

ÚRDOZIMETRIAI RENDSZEREK FEJLESZTÉSE
PhD téziszfüzet

HIRN ATTILA

TÉMAVEZETŐ

DR. PÁZMÁNDI TAMÁS
MTA KFKI AEKI

TANSZÉKI KONZULENS

DR. ZAGYVAI PÉTER
BME NTI

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
NUKLEÁRIS TECHNIKAI INTÉZET
2009

A kutatások előzménye

A hosszú idejű emberes űrrepülések (pl. tervezett Mars-expedíciók) során a legénység várható dózisa összemérhető az űrhajósokra vonatkozó élettartamdózis-korláttal; számukra az egyik legfontosabb kockázati tényező a hosszú idejű űrrepülések során őket érő, a Föld felszínén mérhető háttérsugárzásnál legalább két nagyságrenddel nagyobb intenzitású kozmikus sugárzás.

Az elmúlt években indult el a TriTel háromtengelyű szilícium detektoros teleszkóp fejlesztése a Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézet Űrdozimetriai Csoportjában. A készülék nagy előnye, hogy – önállóan, vagy a Pille rendszerrel [Fehér, 1981] kiegészítve – az elnyelt dózis mellett a LET (lineáris energiaátadási tényező) és a sugárzási minőségi tényező meghatározására is alkalmas. Az elnyelt dózis és a minőségi tényező alapján a sugárzás biológiai károsító hatására jellemző dózisegyenérték meghatározható. Az elmúlt években megtörtént az elméleti megalapozás [Pázmándi, 2003], a rendszerterv kidolgozása.

Célkitűzések

A Föld felszínén jellemző értékeket jelentősen meghaladó, az űrállomások és egyéb űreszközök fedélzetén térben és időben is változó elnyelt dózis és minőségi tényező miatt az űrdozimetriában szükséges a kozmikus sugárzás LET-spektrumának időbeli és térbeli meghatározása. Kutatási munkám során az MTA KFKI AEKI-ben folyó, háromtengelyű (közel izotróp érzékenységgű) szilícium detektoros teleszkópok fejlesztésében vettem részt, melyek segítségével megvalósítható a kozmikus sugárzás LET-spektrumának, valamint a dózisegyenértéknek a meghatározása.

Kutatási munkám során bekapcsolódtam a csoportban folyó kutatás-fejlesztésbe, feladataim a következők voltak:

- a mérőrendszer megtervezése;
- az elektronikai rendszer fejlesztése;
- a tudományos, elektronikai és mechanikai szempontok egyeztetése;
- a fedélzeti szoftver algoritmusainak kidolgozása;
- a fejlesztés koordinálása, irányítása és menedzselése.

A dolgozatban elsősorban a fejlesztés tudományos szempontból lényeges elemeit emeltem ki, ugyanakkor a mérnöki szempontok egyeztetésében és a fejlesztés irányításában is részt vettem.

Vizsgálati módszerek

Elemeztem az egy-, illetve háromtengelyű szilícium detektoros teleszkópokkal történő dózisegyenérték-meghatározás közötti főbb különbségeket, valamint módszert dolgoztam ki az irányfüggő minőségi tényezőnek a dózisegyenérték kiszámításában korrekcióként történő figyelembevételére. A teleszkóp geometriájában végrehajtott változtatásokat figyelembe véve újraszámoltam az eszköz geometriai paramétereit és igazoltam, hogy ezen értékek – a teleszkóprendszer érzékenysége, valamint a LET

meghatározásának pontossága szempontjából – közelebb állnak az optimális értékekhez a fejlesztés korai szakaszában számított értékekhez képest.

Korábbi műholdas méréseken alapuló kozmikus sugárzási modellek felhasználásával, valamint Monte Carlo szimuláció segítségével meghatároztam a geomágneses levágás irányfüggésének, a Föld árnyékolásának, valamint a Dél-atlanti anomáliában a befogott részecskék kelet-nyugat irányú aszimmetriájának a leadott energia spektrumokra gyakorolt hatását. Módszert dolgoztam ki a tér anizotrópiájának az egyes tengelyeken mért beütésszámokból történő közelítő meghatározására. Ráműtattam arra, hogy anizotróp sugárzási térben a domináns irány megbecsülhető, a meghatározás bizonytalansága az izotróp komponens nagyságától függ, és az irány π erejéig határozatlan.

