

# DIPLOMAMUNKA

Sugárzási tér jellemzőinek meghatározása magaslégköri ballon  
fedélzetén

Zábori Balázs

Témavezető: Dr. Hirn Attila  
Magyar Tudományos Akadémia  
Energiatudományi Kutatóközpont,  
Űrdozimetriai csoport

Tanszéki konzulens: Dr. Légrády Dávid  
egyetemi docens  
BME Nukleáris Technikai Intézet

BME  
2014



## Diplomamunka feladat a Fizikus mesterképzési (MSc) szak hallgatói számára

A hallgató neve: <b>Zábori Balázs</b>	szakiránya: <b>orvosi fizika</b>
A diplomamunkát gondozó (a záróvizsgát szervező) tanszék:	<b>Nukleáris Technika Tanszék</b>

A diplomamunka készítésének helye: <b>Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpont</b>	
A témavezető neve: <b>Dr. Him Attila</b>	A konzulens neve: <b>Dr. Légrády Dávid</b> (külső témavezető esetén kijelölt tanszéki munkatárs)
– munkahelye: <b>MTA EK</b>	– beosztása: <b>egyetemi docens</b>
– beosztása: <b>kutatócsoport-vezető</b>	– e-mail címe: <b>legrody@reak.bme.hu</b>
– e-mail címe: <b>him.attila@energia.mta.hu</b>	

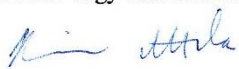
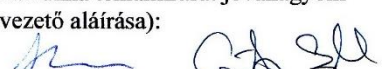
A diplomamunka címe: <b>Sugárzási tér jellemzőinek meghatározása magaslégköri ballon fedélzetén</b>	azonosítója: <b>DM-2012-58</b>
---	--------------------------------

### A téma rövid leírása, a megoldandó legfontosabb feladatok felsorolása:

A Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpontja nagy tapasztalatokkal rendelkezik űrdoziméterek fejlesztésében. Az Európai Űrügynökség REXUS/BEXUS diákprogramja keretében lehetőség van a dózismérő rendszerek kipróbálására éles körülmények között magaslégköri ballon fedélzetén. A hallgató diplomamunkája során bekapcsolódik az űrdozimetriai csoportban folyó kutatás-fejlesztésbe. Ennek keretében az alábbi feladatokat végzi el:

- a BEXUS sztratoszferikus ballon fedélzetén várható primer sugárzási térre vonatkozó irodalmi adatok összegyűjtése, elemzése;
- a főbb műszaki és tudományos követelmények megvalósíthatóságának vizsgálata a várható környezeti adatok ismeretében modellszámítások és földi kísérletek segítségével;
- a TriTel belsejében, valamint a ballonon elhelyezett hőmérsékletszenzorok által mért adatok összevetése a kísérlet termikus modellje segítségével számított értékekkel;
- a passzív szilárdtest detektorokkal végzett mérések kiértékelése, az eredmények értelmezése;
- a TriTel kalibrációja és a ballon fedélzetén mért adatok előzetes kiértékelése.

A feladat kiadásának időpontja: <b>2012. január 1.</b>
--

Témavezető vagy tanszéki konzulens aláírása: 	A diplomamunka témakiírását jóváhagyom (tanszékvezető aláírása): 
---	--





## Önállósági nyilatkozat

„Alulírott Zábori Balázs a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem fizikus MSc szakos hallgatója kijelentem, hogy ezt a diplomamunkát meg nem engedett segédeszközök nélkül, önállóan, a témavezető irányításával készítettem, és csak a megadott forrásokat használtam fel.

Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból vettem, a forrás megadásával jelöltem.”

Budapest, 2014. december 1.

Zábori Balázs



## TARTALOMJEGYZÉK

1.	A DOLGOZAT RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA (REZÜMÉ).....	5
2.	AZ EURÓPAI ŰRÜGYNÖKSÉG OKTATÁSI PROGRAMJA ÉS A MAGYAR TUDOMÁNYOS RÉSZVÉTEL .....	6
3.	AZ ŰRDOZIMETRIA ÉS JELENTŐSÉGE.....	7
4.	A SUGÁRZÁSI KÖRNYEZET AZ ATMOSZFÉRÁBAN .....	9
4.1.	ELSŐDLEGES KOZMIKUS SUGÁRZÁS ÉS RÉSZECSEKELETKEZÉS A LÉGKÖRBE.....	9
4.2.	A MÁGNESES MEZŐ HATÁSA.....	14
4.3.	KAPCSOLAT A NAPTEVÉKENYSÉGGEL .....	15
5.	BEXUS SZTRATOSZFÉRIKUS BALLONKÍSÉRLET A KOZMIKUS SUGÁRZÁS VIZSGÁLATÁRA .....	19
5.1.	A BEXUS BALLONKÍSÉRLETEK TECHNIKAI ÖSSZEFOGLALÁSA.....	19
5.2.	A TECHDOSE KÍSÉRLET, CÉLOK .....	21
5.3.	AZ ALKALMAZOTT MÉRŐESZKÖZÖK .....	23
5.3.1.	A TRITEL űrdozimetriai teleszkóp.....	23
5.3.2.	Geiger-Müller számlálók.....	25
5.3.3.	Passzív szilárdtest detektorok (Pille).....	26
6.	A TECHDOSE KÍSÉRLET MEGVALÓSÍTÁSA A MŰSZAKI ÉS TUDOMÁNYOS KÖVETELMÉNYEK SZEMPONTJÁBÓL .....	27
6.1.	MŰSZAKI KÖVETELMÉNYEK ÉS MEGVALÓSÍTÁS.....	27
6.2.	A TUDOMÁNYOS KÖVETELMÉNYEK: ADATKIÉRTÉKELÉS KIDOLGOZÁSA A TECHDOSE KÜLDETÉSRE.....	30
6.2.1.	Méréstechnika a Pille dózismérők esetében .....	30
6.2.2.	Méréstechnika és adatkiértékelés a TRITEL esetében.....	35
6.2.3.	Adatkiértékelés a GM-számlálók esetében .....	40
7.	MÉRÉSI EREDMÉNYEK A BEXUS-14 KÜLDETÉSŐL.....	41
7.1.	A TECHDOSE REPÜLÉSE A BEXUS-14 FEDÉLZETÉN .....	41
7.2.	A PASSZÍV DETEKTOROKKAL VÉGZETT MÉRÉSI EREDMÉNYEK.....	48
7.3.	A TRITEL MÉRÉSI EREDMÉNYEINEK ELŐZETES ÖSSZEFOGLALÁSA .....	51
8.	KITEKINTÉS .....	58
9.	ÖSSZEFOGLALÁS .....	59
10.	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....	61
11.	IRODALOMJEGYZÉK.....	62



## 1. A dolgozat rövid összefoglalása (rezümé)

Magyarország az egyik legkiemelkedőbb résztvevője az Európai Űrügynökség (*ESA-European Space Agency*) oktatási programjának, habár csupán együttműködő tagállama vagyunk az Űrügynökségnek (2014 novemberében született meg a magyar kormány döntése a teljes jogú csatlakozásról). 2011 nyara óta vehetek részt aktívan ebben az oktatási programban az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Űrdozimetriai Kutatócsoportja támogatásában. Kutatómunkám céljaként a Föld-közeli térség sugárzási jellemzőinek vizsgálatát tűztem ki dozimetriai szempontból, amely napjainkban – mikor a technológia fejlődésével az emberes űrrepülés egyre gyakoribb – növekvő hangsúlyt kap. Kutatásaim során az Űrdozimetriai Kutatócsoport által kifejlesztett mérőrendszerekre alapozott kísérleteket hajtottam végre, hogy mérési eredményekhez jussak bolygónk kozmikus sugárzási környezetére vonatkozólag.

Jelen dolgozatomban a BEXUS sztratoszférikus kutatóballonok fedélfelületére kifejlesztett TECHDOSE kísérlet részletesebb tárgyalásával foglalkozom. A kísérlettel alapvető célom volt egy olyan technológiai mérőrendszer megvalósítása, amely sztratoszférikus repülések során képes monitorozni a kozmikus sugárzást. A kísérlet egyszerre alkalmazta a szilícium detektoros mérőrendszerre alapozott TRITEL egységet, illetve a termolumineszcens elven működő Pille dózismérő rendszert. A TRITEL első alkalommal mérhetett éles repülés során, és szintén első alkalommal nyílt lehetőség együttes mérések összehasonlítására a Pille eredményekkel. Ennek különösen nagy a jelentősége, hiszen a Pille a Nemzetközi Űrállomás orosz szegmensén a szolgálati dózismérő rendszer a része, és mint ilyen hozzájárul az űrhajósok sugárvédelméhez a világűrben. A TRITEL esetében pedig reméljük, hogy a közeljövőben hasonlóan fontos szerepet tölthet majd be az űrállomás üzemeltetésében, illetve számos műholdas küldetésben.

A projektben a legfontosabb feladatomban a kísérlet tudományos háttérének kidolgozása, illetve a projekt és a diákcsoport koordinálása volt. Elvégeztem számos fizikai kérdés vizsgálatát a tervezés során (mechanikai és hőtani szempontokból), valamint részletes tesztelésnek vettem alá az elkészült kísérleti egységet, hogy bizonyítsam a megfelelést a küldetés szigorú követelményeinek. Részt vettem a programhoz kapcsolódó külföldi oktatási kurzusokon és az ESA által előírt kötelező felülvizsgálatokon egy bizottság előtt, ahol minden alkalommal megfelelt eredményt sikerült elérnem, amellyel lehetővé vált a kísérlet felbocsátása. A dolgozatban igyekszem egy összesítő képet nyújtani a fejlesztési munkámról, illetve részletesebb elemzést bemutatni a kapott tudományos eredményekről.



## 2. Az Európai Űrügynökség oktatási programja és a magyar tudományos részvétel

Az európai egyetemek általános mérnökképzési programjai nem biztosítanak megfelelő tudást és képzettséget az űrkutatás magas szintű kihívásainak teljesítésére, miközben az űrkutatás számos területe a mindennapi életünk elengedhetetlen részévé vált és a képzett, űrkutatásra szakosodott mérnökök hiánya egyre inkább érezhetővé válik az űripar terjeszkedésével. Néhány egyetemen ugyan van lehetőség specializálódott szakot választani, de az így képezhető mérnökök száma nem éri el az európai űripar szükségleteit. Az Európai Űrügynökség korán felismerte ezt a problémát és elindította saját oktatási programját, hogy kiképezze a jövő űrkutató generációját.

Az Űrügynökség megközelítése némileg eltér egy megszokott egyetemi képzés koncepciójától, hiszen egyedülálló hallgatók helyett csapatok jelentkezését várják. Ez egyben segíti a hallgatókat, hogy megtanuljanak közösen dolgozni és együttműködni a cél érdekében, amelyhez egyaránt szükség van a fizikusra, a villamosmérnökre, az informatikusra, a mechanikai mérnökre és egy jó menedzserre.

A legnépszerűbb és az érdeklődő (pályázó) hallgatók számát tekintve az egyik legsikeresebb oktatási jellegű program a REXUS/BEXUS (*Rocket and Balloon Experiments for University Students*) rakéta- és ballonkísérletek egyetemista diákoknak. A BEXUS programban sztratoszférikus ballon fedélzetére adaptálhatóak kísérletek. A különleges, kutatási célokra fejlesztett ballon körülbelül 30 km-es magasságig emelkedik, és megközelítőleg 5-7 órán keresztül repül olyan magasságokban, ameddig a hagyományos repülőgépek nem képesek eljutni. A REXUS/BEXUS programban 2011 óta töretlen hazánk részvétele, majdnem minden évben képviseli Magyarországot egy-egy diákcsoport mind a ballonos, mind pedig a rakétás repülések tekintetében.

A CoCoRAD (*Combined TRITEL/Pille Cosmic Radiation and Dosimetric Measurements*) ballonos diákkísérlet csapatvezetőjeként 2011-ben hazánkban elsőként sikerült nyertes pályázatot benyújtanom a BEXUS programban való részvételre, melyet a Magyar Űrkutatási Iroda azonnal támogatott is. Az általam koordinált diákcsoport 2011 szeptemberére sikeresen megtervezett és megépített egy kozmikus sugárzási kísérletet, amely a BEXUS-12 fedélzetén végezhetett méréseket. Az eredményeket kiértékelve a kísérlet további bővítési lehetőségei felé fordultam, melynek eredményeképpen született meg a TECHDOSE





(Development of a Complex Balloon **Technology Platform for Advanced Cosmic Radiation and Dosimetric Measurements**) kísérlet ötlete és alapkonceptiója. Ismételten sikeresen toboroztam hallgatói csapatot a részvételhez és nyertes pályázatot nyújtottam be az ESA bizottság elé, melyhez a Magyar Űrkutatási Iroda biztosította a szükséges pénzügyi támogatást, míg a tudományos és technikai háttérrel a Magyar Tudományos Akadémia Energiatudományi Kutatóközpontjának (MTA EK) Űrdozimetriai Kutatócsoportja jelentette.

### 3. Az űrdozimetria és jelentősége

Az emberes űrutazások egyik legfőbb kockázati tényezője a kozmikus sugárzás élő szervezetre kifejtett káros hatása és ennek hosszú távú következményei. A védelem kidolgozásának első lépése a sugárzási tér jellemzőinek meghatározása, folyamatos monitorozásának megvalósítása. Ez azonban komoly technológiai kihívást jelent, hiszen a sugárzási tér nagyon összetett, számos különböző fajtájú részecskét tartalmaz, melyek együttes méréséhez más és más mérési módszerek szükségesek. A sugárzás térbeli és időbeli változásai is jelentősek, a Föld mágneses terének változása mellett a napsíkulus is jelentősen befolyásolja.

Az űrkutatásban alapvetően a dózisegységérték fogalmát használjuk, mely a sugárvédelmi szabályozásban a sugárzás sztochasztikus biológiai károsító hatásának jellemzésére bevezetett mennyiség:

$$H = q(LET_{\infty}) \cdot D, \quad (1)$$

ahol  $D$  az elnyelt dózis,  $q(LET_{\infty})$  a vízben mért nem korlátozott LET ( $LET_{\infty}$ )-függő minőségi tényező ( $LET_{\infty}$  fékezőképességet kapjuk, ha a levágási energiát nem vesszük figyelembe, vagyis feltételezzük, hogy a teljes leadott energia elnyelődik az adott közegben). A különböző típusú és energiájú sugárzásoknak az emberi testszövetben és szervekben kifejtett sztochasztikus hatásának számszerűsítésére a sugárvédelemben az egyenérték dózist használják:

$$H_T = \sum_R D_{T,R} \cdot w_R, \quad (2)$$

ahol  $D_{T,R}$  az R típusú sugárzástól származó, a T testszövetre, illetve szervre átlagolt elnyelt dózis,  $w_R$  az R típusú sugárzás súlytényezője. A világűrben tapasztalható sugárzási tér a Földön mérhető sugárzási tereknél jóval összetettebb. Mivel a dózis döntő hányada protonoktól



és nehezebb töltött részecskéktől származik, így lehetőség nyílik a sugárzási teret a minőségi tényező egyfajta átlagos értékével leírni:

$$\langle Q \rangle = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} q(LET_{\infty}) D(LET_{\infty}) dLET_{\infty}, \quad (3)$$

ahol  $D(LET_{\infty})$  az elnyelt dózis LET szerinti eloszlása az ICRU gömb 10 mm-es mélységében.

Az űrdozimetriai kutatásokban élenjáró munkát végez az MTA Energiatudományi Kutatóközpont Űrdozimetriai Kutatócsoportja, mely számos, kozmikus sugárzás dozimetriai célú mérésére alkalmas mérőrendszert fejlesztett már ki, és jelenleg is több nemzetközi űrkutatási programban vesz részt. Diplomamunkám készítése során a kutatócsoport munkájába nyílt lehetőségem bekapcsolódni és a kozmikus sugárzás dozimetriai célú vizsgálatába mélyedhettem el a BEXUS programban való részvétellel.

Az utóbbi években egy új terület kutatásával bővült a csoport munkája: a sugárzási tér vizsgálatával bolygónk légkörében, olyan magasságokban, ahová a hagyományos repülőgépek nem képesek eljutni. A sugárzás szempontjából legkevésbé ismert térségek egyike a sztratoszféra, ahol változatos kozmikus sugárzási környezet alakul ki a Föld mágneses mezeje, valamint a légkör és az elsődleges kozmikus részecskék kölcsönhatása eredményeképpen. Ezen régió vizsgálata csak légköri kutatóballonokkal és rakétákkal lehetséges. A ballonok előnye, hogy akár huzamosabb ideig is képesek egy adott magasságban repülni és méréseket végezni. Munkám eredményeképpen a TECHDOSE projekt keretében a sztratoszférikus ballonok fedélzetén való használatra alkalmas összetett mérőrendszert fejlesztettünk ki, mely képes a kozmikus sugárzás számos összetevőjének vizsgálatára és remélhetőleg jövőbeli felhasználása is lehetséges lesz majd hasonló ballonos repülések során.



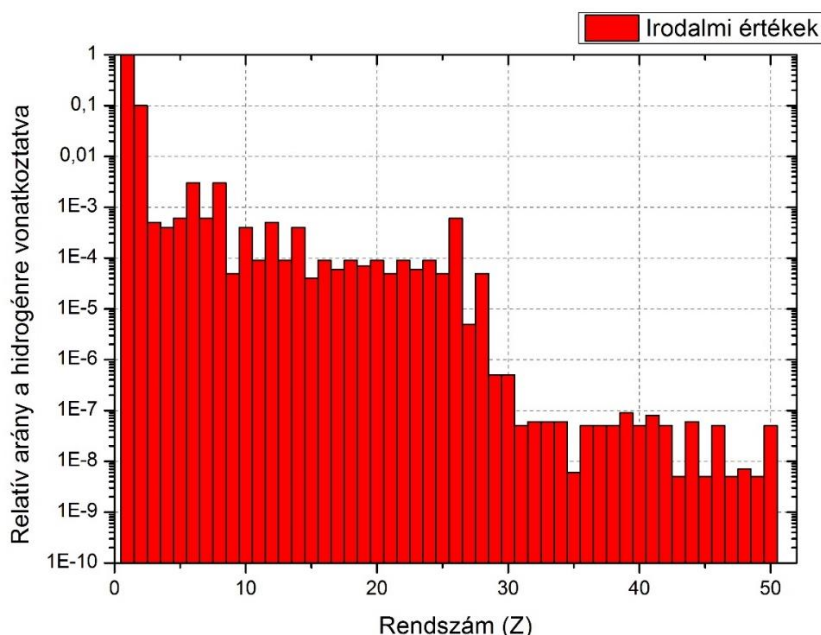


## 4. A sugárzási környezet az atmoszférában

### 4.1. Elsődleges kozmikus sugárzás és részecskekeletkezés a légkörben

Az első kozmikus sugárzásra vonatkozó tudományos kísérletre 1912-ben került sor Victor Hess munkásságának köszönhetően [1]. A 20. század elején egyértelművé vált, hogy a sugárzás szintje a Föld felszínén nem magyarázható csupán a bolygónk belsejéből (a kőzetekből) származó sugárzással. Victor Hess kísérletében egy egyszerű elektroszkópot használt mérőeszközü egy ballon repülése során. Napfogyatkozás során is végzett méréseket, hogy kizárhassa a Napunkat, mint a sugárzás lehetséges forrását. Mérései azt mutatták, hogy mintegy 700 m magasságig a sugárzás szintje csökken (megállapítása a földi eredetű és a kozmikus sugárzás eredőjére érvényes) [2], majd növekedni kezd, ami arra utal, hogy a jelenség forrása a világűrben keresendő.

Az elsődleges kozmikus sugárzás a világútból érkezik és főként nagy energiájú, szubatomi részecskéket tartalmaz (1 MeV és  $5 \times 10^{13}$  MeV között; [3]), melyek közel fénysebességgel bombázzák bolygónk légkörét minden irányból. A sugárzás döntő hányada azonban nem éri el a Föld felszínét közvetlenül, hanem ütközések révén kölcsönhatásba lép a légkör molekuláival, melynek eredményeképpen számos másodlagos részecske keletkezik. Az elsődleges sugárzás legfőbb alkotói a protonok (hidrogén atommagok; 85%), alfa-részecskék (hélium atommagok; 12%), nehéz ionok (1%), illetve elektronok (2%). Az 1. ábra szemlélteti az elsődleges kozmikus sugárzás protonokhoz viszonyított relatív összetételét [4] a részecskék rendszámának függvényében.



