

Passzív űrdozimetria magyar részvétellel

DUDÁS BEÁTA, SZABÓ JULIANNA, PÁLFALVI JÓZSEF

MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet
dudbea@aeki.kfki.hu

Kulcsszavak: dozimetria, szilárdtest nyomdetektor, kozmikus sugárzás, ISS (Nemzetközi Űrállomás)

Ebben a cikkben két űrkutatással foglalkozó projektről lesz szó, név szerint a jelenleg is zajló MATROSHKA és BIOPAN programokról, amelyek évek óta nemzetközi összefogással, köztük magyar részvétellel folynak az Európai Űrkutatási Ügynökség (ESA) irányításával és az orosz Orvos-biológiai Problémák Intézetével (IBMP) együttműködve. A MATROSHKA projekt egy emberszerű fantom felhasználásával a kozmikus sugárzás okozta dózisterhelés eloszlásának meghatározását tűzte ki célul. A BIOPAN kísérletsorozatban űrbiológiai folyamatok vizsgálata és ezek dozimetriai támogatása volt a feladat Földre visszatérő műholdak segítségével, az ISS-hez közeli orbitális pályán. A kutatócsoportunk passzív, szilárdtest nyom- és termolumineszcens detektorokkal szerepel ezekben a kísérletekben. Az űrbeli mérések előkészítéséhez földi szimulációs kísérleteket, besugárzásokat végeztünk a többi résztvevővel közösen, különböző részecskegyorsítók alkalmazásával.

1. Bevezetés

Az űrkorszak 50. évfordulójának ünneplése során országsszerte számos kiállítás nyílt és megemlékezés történt, így a magyar polgárok is szembesülhettek az űrkutatás fontosságával és a használt technológiák terjedésével. Ez a kutatási terület folyamatosan jelen van a tudományban, sőt még a mindennapi életünkben is, gondoljunk csak a legmodernebb ágymatracokra. Az űrkutatás régi és új technológiák tökéletesítésére, illetve felmerülő problémák megoldására törekszik, mint például a hordozórakéták meghajtásának problémája vagy épp az űrturizmus kérdése. Itt kell bevezetnünk az űrdozimetria témakörét is, amely egyre inkább előtérbe kerül a meghosszabbodott és gyakoribb űrutazások miatt.

Ez a tudományág a kozmikus sugárzás (világegyetemből érkező ionizáló hatású, nagy energiájú részecske- és elektromágneses sugárzás) mérésével, feltérképezésével foglalkozik főleg az ISS-en, de más űrben keringő objektumok esetén is. A földfelszínen a természetes eredetű sugárterhelésnek igen magas hányadát, 17 %-át a kozmikus sugárzás adja. Itt fellép a Föld mágneses terének és a légkörnek jótékony védő hatása, ami azonban a magasság növekedésével folyamatosan csökken és 400 km magasságban, ahol az ISS kering, már nem érvényesül ez a védőmechanizmus. Az űrhajósokat akár százszorosan nagyobb sugárzás érheti, mint a földi lakosságot, ezért az űrexpedíciók során a sugárvédelmi feladatok ellátására mindig nagy hangsúlyt fektetnek.

A sugárvédelemben a sugárzás mennyiségét a dózissal jellemezzük. Az abszorbeált dózis azt mutatja meg, hogy a sugárzás egységnyi tömegű anyagban mennyi energiát adott le (mértékegysége a gray, 1 Gy = 1 joule/kg). Az ekvivalens dózis ezen felül súlyozottan figyelembe veszi a sugárzás összetevőinek fajta- és ener-

giafüggő biológiai hatását egy adott anyagban, egy úgynevezett minőségi tényező alkalmazásával; mértékegysége a sievert (Sv). Példaként az ISS belsejében kialakuló elsődleges és másodlagos kozmikus sugárzás biológiai hatása az emberi szövetekre mintegy 2,5-szerese a diagnosztikai röntgensugárzásnak (más szóval az átlag minőségi tényező 2,5).

