

nem jól definiált fogalom, mert az eredmény – a végpontba érkező vektor orientációja – attól függ, milyen görbe mentén végeztük a párhuzamos eltolást. Ezt az 1. ábra szemlélteti.

Az **a** és **b** jelű vektorok távol vannak egymástól, itt speciálisan a gömbfelület két átellenes pontján. A gömbfelületen élő laposlények arra kíváncsiak, mekkora szöveget zár be egymással az **a** és **b** vektor. Ahhoz, hogy ezt eldöntsék, a **b** jelű vektort valamilyen vonal mentén párhuzamos eltolással (orientáció-megőrző módon) kell az **a** helyére vinniük. De az *A* és *B* helyeket végtelen sok vonallal összeköthetik, sőt ebben a példában még a gömbfelület egyenesei – a főkörök – közül is végtelen sok köti össze a két pontot. Nincs semmi, ami bármelyik főkört a többihez képest kitüntetné, viszont az eredmények a használt főkörtől függetlenül drasztikusan eltérőek lesznek. Mekkora tehát a két vektor által bezárt szög? Ha a laposlények a folytonos vonallal jelölt főkört használják a párhuzamos eltoláshoz, akkor a kapott válasz 0° , ha a pontozottat, akkor 180° , ha a szaggatottat, akkor 90° . Tanulság: magának a kérdésnek nem volt értelme.

Teljesen analóg a helyzet négyessebesség-vektorok összehasonlításával görbült téridőben. Nyugodalomban van-e egymáshoz képest két távoli objektum? Ha nem, milyen sebességgel mozognak egymáshoz képest? E kérdéseknek pontosan azért nincs értelme, amiért az 1. ábra két távoli vektorának párhuzamoságáról vagy bezárt szögéről sincs értelme beszélni. A távoli galaxis négyessebesség-vektorának és a mi galaxisunk négyessebesség-vektorának relatív orientációját úgy tudnánk megállapítani, ha a távoli vektort párhuzamos eltolással a téridőnek abba az eseményé-

be vinnénk, ahol a mi galaxisunk most van. Ez azonban éppúgy rosszul definiált feladat, mint a fenti két-dimenziós példa.

Összefoglalás

A Hubble-törvény komoly pedagógiai értéke, hogy felhívja a figyelmet arra, hogy a távolság és a sebesség fogalmai görbült téridőben problematikusak. Mivel ezen empirikus törvény köznyelvi megfogalmazása épp a távolság és sebesség szavakat használja, nem csoda, hogy naiv értelmezése félreértésekhez vezet. Megóvhatjuk diákjainkat ezektől a félreértésektől, ha gondoskodunk róla, hogy ne az (1) egyenlet által sugallt mentális kép éljen bennük. Ne úgy vizualizálják a Hubble-törvényt, mint ami egy galaxis „távolsága” és „sebessége” között teremt kvantitatív kapcsolatot. Helyesebb, ha úgy gondolnak rá, mint az adott galaxis *látszólagos fényessége* és fényének *vöröseltolódása* között felfedezett kvantitatív kapcsolatra. A képlet ekkor ugyan bonyolultabb, mint az (1) egyenlet, ráadásul konkrét alakja a használt kozmológiai modelltől függ, de nem súlyos ez az ár, ha cserébe világosabb fizikai intuíciót kapunk.

Irodalom

1. Ali Kaya: Hubble's law and faster than light expansion speeds. *Am. J. Phys.* 79/11 (2011) 1151.
2. Edwin F. Taylor, John Archibald Wheeler: *Téridőfizika*. Typotex, Budapest, 2006.
3. Stephen Webb: *Measuring the Universe – The Cosmological Distance Ladder*. Springer, 1999.
4. Bokor Nándor, Laczik Bálint: Vektorok párhuzamos eltolásának szemléltetése I. *Fizikai Szemle* 61/7–8 (2011) 240.

SUGÁRVÉDELEM A VILÁGŪRBEN

Hirn Attila, Pázmándi Tamás, Deme Sándor
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

2012 augusztusában ünnepeltük századik évfordulóját annak, hogy *Victor Franz Hess* osztrák fizikus (1. ábra) hidrogénnel töltött ballon fedélzetén végzett mérései során felfedezte a kozmikus sugárzást [1]. Bár az ezt követő évtizedekben is számos figyelemre méltó

1. ábra. V. F. Hess felbocsátás előtt, a ballon kosarában.



A 2013. évi Magyar Fizikus Vándorgyűlésen elhangzott előadás írott változata.

A Nemzetközi Űrállomás Columbus modulján végrehajtott TRITEL kísérlet az Európai Unió 6. Keretprogramja terhére meghirdetett SURE program keretében (RITA-CT-2006-026069), a 98057 és a 4000108072/13/NL/KML számú ESA PECS együttműködéseknek köszönhetően valósult meg. Köszönet illeti továbbá a kísérlet két külföldi társkutatóját, *Sönke Burmeister*t (Kieli Egyetem) és *Günther Reitzel*t (Német Légiközlekedési és Űrepülési Központ) a fejlesztés és a kiértékelés során nyújtott segítségükért és együttműködésükért.