**1. ábra: Az elsődleges kozmikus sugárzás protonokra vonatkoztatott relatív összetétele 1 GeV/amu kinetikus energia esetén a részecskék rendszámának függvényében [4]**

A másodlagos részecskék között háromféle piont és számos kaont találunk [5]. A semleges pionok gamma-részecskékre vagy elektron-pozitron párokra bomlanak el [6]:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma (98,798\%) \text{ és } \pi^0 \rightarrow \gamma + e^- + e^+ (1,198\%). \quad (4)$$

A töltött pionok pedig müonokra vagy elektronokra/pozitronokra bomlanak el [6]:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu (99,9877\%) \text{ és } \pi^+ \rightarrow e^+ + \nu_e (0,0123\%), \quad (5)$$

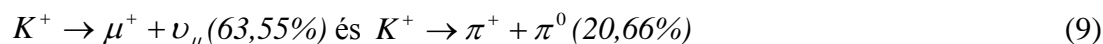
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu (99,9877\%) \text{ és } \pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e (0,0123\%). \quad (6)$$

A keletkezett müonok tovább bomlanak elektronokra és pozitronokra, azonban mégis eléri a felszínt. Ez a tény a relativitáselmélet egyik közvetlen bizonyítéka, hiszen a müonok rövid élettartama (átlagos élettartam  $2,2 \times 10^{-6}$  s, [7]) nem tenné lehetővé, hogy lejuthassanak a felszínig. Azonban a nagy kinetikus energia következtében idődilatáció lép fel és ezáltal a látszólagos élettartamuk megnövekszik. A müonok bomlásának a folyamata [8]:

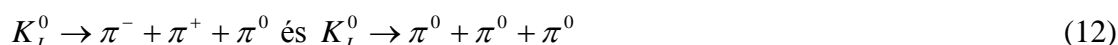
$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e (100\%) \quad (7)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e (100\%) \quad (8)$$

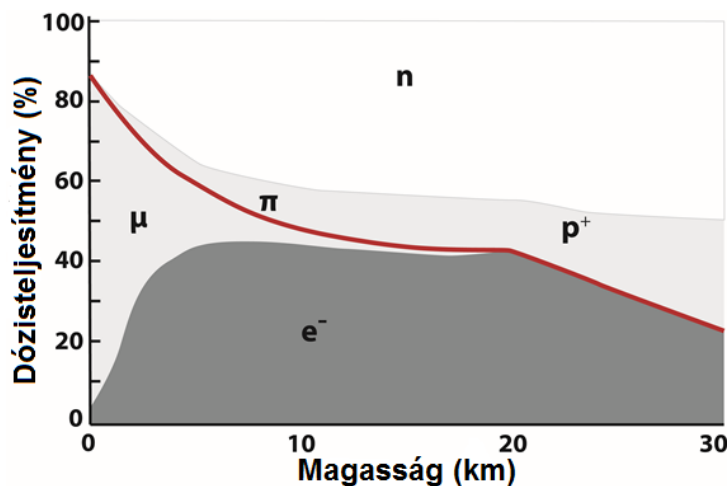
A reakciókban kaonok is részt vesznek, melyek felfedezése a kozmikus sugárzáshoz köthető. A töltött kaonok főbb bomlási reakciói (átlagos élettartam  $1,24 \times 10^{-8}$  s; [8]):



A semleges kaonok főbb bomlási reakciói (átlagos élettartam  $9 \times 10^{-11}$  s [ $K_S^0$ ] és  $5 \times 10^{-8}$  s [ $K_L^0$ ]; [8]):

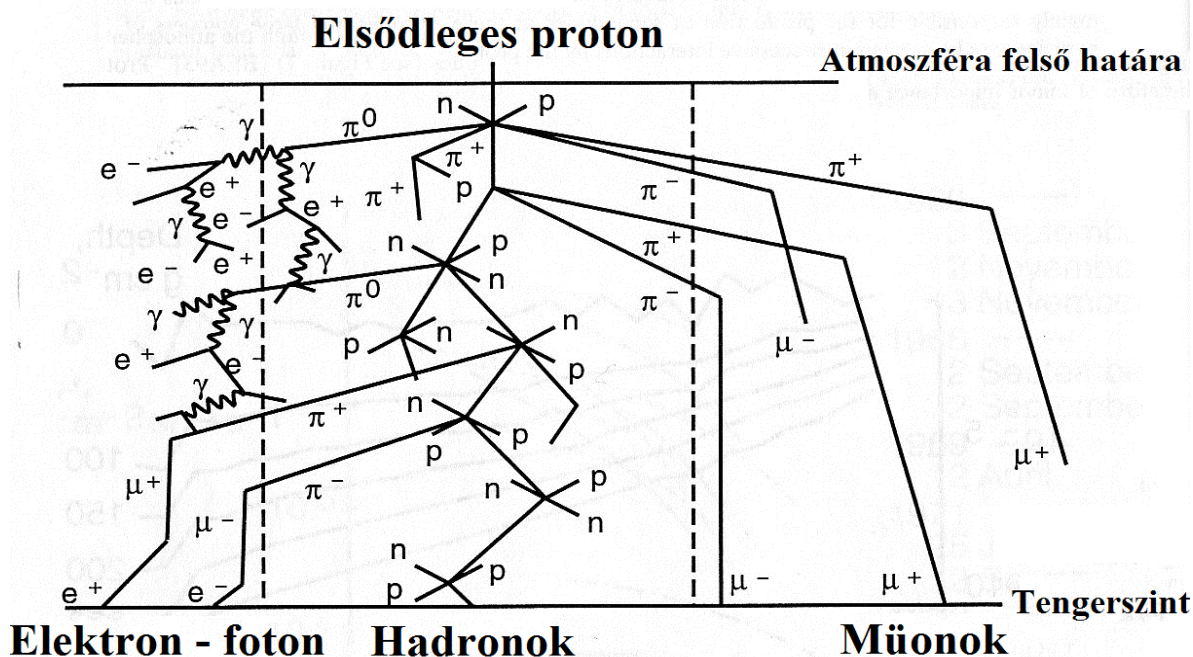


A fenti folyamatokban keletkezett nagy energiájú gamma fotonok további elektronokat és pozitronokat kelthetnek, mely részecskék az atommagok erőterében fékezési röntgensugárzással járulnak hozzá a sugárzási térhez. A keletkező részecskék között fontos kiemelni a semleges neutronokat, melyek részaránya a légkörben jelentős lehet az ütközési folyamatok következtében. A neutronok járuléka a mérhető dózisteljesítményhez elérheti akár az 50%-ot is nagyobb magasságokon, ahogyan azt a 2. ábrán láthatjuk (ennek később fontos jelentősége lesz a Pille mérések előzetes becslései során).



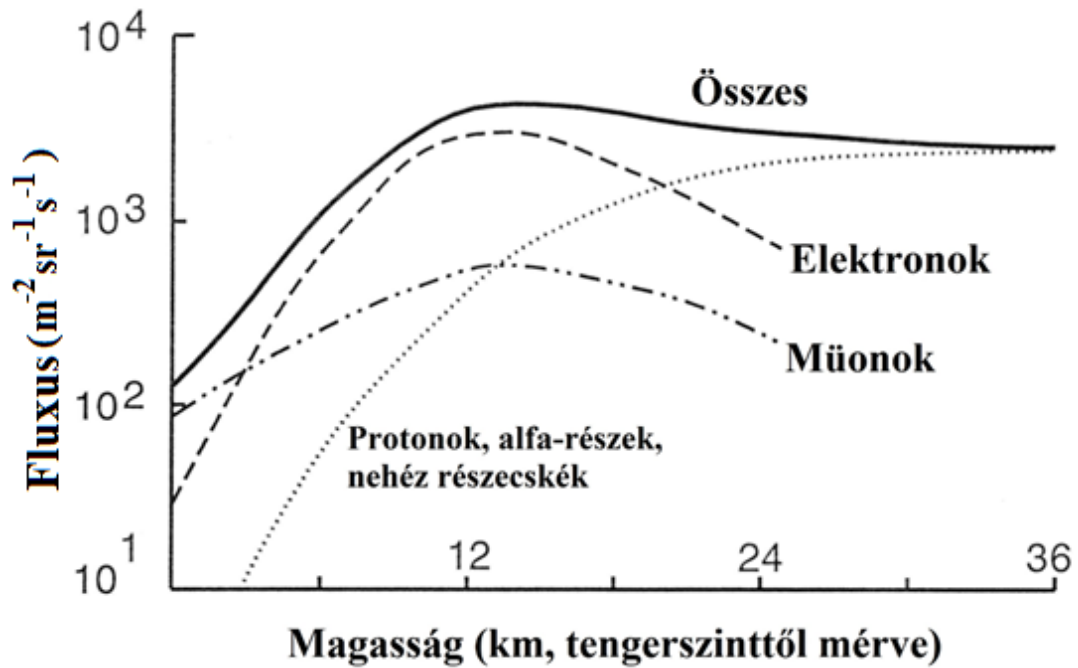
2. ábra: A dózisteljesítmény forrásai a magasság függvényében [4]

A leírt folyamatok eredményeképpen egy meglehetősen összetett sugárzási tér alakul ki a bolygónk légkörében, melyet a 3. ábra szemléltet, feltüntetve a másodlagosan keletkező sugárzás összes jelentős komponensét.

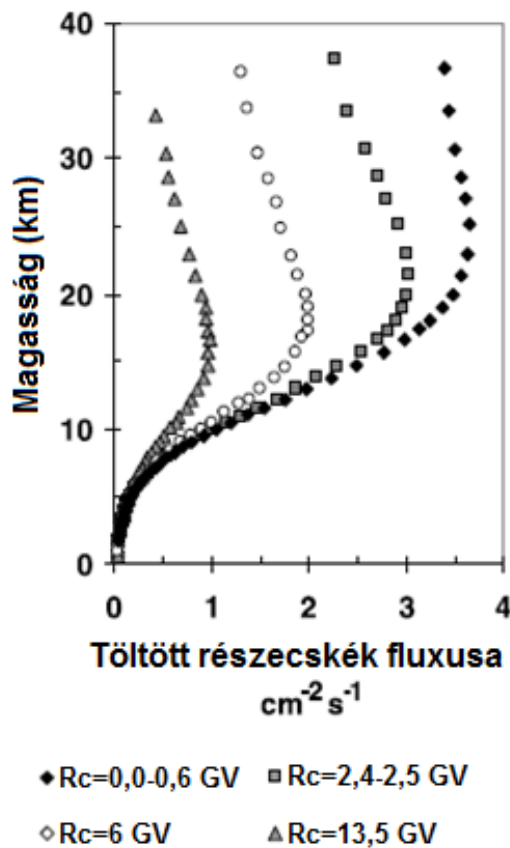


3. ábra: A másodlagos kozmikus sugárzás sematikus reprezentációja a légkörben [4]

A töltött részecskék esetében a sugárzási tér főbb komponenseinek intenzitását mutatja a 4. ábra a magasság függvényében. Az intenzitás maximuma 15-26 km magasságban található, melyet Pfozter-maximumnak nevezünk [9]. Ebben a magasságtartományban éri el a másodlagos részecskekeletkezés a maximumát. A felszín felé haladva a légkör és a mágneses mező árnyékoló hatása miatt csökken az intenzitás, ennél magasabban pedig már az elsődleges részecskék dominálnak a sugárzási tér összetételében. A maximum pontos magassága függ a naptevékenységtől és a geomágneses levágás értékétől, azaz a földrajzi szélességtől is (lásd 5. ábra).



4. ábra: A kozmikus sugárzási tér egyes komponenseinek intenzitása a magasság függvényében töltött részecskék esetében [4]



5. ábra: A Pfitzer-maximum magasságfüggése a geomágneses levágás értékétől (az Rc jelenti a mágneses levágás értékét (lásd 4.2 fejezet), [10])

## 4.2. A mágneses mező hatása

A sugárzási tér kapcsán feltétlen ki kell térnünk a mágneses mező árnyékoló hatására és ennek jelentőségére. A Föld mágneses terének jelenléte befolyásolja a mérhető részecskék intenzitását, amely ezáltal a szélességi kör függvénye lesz. A töltött részecskék behatoló képességét a mágneses mezőbe a geomágneses merevség határozza meg:

$$R = \frac{c \cdot P}{z \cdot e}, \quad (13)$$

ahol  $R$  a geomágneses levágás [GV],  $c$  a fénysebesség [m/s],  $P$  a részecskemomentum [kgm/s],  $z$  a részecske töltéseinek száma [-] és  $e$  az elemi töltés [C].

A mágneses mező minden egyes pontjához és belépési szögéhez rendelhető egy  $R_C$  merevségi határérték, melyet geomágneses levágásnak hívunk. Ezen értéknél kisebb geomágneses merevséggel rendelkező részecskék ( $R < R_C$ ) a mágneses mező adott pontját a kijelölt irányból nem képesek elérni [11]. Ez a levágás számítható a Stormer-formula segítségével dipólus mágneses mezőt feltételezve [12]:

$$R_C = \frac{C_D \cdot \cos^4 \phi}{r_D^2 \cdot \left(1 + \sqrt{1 - \cos^3 \phi \cdot \sin \chi \cdot \sin \lambda}\right)^2}, \quad (14)$$

ahol  $R_C$  a mágneses levágás [GV],  $r_D$  a távolság a mágneses dipólus középpontjától [Föld sugár egységben],  $\phi$  a geomágneses szélesség [fok],  $\chi$  a sebességvektor és a délkör síkja által bezárt szög [fok],  $\lambda$  pedig az azimutális szög [fok]. A gyakorlati számításokban leggyakrabban az „*International Geomagnetic Reference Field 2000*” modellt alkalmazzák, mely a függőleges irányú geomágneses levágást ( $R_{VC}$ ) használja közelítésként:

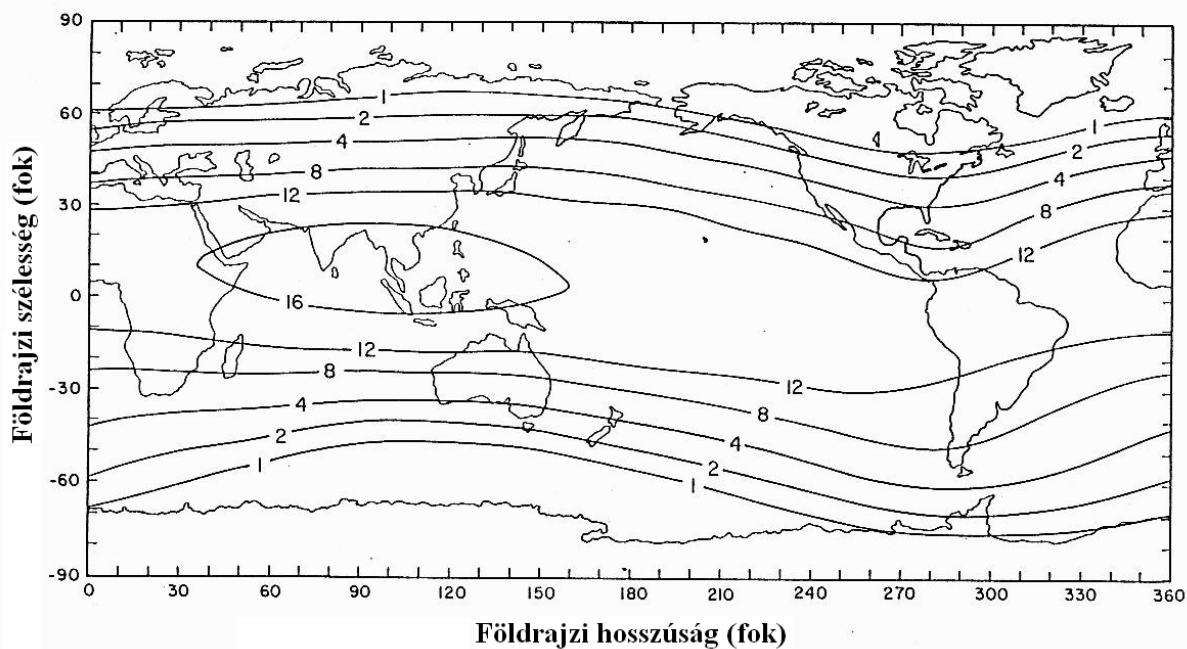
$$R_{VC} = \frac{C_D \cdot \cos^4 \phi}{4 \cdot r_D^2}. \quad (15)$$

A Föld dipólus mágneses mezejének a középpontja nem esik egybe a bolygó geometriai középpontjával, hanem mintegy 540 km-el el van tolva a Mariana-szigetek irányába, illetve a mágneses tengely és a forgástengely is szöget zárnak be egymással, mindezek következtében pedig a mező tapasztalható jellege asszimmetrikus.

A 6. ábra szemlélteti a függőleges geomágneses levágást 20 km magasságban GV egységekben. Láthatóan a sarkok felé közeledve a levágás értéke drasztikusan csökken, így az



egyre kisebb energiájú részecskék is képesek elérni az adott magasságban lévő pontokat a mágneses mezőben, melynek eredménye – többek között – a látványos sarki fény (*aurora borealis*). Ez az előnye a kozmikus sugárzási kísérleteknek magas szélességeken. Az Észak-Svédországban található ESRANGE űrbázis szélességén (északi szélesség  $68^\circ$ ) példaképpen a levégás értéke már jóval 1 GV alatt található.



6. ábra: A függőleges geomágneses levégás értékei 20 km magasságban GV egységekben [13]

### 4.3. Kapcsolat a naptevékenységgel

Az elsődleges kozmikus sugárzás két fő forrása a galaktikus kozmikus sugárzás (*GCR – Galactic Cosmic Rays*), mely az Univerzumból származik (pl. szupernóvák, kvazárok, távoli csillagok) és a Napunk saját sugárzása (*SCR – Solar Cosmic Rays*). A Napból érkező sugárzás két főbb típusra osztható, mindkettő forrása a napkorona [14]. Az egyik típus a napszél, amely töltött részecskék plazmaáramából és ezek elektromágneses mezejéből áll, a másik pedig a korona anyagkidobódás (*CME – Coronal Mass Ejection*).

A napszél folyamatosan áramlik ki a Napunk koronájából, amely a korona magas hőmérsékletéből fakadó jelentős részecskenyomásnak köszönhető. A részecskenyomás hatására a napkorona kitágul és a gravitáció már nem képes megtartani az anyagmennyiség egy részét, mely napszél formájában elveszik a világűrbe (1 millió t/s veszteség). A napszél elhagyva a Napunkat felgyorsul, miközben a térfogata megnő és a sűrűsége ezáltal lecsökken



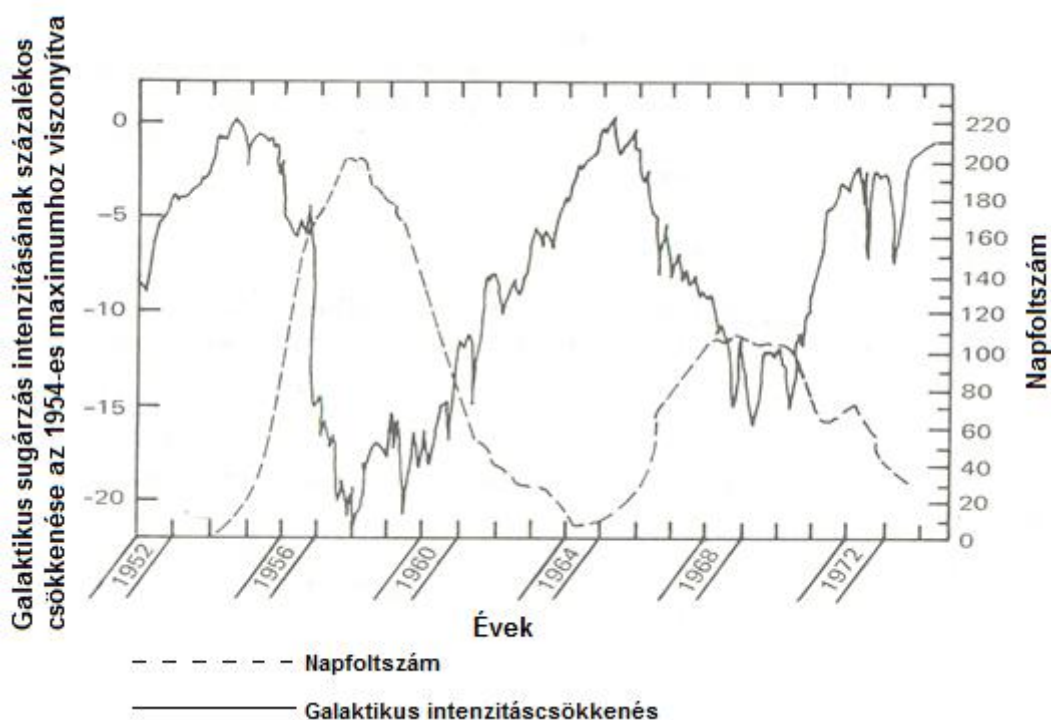
(csökken a részecskék ütközési gyakorisága). Ezt a folyamatot nevezzük adiabatikus tágulásnak, mivel nincs energiabetáplálás vagy veszteség a folyamat során. A napszél esetében további két típust különböztethetünk meg: lassú és gyors napszélről beszélhetünk, amelyek alapvetően különböznek a keletkezési helyükben és ezáltal tulajdonságaikban [15]. A gyors napszél forrásai a napkorona olyan területei, ahol a mágneses térerősség vonalai nyitottak a bolygóközi tér felé (Napunk poláris vidékein főként) és ezáltal a napszelet alkotó részecskék viszonylagosan akadálytalanul hagyhatják el a Napunk felszínét nagy sebességgel (800-1000 km/s). A lassú napszél esetében a források olyan területek, ahol a mágneses mező erővonalai zártak, melynek következtében a részecskék kilépése lassabb lesz (főként a Napunk egyenlítői vidékein jellemző mintegy 400 km/s sebességgel). A napszél alapvetően ionizált hidrogént tartalmaz (protonok és elektronok), közel 8%-ban tartalmaz alfa-részecskéket, valamint számos további elemet is kimutattak már benne ionos formában: C, N, O, Ne, Mg, Si, S, Fe [16]. A SOHO napfigyelő műhold mérései alapján további, nehezebb elemeket is nyomokban sikerült azonosítani: P, Ti, Cr, Ni, Fe és Ni [17].