A kozmikus sugarak a Galaktikából és a Naptól származnak, összetevőik nagyrészt protonok, alfa-részecskék és ezeknél nagyobb rendszámú ($Z > 2$), nagyenergiás ($E > 10$ MeV) töltött részecskék (HZE), valamint fotonok. A galaktikus sugárzás (GCR) többé-kevésbé állandó, míg a Naptól származó, szoláris sugárzás intenzitását a napkitörések erősen befolyásolják: ilyenkor a protonsugárzás fluxusa erősen megnő. A kozmikus sugárzást a részecskék anyagban történő lineáris energiaátadása (LET, mértékegysége $\text{keV}/\mu\text{m}$) szerint szokásos két csoportba osztani. A kis LET értékű csoportba a ~ 10 $\text{keV}/\mu\text{m}$ alatti fotonok, elektronok és nagyenergiás protonok tartoznak, ezt a tartományt úgynevezett termolumineszcens detektorokkal (TLD) célszerű mérni. Az ennél nagyobb energialeadási képességgel rendelkező, tehát a nagy LET értékű csoportba tartozó részecskéket pedig szilárdtest nyomdetektorokkal regisztrálhatjuk. A TLD-k és a nyomdetektorok a passzív, vagyis detektálás közben energiaellátást nem igénylő detektorok közé tartoznak. Kis méretük miatt akár az űrhajós ruhájába is elhelyezhetőek, például egy űrséta alkalmával.

Az AEKI sugárvédelmi kutatócsoportja 1975 óta foglalkozik töltött részecskék szilárdtest nyomdetektorral történő vizsgálatával, és 2000-től a Nemzetközi Űrállomás kozmikus sugárzás eredetű dózisviszonyainak kutatásával. A következőkben bemutatjuk a magyar kutatócsoport által használt technikákat és megismertetünk az olvasóval két űrdozimetriai projektet (MATROSHKA és BIOPAN).

2. Az alkalmazott detektorok

A TLD-k működésének részletes leírását megtalálhatják Apáthy István „Sugárdózis-mérés égen és földön” című, a Híradástechnikában 2004-ben megjelent cikkében [1]. Röviden: a termolumineszcens anyagban valamilyen sugárzás által bevitt energia a kristályszerkezetben hosszan megőrződő, de visszafordítható változást hoz létre. Az anyag kiértékeléskor több száz fokok felmelegítés hatására a kapott dózissal arányos, mérhető fényt bocsát ki, amelyet alkalmas eszközzel – úgynevezett kiolvasóval –, mint például a „hungarikumnak” számító PILLE készülékkel [1] mérni lehet.

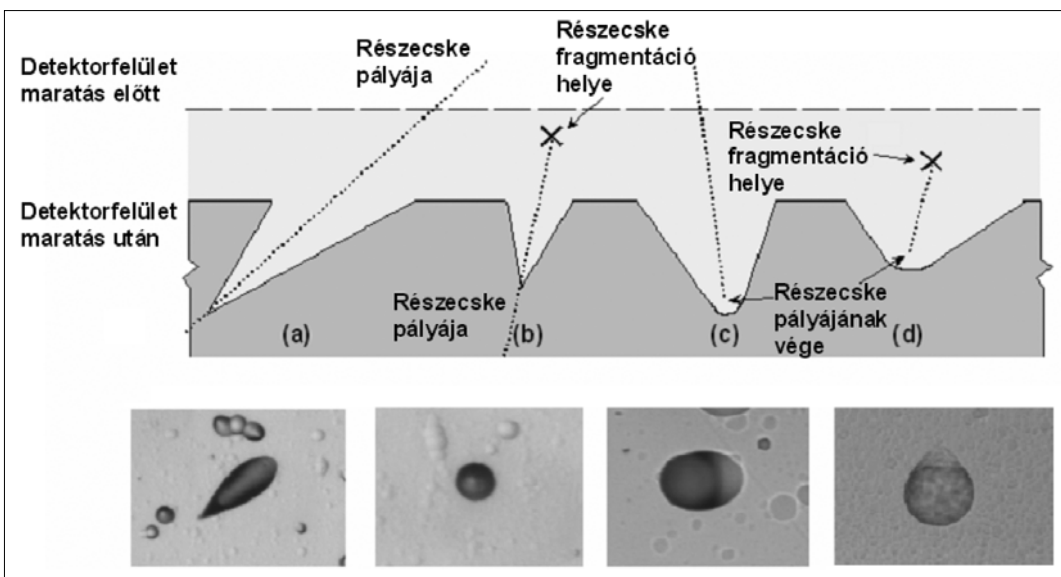
A szilárdtest nyomdetektorok az elektromosan töltött, ionizáló részecskéket képesek detektálni, amelyek szigetelő anyagokon való áthaladásukkor pályájuk mentén keskeny (3-10 nm szélességű) rombolt zónát hoznak létre. Ez kristályos anyagokban különböző rácshibák létrejöttéhez, míg műanyagokban a kémiai kötések felszakadásához, szabad gyökök keletkezéséhez vezet. Bizonyos kémiai reagensek ezeket a rombolt zónákat nagyobb sebességgel oldják vagy „marják”, mint az illető anyag nem rombolt részeit. Így a keskeny roncsolt zónát a maratószer kiszélesíti, egy kúpszerű mélyedést, szakszóval nyomot hoz létre. Ha a nyom kellően nagy méretet ér el, optikai mikroszkóp segítségével láthatóvá válik [2].