Az ISS orosz szegmensén üzemelő TRITEL rendszer fejlesztése és megépítése a Magyar Űrkutatási Iroda támogatásával, valamint intézeti forrásból valósult meg. Az IBMP és az MTA EK közti kutatói mobilitást a Magyar Tudományos Akadémia és az Orosz Tudományos Akadémia közötti kétoldalú együttműködés segítette elő.

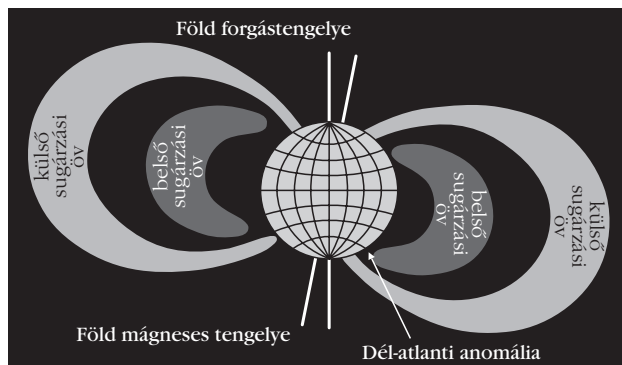
tó eredmény született a kozmikus sugárzás kutatása terén, igazán jelentős áttörést az első amerikai műhold küldetése hozott még az űrkorszak hajnalán. Az 1958. január 31-én felbocsátott Explorer-1 egyik hasznos terhe egy Geiger–Müller-számláló volt, amellyel *James A. Van Allen* felfedezte a – később róla elnevezett – sugárzási öveket.

Nem egészen négy évvel az első műhold felbocsátását követően az ember is kijutott a világűrbe, majd alig egy évtizeden belül már a Hold felszínén járt. Ahogy az ember is kilépett a világűrbe, és az emberes űrrepülések gyakorisága megnőtt, úgy vált egyre inkább meghatározóvá az űrhajósok kozmikus sugárzás elleni védelme. Ennek következtében a kozmikus sugárzás összetevőinek, illetve azok fizikai jellemzőinek kutatása mellett egyre fontosabbá vált a kozmikus sugárzás dozimetriai célú vizsgálata. Az űrkorszak¹ első 10-15 évének sugárvédelmi gyakorlatáról, valamint az Apollo-küldetések dóziszviszonyairól *Makara Zsigmondtól* jelent meg egy-egy cikk a *Fizikai Szemle* hasábjain [2, 3].

A továbbiakban a hangsúly – az alacsony Föld körüli pályán² keringő űrállomások révén – fokozatosan a hosszabb időtartamú repülések felé tolódott el. Napjainkra az ember jelenléte a világűrben folyamatos; a közel teljes kiépítettségű üzemelő Nemzetközi Űrállomás (International Space Station, ISS) fedélzetén a hat fős legénység fele rutinszerűen, háromhavonta váltja egymást.

A kozmikus sugárzási tér a Föld közelében

Az űrhajósokat a világűrben folyamatosan érő kozmikus eredetű sugárzás több komponensből tevődik össze, jellemzői helyről helyre és időről időre jelentős mértékben változhatnak. A galaktikus kozmikus sugárzást többnyire nagyenergiájú (tipikusan 10^8 – 10^{20} eV) és emiatt nagy áthatolóképeségű töltött részecskék (83%-ban proton, 14%-ban alfa-részecske, kis gyakorisággal nehezebb ionok és elektronok) alkotják. A galaktikus kozmikus sugárzásnál lényegesen lágyabb spektrummal (néhány eV – több ezer MeV) rendelkező, Napból származó, úgynevezett szoláris sugárzást a főként protonokból és elektronokból, kisebb arányban a vasig bezárólag a protonnál nehezebb ionokból álló napszél alkotja. Fluxusa a galaktikus sugárzáshoz képest általában kicsi, azonban nagy napkitörések esetén a galaktikus sugárzás fluxusát három-négy nagyságrenddel is felülmúlhatja. A Napból kiáramló napszél pozitív tértöltést hoz létre, ez a galaktikus eredetű kozmikus sugárzással kölcsönhatásba lép, a galaktikus eredetű pozitív töltésű részecskék energiája több száz MeV-vel kisebb lesz, amelynek



2. ábra. A Van Allen-övek és a Dél-atlanti anomália [NASA SRAG].

eredményeképpen a galaktikus komponens fluxusát az egész Naprendszerben csökkentti, valamint – a 11 éves periódusú napciklusnak megfelelően – modulálja. A napszél így a földi élet számára a kozmikus sugárzás elleni hármas védelem első vonalának tekinthető.