Ezzel szemben a korona anyagkidobódások egyszerre jelentősebb anyagmennyiséget juttatnak ki a világűrbe és lényegesen lassabban mozognak, mint a napszél, közel 1-5 nap alatt érik csupán el bolygónkat. Ez utóbbiak hatása viszont lényegesen nagyobb lehet Földünkre és környezetére, mint a napszél esetében. A rendkívül nagysebességű anyagkidobódások az egész Naprendszerben komoly hatásokat válthatnak ki, melyeket bolygóközi anyagkidobódásoknak is nevezünk (*ICME – Interplanetary Coronal Mass Ejection*). A korona anyagkidobódások Földünk mágneses mezejével való kölcsönhatása nem minden esetben egyforma mértékű, alapvetően az anyagkidobódás mágneses mezejének irányítottságától függ. A meghatározó a mágneses mező z-komponensének iránya ( $B_z$ ). Ha ez az irány pozitív (megegyezik az iránya a Föld eredő mágneses mezejének irányával), akkor szinte nem tapasztalható kölcsönhatás. Azonban, ha  $B_z$  értéke negatív, akkor jelentős kölcsönhatás lép fel a két mágneses mező között, melynek következtében az anyagkidobódás által szállított energia bejuthat a Föld mágneses mezejébe.

Forbush-csökkenés figyelhető meg a galaktikus kozmikus sugárzás intenzitásának csökkenésében, amikor a Napunkból kilökődött anyag bolygóközi zavarként áthalad a Naprendszeren és kölcsönhatásba lép a galaktikus komponenssel [18]. A Napból érkező töltött részecske sugárzások kölcsönhatnak a galaktikus kozmikus sugárzással, melyen keresztül egyfajta ellenállást, árnyékolást jelentenek a galaktikus sugárzás számára, csökkentvén a

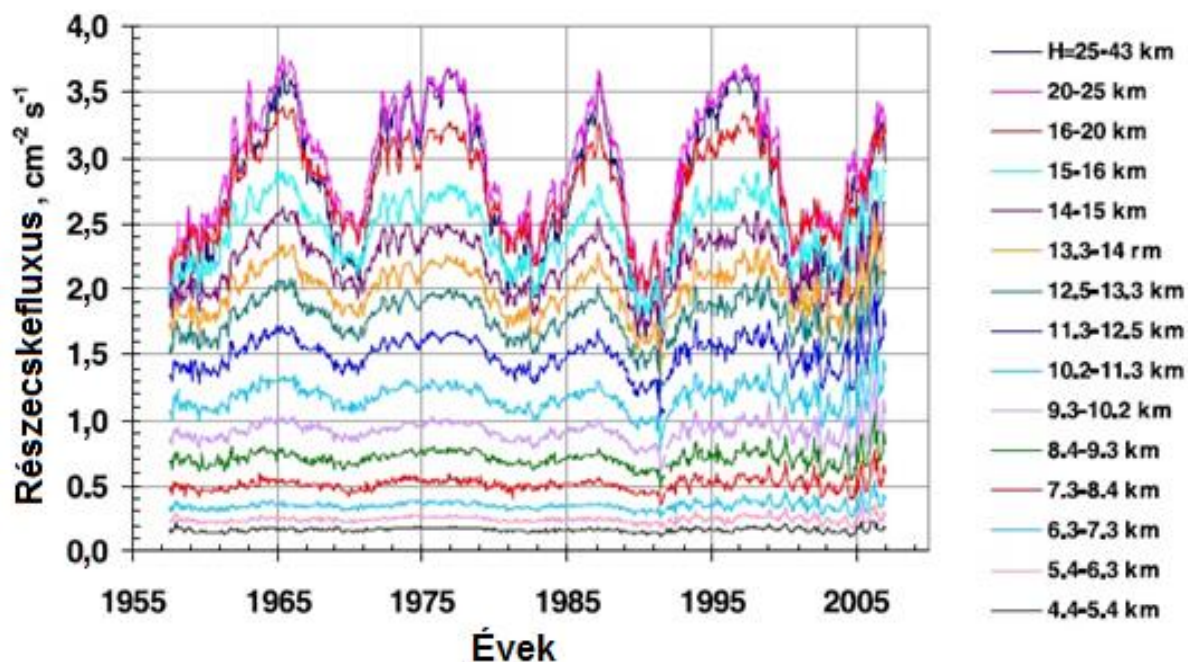
galaktikus komponens mérhető intenzitását. Ez a csökkenés a Forbush-effektus. Az árnyékolás fő oka a napszél által hordozott mágneses mező, amely a részecskesebesség növekedésének a következménye. Fontos tényező az is, hogy a napszél, mint plazma, pozitív töltésű és fékezi a galaktikus, töltött részecskéket. A galaktikus kozmikus sugárzás földfelszínen alkalmazott mérési módszere a neutron monitorokat használja fel [19], melyek segítségével a galaktikus sugárzásra jellemző nagyenergiájú, töltött részecskéket közvetetten mérhetjük a légkörben kiváltott, másodlagosan keletkező (lásd 3. ábra) neutronok detektálásával (ezek elérik a felszínt).

Napunk 11-éves, ciklikusan változó aktivitást mutat, amely a sugárzás mérhető intenzitásában a fent említett folyamatokon keresztül, érzékelhető. A 7. ábrán látható, hogy a galaktikus komponens intenzitása és a naptevékenység aktivitása pontosan ellenkezőleg változik az időben. Az ábrán a naptevékenységet a napfoltzámmal adtuk meg, amely a Nap aktivitásának egyfajta mérőszáma.



**7. ábra: A naptevékenység és a galaktikus kozmikus sugárzás intenzitásának változása az idő függvényében [20]**

A 8. ábra szemlélteti, hogy már az utasszállítók repülési magasságában is észlelhető a sugárzási környezet 11-éves ciklikus változása a naptevékenység hatására. A 8. ábra alapján levonhatjuk a következtetést, hogy a sztratoszférában is észlelhető, ciklikus változást okoz a naptevékenység.



8. ábra: Naptevékenység hatása a kozmikus sugárzási környezetre a légkörben (töltött részecskék fluxusára vonatkozólag) [10]

Napjainkban közelítünk a 24. napciklus maximumához (az első napciklust a csillagászok 1760-tól számítják), melynek eredményeképpen a napfoltok száma növekszik és a naptevékenység fokozódik. A fokozódásnak pedig mérhető hatásai vannak a Föld-közeli térségben. Ezeket a hatásokat számos műhold rögzíti:

- GOES műholdak: röntgensugárzás, proton fluxus mérése;
- Wind műhold: a napszél változásainak kimérése a bolygóközi térben;
- Polar műhold: poláris magnetoszféra és az auróra tanulmányozása;
- GEOTAIL műhold: a Föld mágneses mezejének megfigyelése.

Számos további műhold végez méréseket a Napot és a Földünk mágneses mezejét megfigyelve: ACE, CLUSTER, SOHO, SDO, Yohkoh, RHESSI, TRACE, Hinode. A napciklusokra vonatkozó elméleti kutatómunka folytatásaként ezen műholdak adatsorainak elemzése az egyik lehetséges kiindulópont.

## 5. BEXUS sztratoszférikus ballonkísérlet a kozmikus sugárzás vizsgálatára

### 5.1. A BEXUS ballonkísérletek technikai összefoglalása

A BEXUS program keretében a német űrügynökség (*DLR – Deutsches Zentrum für*

*Luft- und Raumfahrt*) és a svéd űrkutatási hivatal (*SSC – Swedish Space Corporation*) által kifejlesztett magaslégköri kutatóballon rendszer

fedélzetére adaptálhatóak tudományos és technikai kísérletek egyetemista diákok számára. A tipikus felépítése a ballon rendszernek a 9. ábrán látható. A rendszer legfontosabb eleme a ballon, mely akár

12.000 m<sup>3</sup> héliummal is feltölthető (biztonsági okokból a technikailag sokkal előnyösebb hidrogén használata ma már nem engedélyezett). A ballon alatt egy távvezérelhető töltet segítségével („cutter”) a hasznos

teher leválasztható a repülés bármely szakaszában, melyet követően ejtőernyő lassítja a rendszer zuhanását. Az EBASS feladata az energiaellátás biztosítása a kísérletek számára, melyek legalul, a gondolában kapnak helyet. A kommunikációs és nyomkövető rendszerrel, illetve jelzőfényrel szerelik fel az indítás előtt, így a küldetés teljes időtartama alatt a kísérletek mérési adatait az irányító központban lehetséges venni és azonnal kiértékelni. Ballaszt tömeg alkalmazásával lehetséges modulálni a repülési profilt, melyre egy

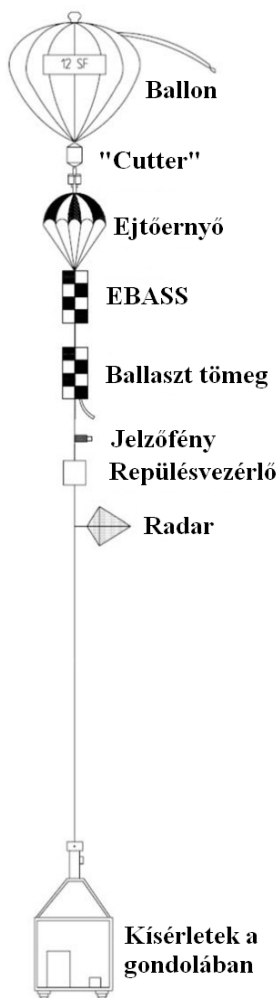
tipikus példát mutat a 10. ábra. A repülési magasság a ballonon elhelyezett kis szelep segítségével is változtatható.

alkalmazásával lehetséges modulálni a repülési profilt, melyre egy tipikus példát mutat a 10. ábra. A repülési magasság a ballonon elhelyezett kis szelep segítségével is változtatható.

alkalmazásával lehetséges modulálni a repülési profilt, melyre egy tipikus példát mutat a 10. ábra. A repülési magasság a ballonon elhelyezett kis szelep segítségével is változtatható.

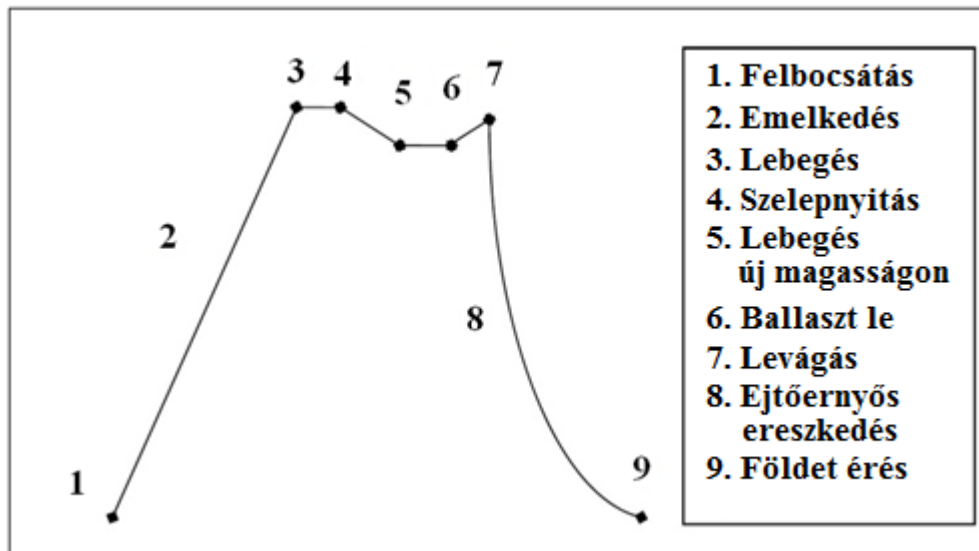
alkalmazásával lehetséges modulálni a repülési profilt, melyre egy tipikus példát mutat a 10. ábra. A repülési magasság a ballonon elhelyezett kis szelep segítségével is változtatható.

alkalmazásával lehetséges modulálni a repülési profilt, melyre egy tipikus példát mutat a 10. ábra. A repülési magasság a ballonon elhelyezett kis szelep segítségével is változtatható.



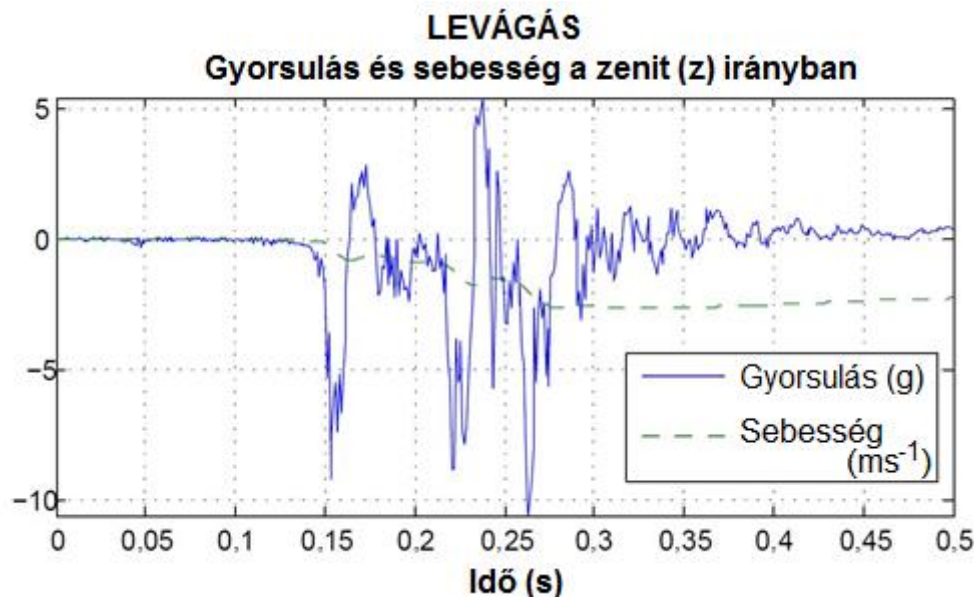
9. ábra: A BEXUS ballon felépítése [21]





10. ábra: A BEXUS ballonok tipikus repülési profilja [21]

A kísérlet megtervezése során a legnagyobb kihívást a BEXUS küldetés rendkívül zord környezeti feltételeinek teljesítése jelentette. Mechanikai szempontból a küldetés előírásai szerint +/-25g gyorsulás elviselésére is fel kell készíteni a kísérletet (melyet többek között a ballon leválasztásakor, illetve a földet éréskor tapasztalhatunk). Egy tipikus BEXUS repülésből származó gyorsulás- és sebességprofil mutat a 11. ábra a függőleges irányban a ballon leválasztása során.



11. ábra: Példa a BEXUS ballonok gyorsulás- és sebességprofiljára a zenit (z) irányban a ballon levágása során [21]

A környezeti feltételek között szükséges említeni a kis légnyomást (mintegy 10 mbar értékkel kell számolnunk 30 km-es magasságban), illetve a rendkívül alacsony várható





hőmérsékletet, amely a sztratoszférában a  $-60^{\circ}\text{C}$ -ot is elérheti (a jellemző hőmérséklet értékeket a sztratoszférában a magasság függvényében az 1. táblázatban foglaltam össze)!

**1. táblázat: Várható hőmérsékletek a magasság függvényében [21]**

Magasság (km)	Hőmérséklet ( $^{\circ}\text{C}$ )	
	December - Január	Május - Június
0	-17	7
5	-33	-14
10	-56	-47
15	-56	-47
20	-59	-47
25	-61	-44
30	-58	-36
35	-55	-24
40	-44	-12

Mindezen feltételeket egyszerre kellett figyelembe vennem a kísérlet megtervezésekor. Jelen dolgozatomban a tervezés során általam vizsgált néhány aspektust mutatom be. A teljes tervezési folyamatot és az abban végzett munkámat nincs lehetőségem a diplomamunka keretében tárgyalni.

## 5.2. A TECHDOSE kísérlet, célok

A világűrben az átlagos földfelszíninél több nagyságrenddel nagyobb a sugárzás intenzitása, mely az élő szervezeteket és az elektronikai berendezéseket is súlyosan károsíthatja. A jövőbeli űrutazások elengedhetetlen feltétele, hogy erről a sugárzásról, összetételéről, tulajdonságairól és a mérési módszereiről minél több tapasztalatot szerezzünk. Bolygónk felszínén az emberiség kettős védelmet is élvez a pusztító sugárzással szemben. A védelem első vonalát a Föld belsejében zajló folyamatok eredményeképpen indukálódott mágneses tér alkotja, mely eltéríti a töltött részecskéket. További védelmet jelent a légkör árnyékoló hatása. Ahogy azonban egyre magasabbra emelkedünk, úgy csökken a felettünk lévő légréteg vastagsága. A sarkvidékek közelében pedig a nagyenergiájú töltött részecskék a mágneses térerősség vonalakat követve a felszínhez egészen közel juthatnak. A TECHDOSE kísérlet legfőbb tudományos célja ezen sugárzási környezet tanulmányozása, dozimetriai mennyiségek meghatározása a TRITEL szilícium alapú detektorral és a Pille TL alapú mérőrendszerrel,



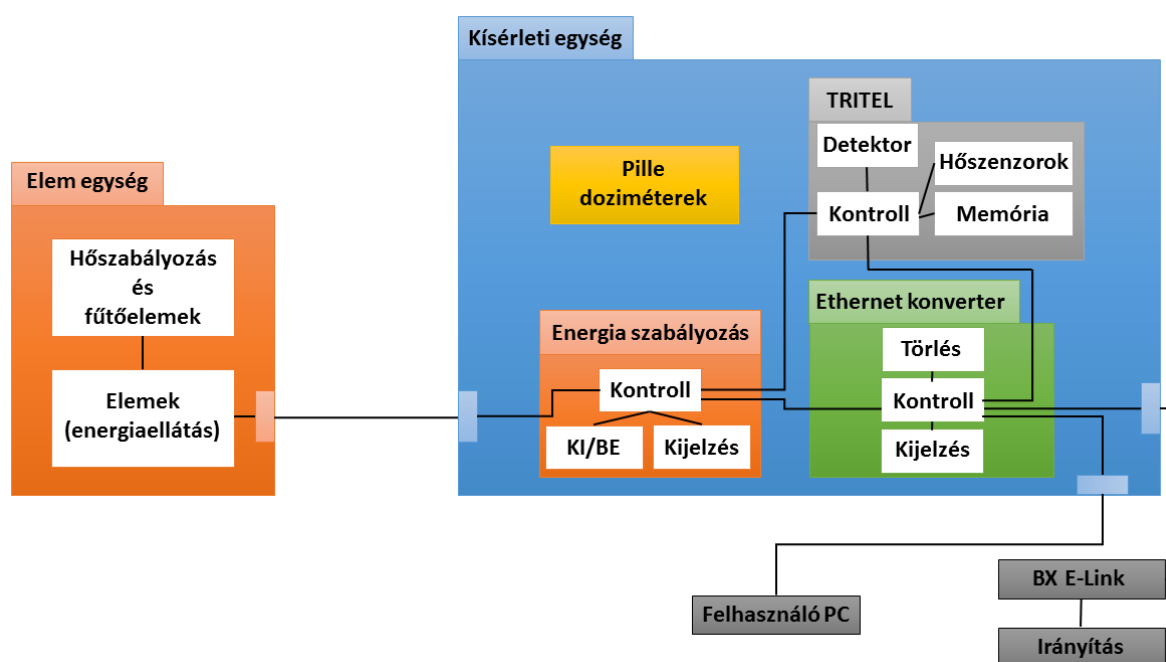
valamint a különböző műszerek által mért eredmények összehasonlítása első alkalommal. A kísérlet céljait az alábbi táblázatban foglaltam össze, melyeket technikai és tudományos szempontból, illetve a fontosságuk szerint osztályoztam (az ESA előírásoknak megfelelően).