Az 1. ábra kinagyított nyomfelvételein láthatjuk, hogy egy adott idejű maratás során az (a) és (b) esetben a maratószer nem érte el a részecske pályájának végét, így a nyomok alakja hegyes, kúp formát ölt. A (c) és (d) nyomüregben ezzel ellentétben gömbszerű bemélyedés alakult ki a detektorban, mivel a maratás elérte a részecskepálya végét, a részecskék rövid hatótávolsága miatt. A (b) és (d) rajzokon a nyomot hagyó részecske a detektor anyagában széthasítás, fragmentáció révén keletkezett, ilyenkor a céltárgyat, targetet alkotó részecske magreakció során több részre esik szét, például nagy energiás neutronnal vagy protonnal történő bomlásakor. Kimaratható nyom akkor jön létre, ha a töltött

részecske pályája mentén kellően nagy számú iont kelt az anyagban. Néhány műanyagban akár már a lassú protonok is képesek maratható nyomok létrehozására, más anyagok csak nagyobb tömegű részecskék detektálására alkalmasak. Viszont az alacsony LET-ű elektronok és a fotonok, akármekkora nagy dózist adnak is le, nincsenek hatással a nyomdetektorokra, így ez a tulajdonságuk előnyösen használható, amikor kevert sugárzási térben kell a különböző LET-ű részecskéket szelektíven mérni. A rombolt zóna maratási sebessége, ezáltal a kialakuló nyom mérete a becsapódó részecske típusától és energiájától függ, tehát a különböző nyomok alkalmasak a részecskék azonosítására.

Az általunk használt nyomdetektor 1 mm vastagságú műanyag lapka, anyaga poliallil-diglikol-karbonát (PADC). A PADC detektor szénből, hidrogénből és oxigénből épül fel ($C_{12}H_{18}O_7$). Az anyag detektálja azokat a részecskéket, amelyekre a $LET > 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ érvényes. Így az elsődleges kozmikus sugárzásból közvetlenül detektálja a földi mágneses tér által befogott protonok egy részét és minden olyan egyéb GCR részecskét is, melyekre fennáll a következő összefüggés: $6 \leq Z/\beta \leq 100$. Itt β a részecske sebességének és a fénysebességnek a hányadosa, amely a GCR részecskék esetén megközelítheti a 0,8-at vagy még magasabb értéket is. Például egy Li atom ($Z=3$) csak akkor detektálható, ha sebessége kisebb, mint a fénysebesség fele. A nagyenergiás protonokra a fenti LET kritérium nem teljesül, de ezek a detektort alkotó atomokat fragmentálhatják, kialakulnak a másodlagos (többnyire α) részecskék, amelyek már megfelelnek a kritériumnak és ezáltal az ilyen proton jelenléte is kimutatható.