Kidolgoztam a TriTel különböző változatainak – a fejlesztés során sokszor egymásnak ellentmondó feltételek (tudományos szempontok, valamint mechanikai- és elektronikai követelmények) kompromisszumos teljesítése után kialakult – felépítését, valamint a mérési jelfeldolgozás és az adatkezelés módját. A relativisztikus protonok energia-leadását is figyelembe véve meghatároztam a TriTel rendszer dinamika-tartományát, egyben a megengedett maximális zajszintet is. Javasoltam egy túlcsoportulási csatorna definiálását, amely csatorna a dinamika-tartomány felső határánál nagyobb energia-leadású részecskék számát regisztrálja. Korábbi, egytengelyű teleszkópok által végzett mérések eredményeit, valamint modellszámításokat felhasználva megmutattam, hogy e részecskék LET-spektrumát a TriTel mellé helyezett passzív nyomdetektor tömb kiértékelése során kapott LET-spektrumok segítségével lehet közelíteni, illetve a földi kiértékelés során korrekcióként figyelembe venni. Kidolgoztam a programozható logikai kapu tömbbel megvalósított kvázi-logaritmikus sokcsatornás analizátor, valamint az azt vezérlő mikroprocesszoros egység logikai vázlatát.

Áttekintettem a TriTel bemérésére alkalmas főbb módszereket, majd vizsgáltam az általam javasolt, a TriTel teleszkópokba beépítendő, fénykibocsátó diódákkal megvalósított ellenőrző rendszer felépítését és alkalmazhatóságát, melynek során kitértem a rendszernek a műszer konstrukciójára és a TriTel rendszer zajszintjére gyakorolt hatásainak az elemzésére. Alfa-részecskéket kibocsátó kalibráló forrással (Po-210) és impulzusgenerátorral történő mérésekkel igazoltam, hogy a TriTelhez kifejlesztett analóg áramkörök zajhatára az általam meghatározott, megengedett maximális zajszint alatt van. Kidolgoztam a Nemzetközi Űrállomásra tervezett változat központi egységében megvalósított fedélzeti dózisegyenérték-teljesítmény meghatározásának algoritmusát, illetve módszert dolgoztam ki a Dél-atlanti anomálián való áthaladások fedélzeten történő automatikus meghatározására, amelyet korábbi, egytengelyű teleszkópos mérések eredményeinek felhasználásával ellenőriztem. Igazoltam a háromtengelyű szilícium detektoros teleszkóp geostacionárius átmeneti pályán való alkalmazhatóságát. A pálya azon szakaszán, ahol a TriTel a 10%-nál nagyobb holtidő miatt nem alkalmazható, egy kisméretű GM-cső használatát javasoltam, mellyel a befogott részecskék integrális fluxusa meghatározható. Monte Carlo módszer segítségével megbecsültem az elektronok által kiváltott koincidenziák számát, valamint az elektronok járulékát a kapuzott leadottenergia-spektrumokban, és algoritmust dolgoztam ki az elektron/proton aránynak a kapuzott spektrumokból történő meghatározására.

Új tudományos eredmények

A PhD munkámmal kapcsolatos új eredményeket az alábbi tézispontokban foglalom össze:

1. Számításokat végeztem az alacsony Föld körüli pályán várható kozmikus sugárzási tér anizotrópiájával kapcsolatban, melyek segítségével összehasonlítottam a háromtengelyű és az egytengelyű teleszkópokkal a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén kapott dózisegyenérték várható bizonytalanságát. A számítások során a geomágneses levágás irányfüggésének, a Föld árnyékolásának, valamint a Dél-atlanti anomáliában a befogott részecskék kelet-nyugat irányú aszimmetriájának a hatásait vizsgáltam a leadott energia spektrumokban. Módszert dolgoztam ki a tér anizotrópiájának az egyes tengelyeken mért beütésszámokból történő közelítő meghatározására. Ráműtattam arra, hogy anizotróp sugárzási térben a domináns irány megbecsülhető, a meghatározás bizonytalansága az izotróp komponens nagyságától függ. (A disszertáció 6. fejezete.) [7] [8]
2. Kidolgoztam a programozható logikai kapu tömbbel (FPGA, Field Programmable Gate Array) megvalósított kvázi-logaritmikus sokcsatornás analízátor, valamint az azt vezérlő mikroprocesszoros egység logikai vázlatát. A kvázi-logaritmikus analízátort 16 bites lineáris analízátorral és átkódoló algoritmus segítségével valósítottam meg. Javasoltam egy túlcsoportolás csatorna definiálását, amely csatorna a dinamika tartomány felső határánál nagyobb energia-leadású részecskék számát regisztrálja. Megmutattam, hogy e részecskék LET-spektrumát a TriTel mellé elhelyezett passzív nyomdetektor tömb kiértékelése során kapott LET-spektrumok segítségével lehet közelíteni, illetve a földi kiértékelés során korrekcióként figyelembe venni. (A disszertáció 8. és 9. fejezete.) [7]
3. Megterveztem a TriTel ellenőrző- és mérőberendezés szoftverének, valamint a mérési adatokat feldolgozó szoftvernek a felépítését. Kidolgoztam a TriTel központi egységében megvalósított fedélzeti dózisegyenérték-teljesítmény meghatározásának algoritmusát, melynek segítségével lehetőség nyílik arra, hogy az űrhajósok a földi kiértékelést megelőzően, még az űrállomás fedélzetén folyamatosan nyomon követhessék a dózisegyenérték-teljesítmény alakulását. Módszert dolgoztam ki a Dél-atlanti anomálián való áthaladások fedélzetén történő automatikus detektálására. A korábban egytengelyű teleszkóppal végzett mérések időspektrumai alapján meghatároztam a módszer paraméterének optimális értékét. (A disszertáció 5. és 11. fejezete.) [1]
4. A TriTel mérőrendszer különböző, a Nemzetközi Űrállomásra, illetve műholdakra tervezett változatainak fejlesztése során – a relativisztikus protonok energia-leadását is figyelembe véve – meghatároztam a rendszer dinamika-tartományát, egyben a megengedhető zajszintet is. A különböző expedíciók során várható körülményeket elemezve mérés-technikai, elektronikai és mechanikai követelményeket fogalmaztam meg a rendszer és annak egyes részegységeinek felépítésével kapcsolatban. (A disszertáció 7. és 8. fejezete.) [3] [5] [6] [7]