**2. táblázat: A TECHDOSE kísérlet tudományos és technikai céljai**

#	Kísérleti cél	Típus	Prioritás
1	A BEXUS-12 CoCoRAD mérési eredményei alapján a TRITEL szilícium alapú teleszkóp zajának lecsökkentése, valamint két darab Geiger-Müller számlálóval való kiegészítése.	Technikai	Elsődleges
2	Leadott-energiaspektrum és LET-spektrum meghatározása a BEXUS-14 ballon repülési magasságára vonatkozólag.	Tudományos	Elsődleges
3	A küldetés során mérhető elnyelt dózis vizsgálata a TRITEL segítségével a küldetés különböző fázisaiban (emelkedés, stabil repülés 25 km felett, ereszkedés).	Tudományos	Elsődleges
4	Az elnyelt dózis meghatározása a Pille termolumineszcens dózismérőkkel a küldetés teljes időtartamára és összehasonlítás a TRITEL mérési eredményeivel.	Tudományos	Elsődleges
5	Korrektációs faktor meghatározása első alkalommal a Pille mérésekhez a TRITEL eredményeinek felhasználásával.	Tudományos	Elsődleges
6	A BEXUS-12 CoCoRAD és a BEXUS-14 TECHDOSE kísérletek mérési eredményeinek összehasonlítása a naptevékenység függvényében.	Tudományos	Másodlagos
7	A Pille dózismérő rendszer alkalmazhatóságának vizsgálata sztratoszférikus repülések során.	Technikai	Másodlagos
8	A dózisteljesítmény és a LET-spektrum magasságfüggésének vizsgálata a TRITEL mérési eredményei alapján.	Tudományos	Másodlagos
9	A GM-csövek beütésszám gyakoriságának vizsgálata, illetve összehasonlítás a TRITEL által mért időspektrumokkal.	Tudományos	Másodlagos
10	Az egymásra merőlegesen elhelyezett GM-csövek beütésszám-gyakoriságainak összehasonlítása és ezen keresztül az irányfüggés vizsgálata. Hasonló összehasonlítás elvégzése a TRITEL megfelelő tengelyeit figyelembe véve.	Tudományos	Másodlagos
11	A Pfozter-maximum magasságának meghatározása a TRITEL és a GM-csövek mérései alapján.	Tudományos	Harmadlagos

Jelen dolgozatomban tárgyalom az elsődleges kísérleti célok többségét, a másodlagos és harmadlagos célok esetében pedig érintőlegesen említést teszek némelyik kapcsán a kapott eredményekről.

A kísérlet áttekintő felépítését a 12. ábrán szemléltettem. A rendszer két, elkülönülő egységből épül fel. Az egyik az elemeket tartalmazó rész, amely az energiaellátásért felelős és az optimális energialeadás érdekében hőszabályzó rendszerrel van ellátva. A kísérleti egység foglalja magába a TRITEL szilícium detektoros teleszkópot, a Pille dózismérőket, energia szabályzást megvalósító és az Ethernet alapú kommunikációért felelős alegységeket.



12. ábra: A TECHDOSE kísérlet funkcionális felépítése

### 5.3. Az alkalmazott mérőeszközök

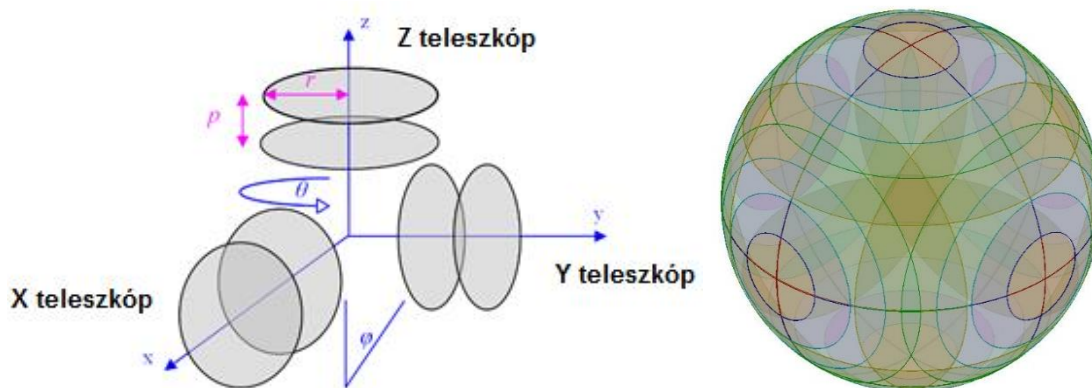
#### 5.3.1. A TRITEL űrdózimetriai teleszkóp

A félvezető szilícium detektoros mérőrendszerek alapelve a sugárzás hatására a kiürített rétegben keletkező töltésmennyiség kigyűjtése. A detektor érzékeny térfogata a kiürített réteg, ahol a beérkező, sugárzásból elnyelt energia hatására elektron-lyuk párok keletkeznek, valamint az anyag elektronjai gerjesztődnek. Az átlagos energia, amely szükséges elektron-lyuk pár keltéséhez a szilícium esetében 1,1 eV. A keletkezett töltéshordozók a megfelelő, ellentétes töltésű elektródák felé vándorolnak a jelenlévő elektromos mező hatására. A kigyűjtött töltésmennyiség arányos az érzékeny térfogatban leadott energiával, így kalibrációt követően a

rendszer kimenetén mérhető jelamplitúdóból az elnyelt energia meghatározható. A mérőrendszer töltött részecskék és foton sugárzások detektálására egyaránt alkalmas.

A legújabb technológiával előállított detektor a PIPS (*Passivated Implanted Planar Silicon*, [22]). A teljesen kiürített rétegű detektorok esetében a kiürített réteg kiterjed a detektor teljes térfogatára.

A TRITEL egy háromtengelyű szilícium detektoros teleszkóp, amely hat, teljesen kiürített rétegű, PIPS detektort tartalmaz (lásd 13. ábra). Minden egyes tengelyen két, egymás mögött, párhuzamosan elhelyezkedő szilícium detektor található, melyek „ÉS” kapcsolatban vannak egymással, ezáltal lehetővé téve a koincidencia méréseket.



**13. ábra: A háromtengelyű teleszkóp elrendezés (balra: teleszkóp tengelyek; jobbra: a három tengely együttes érzékenysége (virtuális gömbre rajzolt relatív hatások 0, 20, 40, 60, 80%, 100%-os értékeknek megfelelően), [23])**

A leadott energia spektrum kiértékelésével az elnyelt dózis, LET-spektrum három tengelyre (*LET – Lineáris Energiaátadási Tényező*), a sugárzás minőségi tényezője és a dózisegyenérték határozható meg. A számítások során a szilíciumban mért LET-spektrumot átkonvertálhatjuk emberi szövetre érvényes LET-spektrummá.

A teleszkóp elrendezés nem teszi lehetővé az egyes részecskék pontos beérkezési irányának meghatározását, azonban a kozmikus sugárzás szögeloszlásában tapasztalható aszimmetria kimutatására már alkalmas. További nagy előnye a detektorok ilyen jellegű elrendezésének a közelítőleg egyenletes összesített érzékenység a teljes  $4\pi$  térszögben.

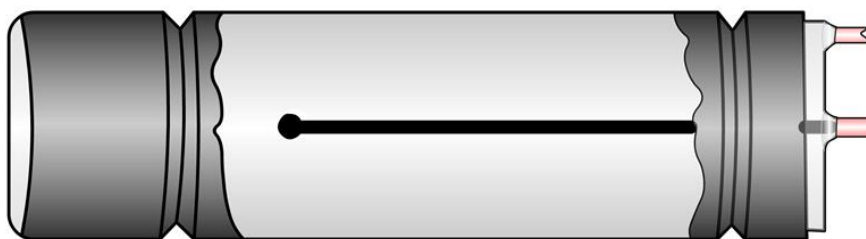
Az effektív felülete az egyes detektoroknak  $220 \text{ mm}^2$ , vastagságuk pedig  $300 \text{ }\mu\text{m}$ . A legfontosabb geometriai paramétereit a TRITEL teleszkópnak a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: A TRITEL teleszkóp főbb paramétereit [24]

Paraméter	Érték
a detektorok effektív sugara (r)	8,4 mm
a detektorok effektív felülete (A)	220 mm <sup>2</sup>
a detektorok közötti távolság az egyes tengelyek esetében (p)	8,9 mm
a detektor távolság és sugár aránya ( $q = p/r$ )	1,06
geometriai faktor, G (egyetlen tengely esetében $4\pi$ térszögre)	5,1 cm <sup>2</sup> sr
maximális belépési szög (egy detektor párra nézve)	62,1°
minimális úthossz a detektorban (kiürített réteg vastagsága, w)	300 $\mu$ m
átlagos úthossz a detektorban (izotróp mező esetében)	361 $\mu$ m
maximális úthossz a detektorban (maximális belépési szög esetében)	641 $\mu$ m
maximális és minimális úthosszak aránya	2,14

### 5.3.2. Geiger-Müller számlálók

A Geiger-Müller számlálók a legelterjedtebb sugármérő műszerek a mindennapi használatban. Ennek legfőbb oka a könnyű használhatóság, olcsóság, egyszerű elektronikai felépítés és viszonylag nagy érzékenység. A GM-számláló képes detektálni alfa-részecskéket, elektronokat ( $\beta$ -sugárzást), röntgen- és gamma-sugárzást.



14. ábra: A Geiger-Müller számláló felépítése

A GM-számláló egy egyszerű gáztöltésű cső, melynek a tengelyében fut az anódszál és a váz jelenti magát a katódot (lásd a 14. ábrán). A cső általában neon–argon keverékkel van alacsony nyomáson töltve, ehhez kismennyiségű klór vagy brómot kevernek (a gáz fajtája és összetétele típusonként változó). A beérkező töltött részecskék ionizálják a töltőgáz részecskéit pályájuk mentén, a keletkezett töltéshordozók pedig az elektromos térerősségnek megfelelően

az anódra és a katódra vándorolnak. Az alkalmazott nagyfeszültségnek köszönhetően a keletkezett ionok annyira felgyorsulhatnak, hogy pályájuk mentén további ionizációra képesek, mindennek eredményeképpen egyetlen beérkező részecske hatására is egy töltéslavina indul el, amely olyan nagy ( $\sim V$  nagyságrendű) jelet ad, hogy nincs szükség további elektronikai erősítésre sem. A fotonugárzás esetén a cső a GM-számláló falában vagy a töltőgázban a fotonugárzás hatására keletkező elektronokat detektálja.

### 5.3.3. Passzív szilárdtest detektorok (Pille)

Az űrhajósok dózisének mérésére leggyakrabban termolumineszcens (TL) dózismérőket



15. ábra: A Pille dózismérő

használnak. Ennek a legfőbb oka egyszerűségük, olcsóságuk, illetve az a tény, hogy csak a kiértékelés során igényel energiát. A technológia egyik úttörője a hazánkban kifejlesztett Pille mérőrendszer, mely napjainkban is a Nemzetközi Űrállomás szolgálati rendszerének a része [25]. A TL dózismérők detektora egy kristályos termolumineszcens anyag (lásd 15. ábra), amely a kozmikus sugárzásból elnyelt energia egy részét eltárolja.

A TL kristály melegítés hatására az elnyelt energiát fény formájában bocsátja ki, a kibocsátott fény mennyisége arányos az elnyelt sugárzási energiával, így végső soron a kapott dózissal. A kifűtéskor kibocsátott fény mérésével tehát közvetlenül meghatározható az elnyelt dózis. A módszernek ugyanakkor jelentős hátránya, hogy a kiértékeléshez külön, általában nagyméretű, csak laboratóriumokban használt berendezésre van szükség. Korábban csak az űrutazásból történt visszatérés után, a földön mérték meg az űrhajósok dóziséit. A kisméretű, kis fogyasztású Pille rendszer kiértékelője lehetővé tette a dózismérők űrállomás fedélzeti kiértékelését is, így operatívvá vált a TL dózismérés.

A TL dózismérő rendszerek csak az elnyelt dózis mérésére alkalmasak; az ionizáló sugárzás biológiai hatásának jellemzésére használt dózisegyenérték meghatározásához ugyanakkor a lineáris energiaátadás eloszlás, más néven LET-spektrum ismeretére is szükség van. A LET-spektrum meghatározása és a valós idejű mérések megvalósítása érdekében kezdődött a TRITEL fejlesztése évekkel ezelőtt az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézetben, majd folytatódott ennek utódjában, az MTA EK-ban [26].

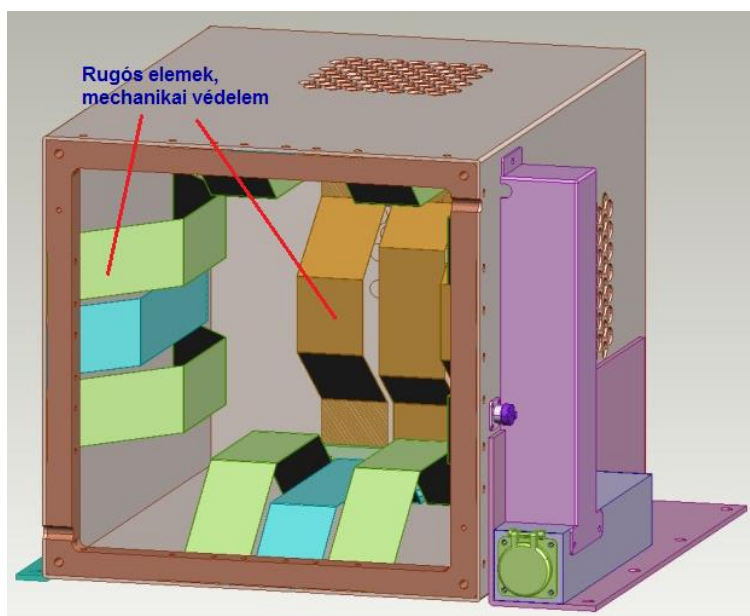


## 6. A TECHDOSE kísérlet megvalósítása a műszaki és tudományos követelmények szempontjából

### 6.1. Műszaki követelmények és megvalósítás

Az 5.1 fejezetben már tárgyaltam a szigorú környezeti feltételeket, melyeknek a küldetés során meg kellett felelni, illetve az 5.2 fejezet végén egy funkcionális összefoglalását adtam a kísérlet felépítésének. Jelen dolgozat keretein belül nincs lehetőségem részletekbe menően kitérni a tervezés során végzett teljes munkámat, így csupán az eredményét, illetve a főbb szempontokat összegzem.

A mechanikai védelem szempontjából két kritikus elemet határoztam meg: az egyik a TRITEL, hiszen mechanikailag érzékeny szilícium detektorokat tartalmaz; míg a másik a GM-csővek, mivel a gyártó nem biztosít megfelelő leírást a belső szerkezetükről. A TRITEL védelme érdekében egy – a magyar űrkutatásban már korábban alkalmazott – filccel borított rugós rendszer használatát javasoltam, melyet a 16. ábra szemléltet. A rugós elemek fogták közre a TRITEL egységet, elnyelvén a mozgási energiáját és átalakítva rugalmas energiává, így csillapítva a TRITEL-t érő gyorsulások hatását.

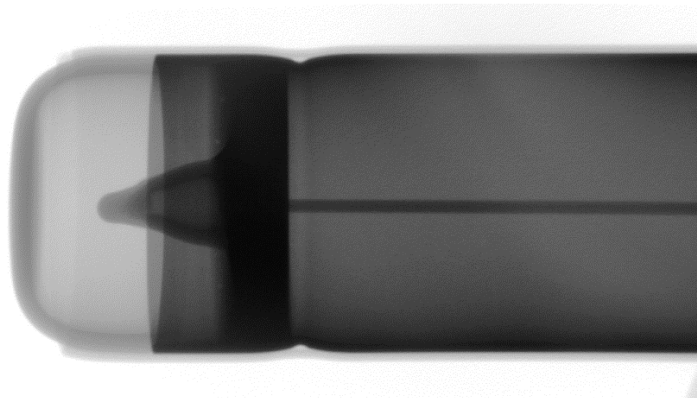


16. ábra: A TRITEL mechanikai védelme [28]

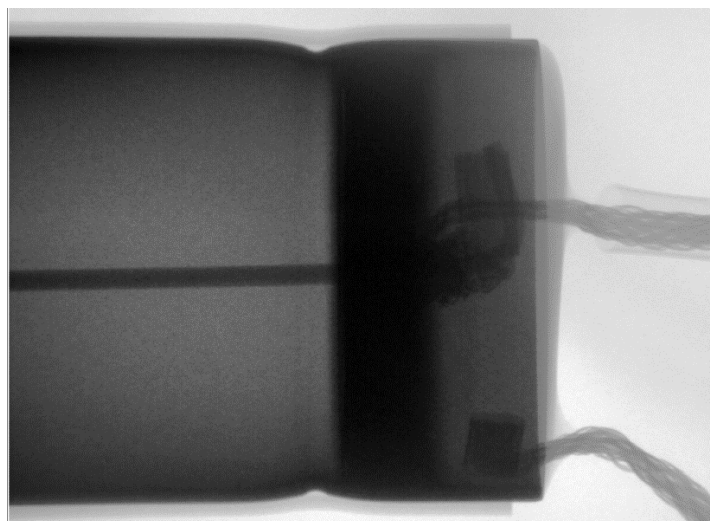
Kísérleti mérésekkel határoztam meg a szükséges rugók erősségét, melyek akár a +/-25g gyorsulás ellen is képesek megvédeni a TRITEL rendszert.

A GM-csővek esetében a belső felépítés vizsgálatára koncentráltam annak kiderítése érdekében, hogy pontosan milyen az anódszál rögzítése, nehogy kiszakadhasson a helyéről a

nagy gyorsulások hatására. A vizsgálathoz 100 kV-os röntgenfeszültségű, anyagvizsgálatra alkalmas diagnosztikus röntgenkészülékkel világítottam át a csöveket, melyek eredményeit a 17-18. ábrákon mutatom be.



**17. ábra: A ZP1210-es GM-cső feji végének belső szerkezete [28]**



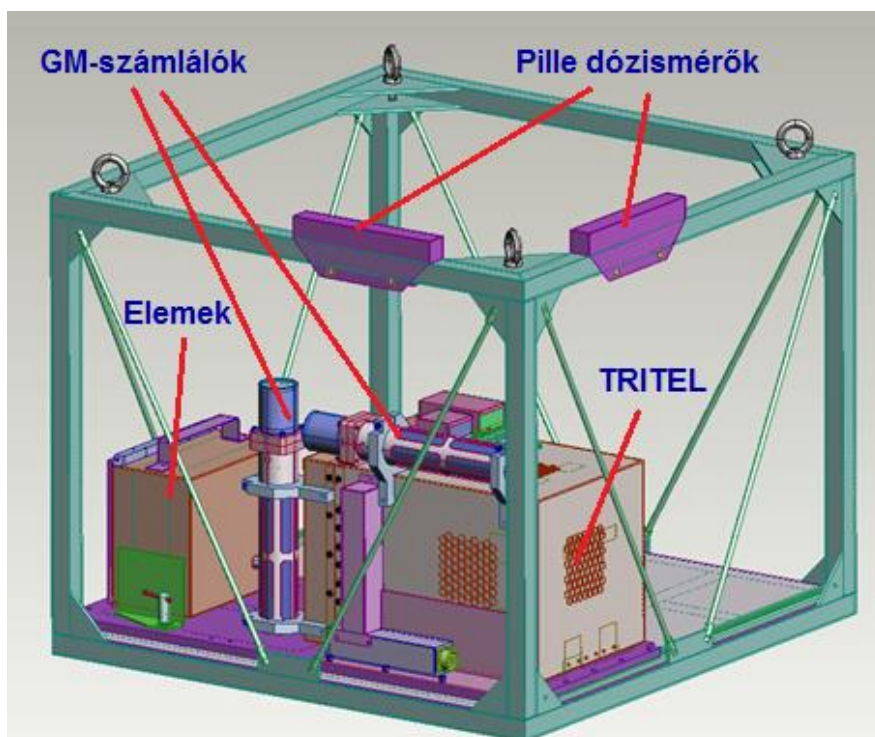
**18. ábra: A ZP1210-es GM-cső csatlakozási végének belső szerkezete [28]**

A 17-18. ábrákon jól kivehető a belső anódszál és annak rögzítése. A felbontás alapján megbecsülhető, hogy az anódszál vastagsága mintegy 1,2 mm. Az adatlapjáról tudható, hogy az anyaga króm és vas ötvözet. Mivel az ötvözet pontos összetétele, és így sűrűsége sem ismert, így a vas – némileg nagyobb, de konzervatív becslésnél elfogadható – sűrűségét felhasználva ( $7,87 \text{ g/cm}^3$ ) az anódszál tömegére 0,6 g adódik, amely még +/-25g esetében is elhanyagolható terhelésnek felel meg, amit a röntgenképeken látható forrasztott kötési pontoknak bírniuk kell (anódszál rögzítése) az ESA ajánlásai alapján.