A töltött részecskék mellett a PADC detektoranyag a primer kozmikus sugárzás, főleg protonok által keltett másodlagos neutronok közvetett vizsgálatára is képes, kihasználva a neutronok által különféle magreakciók révén létrehozott töltött részecskéket. A reakció lehet például rugalmas ütközés, amikor is a meglökött H, C és O magok keltenek viszonylag rövid nyomokat, hasonlóan a target fragmentekhez. Nagyenergiás neutronok a pro-



1. ábra
Négy különböző részecske nyomkialakulásának szemléltetése és mikroszkópos felvétele

tonokhoz hasonlóan fragmentálhatják is a C és O magokat és így sok fajta töltött részecske jöhet létre (p, D, T, α , Be stb.) (2. ábra). Ez történik az űrhajósok testszövetében is, melynek a detektor anyaghoz nagyon hasonló az összetétele.

Az anyag maratásához, azaz a benne keletkező ionizáló részecskék által keltett nyomok láthatóvá tételéhez tömény 6 M-os NaOH oldatot használunk 70°C hőmérsékleten. 6 óra maratás után a ~20 keV/ μm feletti, nagy LET-ű nyomok, 15 h maratás után már a ~12 keV/ μm LET feletti is vizsgálhatóak a nyomparaméterek képanalizátorral történő mérésével (3. ábra). A nyomok alakját leíró adatokból, felhasználva a földi szimulációs kísérletek eredményeit, a kalibrálást, meghatározható a részecskék által leadott energia és ezzel mód nyílik a dózismérésre.

3. MATROSHKA

A MATROSHKA kísérletekben az AEKI kutatócsoportja a Német Űrkutatási Hivatal (DLR) meghívására van jelen, ezeket a vizsgálatokat a Magyar Űrkutatási Iroda (MŰI) is támogatja. A projekt egy emberhez hasonló, csontokból és szövetekvivalens műanyagból készített fantomot használ fel az űrhajósok modellezésére (4. ábra), amit először 2004-ben egy Progressz teherszállító űrhajóval juttattak fel az ISS fedélzetére, a szegmenseiben elhelyezett detektorokat eddig már kétszer is lecserélték.

A projekt több ütemből áll. Első alkalommal a detektorok (MATROSHKA I összeállítás) 622 napot voltak az ISS-en, ebből 539 napot az űrállomás külső felszínéhez rögzítve töltöttek [2]. Ez lényegében egy űrséta szimulálására szolgált. Második alkalommal az újabb detektorcsomagok (MATROSHKA IIA) 367 napra egy zsilipkamrába, harmadszorra (MATROSHKA IIB) pedig az orosz szegmensbe, a Zvezda (csillag) modulba kerültek, ahol ma is detektálják a részecskéket.

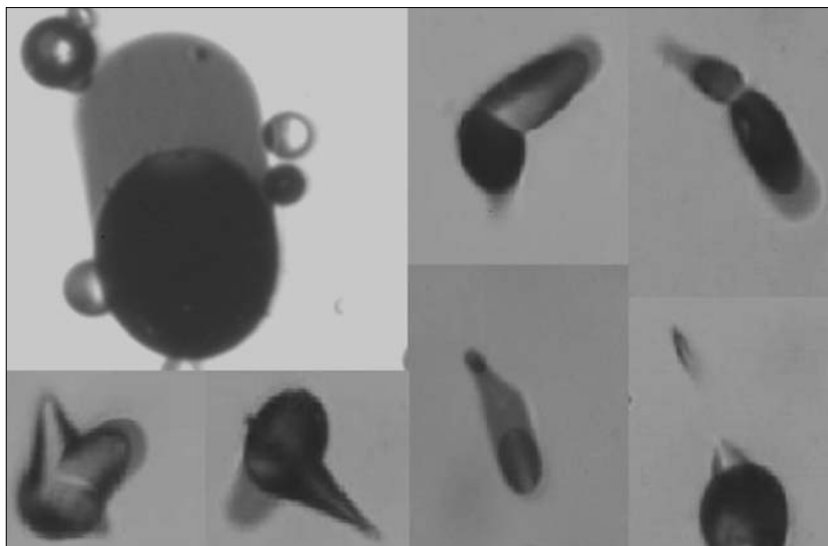


3. ábra
Optikai mikroszkóphoz kapcsolt képanalizátor berendezés szilárdtest nyomdetektorok kiértékeléséhez (Pálfalvi József felvétele)