Sugárvédelmi szempontból fontos szerepe van a geomágneses térnek is, amely a hármas védelem második vonala. A Föld közvetlen környezetében a kozmikus sugárzást alkotó részecskék egy részét eltéríti, illetve a mágneses erővonalak mentén befogja; ezzel bizonyos mértékű védelmet biztosít a földi élet számára. A főként protonokat befogott belső sugárzási öv az Egyenlítő fölött 1,5–2,0 föld sugárnyi távolságban található. Ugyanakkor annak köszönhetően, hogy a Föld mágneses tengelye és a forgástengelye nem esik egybe, a dél-atlanti térségben 200 km-es tengerszint feletti magasságig is lenyúlik (Dél-atlanti anomália, DAA, 2. ábra). Az űrhajósok a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén az elnyelt dózis akár 50%-át az – amúgy legfeljebb naponta összesen fél óra időtartamú – DAA-n történő áthaladások során kapják.

Az űrállomásokon és egyéb űreszközökön a szerkezeti elemek sugárzásgyengítő és konverziós hatása miatt a szekunder sugárzás aránya sem elhanyagolható. A primer sugárzás egy része az űrállomás falában elnyelődik, eközben (p, n) és (α, n) magreakciók révén neutronok, valamint az ezen magreakciókat kísérő és a keletkező magok bomlásából származó gamma-fotonok jelennek meg, amelyekhez a felső légkörben hasonló magreakciókkal keletkező és onnan visszaszóródó (albedo) neutronok társulnak [4].

A földi élet számára a napszél és a geomágneses tér mellett jelentős védelmet nyújt a kozmikus sugárzás ellen a Föld légköre, amely az abba belépő nagyenergiájú részecskék, illetve az ott keletkező szekunder részecskék jelentős részét elnyeli. A Föld felszínén a lakosság természetes eredetű sugárterhelésének mindössze 1/6-a kozmikus eredetű, a maradék 5/6 rész a talajban lévő természetes radioizotópoktól származik. Ezen felül az orvosi tevékenységtől származó dózis a teljes dózis közel 1/6-a [5]. Ahogy a földfelszínről felemelkedünk, úgy csökken a földkéregből származó és nő a kozmikus komponens fluxusa. A Föld felszíne felett közel 400 km magasan $51,6^\circ$ -os hajlásszögű pályán keringő Nemzetközi Űrállomás fedélzetén az évi néhány napkitöréstől eltekintve a

¹ Az űrkorszak kezdetének a célszerűség kedvéért itt most 1957. október 4-ét, az első műhold, a szovjet Szputnyik-1 felbocsátásának dátumát tekintjük.

² Alacsony Föld körüli pályáknak a legfeljebb 2000 km pályamagasságú pályákat tekintik. Az űrállomások, mint például a Nemzetközi Űrállomás, tipikusan a tengerszint felett 300–400 km magasan keringenek.

dózis jelentős része a galaktikus kozmikus sugárzásból származik. Az átlagos elnyelt dózisteljesítmény itt a Föld felszínén mérhető átlagos elnyelt dózisteljesítménynél közel két nagyságrenddel nagyobb.

Dozimetriai alapfogalmak a földi gyakorlatban és a világűrben

A sugárvédelem alapvető fizikai dózis mennyisége a D elnyelt dózis:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm},$$

ahol $d\bar{\epsilon}$ a dm tömegű térfogatelemben a közvetlenül ionizáló részecskék által leadott energia középértéke. Mértékegysége a J/kg, neve gray, jele Gy.

A sugárzás hatására fellépő biológiai károsodás valószínűsége különböző fajtájú és energiájú sugárzások esetében azonos elnyelt dózis esetén is különböző, mivel a károsodásban az elnyelt dózis mellett a részecske pályája mentén keletkező ionizációsűrűség is szerepet játszik. A földi sugárvédelmi szabályozásban a sugárterhelés várható teljes sztochasztikus biológiai károsodásának³ jellemzésére az E effektív dózis alkalmazták:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R},$$

ahol w_T a T szövet vagy szerv testszöveti súlytényezője, illetve H_T az egyenértékű dózis, w_R az R típusú sugárzás sugárzási súlytényezője és $D_{T,R}$ a T szövet vagy szerv átlagos elnyelt dózisa az R típusú sugárzásra. Az egyenértékű dózis, valamint az effektív dózis mértékegysége a J/kg, neve sievert, jele Sv.

