialakuló hárták közül a cérnaszálon belül levőket kipukkasztjuk, a cérnaszálon kívül, de a kisebb négyzeten belül levő hárták felületi feszültségét pedig

(valamilyen vegyszer hozzáadásával) az eredeti érték felére csökkentjük.

Milyen alakot vesz fel a cérnaszál egyensúlyi helyzetben? (Feltételezhetjük, hogy a cérna – a két rögzített pontját leszámítva – szabadon elcsúszhat a drótkereten.)

(G. P.)

## KÖNYVESPOLC

# Ralph W. Moss: SZENT-GYÖRGYI ALBERT

Fordította: Bakács Tibor, Typotex Kiadó, Budapest 2003, 341 o.

Kiváló életrajzi könyvet kap kezébe az olvasó, mely *Szent-Györgyi Albert* mind tudományos karrierjét, mind magánéletét bemutatja. A könyv szerzője rendelkezik magyar gyökerekkel édesanyja révén. Többször járt hazánkban, ahol sok segítséget kapott írása elkészítéséhez. De munkájában segítségére volt maga Szent-Györgyi Albert is, akivel 1980–85 között többször személyesen beszélgetett a könyv írása kapcsán. Az életrajz hitelességét számtalan dokumentummal támasztja alá, melyekre való hivatkozások, esetleges kiegészítések a „Jegyzetek” részben megtalálhatók. A személyes vonatkozások erősítését szolgálja a három Függelék, továbbá a könyv végén található számtalan fotó.

Az író részletesen bemutatja Szent-Györgyi Albert tudományos eredményeit és az azokhoz vezető út fő momentumait. Szent-Györgyi munkásságának középpontjában a legfontosabb kérdés valójában az élet mikéntjének megértése volt, felfedezéseit e cél eléréshez vezető egyes állomásoknak tekintette. Ez elmondható mind a C-vitamin, mind a citromsav-ciklus felfedezéséről, majd később az izommal kapcsolatos kutatásairól, végül utolsó évtizedeiben a rák gyógyításával kapcsolatos munkásságáról.

A biológiai oxidációval már az 1920-as évek elején, Groningenben kezdett el foglalkozni. Kutatásai közben olyan dolgokat vett észre, melyek mások számára is ismerős tapasztalatot jelentettek, de azokon nem csodálkoztak el. Például egyes növények, gyümölcsök megbarbadnak, míg mások nem, például narancs, citrom. Ezért egyik fő kutatási módszere az volt, hogy megismételte a már addig leírt kísérleteket, és közben arra figyelt, hogy észre tud-e venni olyan dolgokat, amelyek kicsit másképpen mennek végbe, mint az az addigi szakirodalomban szerepelt, hiszen majd azt lesz érdemes kutatnia. És ezért nem értett egyet az élete vége felé kibontakozó pályázati

rendszerrel, mely napjaink kutatási finanszírozási rendszerének is meghatározó eleme, hogy már a munka kezdetén meg kell tervezni a teljes kutatási folyamatot a várható eredményekkel együtt. Szerinte ez lehetetlen, hiszen nem tudhatja a kutató, hogy adott esetben milyen váratlan kérdésre bukkan.

Hollandiai éveit nagy szegénységben élt feleségével és lányával. Majdnem fel is adta a tudományos munkát, míg váratlanul, felfigyeltek eredményeire, Cambridge-ben kapott állást. Itt szerezte meg PhD-fokozatát is. Ezt követően költözött Szegedre, ahol Nobel-díjas felfedezését megtette a szegedi paprika segítségével. Majd a háborús évek következtek. A könyv nagy érdeme, hogy a szerző nemcsak a tudományos eredmények felé vezető, nemegyszer rögzös út rejtelseibe vezeti be az olvasót, hanem korhűen mutatja be a korabeli, elsősorban magyar, történelmi hátteret is Szent-Györgyi életén keresztül. A könyvnek ezek a fejezetei szinte krimibe illőnek tekinthetők.