Mint említettük, a MATROSHKA fantom több szeletből áll, így lehetővé válik a kozmikus sugárzás okozta dózis eloszlásának mérése. Még nagyon keveset tudunk az egyes szerveket ténylegesen érő sugárdózisról. Ennek vizsgálatára alkalmazott magyar szilárdtest nyomdetektorokat a fantom különböző részeibe helyezték el.

A MATROSHKA I és IIA detektorok Budapestre visszaérkezésük után kerültek kiértékelésre. Mindkét esetben egy-egy PADC detektorokból álló csomag került a tüdő és vese „szervekbe”, két összeállítás a fantom fedő mellényke (poncsó) zsebeibe jutott, egy csomag pedig referenciaként szolgált a Zvezdában, a szerviz modulban, ahol is az űrhajósok a legtöbb időt töltik (5. ábra).

Az űrbeli méréseknél a detektorok alkalmazásának elengedhetetlen feltétele, hogy megfelelő kalibrálást végezzünk. Az általunk használt rendszert nagy energiájú részecskegyorsítókkal, neutron generátorral, 1 MeV protonnal (Van de Graaf) és kollimált ^{210}Po α -forrással (4,65 MeV) kalibráltuk.

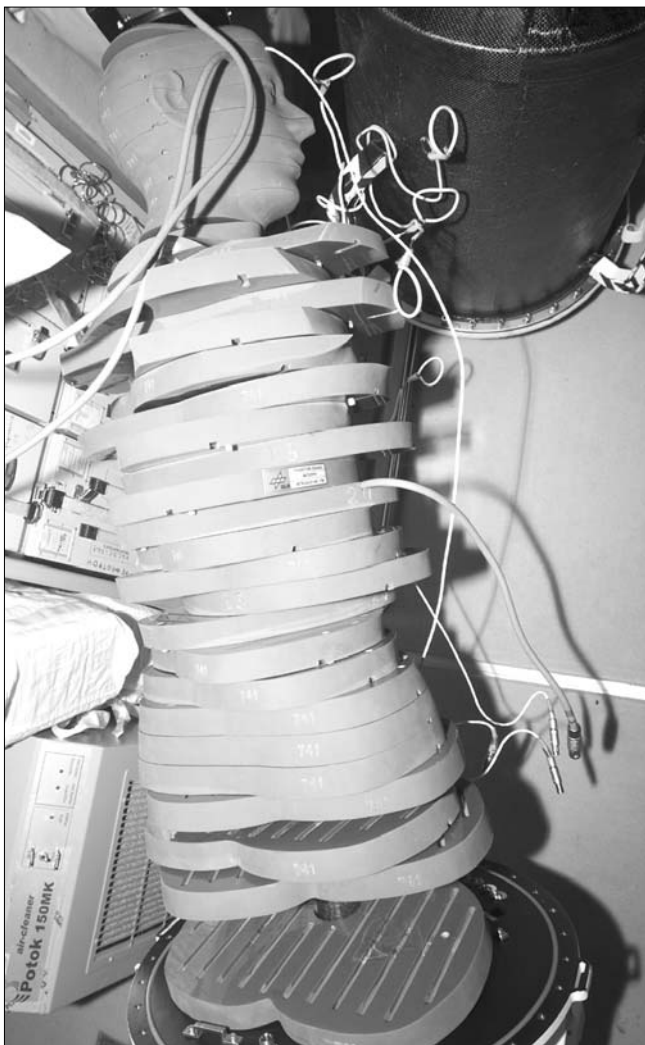


2. ábra
Egy HZE, feltehetően a detektorban éppen leálló Fe részecske nyoma látható a bal felső sarokban, körülvéve néhány fragmentum vagy meglökött mag nyomaival. A többi kép nagyenergiás neutronok által keltett magreakciók mikroszkópos felvétele a PADC nyomdetektorok felületén. A reakcióban keletkező részecskéket felismerhetjük arról, hogy nyomaik egy centrális pontból, az ütközés helyéről, különböző irányokba indulnak ki és hosszuk, illetve átmérőjük a keletkezett részecskék energiájától és rendszámától függ.