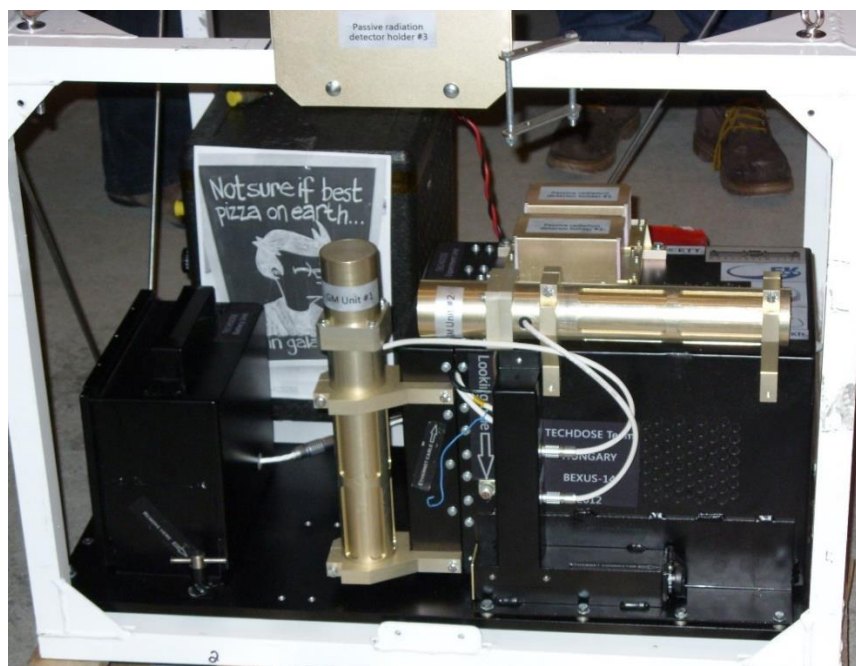
A kísérlet termikus egyensúlyának, azaz a megadott hőmérséklettartományban való tartásának biztosítása érdekében összetett termikus védelmi rendszert dolgoztam ki, mely

tartalmazott passzív elemeket (hőszigetelés a megfelelő helyeken), valamint aktív elemeket (a kritikus egységek fűtése).

A munka eredményeképpen elkészült mechanikai elrendezést összesíti a 19. ábra, melyen jól kivehető a kísérleti berendezés minden egyes részlete a gondolába beszerelt állapotban. A 20. ábrán egy fotó látható az elkészült kísérleti berendezésről.



19. ábra: A TECHDOSE kísérleti berendezés modellje [28]



20. ábra: Az elkészült TECHDOSE kísérleti berendezés a felbocsátás előtt

## 6.2. A tudományos követelmények: adatkiértékelés kidolgozása a TECHDOSE küldetésre

A küldetés kidolgozása során egyik legfontosabb feladatom volt a számos, alkalmazott mérőműszer esetében a tervezett adatkiértékelési eljárások kidolgozása. Az eredményeket röviden a következő néhány alfejezetben foglalom össze.

### 6.2.1. *Méréstechnika a Pille dózismérők esetében*

A rendelkezésre álló Pille dózismérők közül néhányat kiválasztottam referencia dózismérőnek, míg a többit kijelöltem a repülésre. A referenciák maradtak a felszínen a küldetés alatt és a felszínen mérhető háttér értékét rögzíthettük a segítségükkel. A repülésre kijelölt dózismérőket lehetőség szerint a kísérleti berendezés belsejében, különböző helyeken és eltérő orientációban helyeztem el, hogy lehetséges legyen az esetleges különbségek vizsgálata is (irányfüggés kimutatása, valamint a kísérlet egyes helyein eltérő árnyékolás hatásai).

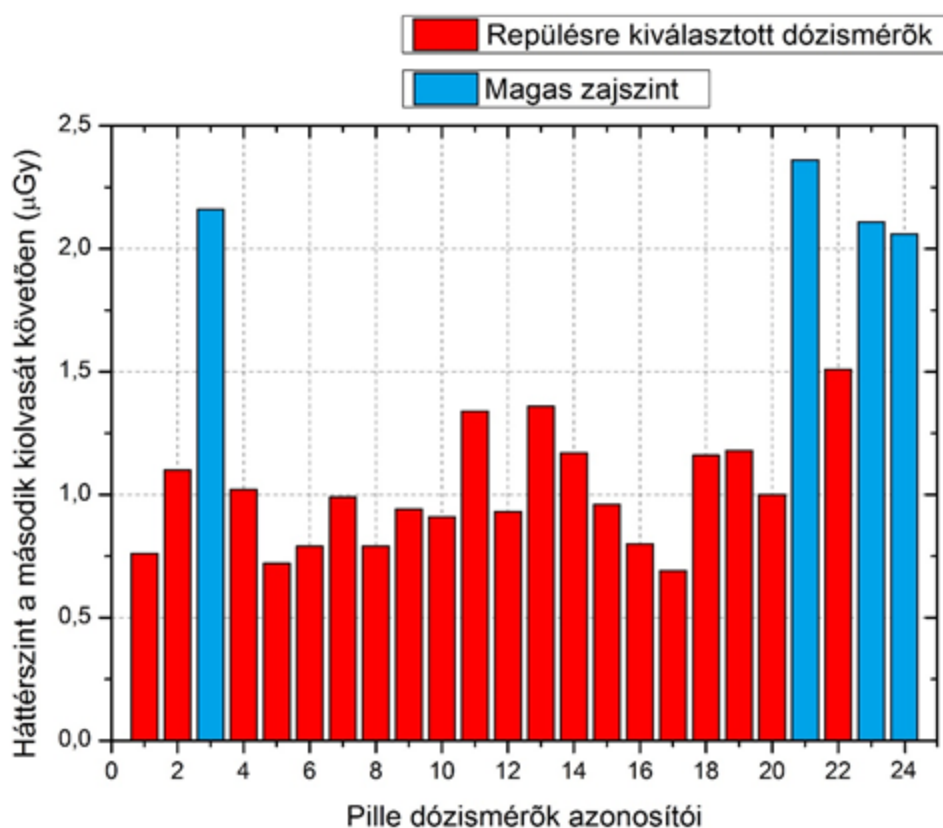
Minden egyes dózismérőt kalibrálni kellett az MTA EK laboratóriumában  $^{137}\text{Cs}$  forrással. A kalibrált dózismérőket a repülés előtti utolsó lehetséges időpontban kiolvastam kétszer is, ezáltal törölvén a TL kristályban addig összegyűlt sugárzási energiát. A repülést követően ismét kiolvastam őket kétszer. Az első kiolvasás eredménye megadta a repülés során és a talajon kapott dózist, amelyet még korrigálni kellett a talajon kapott háttér értékével a referencia dózismérők mérése alapján. A második kiolvasás a zajszint ellenőrzésként szolgál, melynek eredménye az adott dózismérő korábban meghatározott átlagos zajszintjének közelében kell legyen.



21. ábra: A Pille dózismérők kalibrálása. A baloldali kép a kalibráló sugárforrás időzítője, a jobboldalon láthatók a Pille készülék bura dózismérői



A kalibrációs méréseket el is végeztem (lásd 21. ábra), melyek legfontosabb eredménye az egyes dózismérők második kiolvasás után mérhető zajának értéke (elméletileg további kiolvasásokkal ez a háttér még csökkenthető). Úgy választottam ki a repülésre szánt dózismérőket, hogy ez a zajszint a lehetőség szerint minimális legyen, hiszen a küldetésben viszonylag rövid idejű mérésre kellett készülnöm a Pille dózismérők tipikus felhasználásaihoz képest (az úrállomáson hónapokig is mérnek egy-egy Pille dózismérővel). A kiválasztott dózismérők átlagos zaja  $1,15 \pm 0,44 \mu\text{Gy}$  volt (tehát hibahatáron belül  $2 \mu\text{Gy}$  alatt), az eredményeket a 22. ábra foglalja össze.

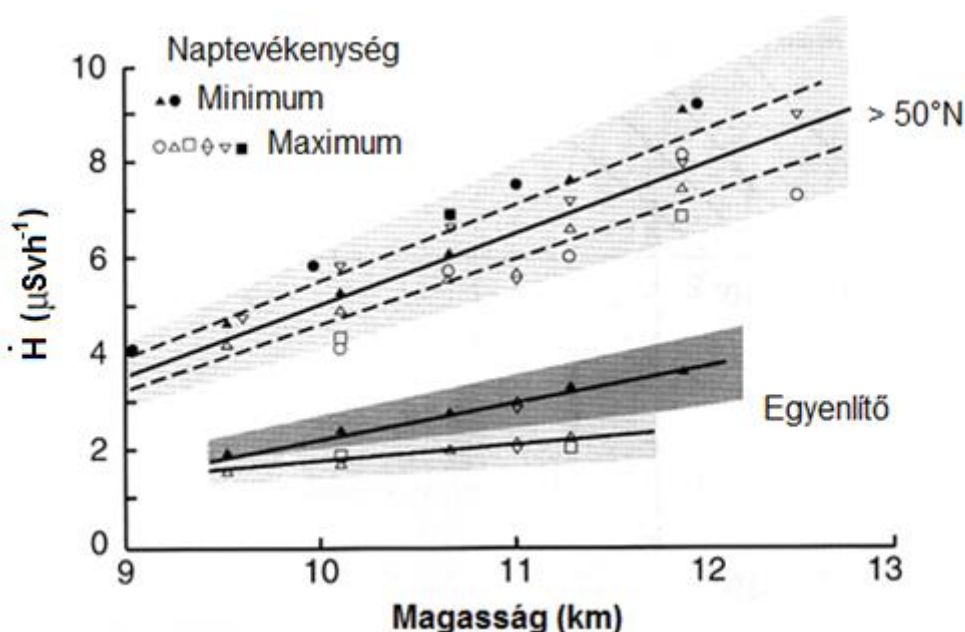


22. ábra: A Pille dózismérők zajszintje a második kiolvasást követően

A háttér vizsgálata kapcsán előzetesen irodalmi adatokra támaszkodva igyekeztem becsléseket végezni a várható Pille mérési eredményekre vonatkozólag egy tipikus (mintegy 4-6 óra hosszú) BEXUS sztratoszférikus repülés esetére annak bizonyítására, hogy a Pille dózismérők alsó méréshatára legalább egy nagyságrenddel alacsonyabb, mint a várható dózistöbblet a TECHDOSE kísérlet során. A ballonkísérletre TL anyagként  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  szolgált a Pille dózismérőkben. Ezt a TL anyagot használva a Pille rendszer mérési tartománya dózisban kifejezve  $\sim 2 \mu\text{Gy}$ -tól kezdődik és mintegy 10 Gy a felső határa (ekkor egyedi utókalibrációra van szükség). A mérés bizonytalansága  $10 \mu\text{Gy}$  felett 5% alatt van  $^{137}\text{Cs}$  forrással kalibrálva

[27]. Mindennek ismeretében azt kellett megvizsgálnom, hogy a várható elnyelt dózis egy tipikus sztratoszférikus repülés során meghaladja-e a  $10 \mu\text{Gy}$ -t.

Korábban Concorde repülőgépek fedélzetén végzett mérésekből ismert [29], hogy az átlagos dózisteljesítmény 1976 és 1983 között megközelítőleg 18 km-es magasságban mintegy  $11,2 \mu\text{Svh}^{-1}$ -nak adódott (a repülések nem korlátozódtak földrajzilag egyetlen régióra, így ez az érték egyben térbeli átlagnak is tekinthető). Orosz szuperszonikus repülések adatai is elérhetőek az irodalomban, melyek azonos magasságban mintegy  $10\text{-}12 \mu\text{Svh}^{-1}$  értéket adnak [30]. A 23. ábra az ezekhez hasonló mérési eredményeket foglalja össze (a naptevékenységet is külön feltüntetve).



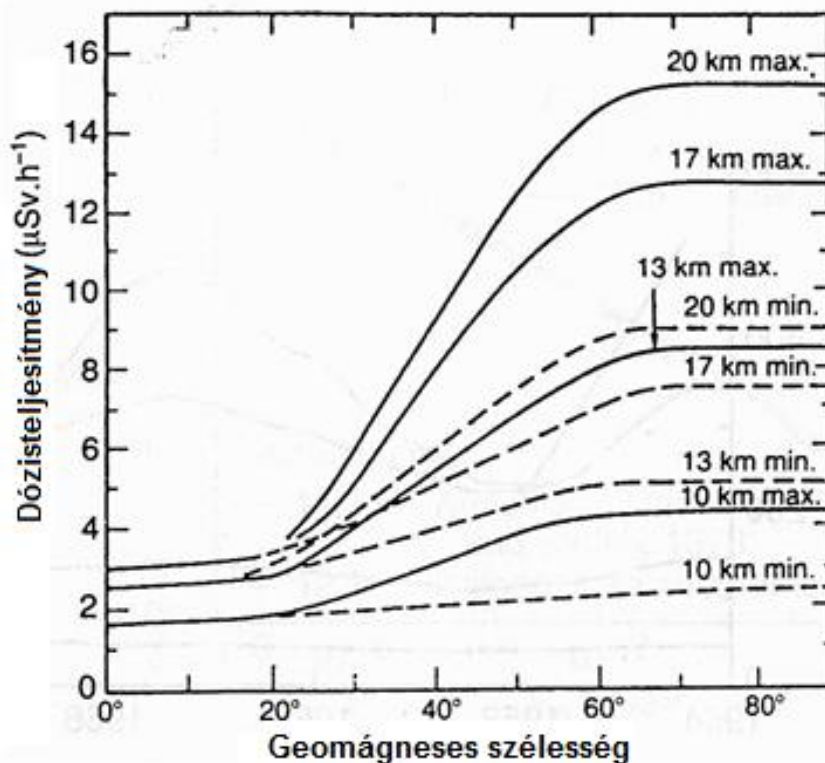
**23. ábra: Tipikus dózisteljesítmény értékek szuperszonikus repülési magasságokon [30]**

15 km felett a mérhető dózisteljesítmény jelentős növekedést mutat [29]. Egy tipikus BEXUS repülés emelkedési szakasza maximum 1,5-2 órát vehet igénybe, míg az ereszkedés mintegy 0,5-1 óra hosszan tarthat (kisebb része a levágás utáni szabadesés, melyet ejtőernyős fékezés követ). A 23. ábrán látható mérési eredmények alapján az emelkedés és ereszkedés során mintegy  $3\text{-}10 \mu\text{Svh}^{-1}$  dózisteljesítményt mérhetünk majd mintegy  $5 \mu\text{Svh}^{-1}$  átlagos értékkel. Összesen 2,5 óra teljes időt feltételezve az emelkedés és ereszkedés időtartamára együttesen  $7,5\text{-}25 \mu\text{Sv}$  tartományban várhatóak a mérési eredmények  $12,5 \mu\text{Sv}$  átlagos értékkel.

Kísérleti eredményekből ismert, hogy a mérhető dózisteljesítmény a sztratoszférában a naptevékenység maximuma idején mintegy 40%-kal is lecsökkenhet a naptevékenység minimumához viszonyítva [31]. Ez a folyamat a naptevékenység maximuma idején



bekövetkező galaktikus kozmikus sugárzás gyengülésének tudható be. A 24. ábra a maximális és minimális dózisteljesítményt mutatja a geomágneses szélesség függvényében.

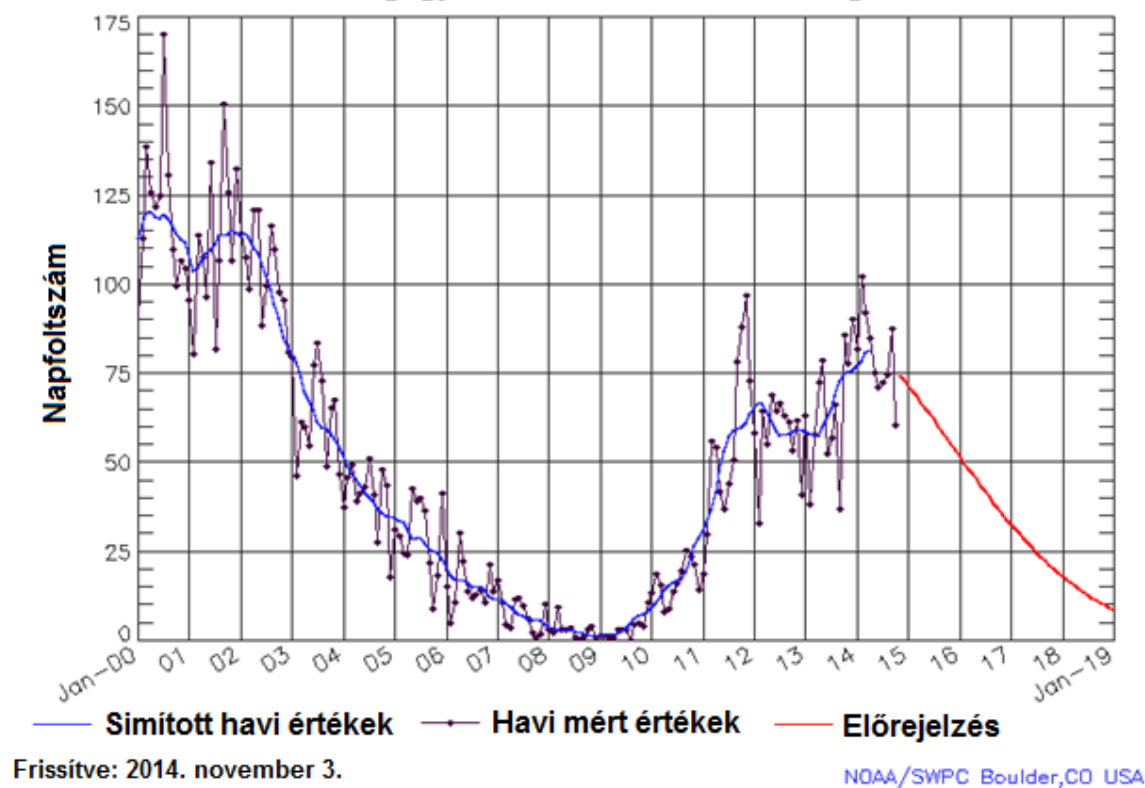


**24. ábra: A maximális és minimális dózisteljesítmény értékek a geomágneses szélesség függvényében különböző tengerszinttől mért magasságokra vonatkozólag (Megjegyzés: A maximum és a minimum a naptevékenységre utal.) [31]**

A NASA megfigyelési alapján erős naptevékenységre kellett számítanunk a BEXUS-14 repülése során (<http://www.swpc.noaa.gov/SolarCycle/>). A ciklus változása a 25. ábrán követhető nyomon, melyen látható, hogy 2012-ben egy meglehetősen gyenge maximum volt tapasztalható.

## ISES Naptevékenységi Előrejelzés

Megfigyelési adatok: 2014. októberig



25. ábra: ISES naptevékenységi adatok és előrejelzés 2000 és 2019 között

Általában a BEXUS repülések során a ballonok mintegy 1-6 órát töltenek [21] stabilan a repülési magasságban (25-35 km-es tartományban). Figyelembe véve a naptevékenységi előrejelzést 2012-re vonatkozólag (amikor a repülés előtt ezt az elemzést elvégeztem még csupán a naptevékenységi előrejelzés állt rendelkezésemre, amelyet a piros görbe szemléltet a fenti ábrán) a 23. ábra alapján a minimális dózisteljesítmény  $9-16 \mu\text{Sv h}^{-1}$  tartományban várható. Figyelembe véve a tipikus repülési időket mintegy  $9-96 \mu\text{Sv}$  lesz a várható mérési eredmény.

A számítások kapcsán meg kell említenem, hogy a  $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$  TL anyag gyakorlatilag érzéketlen a sugárzás neutron komponensére, azonban a sztratoszférában a dózisteljesítmény mintegy 40%-a származik a neutron komponensből [4], így a fenti becsléseimet ezzel az értékkel korrigálnom kellett.

Összefoglalva az eddigi becsléseket az emelkedés, repülés és ereszkedés szakaszára együttesen, azt várhatjuk egy tipikus BEXUS repülés során, hogy a Pille dózismérők megközelítőleg  $10-100 \mu\text{Sv}$  tartományban fognak mérni, amely egyértelműen a korábban megfogalmazott kívánatos alsó határ ( $10 \mu\text{Gy}$ ) felett van.



Érdeemes külön megemlítenem, hogy egy váratlan napkitörés esetén, amely éppen a BEXUS repülés alatt érné el a Földünket, a dózisteljesítmény 20 km-es magasságban elérhetné a  $30 \text{ mSv h}^{-1}$  értéket is [4]! Ha különlegesen magas elnyelt dóziseket mérnénk a Pille dózismérővel, akkor hasonló [4] naptevékenységi eseményre következtethetnénk majd belőle.