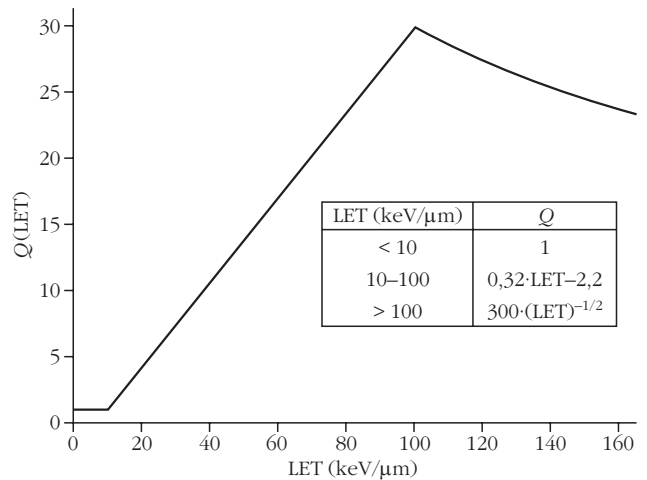
Amint a fentiekben láthattuk, a kozmikus sugárzási tér jelentős részben nagy energiájú protonokból, alfa-részecskékből, valamint nehezebb töltött részecskékből áll. Az ICRP 60 és az ICRP 103 ajánlás szerint w_R értéke a 2 MeV-nél nagyobb energiájú protonokra 5, illetve 2, alfa-részecskékre és nehezebb töltött részecskékre pedig egységesen 20, így az egyenértékű dózis alkalmazása az űrdozimetriában jelentős felülbecslést jelentene, és ezért helyette a testszövetre vonatkoztatott $H_{T,Q}$ dózisegyenértéket használják:

$$H_{T,Q} = Q_T D_T$$

$$Q_T = \frac{1}{m_T D_T} \int \int_{m_T, L=0}^{\infty} Q(L) D_T(L) dL dm$$

ahol Q_T és D_T – az adott sugárzási térben – a T szövetben, illetve szervben az átlagos minőségi tényező és

³ Ionizáló sugárzások esetében alapvetően kétféle biológiai hatást különböztetnek meg. A determinisztikus hatások (helyi sugársérülések, illetve sugárbetegség) egy adott küszöbdózis felett és többnyire rövid időn belül mindenkinél jelentkeznek, míg a sztochasztikus hatások (például daganatos betegségek) általában hosszabb idő után lépnek fel és előfordulásuk valószínűségi jelleget mutat.



3. ábra. A Q minőségi tényező értéke a vízben mért LET függvényében [5].

az elnyelt dózis, m_T az adott szövet, illetve szerv tömege, és $Q(L)$ a vízben mért LET⁴ (L)-függő minőségi tényező (3. ábra) és $D_T(L)$ a sugárzás L és $L+dL$ közötti LET-értékű komponensének járuléka az elnyelt dózisban. A testszövetre vonatkoztatott dózisegyenértékek szöveti súlytényezővel súlyozott összege a H_E effektív dózisegyenérték, amely az űrdozimetriában a földi gyakorlatban használt effektív dózis szerepét tölti be. Az effektív dózishoz hasonlóan a mértékegysége J/kg, neve sievert, jele Sv [5]:

$$H_E = \sum_T w_T H_{T,Q}.$$

A földi, illetve űrbéli sugárvédelmi szabályozásban használt, előbb tárgyalt mennyiségek – a különféle szövetek és szervek egyenértékű dózisa, illetve dózisegyenértéke, valamint az effektív dózis, illetve effektív dózisegyenérték – közvetlenül nem mérhetők. A földi sugárvédelmi gyakorlatban a külső sugárterhelés okozta effektív dózis becslésére ezért bevezették az egyéni sugárterhelés ellenőrzésére alkalmas személyi dózisegyenérték, valamint a külső sugárzási terek ellenőrzésére szolgáló környezeti dózisegyenérték és irány szerinti dózisegyenérték fogalmát.

A személyi dózisegyenérték, $H_p(d)$ a testfelület egy meghatározott pontja – ez általában a doziméter viselési pontja – alatt a légyszövet d mélységében fellépő dózisegyenérték.⁵ Áthatoló sugárzásokra a $d = 10$ mm értékkel számolnak; némely szerv esetében ettől eltérő értékeket javasolnak. Modellszámításokhoz 1 g/cm³ sűrűségű lágyszövet összetételű,⁶ 30×30×15 cm³ méretű, úgynevezett ICRU⁷ hasábfantomot használnak.

⁴ Lineáris energiaátadási tényező (LET = dE_{abs}/dL): a töltött részecskékre jellemző mennyiség; a dL úton lokálisan elnyelt energia (dE_{abs}) és a dL hányadosa.

⁵ A testszövet adott pontján a testszövetre számított D elnyelt dózis és az adott sugárzás Q minőségi tényezőjének szorzata. Mértékegysége a J/kg, neve sievert, jele Sv.

⁶ 76,2 m/m% oxigén, 11,1 m/m% szén, 10,1 m/m% hidrogén és 2,6 m/m% nitrogén.

⁷ International Commission on Radiation Units and Measurements (Radiológiai Egységek és Mérések Nemzetközi Bizottsága).