5. Igazoltam a háromtengelyű szilícium detektoros teleszkóp geostacionárius átmeneti pályán való alkalmazhatóságát. Meghatároztam a pálya azon tartományait, ahol a TriTel a dózisegyenérték meghatározására alkalmas, ahol csak az elnyelt dózis mérésére használható, illetve ahol a 10%-nál nagyobb holtidő miatt nem alkalmazható. Az utóbbi tartományban egy kisméretű GM-cső használatát javasoltam, mellyel a befogott részecskék integrális fluxusa meghatározható. Monte Carlo módszer segítségével megbecsültem az elektronok által kiváltott koincidenziák számát, valamint az elektronok járulékát a kapuzott leadottenergia-spektrumokban. Algoritmust dolgoztam ki az elektron/proton aránynak a kapuzott spektrumokból történő meghatározására, valamint becslést adtam az átlagos minőségi tényező meghatározásában okozott hiba nagyságára az elektronok részarányának függvényében. (A disszertáció 12. fejezete.) [1] [2]
6. A TriTel fejlesztése során kidolgoztam az egyes részek és a teljes rendszer bemérésének módszerét, valamint a rendszer paramétereinek optimalizálását. A teljes analóg rendszer tesztelésére LED-es ellenőrző rendszer létrehozását javasoltam. Rámutattam arra, hogy a detektorpárok tokozásába beépített, impulzusüzemben működtetett LED fényforrások segítségével megoldható a komplett analóg rendszer bemérése, beleértve a koincidenzia áramkörök felbontási idejének vizsgálatát is. Az energia-kalibrációt alfa-forrás és impulzusgenerátor segítségével végeztem. (A disszertáció 10. fejezete.) [4]

Irodalmi hivatkozások listája

Fehér, I., Deme, S., Szabó, B., Vágvölgyi, J., Szabó, P. P., Csőke, A., Ránky, M., Akatov, Yu. A., A new Thermoluminescent Dosimeter System for Space Research, Adv. Space Res., 1, pp. 61-66, 1981

Pázmándi T., Űrdozimetria háromtengelyű szilícium detektoros teleszkóp és a Pille hordozható TLD rendszer alkalmazásával, PhD értekezés, BME NTI, 2003

Az eredmények hasznosítása

A TriTel rendszerrel a közeljövőben több kísérletben is részt veszünk:

- A háromtengelyű teleszkóp iránt nagy érdeklődést tanúsít az orosz űrkutatás; a moszkvai Orvosbiológiai Kutatóintézet (IBMP) történt megállapodás szerint a közeljövőben repülési lehetőséget biztosítanak a TriTel számára a Nemzetközi Űrállomás orosz szegmensén.
- Az európai SURE (International Space Station: a Unique REsearch Infrastructure) program keretében az eszköz a Nemzetközi Űrállomás európai Columbus modulján fog dozimetriai méréseket végezni.
- Az Európai Űrügynökség Oktatási Irodája által meghirdetett ESEO (European Student Earth Orbiter) program keretében a TriTel egy műholdas változata kap helyet az ESEO diákműhold fedélzetén.

A TriTel rendszer segítségével az űreszközökön lévő összetett sugárzási tér jellemzőinek meghatározása a korábban alkalmazott módszereknél nagyobb pontossággal valósítható meg. A rendszer a jövőben egy Mars-szondán elhelyezve a bolygóközi emberes repülés előkészítésére is alkalmas lesz.