### 6.2.2. Méréstechnika és adatkiértékelés a TRITEL esetében

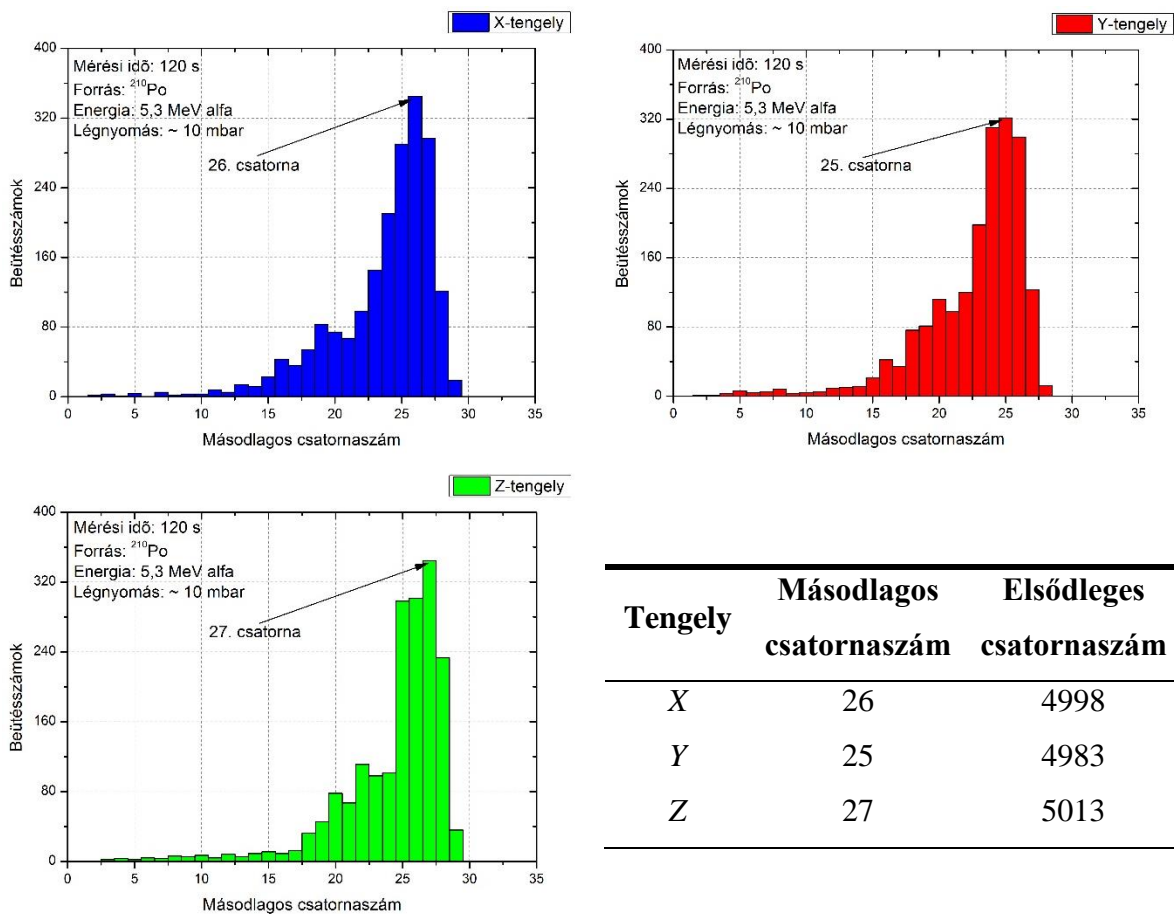
A TRITEL-t kalibrálni kell a repülés előtt a detektorokban leadott energia függvényében, amelyhez  $^{210}\text{Po}$  és  $^{241}\text{Am}$  források álltak rendelkezésemre. A polónium 5,3 MeV-es alfa energiáját használtam fel, így ezt a mérést vákuum kamrában kellett elvégezni, míg az amerícium esetében az 59 keV-es gamma energiáját detektáltam, így kaptam egy mérési pontot a TRITEL alsó mérési határa közelében is. (A TRITEL teljes mérési tartománya leadott energiában kifejezve mintegy 50 keV és 70 MeV közé tehető, melyet azonban a detektorok és az elektronika hőmérséklete befolyásolhat). A műszer elektronikájában alkalmazott többszörös analízátor  $2^{16}$  csatornáját előre definiált táblázatok segítségével (*LUT táblázatok – Look-Up-Table*) válthatjuk át 128 csatornás kvázi-logaritmikus spektrumokra. A 128 csatornás felbontást hívjuk másodlagos csatornaszámnak, míg a többszörös analízátor által közvetlenül meghatározott számozást nevezzük elsődleges csatornaszámnak. A LUT táblázat a másodlagos csatornák alsó határait tartalmazza elsődleges csatornaszámban kifejezve. A repülésre kiválasztott LUT táblázatot a 4. táblázat mutatja.

4. táblázat: A BEXUS repülés során alkalmazott TRITEL LUT táblázat

sz	p	sz	p	sz	p	sz	p	sz	p	sz	p	sz	p
0	56	16	123	32	294	48	722	64	1788	80	4458	96	11123
1	57	17	130	33	311	49	764	65	1893	81	4720	97	11778
2	60	18	137	34	329	50	808	66	2004	82	4997	98	12471
3	63	19	145	35	348	51	855	67	2122	83	5291	99	13205
4	66	20	153	36	368	52	905	68	2246	84	5602	100	13982
5	69	21	161	37	389	53	958	69	2378	85	5931	101	14805
6	73	22	170	38	411	54	1014	70	2518	86	6280	102	15676
7	77	23	179	39	435	55	1073	71	2666	87	6649	103	16599
8	81	24	189	40	460	56	1136	72	2823	88	7040	104	17576
9	85	25	200	41	487	57	1202	73	2989	89	7454	105	18611
10	90	26	211	42	515	58	1272	74	3165	90	7893	106	19707
11	95	27	223	43	545	59	1346	75	3351	91	8357	107	20867
12	100	28	236	44	577	60	1425	76	3548	92	8849	108	22096
13	105	29	249	45	610	61	1508	77	3756	93	9370	109	23397
14	111	30	263	46	645	62	1596	78	3977	94	9921	110	24775
15	117	31	278	47	682	63	1689	79	4211	95	10505	111	26234
												127	65535

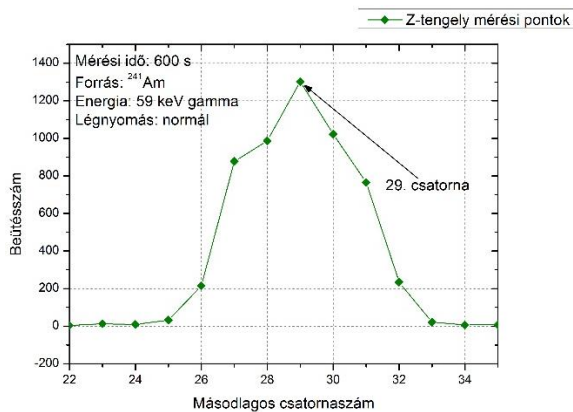
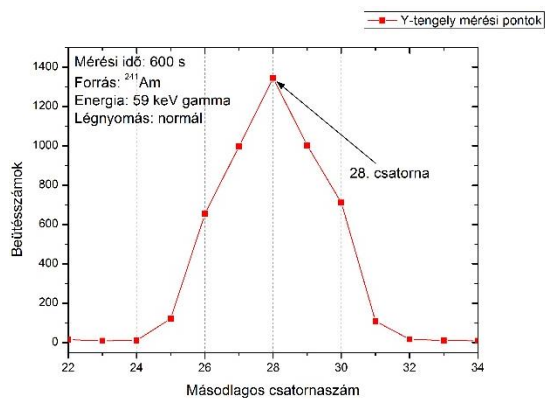
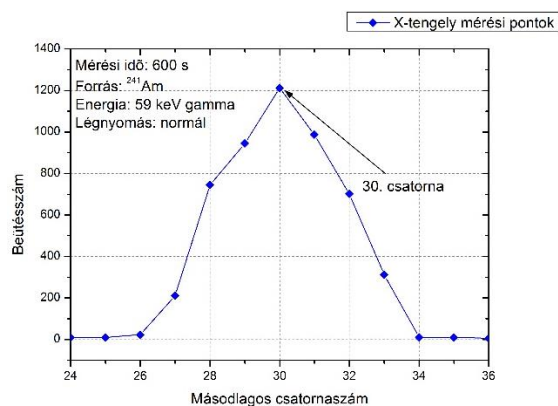
A polóniummal végzett méréseim során egy speciális házat használtam a TRITEL-en, ahol a detektorok előtt el van távolítva az alumínium ház, így a forrást közvetlenül tudtam a detektorok elé helyezni. A vákuumkamrában a nyomást mintegy 10 mbar-ig lecsökkentettem,

majd mindhárom tengelyre felvettem a mérhető spektrumokat. Az eredmények a 26. ábrán láthatóak. A mérésekhez a 6-os számú LUT táblázatot használtam, amely az alábbi felbontást követi: 4600, 4615, 4630, 4645, ..., 6490, 6505 (ennek segítségével éppen az 5,3 MeV energia közelében érhettem el a mérőrendszer nagyobb felbontását). Az egyes tengelyek színekódolása a dolgozatban mindig a következő formalizmust követi: X-tengely esetében kék, Y-tengely (zenit irány) esetében piros, Z-tengely esetében pedig zöld szín.



**26. ábra: TRITEL kalibrációs eredmények  $^{210}\text{Po}$  forrással**

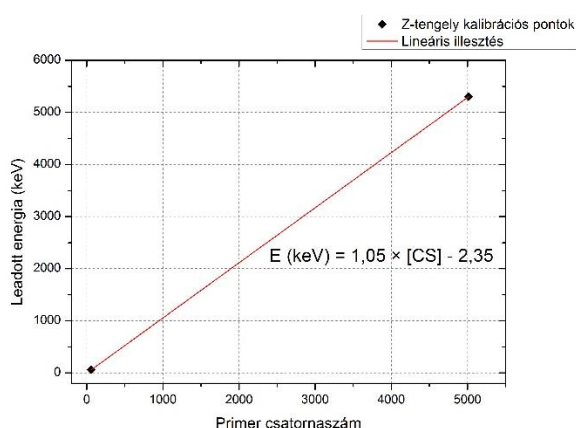
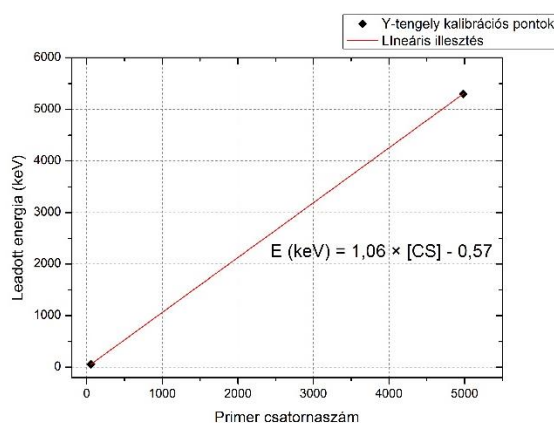
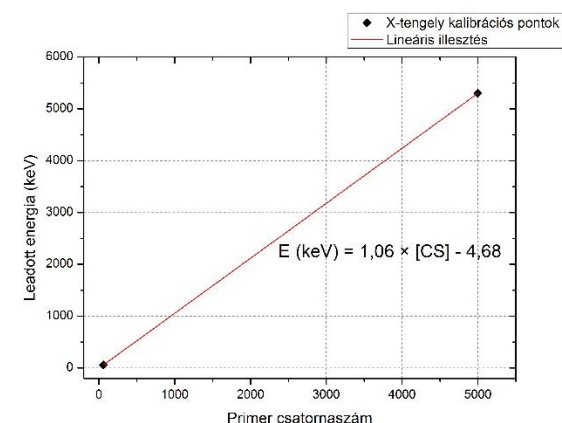
Ezt követően elvégeztem hasonlóan mindhárom tengelyre egy mérést az amerícium forrással is (szabad levegőn), melynek az eredményeit a 27. ábrán mutatom be. A mérés során az alkalmazott TRITEL mechanika az amerícium alfa részecskéit leárnyékolta (az amerícium 5,6 MeV energiával alfa részecskéket is kibocsát), így tulajdonképpen csak az 59 keV-es gamma energiát mértem. A mérésekhez az 1-es számú LUT táblázatot használtam, amely az alábbi felbontást követi: 0, 2, 4, 6, ..., 252, 254 (ennek segítségével éppen az energiataromány legalsó részében érhettem el a mérőrendszer nagyobb felbontását, ahol az 59 keV energia megjelenését vártam).



Tengely	Másodlagos csatornaszám	Elsődleges csatornaszám
X	26	60
Y	25	56
Z	27	58

27. ábra: TRITEL kalibrációs eredmények  $^{241}\text{Am}$  forrással

Az így kapott mérési pontokra egyenest illesztve megkaptam a három kalibrációs egyenest, amelyek definiálják a leadott energia és a csatornaszám közötti összefüggést az egyes tengelyek detektoraiban. A kalibrációs eredmények az egyes TRITEL tengelyekre 28. ábrán láthatóak.



Tengely	Kalibrációs egyenes egyenlete
X	$E \text{ (keV)} = 1,06 \times [\text{CS}] - 4,68$
Y	$E \text{ (keV)} = 1,06 \times [\text{CS}] - 0,57$
Z	$E \text{ (keV)} = 1,05 \times [\text{CS}] - 2,35$

**28. ábra: A TRITEL kalibrációs egyenesek az egyes tengelyekre vonatkozólag**

A kalibrációs eljárás kapcsán feltétlenül meg kell említenem, hogy a kalibrációs egyeneseket csupán két – a méréstartomány alsó tizedében lévő – mérési pont alapján határoztam meg, mivel nem volt lehetőségem további (a detektorban nagyobb energiát leadó) forrásokkal méréseket végezni. A jövőbeli TRITEL mérések kapcsán mindenképpen javasolt a kalibrálást gyorsítóban végzett mérésekkel is kiegészíteni. Ilyen mérésekre lesz talán lehetőség 2015 során.

A kalibrációs eredményekre támaszkodva a küldetés után számos dozimetriai mennyiséget határozhatunk meg az egyes tengelyekre vonatkozólag. Ezek számítási eljárásait foglalom össze röviden az alábbiakban [24].

A 128 kvázi-logaritmusos csatorna mindegyikének megfeleltethető egy  $\Delta E_i$  ( $i = 0 \dots 127$ ) energiataromány. A koincidencia módban rögzített spektrum segítségével minden egyes csatorna értékhez egy LET értéket rendelhetünk. Első közelítésben (izotróp sugárzás esetén) a szilíciumban megadott LET érték a következőképpen számítható:

$$LET_{Si,i} = \Delta E_{coinc,i} / x_{avg}, \quad (16)$$



ahol  $\Delta E_{coinc,i}$  a leadott energia az  $i$ -dik csatornában a koincidencia spektrum esetében,  $x_{avg}$  a részecskék az átlagos úthossza a szilícium detektorban (a teleszkóp geometriája határozza meg).

Az elsődleges spektrum integrálásával (avagy felösszegezzük a beütéseket a spektrumban a  $\Delta E_i$  értékekkel súlyozottan) a szilíciumban elnyelt energiához, majd a vonatkozó tömeggel osztva a dózishoz juthatunk. Számunkra azonban a szövetben elnyelt dózis meghatározása a cél, amelyet a következőképpen számíthatunk ki:

$$D_{tot} = \frac{1}{m_d} \sum_{i=0}^{127} c_{Si \rightarrow tissue}(\Delta E_i) \cdot N_i \cdot \Delta E_i, \quad (17)$$

ahol  $D_{tot}$  a szövetben elnyelt dózis,  $m_d$  a szilícium detektor tömege,  $c_{Si \rightarrow tissue}(\Delta E_i)$  a szilícium-szövet konverziós tényező,  $N_i$  a beütések száma az  $i$ -dik csatornában,  $\Delta E_i$  pedig a leadott energia az  $i$ -dik csatornának megfelelően az elsődleges spektrumban.

Definiálható egy átlagos minőségi tényező tetszőleges minőségű és energia eloszlású sugárzás esetére vonatkozólag. Ehhez egyszerre van szükségünk az elsődleges és a koincidencia spektrumokra:

$$\langle Q \rangle_k = \frac{H_{coinc,k}}{D_{coinc,k}}, \quad (18)$$

ahol  $D_{coinc,k}$  a  $k$ -dik tengelyre vonatkozó koincidencia spektrumból számított elnyelt dózis,  $H_{coinc,k}$  a  $k$ -dik tengelyre vonatkozó koincidencia spektrumból számított egyenérték dózis.  $D_{coinc,k}$  és  $H_{coinc,k}$  a fentebb már definiált változókkal az alábbi módon számítható ki:

$$D_{coinc,k} = \frac{1}{m_d} \cdot \sum_{i=0}^{127} c_{Si \rightarrow tissue}(\Delta E_{coinc,i}) \cdot N_{coinc,k,i} \cdot \Delta E_{coinc,i}, \quad (19)$$

$$H_{coinc,k} = \frac{1}{m_d} \cdot \sum_{i=0}^{127} q(LET_{H_2O,i}) \cdot c_{Si \rightarrow tissue}(LET_{Si,i}) \cdot N_{LET,k,i} \cdot LET_{Si,i} \cdot x_{avg}, \quad (20)$$

ahol  $N_{coinc,k,i}$  a  $k$ -dik tengelyre vonatkozó beütésszám az  $i$ -dik csatornában a koincidencia spektrumban,  $N_{LET,k,i}$  a  $k$ -dik tengelyre vonatkozó beütésszám a LET-spektrum  $i$ -dik csatornájában (amely megegyezik az  $N_{coinc,k,i}$  értékével). A  $c_{Si \rightarrow H_2O}(LET_{Si,i})$  jelenti a szilícium-víz konverziós tényezőt,  $LET_{H_2O,i}$  pedig az  $i$ -dik csatornához rendelhető vízben érvényes LET értéket:

$$LET_{H_2O,i} = c_{Si \rightarrow H_2O}(LET_{Si,i}) \cdot LET_{Si,i} \quad (21)$$

A  $q(LET_{H_2O,i})$  pedig a sugárzás minőségi tényezője, amelyet az alábbi egyenlet definiál (az ICRP – International Commission on Radiological Protection – által bevezetett minőségi tényező, amely az 1-1000 keV/ $\mu\text{m}$  tartományban értelmezett):

$$q(LET_{H_2O,i}) = \left\{ \begin{array}{ll} 1, & LET_{H_2O,i} < 10 \text{ keV} / \mu\text{m} \\ -2,2 + 0,32 \cdot LET_{H_2O,i}, & 10 \text{ keV} / \mu\text{m} < LET_{H_2O,i} < 100 \text{ keV} / \mu\text{m} \\ 300 / \sqrt{LET_{H_2O,i}}, & 100 \text{ keV} / \mu\text{m} < LET_{H_2O,i} \end{array} \right\} \quad (22)$$

Az elnyelt dózisos és az átlagos minőségi tényezők meghatározásával (minden egyes tengelyre) a szöveti egyenértékdózist határozhatjuk meg.

### 6.2.3. Adatkiértékelés a GM-számlálók esetében

A TECHDOSE kísérlet keretében javasoltam a lehetőséget, hogy a TRITEL rendszert bővítsük ki egy eltérő működésű elvű, de szintén aktívan üzemelő mérőegységgel összehasonlítási céllal, melynek legegyszerűbb megoldása Geiger-Müller számlálók alkalmazása. Így elsőként egészült ki a TRITEL járulékos GM-csőves mérőmodulokkal kiegészített változata. Két darab ZP1210-es típusú GM-számláló csatlakozott a TRITEL egységhez (a TRITEL elektronikája dolgozta fel és továbbította a GM-csövek mérési adatait is) a küldetésben, melyeket egymásra merőlegesen, függőleges és vízszintes tengellyel helyeztem el a kísérleti mechanikában (lásd 19. ábra) az irányérzékenység és a TRITEL tengelyeivel való összehasonlítás érdekében. A ZP1210 GM-csövek legfontosabb technikai adatait az 5. táblázatban foglaltam össze.

5. táblázat: A BEXUS repülésre kiválasztott GM-csövek adatai

GM-számláló típusa	ZP1210
Működési feszültség	500 V
Dózisteljesítmény tartomány	$3 \times 10^{-4} - 10$ mGy/h
CPS $10^{-2}$ mGy/h esetén ( $^{137}\text{Cs}$ forrás)	$110 \text{ s}^{-1}$
Becsült beütésszám-gyakoriság átlagos értéke a BEXUS repülésre vonatkozólag	$\sim 100 \text{ s}^{-1}$



## 7. Mérési eredmények a BEXUS-14 küldetésből

### 7.1. A TECHDOSE repülése a BEXUS-14 fedélzetén

A TECHDOSE kísérlet az ESRANGE űrbázisról bocsátották fel, amely Észak-Svédországban található, mintegy 50 km-re Kiruna városától a sarkkörön túl. A bázisra való megérkezés és a felbocsátás között alig telt el több, mint három nap, így a feladataimat – a csapatom tagjainak közreműködésével – szigorúan ütemezett rendben kellett elvégezniem. Elsőként integráltam a kísérletet a ballon gondolájába, majd rákapcsoltam a központi kommunikációs rendszerre és egy teljes funkcionális és kommunikációs tesztet futattam le, melynek keretében méréseket végeztem, adatokat töltöttem le és parancsokat küldtem a kísérletnek. Minden megfelelően üzemelt. A gondolán egy német csapattal osztoztunk, mely a gyors neutronok mérését tűzte ki célul. Az Űrügynökség szándékosan helyezte ezt a két kísérletet közös gondolára az eredmények későbbi összehasonlíthatósága érdekében.