A földi gyakorlatban áthatoló sugárzások alatt általában röntgen- vagy gamma-sugárzás és neutronokat értünk. Ami a világűrt illeti, a dózismeghatározási probléma fő forrása az, hogy a testszövet 10 mm-es mélységében a kozmikus sugárzást alkotó nagyenergiás részecskék esetében rendszerint nem áll fenn a szekunder töltött részecske-egyensúly, és így az effektív dózis becslésére a személyi dozimetriában a személyi dózisegyenérték nem alkalmazható.

A földi háttérsugárzáshoz, valamint a földi sugárveszélyes munkahelyeken mérhető sugárzási térhez képest a különféle űreszközök fedélzetén mérhető kozmikus sugárzási tér mind összetételében, mind a részecskék energiaspektrumát tekintve jelentősen összetettebb képet mutat. Az űrhajósok esetében dózisterhelésük becsléséhez nem elegendő az ICRU fantom egy adott pontján mérhető dózisegyenérték mérése. A nagy LET-értékű sugárzásnak köszönhetően a dózis az egyes szöveteken, szerveken belül sem homogén, így a dózisebecsléshez a mélységi LET-és dóziseloszlás vagy a dózisegyenérték ismerete is szükséges. A személyi dózisegyenérték fogalmát ezért űrhajósok esetében nem alkalmazzák. A világűrben végzett dozimetriai célú mérések emiatt elsősorban az elnyelt dózist, illetve a sugárzási tér LET-spektrumának – esetenként különböző mélységekben történő – mérését jelentik, amelyeket gömb alakú vagy antropomorf fantomokra vonatkozó modellszámítások egészítenek ki. A Nemzetközi Űrállomás fedélzetén a Matrjoska program keretében számos alkalommal végeztek dozimetriai célú méréseket antropomorf fantommal. A testszövet-ekvivalens anyagból készült torzó különböző pontjaiban mérve az elnyelt dózist és a sugárzás LET-spektrumát az effektív dózisegyenértékre adtak becslést a kísérletet végző kutatók [4].

A sugárvédelmi szabályozás a gyakorlatban

Bár a sugárvédelem három alapelve,⁸ úgy mint az indokoltság, az optimalizálás és a dóziskorlátozás elve mind a földi gyakorlatban, mind a világűrben érvényes, az eltérő sugárzási tereknek köszönhetően a gyakorlatban jelentős eltérések mutatkoznak. Fontos megemlíteni, hogy az űrhajósokat érő sugárzás dózisteljesítménye⁹ jelentősen meghaladja a földi munkahelyeken érvényes dóziskorlátok értékét. A helyzetet tovább súlyosbítja, hogy az űrhajósok a repülés teljes időtartama alatt ki vannak téve a sugárzás-

⁸ Valamely sugárterheléssel járó eljárás alkalmazására csak akkor kerüljön sor, ha az abból eredő egészségügyi és gazdasági haszon nagyobb, mint a sugárterhelésnek betudható kár (indokoltság). A sugárforrások alkalmazása során a többletterhelés olyan csekély legyen, amilyen ésszerűen elérhető (optimalizálás). A sugárforrások alkalmazásából származó foglalkozási és lakossági sugárterhelés dóziskorlátaikat semmilyen módon nem szabad túllépni annak érdekében, hogy a sugaras munkahelyeken dolgozók és a lakosság körében se léphessen fel sugárkárosodás (dóziskorlátozás).

⁹ Az időegység alatt elszennvedett dózis.

1. táblázat

A NASA élettartam effektív dózisegyenérték-korlátai (3% fatális kockázat 95% konfidenciaszint mellett)

életkor (év)	NASA űrhajós élettartam-dóziskorlátok, H_E (mSv)	
	férfiak	nők
30	620	470
35	720	550
40	800	620
45	950	750
50	1150	920
55	1470	1120

nak, szemben a földi munkahelyeken eltöltött napi maximum 8 órával. Az űrhajósok küldetésük során a földi sugárveszélyes munkahelyekre megállapított dóziskorlátokat nagyon hamar túllépnek; ugyanakkor nem töltenek el évtizedeket ezen a sugárveszélyes helyen, egész pályafutásuk alatt csak néhány expedícióban vesznek részt. Így rájuk nem éves, illetve 5 éves, hanem úgynevezett élettartam-dóziskorlátokat határoznak meg.

A sugárzás sztochasztikus hatásain túl egyes szervek – például a szemlencse vagy a bőr – esetében a lehetséges determinisztikus hatásokkal is számolni kell. A dózis-hatás összefüggéssel kapcsolatos ismereteink is elsősorban az atombomba-támadások túlélőinek adataiból származnak, így a nagy LET-értékű sugárzással kapcsolatos kockázatok becslése jelentős bizonytalansággal terhelt. Maga az elfogadható kockázat mértékének meghatározása sem magától értetődő; így nem csoda, hogy az emberes űrrepülés alig több mint fél évszázados történetében a sugárvédelmi szabályozás jelentős változásokon ment keresztül.