A kémiai maratással láthatóvá tett részecskenyomok paramétereinek meghatározása után a $LET > 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ -es részecskékre kiszámítottuk a LET eloszlását, amelyből végül a napi dózisteljesítmények adódtak. Eredményül a MATROSHKA I/IIA kísérletekben a tüdőre 226/177 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$, a vesére 202/158 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$, a poncsókra 323/275 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$, a referencia detektorokra pedig 273/223 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ értékeket kaptunk. Megjelentek a várt különbségek, a külső szövetek elnyelő hatása miatt a belső szerveket kisebb ekvivalens dózis érte, mint a poncsóban elhelyezett detektorokat. Meg kell jegyezni, hogy a kis LET-ű sugárzások dóziszjáruléka is igen számottevő. Más kutatócsoportok által TLD-vel mért adatok szerint például az űrsétát szimuláló MATROSHKA I kísérletben a poncsóban 536 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ dózis teljesítmény adódott, vagyis a teljes, a felső szöveteket ért dózisteljesítmény 859 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ volt. Az ISS belsejében ugyanakkor a kontroll TLD-k 139 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ot jeleztek és a teljes dózis így körülbelül a fele értéket, 412 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ot érte el. Ez egy átlagos, 180 napos űrutazás esetében 74 mSv dózist jelent, mely lényegesen magasabb, mint a földi sugárveszélyes munkahelyeken megengedett 10 mSv.

4. ábra

A MATROSHKA fantom detektorcsere előtt a zsillipkamrában. A szegmensekben található mélyedésekben helyezik el majd a kisméretű detektorokat. (DLR felvétele)



5. ábra
MATROSHKA I, IIA és IIB detektorok összeállítása, az űrbe utazásuk előtt. A detektorcsomagok mindegyike több réteg PADC lemezből áll. (P.J. felvétele)



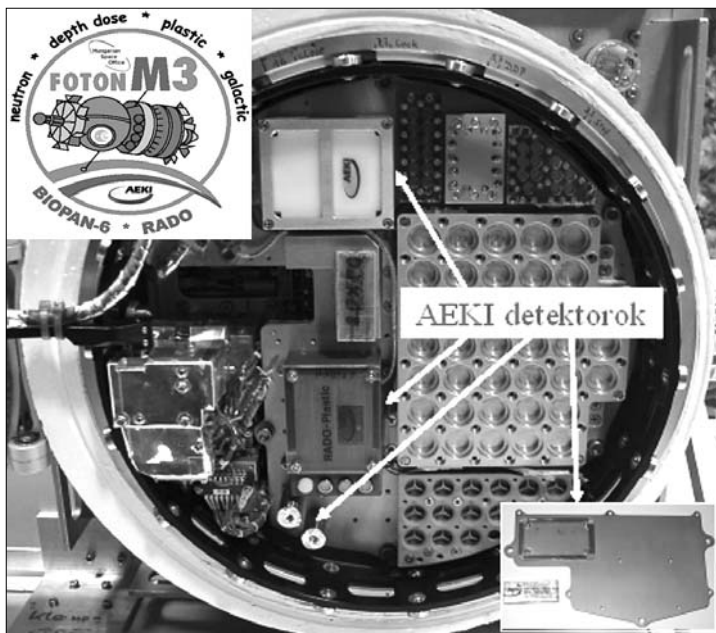
4. BIOPAN

A BIOPAN program az Európai Űrügynökség (ESA) irányítása alatt 1991 óta folyik, elsősorban űrbiológiai vizsgálatokat jelent a Föld körül keringő és a Földre visszatérő egységgel rendelkező műholdak bevetésével [3].