A BEXUS-14 felbocsátására 2012. szeptember 24-én 13 óra tájékán került sor. Kitűnő időjárási körülmények közepette indították el a ballont. Mivel alig volt tapasztalható szélmozgás, így a ballon mindösszesen 50 km-re távolodott el a bázistól és a tiszta időben a levágást is láthattuk szabad szemmel megfigyelve. A repülés átlagos magassága mintegy 28,6 km volt. A repülés teljes időtartama alatt – fel- és leszállással együtt több, mint 5 óra – hibátlanul kommunikált a kísérlet, megérkeztek a mérési adatok és az előzetes feldolgozást végző szoftver segítségével az első eredményeket is élőben követhettem nyomon. A rákövetkező napon helikopter hozta vissza a gondolát, melyből kiszereztem a kísérleti berendezést, letöltöttem a teljes kísérleti memóriát és kiolvastam a passzív dózismérőket a helyszínen.

A küldetés sikerességét jól összegezhetjük a 6. táblázattal, ahol összefoglaltam a repülés során a kommunikációs adatokat. A TRITEL HK és TMP HK adatcsomagokat 2 percnként küldte a kísérlet, míg az idő- és energiaspektrumok 10 percnként érkeztek be.



6. táblázat: A TECHDOSE repülés kommunikációjának összefoglalása

<b>Kommunikáció kezdete</b>	2012-09-24 12:11:22 (CET)
<b>Kommunikáció vége</b>	2012-09-24 17:37:51 (CET)
<b>Kommunikáció teljes időtartama a kísérettel</b>	05:26:29 (19.589 s)
<b>Beérkezett TRITEL HK adatok*</b>	165 frame, 12 kB
<b>Beérkezett TMP HK adatok*</b>	167 frame, 4 kB
<b>Beérkezett TRITEL időspektrumok</b>	32 frame, 4 kB
<b>Beérkezett GM időspektrumok</b>	32 frame, 2 kB
<b>Beérkezett TRITEL energia spektrumok</b>	32 frame, 49 kB
<b>Teljes kommunikációs adatmennyiség</b>	<b>428 frame, 71 kB</b>

\*A TRITEL HK adatcsomagok a TRITEL belsejében lévő szenzorok mérési eredményeit tartalmazzák (hőmérsékletek, áramerősségek, feszültségek), míg a TMP HK adatcsomagok a TRITEL-en kívül a kísérlet különböző pontjaiban elhelyezett hőmérséklet szenzorok adatait tartalmazzák.

A kommunikációs összefoglaló táblázatból kitűnik, hogy 2 darab TRITEL HK adatcsomag veszett el csupán a teljes kommunikációs kapcsolat során. Az átlagos adatátviteli sebesség 0,29 kB/perc volt.

A 18 repülő és a 2 darab referencia Pille dózismérő kiolvasásának jellemzőit a 7. táblázat foglalja össze.

7. táblázat: A TECHDOSE kísérlet Pille adatok összefoglalása

<b>Kiolvasás időpontja a repülés előtt</b>	2012-09-24 08:30 (LT)
<b>Kiolvasás időpontja a repülés után</b>	2012-09-25 18:05 (LT)
<b>A kiolvasások között eltelt idő</b>	~ 33,5 óra
<b>Pille kiolvasásokból nyert adatmennyiség</b>	<b>~ 60 kB</b>

A kísérleti berendezés a repülés során a saját, belső elem egységéről üzemelt mintegy 34 órán keresztül. A fogyasztásra vonatkozó adatokat a 8. táblázatban foglaltam össze. A mért fogyasztás értékek azt mutatják, hogy a kísérlet stabilan üzemelt és a beépített elem egység fűtése megfelelően működött.

**8. táblázat: A TECHDOSE kísérlet fogyasztása a küldetés során**

<b>Energiafogyasztás időtartama a beépített elemekről</b>	34 óra
<b>Kísérlet bemeneti feszültsége</b>	28,5 V – 28,8 V
<b>Kísérlet áramfelvétele</b>	92 mA – 96 mA
<b>Kísérlet átlagos fogyasztása</b>	<b>2,6 W – 2,8 W</b>

Érdeemes kitérni a kísérlet termikus viselkedésére a repülés során, melyet számos hőmérő rögzített folyamatosan. A mérési adatokat 2 percenként kaptam meg a repülés irányító központjában, így folyamatosan nyomon tudtam követni repülés közben is a termikus állapotokat. Kilenc hőmérséklet szenzor mért a TRITEL belsejében és további hét szenzort helyeztem el a termikus tervezés során a kísérleti berendezés különböző pontjain. A hőmérséklet szenzorok elhelyezkedését és a repülés során mért eredményeket a 9. táblázatban foglaltam össze.

**9. táblázat: A TECHDOSE kísérleti berendezés termikus viselkedése a repülés során**

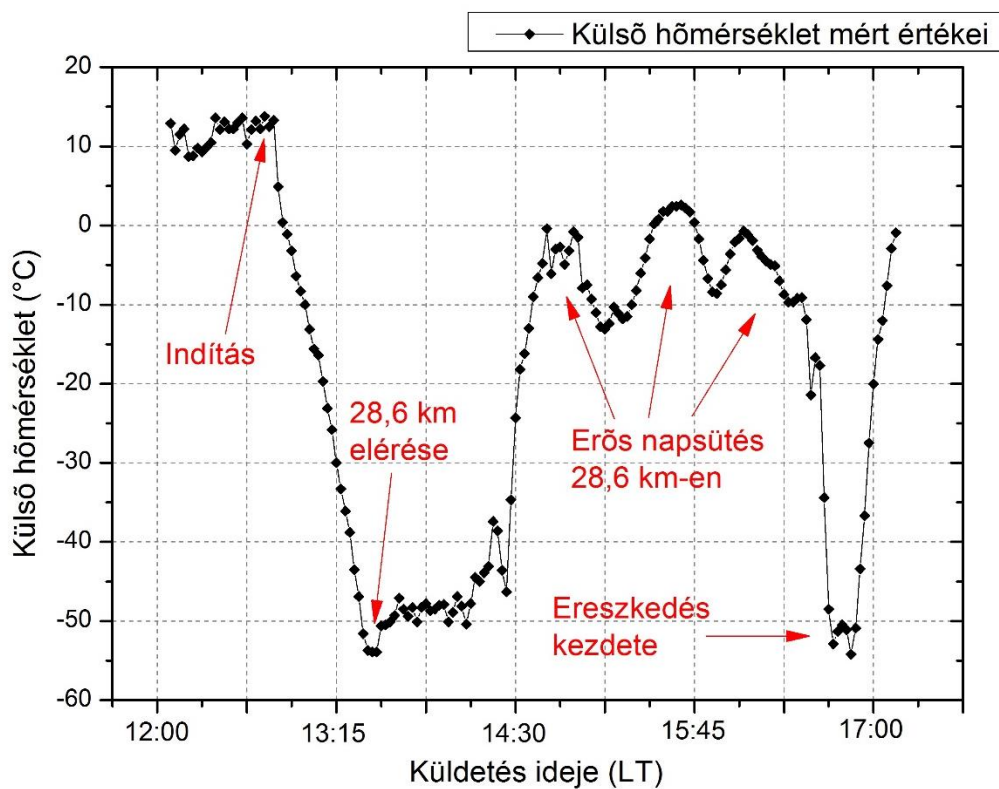
<b>Szenzor azonosító</b>	<b>Szenzor helye</b>	<b>Mért hőmérsékleti tartomány (°C)</b>	<b> \Delta T  (°C)</b>
TRITEL_X	TRITEL X-tengely detektor	17,5 – 32,0	14,5
TRITEL_Y	TRITEL Y-tengely detektor	17,5 – 31,5	14,0
TRITEL_Z	TRITEL Z-tengely detektor	18,0 – 32,0	14,0
TRITEL_ADCX	TRITEL X-tengely ADC konverter	17,5 – 34,5	17,0
TRITEL_ADCY	TRITEL Y-tengely ADC konverter	18,0 – 35,0	17,0
TRITEL_ADCZ	TRITEL Z-tengely ADC konverter	17,5 – 35,0	17,5
TRITEL_CPU	TRITEL CPU panel	18,5 – 32,0	13,5



Szenzor azonosító	Szenzor helye	Mért hőmérsékleti tartomány (°C)	\Delta T  (°C)
TRITEL_PS	TRITEL tápegység panel	17,0 – 30,0	13,0
TMP_EXT	Külső hőmérő a kísérlet burkolatán	Nem működött	Nem működött
TMP_BAT	Elem egységben, az elemekhez közel	13,0 – 18,0	5,0
TMP_GM1T	GM1 burkolatán	-5,0 – 17,5	22,5
TMP_GM1E	A GM1 nagyfeszültségű tápegység paneljén	6,5 – 28,0	21,5
TMP_GM2T	GM2 burkolatán	-8,0 – 19,5	27,5
TMP_GM2E	A GM2 nagyfeszültségű tápegység paneljén	4,0 – 31,5	27,5
TMP_EPS	A kísérlet kiegészítő EPS paneljén	19,5 – 35,5	16,0

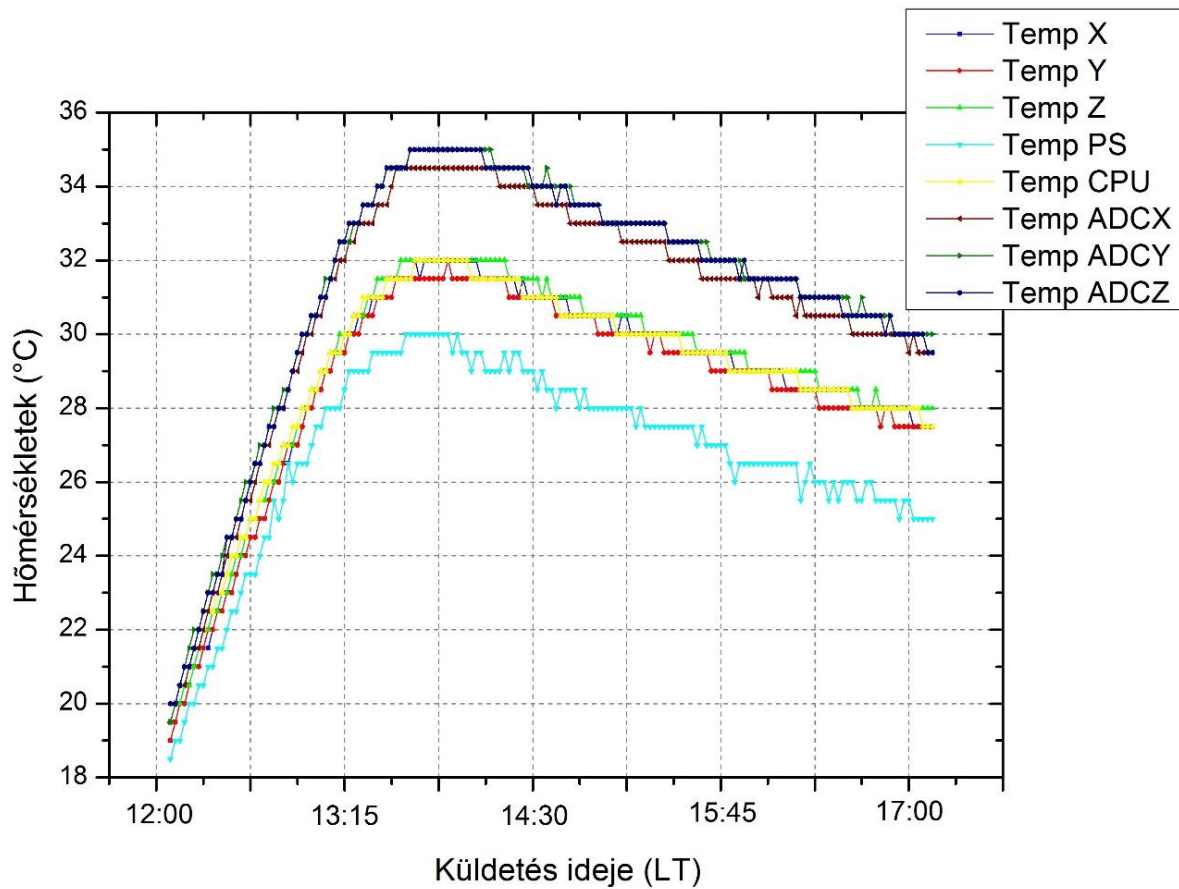
Egyedül a külső hőmérő nem üzemelt a repülés során, azonban a ballon kiszolgáló rendszerének hőmérői rögzítették a repülés során a külső hőmérséklet értékét, így ezt is fel tudtam használni, hogy összehasonlíthassam a kísérlet belsejében mért értékekkel és következtetéseket vonhassak le a kísérlet termikus tervezése során végzett munkámra vonatkozólag. A külső hőmérséklet változását a repülés során (és ennek okait is) a 29. ábrán tüntettem fel.





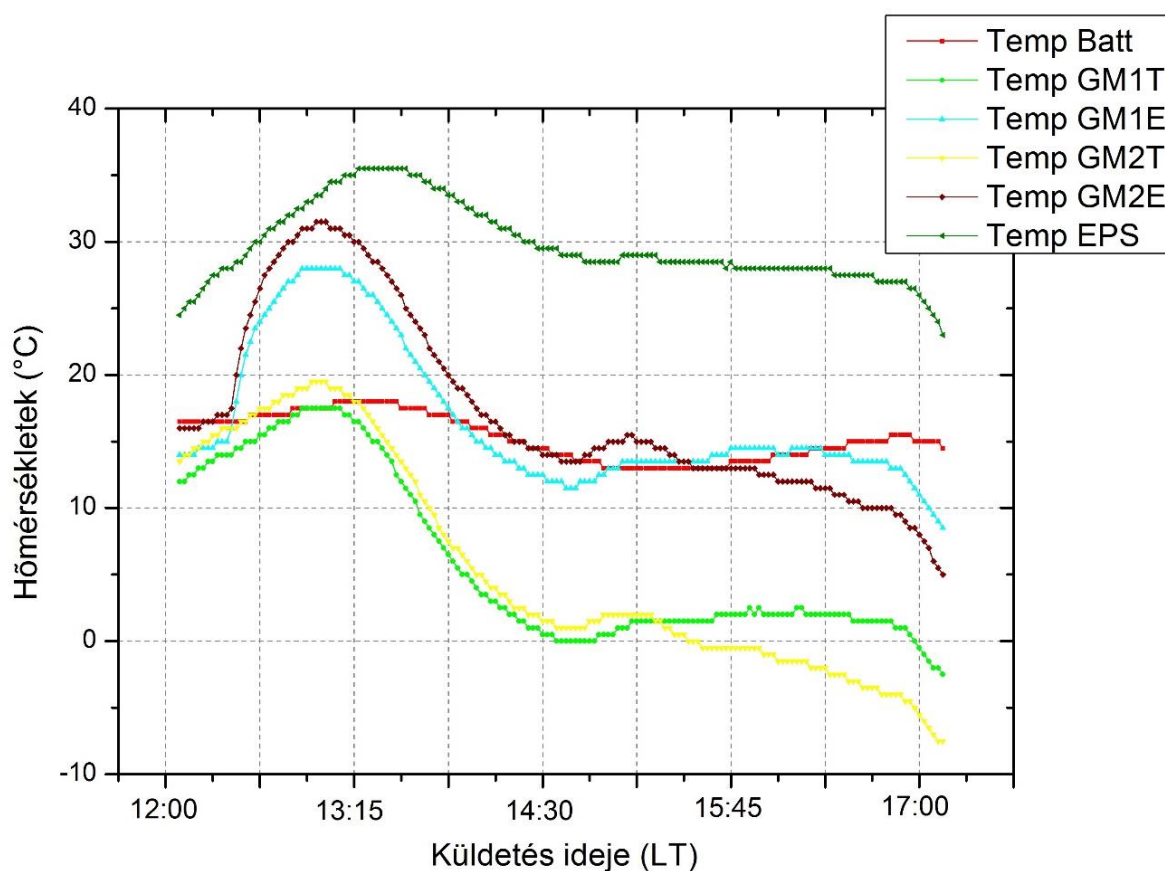
29. ábra: A külső hőmérséklet változása a BEXUS-14 repülése során

A TRITEL belsejében mért hőmérsékleteket és a külső hőmérséklet értékét a 30. ábrán szemléltettem.



**30. ábra: A TRITEL belsejében elhelyezett hőmérők mérési eredményei a repülés során**

A grafikonokon jól leolvasható, hogy a belső hőmérsékletek egy darabig emelkednek a TRITEL saját disszipációs teljesítménye következtében, azonban ahogyan a külső hőmérséklet lecsökkent (13:30 után), úgy a belső hőmérsékletek görbéje is csökkenőbe fordul át, majd pedig – a külső környezet által meghatározott – termikus egyensúlya felé tart. Ez az egyensúly a különböző TRITEL alegységek esetében némileg eltérő, azonban illesztéssel meghatározható, hogy az értéke nagyjából a +24-29°C-os tartományba esik. A következő ábrán a TRITEL-en kívül elhelyezett további hőmérők mérési eredményeit foglaltam össze.



**31. ábra: A TRITEL-en kívül elhelyezett hőmérők mérési eredményei a repülés során**

Ezen hőmérsékletszenzorok már lényegesen eltérőbb viselkedést mutatnak, hiszen az elhelyezkedésük is jelentősen eltérő a kísérlet egyes pontjain. Érdekes megfigyelni a piros görbét, amely az elem egység hőmérséklete, ahol jól látható, hogy a fűtés kiválóan működött a repülés során és a várt 15°C körüli tartományban tartotta az elemek hőmérsékletét, ahogyan ezt a laborban végzett verifikációs tesztheim során is kimértem. A GM-csövek esetében is kellett alkalmazni fűtést, mivel a kísérletben használt ZP1210-es csövek adatlap szerinti minimális működési hőmérséklete -40°C. A világoszöld és a sárga görbék mutatják a GM-csövek hőmérsékleteit a repülés alatt. Eleinte a hőmérsékletük csökkent, majd 15:00 körül a fűtés a beállított értéknél elindult, melyet egy termisztor érzékelt és egy kapcsolón keresztül vezérelt.

A görbék közös jellemzője, hogy az utolsó időszakban a hőmérsékletek jelentősen csökkentek (amivel a GM-csövek fűtése nem is tudott lépést tartani). Ez a gyors csökkenés a leválasztás utáni szabadesés következménye, amikor a rendkívül hideg külső (és egyre sűrűsödő) levegő átáramlott a kísérleti berendezésen és felgyorsította a hő elvonását.



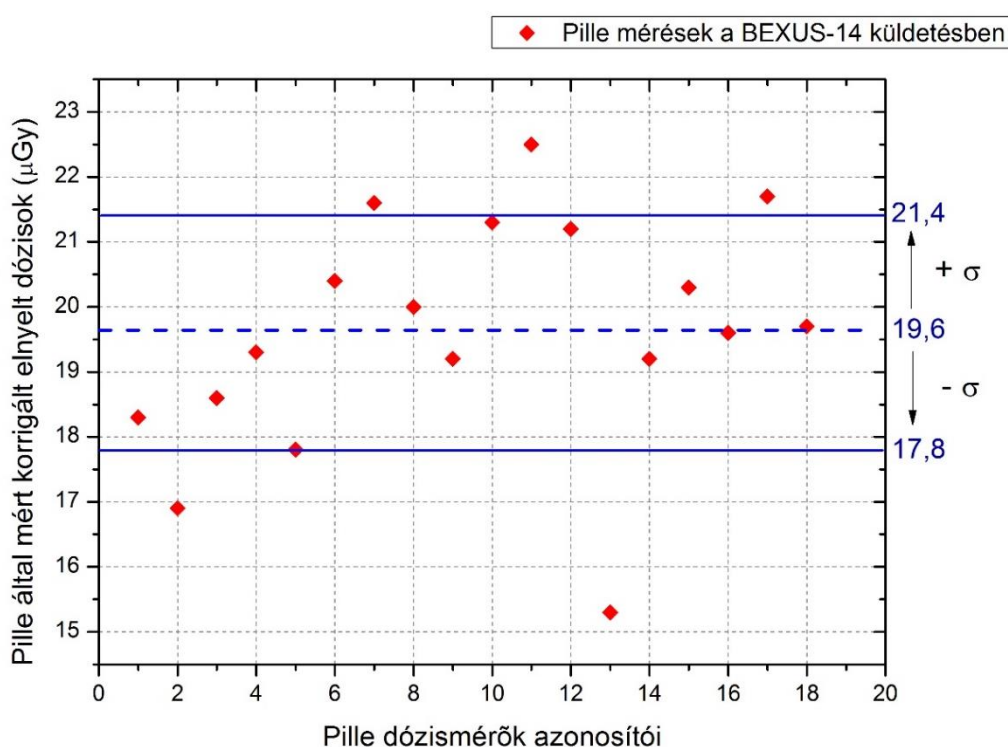
## 7.2. A passzív detektorokkal végzett mérési eredmények

A BEXUS-14 fedélzetén a TECHDOSE kísérlet részeként 19 darab repülésre kiválasztott Pille dózismérőt helyeztem el, illetve 2 darab referenciát, melyek a repülés teljes időtartama alatt a bázison voltak. A repülés előtt kétszer kiolvastam minden egyes dózismérőt, illetve ugyanezt megismételtem a repülés után is, miután a helikopter visszahozta a TECHDOSE kísérletet a landolás helyszínéről. Az egyes dózismérők kiolvasásának eredményét a 10. táblázatban foglaltam össze.