Kezdetben, a rövidebb időtartamú, viszont a Föld geomágneses védelmét elhagyó Apollo-küldetések idején a szabályozás alapja az volt, hogy a kozmikus sugárzás következtében fellépő kockázat ne haladja meg az egyéb kockázatot. Mivel a szakemberek attól tartottak, hogy a sugárvédelmi dóziskorlátok betartásának kötelezettsége esetleg a küldetések sikerét veszélyeztetheti, a dóziskorlátok definiálása helyett inkább arra törekedtek, hogy az adott dózisok esetén várható hatásokat megbecsüljék.

A kockázat mérséklése érdekében a NAS/NRC Radiobiological Advisory Panel 1970-ben jelentésben foglalta össze ajánlásait. A kiindulási alap az volt, hogy a 35 és 55 év közötti férfiak (az űrhajósok akkori tipikus populációjának) rákkialakulási kockázata legfeljebb a természetes kockázat kétszeresére emelkedjék. Ez alapján az élettartamdózist 4 Sv-ben állapították meg, ugyanakkor megjegyezték, hogy ez az érték inkább referenciaértéknek, mintsem dóziskorlátnak tekinthető, és bolygóközi küldetésekhez nagyobb, űrállomás-küldetésekhez pedig kisebb kockázatok is rendelkezhetők.

A NASA, valamint az ESA és az RSA egyes szervekre vonatkozó dóziskorlátai

szerv	30 napos korlát			1 éves korlát			élettartamkorlát		
	NASA (mGy-Eq)	ESA (mSv)	RSA (mSv)	NASA (mGy-Eq)	ESA (mSv)	RSA (mSv)	NASA (mGy-Eq)	ESA	RSA (mSv)
vérképző szervek	250	250	250*	500	500	500	–	–	–
szemlencse	1000	500	500	2000	1000	1000	4000	–	2000
bőr	1500	1500	1500	3000	3000	3000	6000	–	6000
szív	250	–	–	500	–	–	1000	–	–
központi idegrendszer	500	–	–	1000	–	–	1500	–	–
központi idegrendszer ($Z \geq 10$) ¹⁰	–	–	–	100 mGy	–	–	250 mGy	–	–

Az ESA és az RSA űrügynökség a dóziskorlátokat dózisegyenértékben, míg a NASA RBE¹¹-vel súlyozott elnyelt dózisban (mGy-Eq) adja meg.

* Egyszeri akut sugárterhelésre 150 mSv.

A későbbiekben, ahogy a küldetések időtartama megnövekedett és az űrhajósok között a nők, valamint a 35-55 évesnél fiatalabb és idősebb korosztály is megjelent, szükségessé vált a szabályozás módosítása. Időközben a kockázat-dózis arányossági tényező értékét is módosították. 1989-ben az NCRP Report 98 alapján az űrhajósokat a „kevésbé kockázatos”¹² munkakörbe sorolták, és figyelembe vették, hogy a besugárzás következtében a létrejövő daganatok kialakulásának valószínűsége függ az életkortól és – az eltérő várható élettartam miatt – a nemtől is.

Napjainkban az Európai Űrügynökség (ESA) és az Orosz Űrügynökség (RSA) által alkalmazott élettartam-dóziskorlát 1000 mSv, a NASA ezzel szemben életkor- és nemfüggő effektív dózisegyenérték-korlátokat alkalmaz (1. táblázat). A determinisztikus hatásokra vonatkozó dóziskorlátokat a 2. táblázatban foglaltuk össze [6].

Hazai fejlesztésű dózismérő rendszerek a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén

A sugárterhelés mérésére régóta használnak a világűrben is termolumineszcens¹³ (TL) dózismérőket. TL dózismérők űrállomás fedélzetén történő kiértékelé-

¹⁰ A nehéz töltött részecskék központi idegrendszere gyakorolt káros hatásai napjainkban még nem ismertek. Ennek fő oka az epidemiológiai adatok hiánya, valamint az ezen a területen végzett állatkísérletek kis száma. A NASA éppen ezért a $Z \geq 10$ részecskék esetében külön dóziskorlátokat határozott meg.

