

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 időkéséseket 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 kozmikussugárzás-dozimetria a Nemzetközi Űrállomáson és a földi kiegészítő vizsgálatok

Pálfalvi József, Szabó Julianna

KFKI Atomenergia Kutatóintézet

Eördögh Imre

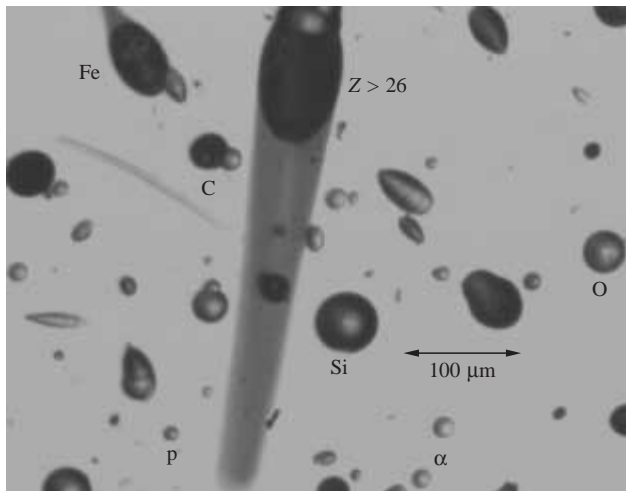
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet

*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)

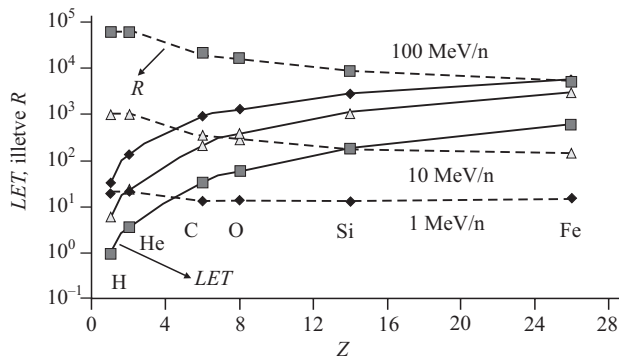
## Mi a szilárdtest-nyomdetektor?

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 képanalizátor. 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 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 energiataromány szerint. Ez fontos lépés, mivel az elsődleges kozmikus sugárzástól eredő nyomok így elhatárolhatók a másodlagosan keletkező neutronok által keltett nyomoktól, és külön-külön értékelhetőek.

## 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 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 kimaratjuk, 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:

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

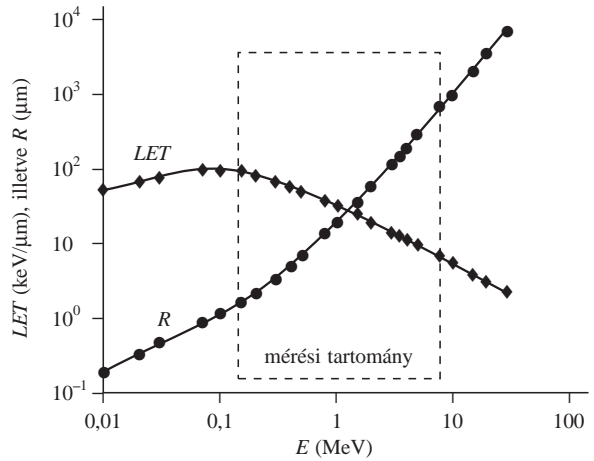
ahol  $A = a/2b$  és  $B = b/2b$  ( $a$  az ellipszis alakú nyom mért nagy-, a  $b$  a kistengelye,  $b$  a detektor felületéről lemaródott réteg vastagsága:  $b = V_b t$ ,  $t$  a maratás ideje). Ha a nyomhossz változása ismételt maratás során mérhető (ld. az 1. ábrán pl. a Fe-nyomot), akkor  $V$  meghatározására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



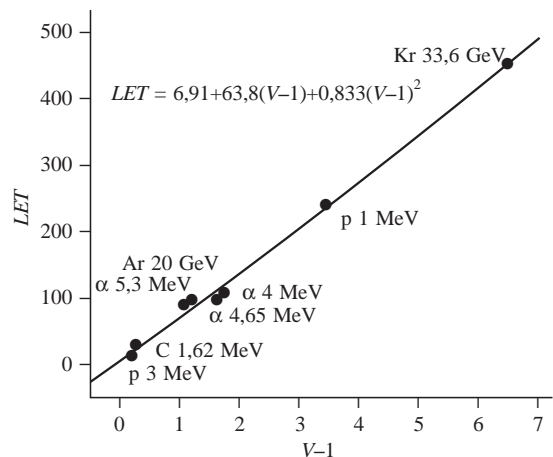
3. ábra.  $LET$  és hatótávolság ( $R$ ) protonokra, az energia függvényében

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

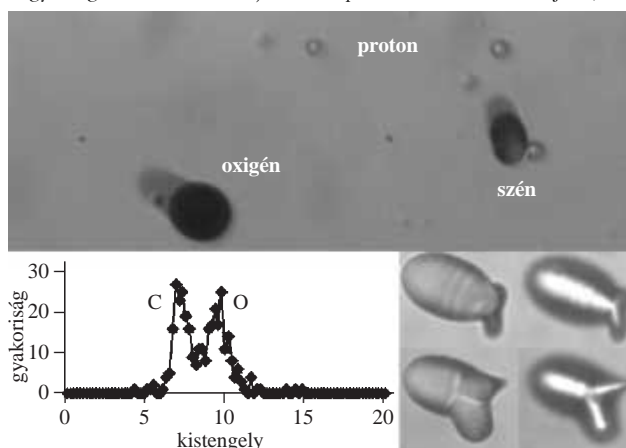
- Földi indítás: 2003. február 2., dokkolás február 4. Jármű: Progressz M-10-247. Detektordobozok elhelyezése február 7. (*Nyikolaj Budarin*, 6. sz. legénység).

- 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 választát<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, űrdózisometriai 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