Az AEKI munkacsoportja 2001. óta vesz részt dozimetriai összeállításával a nemzetközi BIOPAN űrprogramban, a RADO (sugárdozimetria) elnevezésű részfeladatban. Az első ilyen kísérlet 2002-ben, az oroszországi pleszecki rakétabázisról indított Proton típusú orosz szállító rakéta lezuhanása miatt kudarcba fulladt. 2005-ben a biológiai minták és a dozimetriai mérőeszközök a Foton-M2 műholdhoz rögzített BIOPAN-5 műszerdobozban utaztak. Ezt a műholdat a kazahsztáni Bajkonurból egy Szojuz-U típusú rakéta állította 300 km-es magasságban orbitális pályára, amely a földi egyenlítő síkjával 63° -os szöveget zárt be. A 29 kg tömegű, 15 mérőegységet tartalmazó fedeles tepsire hasonlító BIOPAN-5, a német Kaiser Threde vállalat terméke, a pályára állást követően szétnyílt és közvetlen a Földre visszatérés előtt 14,625 nap múlva csukódott össze. A RADO-neutron egység feladata volt meghatározni az elsődleges kozmikus nagy energiájú galaktikus ionokat, illetve az ezek által kiváltott másodlagos neutronsugárzást.

Ennek mérésére 10 darab PADC lapocskát és különböző konvertereket – neutronok által keltett magreakciók létrehozására alkalmas (pl. Al, Ni stb.) lemezeket – tartalmazó összeállítást alkalmaztunk. A detektorcsomag felépítése lehetővé tette a sugárzás közvetlen vizsgálatát az űrből és a műhold irányából egyaránt. A kiértékelés a MATROSHKA detektorokkal megegyezően történt. Megállapítottuk, hogy az űr felől érkező nagyobb elsődleges részecskelfluxus ellenére a műhold felé néző, alsó detektorfelületeken mért nyomásúrság adatok magasabbak az űr felé néző, felső felületeknél, amit a műholdról visszavert másodlagos neutronok detektálásának tudtunk be.

A szilárdtest nyomdetektorok méréseiből kapott ekvivalens dózisteljesítmény 658 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$, míg a TLD-kel együtt kapott eredmény 795 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ volt. A BIOPAN-5



6. ábra
Az eszközök elhelyezkedése a BIOPAN-6 tepsi egyik felében a szerelési próbák ideje alatt 2006. december 6-án. A kép bal oldalán, fentről lefelé haladva: RADO-neutron, RADO-plastic, RADO-depth dose, jobbra a RADO-galactic detektorok láthatóak. (P.J. felvétele)

dóziseredmény 5-ször nagyobb, mint az ISS-en belül mért adatok. A RADO-depth dose elnevezésű TLD csomag szolgáltatva továbbá a kis LET-ű kozmikus sugárzás anyagba való behatolásának mélység szerinti eloszlását. A repülési idő alatt 30 Gy dózist lehetett mérni a felszíni TLD-ken, és ezt kapták a kísérletben résztvevő biológiai objektumok is, de ez az érték 5 mm víznek megfelelő mélységben már ezredrészére csökkent.

2007. szeptemberben úrutazásra indult a BIOPAN-6 elnevezésű kísérlet a Foton-M3 felszínén, ahol a teljes dozimetriai ellenőrzést már az AEKI továbbfejlesztett egységei biztosították (6. ábra). Az ESA irányítása mellett ez volt a 12. Foton küldetés. A BIOPAN mérődoboz most repült hatodik alkalommal orbitális pályán a tudomány szolgálatában. Az ábrán látható a programot népszerűsítő, kutatócsoportunkat reprezentáló logo. A magyar egységeket ismét RADO néven foglaltuk össze: a két már ismert csomag mellett az új RADO-plastic és a RADO-galactic összeállítások is helyet kaptak. Ezek elektronikus eszközök mellé kerültek, az utóbbi éppen a mikrokontrollerbe, oda, ahol a korábbi kísérletben egy vélhetően HZE részecske becsapódás miatt a memória egység felmondta a szolgálatot. Segítségünkkel most térképet kaphatunk az elektronikába becsapódó kozmikus nehéz ionokról. A detektorok visszaérkeztek laboratóriumunkba, kiértékelésük még folyamatban van.