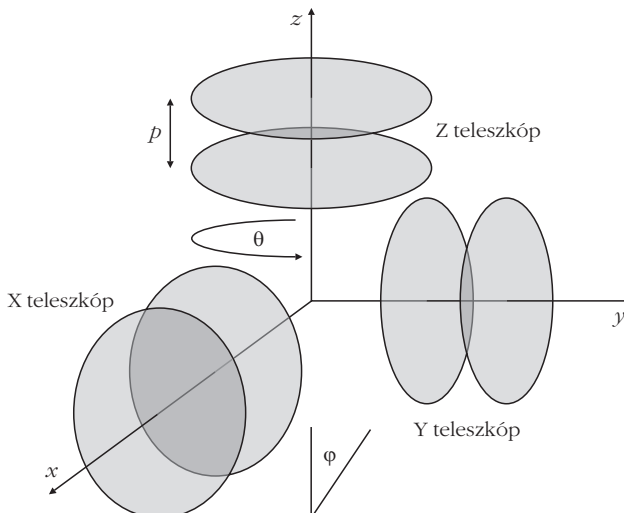
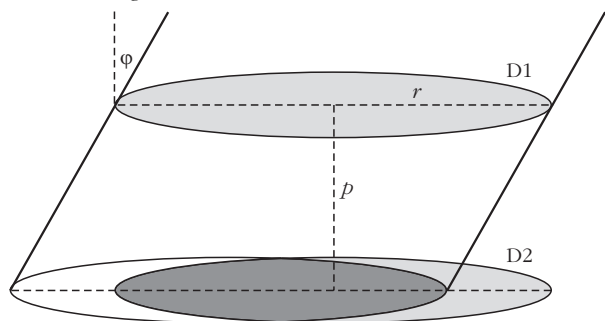
¹¹ A relatív biológiai hatásosság (relative biological effectiveness, RBE) a kis és nagy LET-értékű sugárzások különböző biológiai hatását fejezi ki.

¹² Az éves kockázat 10^{-3} és 10^{-4} között van, az egész élet során 3%.

¹³ A termolumineszcens anyagok olyan szennyezővel ellátott szigetelő (általában kristályos) anyagok, amelyekben az ionizáló sugárzás a kristállyal, illetve annak atomjaival történő energiaközlés eredményeképpen a gerjesztett állapotba került töltéshordozók egy része a szigetelő tiltott sávjában levő csapdába kerül. A TL doziméter kifűtése során a csapdába került töltéshordozók fénykibocsátás kíséretében alapállapotba kerülnek vissza. A kibocsátott fény mennyiségének mérésével az elnyelt dózis becsülhető.

sére dolgozták ki mintegy 35 éve a Központi Fizikai Kutatóintézet munkatársai a *Pille* műszert. E műszer továbbfejlesztett változata az ISS orosz szegmensében 2003 óta szolgálati mérőeszköz. Segítségével az űrállomás különböző pontjaiban havi rendszerességgel mérik az elnyelt dózist, űrállomáson kívüli tevékenységek és jelentősebb napkitörések, koronaanyag-ki-

4. ábra. A két azonos sugarú detektorból álló teleszkóp (felül), illetve a TRITEL háromtengelyű teleszkóp (alul) geometriájának felépítése; r a detektor aktív felületéhez tartozó sugár, p a detektorok közötti távolság.



dobódások esetén pedig űrhajósok személyi dozimetriájára is használják a rendszert. A Pille napjainkban is az egyetlen olyan műszer a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén, amellyel az űrséták alatt kapott többletdózist mérni lehet.

A dózisegyenérték, illetve az effektív dózisegyenérték becsléséhez ugyanakkor nem csak az elnyelt dózist, hanem a sugárzási tér LET-spektrumának, illetve annak mélységbeli eloszlásának az ismerete is szükséges. Ennek érdekében – a BL-Electronics Kft.-vel együttműködésben – számos, szilíciumdetektorokat tartalmazó részecske-teleszkóp fejlesztése folyt, illetve kezdődött meg a Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpontban (MTA EK, korábban MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézetben). Ezek közül a 0,2–120 keV/μm(víz) tartományban a kozmikus sugárzás LET-eloszlásának időbeli és térbeli meghatározására alkalmas, a 4π térszögben közel egyenletes érzékenységgű háromtengelyű szilíciumdetektoron *TRITEL* teleszkóppal 2012. november 6. óta végeznek méréseket az ISS fedélzetén. Az egymásra merőleges irányba néző tengelyeket két-két, egymással párhuzamosan elhelyezkedő, 300 μm vastagságú és 222 mm² aktív felületű, teljesen kiürített rétegű szilíciumdetektor alkotja (4. ábra). A teleszkópokat alkotó detektorok szerepe kitüntetett; az egyik a mérő-, a másik az úgynevezett kapuzódetektor szerepét tölti be. A mindkét detektorban jelet adó részecskéket külön tudjuk mérni, vagyis az úgynevezett kapuzott (koincidencia) és a kapuzatlan (teljes) leadottenergia-spektrum egyaránt meghatározható. A műszer három tengelyének köszönhetően a teljes, 4π térszög lefedése mellett a sugárzási tér irányeloszlásának vizsgálatára is lehetőséget ad.

A TRITEL rendszer első, űrállomásra szánt példányával 2012. november 6. és 2013. május 10. között végeztek méréseket az ISS európai Columbus laboratóriumában, majd további felhasználásra átszállították az orosz szegmens szolgálati moduljába (Zvezda). Ezzel párhuzamosan a rendszer egy továbbfejlesztett, grafikus kijelzővel ellátott és egyszerre több TRITEL teleszkópegység együttes vezérlésére alkalmas változata a moszkvai Orvosbiológiai Problémák Intézetével (IBMP) együttműködésben 2013. áprilisa óta üzemel a Zvezda modul fedélzetén. A két rendszer összekapcsolására várhatóan 2015-ben kerül sor [7].