A szerző bemutatja azokat a kutatással kapcsolatos folyamatokat is, melyek ugyan nem tekinthetők minden esetben dicsőségesnek, mégis sokszor előkerültek a tudomány története során. Ezek a prioritási viták. Szent-Györgyi többször került ilyen viták középpontjába. Az egyik esetben *C.G. Kinggel*, aki még Nobel-díja jogosságát is kétségbe vonta, majd később egyik hűséges munkatársa, *Banga Ilona* védelmében. Az Amerikai Egyesült Államokban eltöltött évek nehézségei sem maradtak ki a könyvből, és Szent-Györgyi halála körül felmerült problémák sem.

Összefoglalva, a kiváló és izgalmas könyvet ajánlom mindazok számára, akik hiteles képet szeretnének kapni hazánk egyik kutatóóriásáról, Szent-Györgyi Albertről.

*Radnóti Katalin*

---

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat  
2005. május 28-án, szombaton  
tartja ez évi, tisztújító Küldöttközgyűlését.

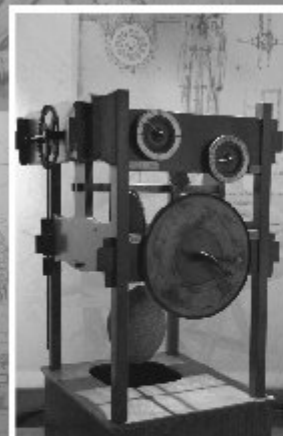
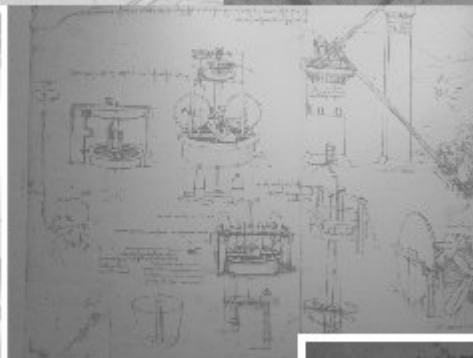
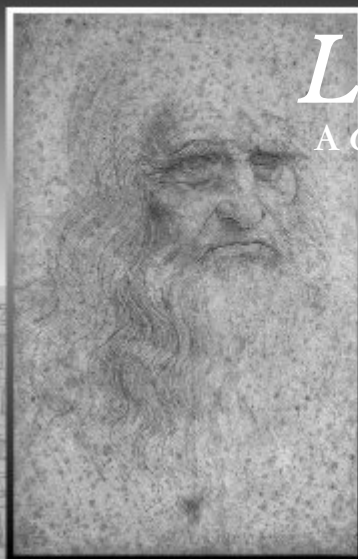
# Leonardo da Vinci Budapesten

A Codex Atlanticus lapjai és tárgyiasult rajzai

2005. március 18. – május 29.

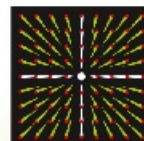
Fővárosi Szabó Ervin Könyvtár

[www.fszek.hu](http://www.fszek.hu)



Megköszönjük Benito Righetti úrnak, az Olasz Köztársaság Budapesti Nagykövetsége tudományos-technikai attaséjának a fényképek elkészítéséhez nyújtott segítségét.

Fotók: Kármán Tamás



# LASER 2005

## World of Photonics

global  
business  
in light



### A szakma jövője

A LASER World of Photonics 2005 szakkiállításon megtapasztalhatja, hogy az optikai technológia ugrásszerű fejlődése milyen előnyöket nyújt az Ön szakterületén. Itt, a fotonika világvásárán valamennyi piacvezető cég jelen van. Használja ki a kiállítás, a World of Photonics Kongresszus, a keretprogramok és az interservice egyedülálló kombinációját!

Hotline: (+49 89) 9 49-1 14 68

fax: (+49 89) 9 49-1 14 69

info@laser.de · www.global-electronics.net/laser

Információ:

Promo Kft. · 1015 Budapest · Széna tér 1/a

tel.: 224-7765 · fax: 224-7763

hunmunch@elender.hu

Belépőjegy, katalógus forintért itt vásárolható.

**Új Müncheneri Vásárváros**  
**2005. június 13–16.**

World of Photonics  
Congress 2005



Együtt a  
2005 fibercomm

Szervező:

Messe München GmbH · Messengelände · 81823 München · Germany

Időt takarít meg az  
online-regisztrációval  
[www.laser.de/ticket](http://www.laser.de/ticket)