5. Összefoglalás

A Nemzetközi Űrállomás bővítése, a munkaterület megnövelése – például a Columbus európai kutatómodul csatlakozása – egyre több lehetőséget nyújt a kutatások

kiszélesítésére, új műszeregyüttesek és mérőegységek elhelyezésére. A legnagyobb korlátozást az űrhajósok mindennapi munkájában a sugárdózis nagysága jelenti. Ennek csökkentéséhez ismerni kell a dózisadatokat, hogy a megfelelő védelmet, ruházatot kialakíthassák számukra. A MAT-ROSKA és BIOPAN programok dózisteljesítmény eredményei mind a szkafanderek megtervezésében, mind az űrbeli tartózkodás késői egészségkárosító hatásainak (például rák kialakulása) felmérésében kiemelkedő szerepet játszanak, ezenkívül pedig az aktív elektronikus adatgyűjtő eszközök védelmének fejlesztését is elősegítik.

Mindemellett ki kell emelni, hogy megbízható eredményeket eléréséhez szükség van a különböző, más nemzetek laboratóriumai által használt mérőeszközök és módszerek összevetésére földi kozmikus sugárzás szimulációs kísérletekkel, amelyeket nagyenergiás gyorsító berendezések mellett lehet elvégezni. Ilyen kísérletek folytak eddig a CERN neutron szimulátoránál és japán, amerikai, svéd részecskegyorsítóknál.

A szerzőkről

Dudás Beáta biomérnök szakon végzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen 2003-ban, majd egészségügyi mérnök szakon folytatta tanulmányait. 2006-ban szerezte meg második diplomáját. 2004-től dolgozik tudományos segédmunkatársként az Atomenergia Kutatóintézet csillebérci telephelyén, ahol a kozmikus sugárzás vizsgálatával foglalkozik szilárdtest nyomdetektorok alkalmazásával.

Szabó Julianna 2000-ben végzett a kolozsvári Babes-Bolyai Tudományegyetem Kémia- és Vegyészmérnöki Karán okleveles vegyész-fizikusként. 2001 óta dolgozik a Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézetében. Kezdetben a kis dózisu ionizáló sugárzások sejtenyészetekre gyakorolt biológiai hatásaival, illetve a sejtsugárzásos kísérletek dozimetriájával foglalkozott, majd folyamatosan bekapcsolódott a Nemzetközi Űrállomáson és a Foton műholdakon végzett nyomdetektoros űrdozimetriai és kozmikus sugárzás vizsgálatokba.

Pálfalvi József fizikus 1970 óta foglalkozik radiatív sugárzások vizsgálatával. A különféle technikák közül a szilárdtest nyomdetektorok (SND) fejlesztésével ért el eredményeket, melyeket több mint száz publikációban tett közzé. A Magyar Nukleáris Társaság munkásságát Szilárd Leó-díjjal ismerte el. Egyik alapítója, majd éveken át elnökségi tagja a Nemzetközi SND Társaságnak, szerkesztőbizottsági tagja több szakmai folyóiratnak. A Nemzetközi Űrállomás első állandó legénységének felbocsátását követően 2001-től folyamatosan részt vesz nemzetközi együttműködésben az ISS-en dolgozó asztronautákat érő elsődleges és másodlagos sugárzások vizsgálatában újabb fejlesztésű SND-kel. Részt vesz az Európai Űrügynökség összefogásával történő űrbiológiai kísérletekhez kapcsolódó kozmikus sugárzási tér vizsgálatában a Foton-Biopan program keretében és egyéb űrdozimetriai projekteknél.

Irodalom

- [1] Apáthy I.,
Sugárdózis-mérés égen és földön.
Híradástechnika, LIX. évf., 2004/5, pp.25–36.
- [2] Szabó J., Dudás B., Pálfalvi J.,
Az űrállomás fantomja.
Természettudományi Közli., 138. (2007) 7, pp.323–325.
- [3] Pálfalvi J., Szabó J., Dudás B.,
AEKI: exobiológiai programokban.
Technika Műszaki Szemle, 50. (2007) 3. pp.38–39.