Az MTA EK kutatói által összeállított – szilárdtest nyomdetektorokat és TL detektorokat tartalmazó – detektorcsomagokkal 2001 óta végeznek méréseket a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén. Ezek közül a Matryoska kísérlet keretében számos alkalommal végeztek méréseket emberszerű fantomban. A program célja a kozmikus sugárzás okozta dózisterhelés eloszlásának vizsgálata egy antropomorf torzó fantom létfontosságú szerveiben, végső soron az effektív dózisegyenérték megbecslése. Az MTA EK Sugárvédelmi Laboratóriumának munkatársai 2011 óta az orosz űrhajósok személyi dózist közvetlenül is mérik egy erre a célra kifejlesztett kombinált, passzív dózismérővel.

Összefoglalás

Mivel az űrhajózás még mindig jelentősen nagyobb kockázatot jelent – igaz jóval rövidebb ideig – a szokásos földi (például ipari) körülményekhez képest, ezért a sugárzás okozta kockázatot kifejező dóziskorlátok ebben az esetben magasabbak a nukleáris iparban elfogadottnál. Bár az űrhajósok dózisének becslésére vonatkozóan egyre több eszköz áll a rendelkezésünkre, a nagy LET-értékű sugárzások esetében a dózis-kockázat összefüggéssel kapcsolatos ismereteink továbbra is meglehetősen hiányosak, ezért a kockázat becslése is elég bizonytalan.

Az elkövetkező évek, évtizedek újabb kihívások elé állíthatják az űrhajósok sugárvédelmével foglalkozó szakembereket. A rendszeres, űrállomáson végzett munka mellett várhatóan ismét sor kerül majd a Föld közvetlen környezetét elhagyó küldetésekre (például kisbolygó-megközelítések, visszatérés a Holdra, Mars-expedíciók). Az ilyen küldetések során az űrhajósokat már a Föld mágneses tere sem védi, így nagyobb napkitörések esetén a jelenleg érvényes dóziskorlátokat könnyen átléphetik, illetve a megfelelő árnyékolás hiányában akár halálos mértékű dózist is kaphatnak. Az elmúlt években újabb csoporttal, a civil résztvevők, más néven az űrturisták csoportjával nőtt a világűr megjáró emberek tábora. Az űrturistacégek tervei alapján a „polgári űrrepülés”¹⁴ gyors előretörése várható.

Bár továbbra is sok a megválaszolandó kérdés, annyi biztosra vehető, hogy az űrhajósok (beleértve a jövő polgári űrutasait is) számára az egyik legfontosabb kockázati tényező továbbra is az őket a küldetés során folyamatosan érő kozmikus sugárzás lesz. Mivel a kozmikus sugárzási tér jellemzői számos tényező – többek között a naptevékenység, az űreszköz pálya menti mozgása, valamint a szerkezeti elemek árnyékoló és konverziós hatása – miatt helyről helyre és időről időre is jelentős mértékben változhatnak, ezért a „helyszíni”, minél szélesebb körű dozimetriai mérések a jövőben is elengedhetetlenek lesznek.

Irodalom

1. Király P.: Jánossy Lajos és a 100 éve felfedezett kozmikus sugárzás. *Fiz. Szle.* 62 (2012) 400–406.
2. Makra Zs.: Űrhajók sugárvédelme. *Fiz. Szle.* 15 (1965) 209–216.
3. Makra Zs.: Az űrutazások dózisviszonyai. *Fiz. Szle.* 28 (1978) 185–188.
4. ICRP 123: Assessment of Radiation Exposure of Astronauts in Space. *Annals of the ICRP, ICRP Publication 123, Vol. 42, No. 4, Elsevier*, 2013.
5. Fehér I., Deme S. (szerk): *Sugárvédelem*. ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2010.
6. F. Cucinotta, Radiation Risk Acceptability and Limitations, <http://three.usra.edu/articles/AstronautRadLimitsFC.pdf>
7. Hirn A., Apáthy I., Bodnár L., Csöke A., Deme S., Pázmándi T., Szántó P., Zábori B.: Első mérések a TRITEL dozimetriai rendszerrel a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén. *Sugárvédelem*, 6/1 (2013) 1–6 (http://www.sugarvedelem.hu/sugarvedelem/docs/V6i1/Hirn_V6i1.pdf)

¹⁴ Itt kezdetben úgynevezett rövid ideig tartó űrúgrásokra kell gondolnunk, bár létezik már olyan cég is, amelyik felfújható modulokból álló, Föld körüli pályán keringő szállodát tervez építeni, és moduljainak prototípusát már a világűrbe is feljuttatták.