A TriTel háromtengelyű teleszkóp különféle változatainak fejlesztése – értekezésem írásakor – lényegében az utolsó fázisába lépett; a dolgozatban javasolt technikai megoldások beépítésre kerültek. A munkám során kidolgozott algoritmusok további pontosításához a jövőben mindenképpen nagyenergiás gyorsítóknál, illetve a világűrben történő mérésekre lesz szükség.

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

Folyóiratcikkek:

- [1] Hirn, A., Apáthy, I., Bodnár, L., Csőke, A., Deme, S., Pázmándi, T., Development of a complex instrument measuring dose in the Van Allen belts, *Acta Astronautica*, 63, pp. 878-885, 2008
- [2] Hirn, A., Pázmándi, T., Deme, S., Apáthy, I., Bodnár, L., Csőke, A., TriTel-S: Development of a complex dosimetry instrument for a satellite in geostationary transfer orbit, *Radiat. Meas.*, 43, pp. 427-431, 2008
- [3] Hirn, A., Pázmándi, T., Deme, S., Apáthy, I., Csőke, A., Bodnár, L., A New Method for Determining the Equivalent Dose of Astronauts, *Publications of the Astronomy Department of the Eötvös University PADEU Volume 17* pp.37-44, ISBN 963 463 557, ISSN 0238-2423, 2006
- [4] Hirn, A., Apáthy, I., Bodnár, L., Csőke, A., Deme, S., Nagy, V., Pázmándi, T., A TriTel 3D űrdozimetriai teleszkóp LED-es ellenőrző rendszere, *Nukleon* (2009) – megjelenés alatt

Teljes terjedelemben megjelent konferenci cikkek:

- [5] Hirn, A., Pázmándi, T., Deme, S., Apáthy, I., Csőke, A., Bodnár, L., 3D Silicon Detector Telescope for Determining the Equivalent Dose of Astronauts, 57th International Astronautical Congress, Valencia, Spain, Paper IAC-06-A1.P.2.05, 2006
- [6] Hirn A., Apáthy I., Bodnár L., Csőke A., Deme S., Pázmándi T., Új módszer az űrhajósok egyenérték dózisének meghatározására, IV. Nukleáris Technika Szimpózium, ISBN-13: 978-963-420-885-3, 2006
- [7] Hirn, A., Apáthy, I., Bodnár, L., Csőke, A., Deme, S., Pálfalvi, J. K., Pázmándi, T., Szabó, J., Szántó, P., Development of a Complex Dosimetry Equipment for the Columbus Module of the International Space Station, 58th International Astronautical Congress, Hyderabad, India, ISSN 1995-6258, Paper IAC-07-A1.9.-A2.7.01, 2007

- [8] Hirn, A., Comparison of the characteristics of 1D and 3D dosimetric telescopes in an anisotropic radiation field in low Earth orbit, 59th International Astronautical Congress, Glasgow, UK, Paper IAC-08-A1.4.4, 2008

Konferencia-kiadványok (csak absztrakt):

- [9] Hirn, A., Pázmándi, T., Deme, S., Apáthy, I., Csőke, A., Bodnár, L., Space Dosimetry with Tritel 3D Silicon Detector Telescope, 11th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Oxford, 6-8 September 2006
- [10] Hirn, A., Pázmándi, T., Apáthy, I., Bodnár, L., Csőke, A., Deme, S., Tritel – Space Dosimetry with a Novel Hungarian Instrument, From Our Star to Far Stars: Variation and Variability, British-Hungarian-French N+N+N Workshop for Young Researchers, Budapest, 15-17 January 2007
- [11] Hirn, A., Űrhajósok dózisterhelésének meghatározása, Tavaszi Szél 2007 Konferencia, Budapest, 2007. május 17-20.
- [12] Hirn, A., TriTel Dosimeter for the SSETI ESEO satellite, First Hungarian-Polish Student Space Conference, Budapest, 6-7 September 2007
- [13] Hirn, A., Pázmándi, T., Deme, S., Apáthy, I., Csőke, A., Bodnár, L., Space Dosimetry with a 3D Silicon Detector Telescope – the ISS Versions of TriTel, 12th Workshop on Radiation Monitoring for the International Space Station, Stillwater, 10-12 September 2007

További tudományos közlemények

- [14] Apáthy, I., Akatov, Yu. A., Arkhangelski, V. V., Deme, S., Hirn, A., Pázmándi, T., Simonyi, C., Szántó, P., Radiation Risk of Space Tourists, Paper IAC-07-A1.9.-A2.7.04, 58th International Astronautical Congress, Hyderabad, India, ISSN 1995-6258, 2007