**10. táblázat: A TECHDOSE kísérletben repült és referencia Pille dózismérők eredményei**

Azonosító	Típus	Mért elnyelt dózis ( $\mu\text{Gy}$ )	Második kiolvasás értéke ( $\mu\text{Gy}$ )	Második kiolvasás alapján korrigált értékek ( $\mu\text{Gy}$ )
01	repülő	19,1	0,8	18,3
02	repülő	18,0	1,1	16,9
04	repülő	19,6	1,0	18,6
05	repülő	20,0	0,7	19,3
06	repülő	18,6	0,8	17,8
07	repülő	21,4	1,0	20,4
08	repülő	22,4	0,8	21,6
09	repülő	20,9	0,9	20,0
10	repülő	20,1	0,9	19,2
11	repülő	22,6	1,3	21,3
12	repülő	23,4	0,9	22,5
13	repülő	22,6	1,4	21,2
14	repülő	16,5	1,2	15,3
15	repülő	20,2	1,0	19,2
16	repülő	21,1	0,8	20,3
17	repülő	20,3	0,7	19,6
18	repülő	22,9	1,2	21,7
19	repülő	20,9	1,2	19,7
			<b>Repülő átlag</b>	<b>19,6</b>
			<b>Repülő szórás</b>	<b>1,8</b>
20	referencia	3,9	1,0	2,9
22	referencia	4,6	1,5	3,1
			<b>Ref. átlag</b>	<b>3,0</b>
			<b>Ref. szórás</b>	<b>0,1</b>

A 10. táblázat alapján a repülő dózismérők mérési eredményei a  $10 \mu\text{Gy}$  bizonytalansági határ felett vannak, így becsülhetjük a mérési eredmények hibáját 5%-al, míg a referenciák esetében 10%-al kell számolnunk. Összefoglalván tehát a repülő dózismérők által mért átlagos elnyelt dózis értéke  $19,6 \pm 1,8 \mu\text{Gy}$ , valamint a referencia dózismérők esetében mért érték pedig  $3,0 \pm 0,3 \mu\text{Gy}$  (a táblázattal ellentétben a szórás értékét az 5%-os bizonytalansággal becsültem meg konzervatív megközelítésben), amely jó egyezésben van a felszínen várható dózisteljesítménnyel. A repülő dózismérők eredményeit a 32. ábrán összesítettem, feltüntetve az átlagot és a mért értékek szórási tartományát.



**32. ábra: A Pille repülő dózismérők mérési eredményei**

A 32. ábrát jobban megvizsgálva arra a következtetésre jutottam, hogy a mérési adatok között nem lehetséges árnyékolási vagy egyéb szempontból összefüggéseket találni ilyen rövid repülési idő esetében. A mérési bizonytalanság keretein belül is azonban az első négy mérési pont alacsonyabb értéke mögött található fizikai magyarázat, ugyanis ezen dózismérők a gondola tetején helyezkedtek el, ahol a sugárzás közvetlenül érte őket, míg a többi dózismérő a mechanika belsejében kapott helyet (lásd 19. ábrán), ahol közvetetten érte a sugárzás egyéb mechanikai elemeken keresztül, amelyek másodlagos részecskéket is keltettek és ezzel megnövelték a mérhető elnyelt dózis értékét. Ahhoz, hogy ezt az elméletemet egyértelműen igazolhassam, hosszabb idejű mérés lett volna szükséges (a mérési pontok jelenleg a szórási





tartományon belül közel megegyeznek). Ennek a kérdésnek a jövőbeli vizsgálata a mérési eredmények értékelése szempontjából elsődleges fontosságú lenne, hiszen egyenesen következik belőle, hogy az elsődlegesen beérkező sugárzás elnyelt dózisa némileg alacsonyabb az általam meghatározott átlagos értéknél, amelybe jelentős mértékben beleszámított a jelen mérésekben a mechanikai elemek által keltett másodlagos részecskék járuléka is.

A mérési eredmények értékeléséhez szükséges további adatokat a 11. táblázatban gyűjtöttem össze.

**11. táblázat: A TECHDOSE kísérletben repült Pille dózismérők eredményeinek összefoglalása**

<b>A küldetés (repülés) időtartama</b>	$4,5 \pm 0,2$ h
<b>A kiolvasások között eltelt idő</b>	$33,5 \pm 0,2$ h
<b>A mért átlagos elnyelt dózis (repülő dózismérők)</b>	$19,6 \pm 1,8$ $\mu$ Gy
<b>A mért átlagos elnyelt dózis (referencia dózismérők)</b>	$3,0 \pm 0,3$ $\mu$ Gy
<b>A becsült dózisteljesítmény a felszínen (ESRANGE űrbázis)</b>	$89,6 \pm 9,0$ nGy/h
<b>A BEXUS-14 sztratoszférikus repülésből származó többletdózis</b>	$16,6 \pm 2,1$ $\mu$ Gy

A repülés előtt végzett becslések (lásd 6.3.1 fejezet) alapján a Pille dózismérőkkel várt mérési eredményeket a 10-100  $\mu$ Sv tartományba helyeztem el. A BEXUS-14 repülése során mért átlagosan  $19,6 \pm 1,8$   $\mu$ Gy jó egyezésben van ezzel. Figyelembe véve a repülő dózismérőkkel mért értékek szórását azt mondhatjuk, hogy a közel 4 óra hosszú sztratoszférikus repülés arra nem elegendő, hogy az eredményekből következtetéseket lehessen levonni a dózismérők különbségeire. Ezen kérdések vizsgálatához hosszabb repülési időkre volna szükség. Az eredmények azonban egyértelműen alátámasztják az előzetes becsléseimet, amely alapján egy 3-4 óra hosszú sztratoszférikus repülés elegendő, hogy a Pille dózismérő rendszer 10%-os bizonytalansággal kimérhesse a küldetés során tapasztalható sugárzás elnyelt dózisát.

### 7.3. A TRITEL mérési eredményeinek előzetes összefoglalása

A TECHDOSE repülés során a TRITEL méréseiből számos dozimetriai mennyiséget határozhatunk meg, ahogyan a 6.3.2 fejezetben összefoglaltam. A mérési eredmények kiértékelését elvégeztem és jelen fejezetben a teljesség igénye nélkül egy összefoglalót adok róluk.

A Pille eredményekkel való összehasonlítás érdekében a TRITEL méréseiből is meghatároztam a vízben elnyelt dózis értékét. Mivel a TRITEL esetében 10 perces spektrumokat rögzített a kísérlet, így lehetőségem nyílt, hogy a spektrumok rögzítésének ideje alapján elkülönítsem az emelkedés, repülés és ereszkedés szakaszait a mért dózisok alapján. Az eredményeket a 12. táblázatban foglaltam össze. A táblázatban az összehasonlításhoz a Pille mérések átlagos eredményét is feltüntettem.

**12. táblázat: A TRITEL spektrumokból számított elnyelt dózisok összesítése és összehasonlítása a Pille eredményekkel**

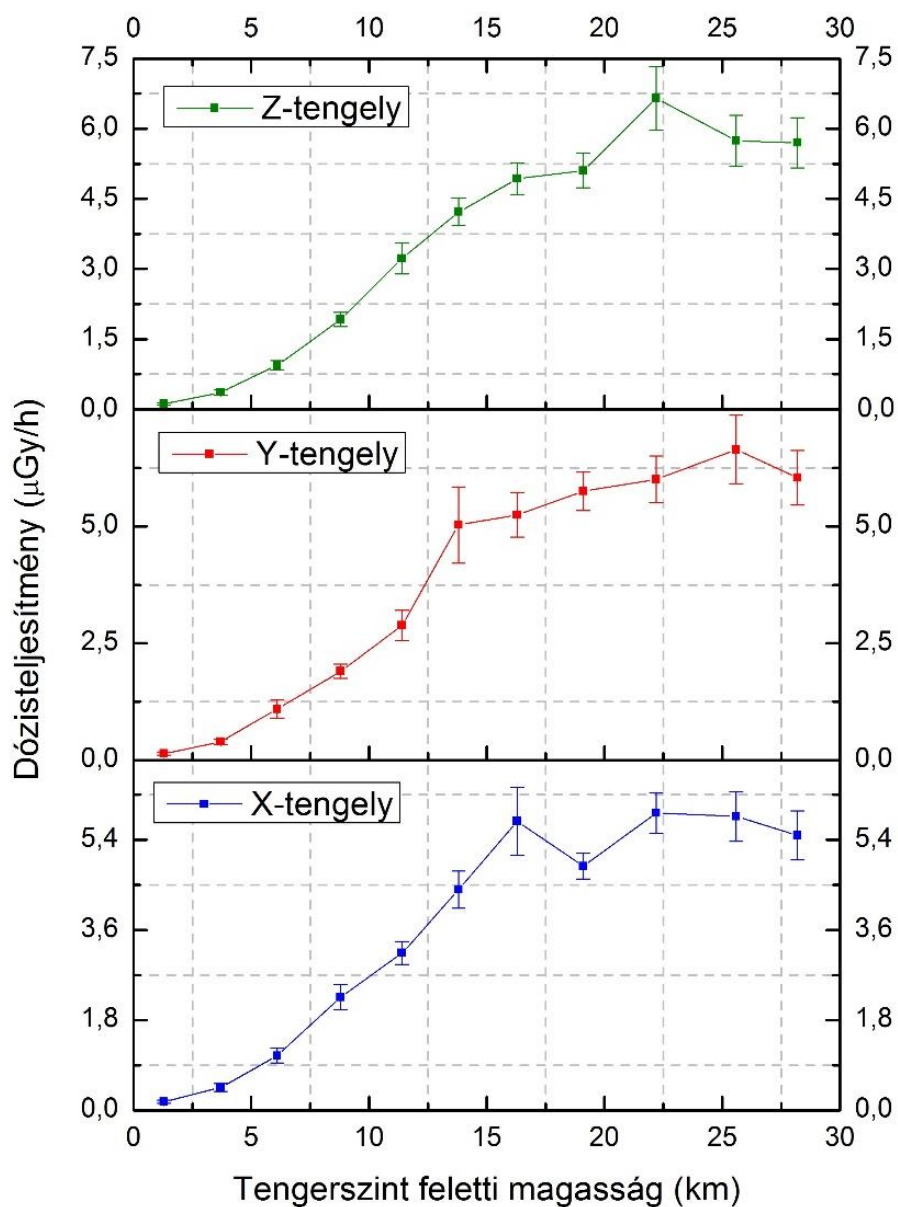
Küldetés fázisai	Mért elnyelt dózis vízben ( $\mu\text{Gy}$ )			Mért elnyelt dózis levegőben ( $\mu\text{Gy}$ )
	X-tengely	Y-tengely (zenit)	Z-tengely	Pille
Emelkedés (1,5 h)	$5,7 \pm 0,2$ (4%)	$5,8 \pm 0,2$ (4%)	$5,5 \pm 0,2$ (4%)	-
Repülés (2,5 h)	$13,5 \pm 0,5$ (4%)	$13,7 \pm 0,3$ (3%)	$14,0 \pm 0,4$ (3%)	-
Ereszkedés (0,5 h)	$0,6 \pm 0,06$ (10%)	$0,5 \pm 0,04$ (8%)	$0,6 \pm 0,03$ (5%)	-
Összesen (4,5 h)	$19,8 \pm 0,5$ (3%)	$20,0 \pm 0,4$ (2%)	$20,1 \pm 0,4$ (2%)	$19,6 \pm 1,8$ (10%)

A 12. táblázat eredményeiből láthatjuk, hogy a legfőbb dóziszárulékot a repülés során mértük 28,6 km magasságban, azonban az emelkedés járuléka sem elhanyagolható (amely értéket a Pille mérései alapján nem lehetséges elkülöníteni). Az Y-tengely szerepe kitüntetett, mivel egybeesett a zenit iránnyal, míg a másik két TRITEL tengely a vízszintes síkban feküdt. Az egyes tengelyek által mért dózisok közel egyeznek, ahogyan azt vártuk, hiszen a dózisokban



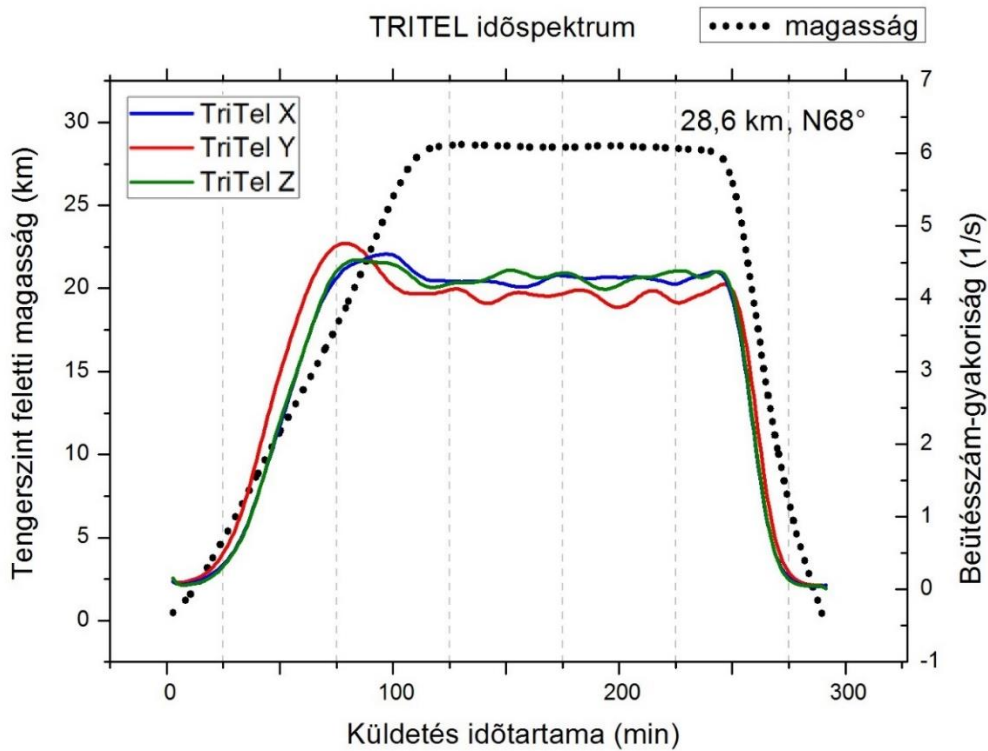
eltérés legfeljebb a lokálisan eltérő árnyékolások miatt lett volna várható, amely azonban elhanyagolható volt. A Pille átlagos eredmény meglehetősen pontos egyezést mutat (hibahatáron belül megegyezik) a TRITEL összes dózis eredményekkel. Érdeemes kiemelni, hogy az átlagos Pille eredmény közel azonos, mint a TRITEL által mért értékek, amely a Pille TL anyagának a TRITEL-hez viszonyított érzékenységének ismeretében értelmezhető. A Pille érzékenységére alacsonyabb  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  LET érték felett, a TRITEL mérési tartománya azonban  $0,05 \text{ keV}/\mu\text{m} - 100 \text{ keV}/\mu\text{m}$  között található, így a Pille által kevésbé érzékeny tartományban is képes mérni a beérkező részecskéket. Az eltérés nagyon kismértékű, amely arra enged következtetni, hogy a  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  feletti sugárzás hányada elhanyagolhatóan kicsi ebben a térségben a  $10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  alattihoz képest, amelyet megerősít a TRITEL méréseiből számított LET-spektrum is (lásd 37. ábra).

A 33. ábrán az emelkedés során a TRITEL spektrumaiból számított dózisteljesítményt szemléltettem a magasság függvényében. A repülés magasságában az átlagos dózisteljesítmény  $5-6 \mu\text{Gy/h}$  értéket ért el. Összehasonlításképpen ugyanezen érték a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén átlagosan  $6-10 \mu\text{Gy/h}$  (közel azonos).

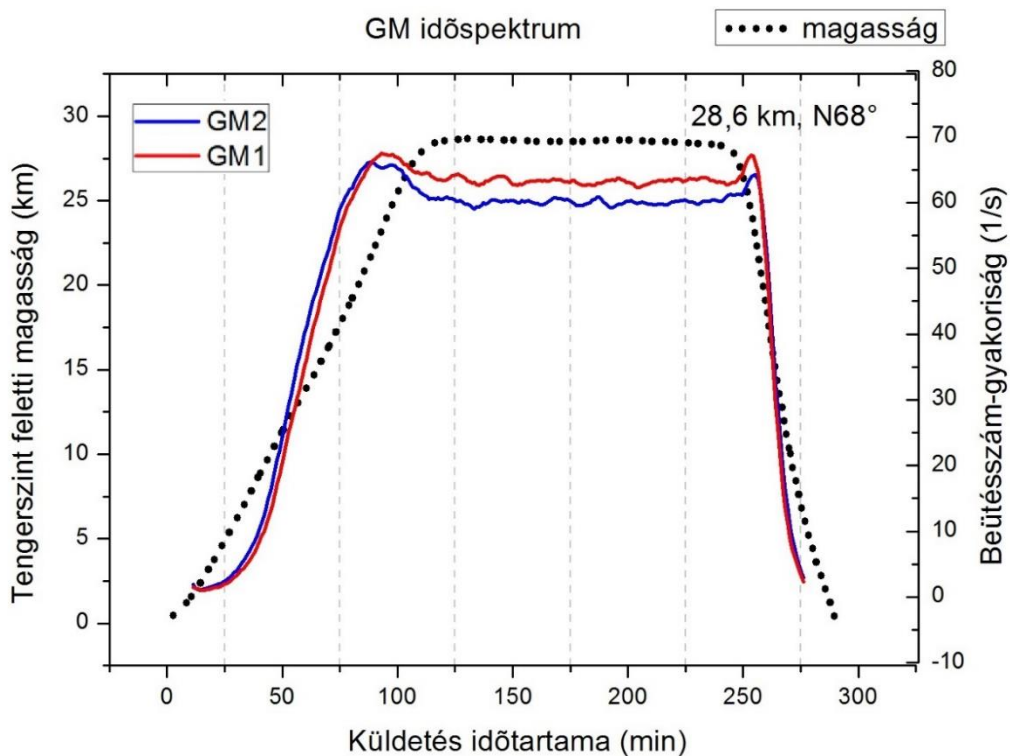


**33. ábra: A TRITEL spektrumokból számított dózisteljesítmény a magasság függvényében**

Kiértékeltem a TRITEL tengelyek szerinti és a GM-csővel mért időspektrumokat, melyeket a 34-35. ábrákon foglaltam össze.



34. ábra: A TRITEL által mért időspektrum a BEXUS-14 repülése során



35. ábra: A GM-számlálók által mért időspektrum a BEXUS-14 repülése során

A TRITEL és a GM-csövek által mért időspektrumok alakja közel azonos. Jól kivehető az emelkedés, a repülés és az ereszkedés tartománya (az ereszkedésnél jóval meredekebb a





görbe, mert lefelé lényegesebben gyorsabban haladt a ballon, mint az emelkedés során). Mindegyik görbén jól látható az emelkedési szakasz végén egy maximum, amely az irodalomból ismert Pfozter-maximumot jelzi (a másodlagos részecskekeletkezés maximuma). Ez a maximum a GM-számlálók esetén megjelenik az ereszkedés elején is, azonban lényegesen élesebb csúccsal, hiszen az ereszkedés nagyon gyorsan zajlott. A görbék Pfozter-maximumnak megfelelő szakaszait külön ábrázoltam és Gauss görbét illesztettem rájuk, amellyel megbecsülhettem a mérési adatsorok alapján meghatározható Pfozter-maximum magasságának értéke. Az eredményeket a 13. táblázatban foglaltam össze.

**13. táblázat: A TRITEL és a GM mérésekből meghatározott Pfozter-maximum értékek**

<b>Pfozter-maximum mért értéke km-ben (N68°; nappal)</b>				
<b>X-tengely</b>	<b>TRITEL</b>		<b>GM</b>	
	<b>Y-tengely (zenit)</b>	<b>Z-tengely</b>	<b>GM_1</b>	<b>GM_2 (zenit)</b>
21,8 ± 0,3	17,9 ± 0,2	21,4 ± 0,3	22,4 ± 0,2	21,5 ± 0,2
(3%)	(2%)	(2%)	(1%)	(1%)

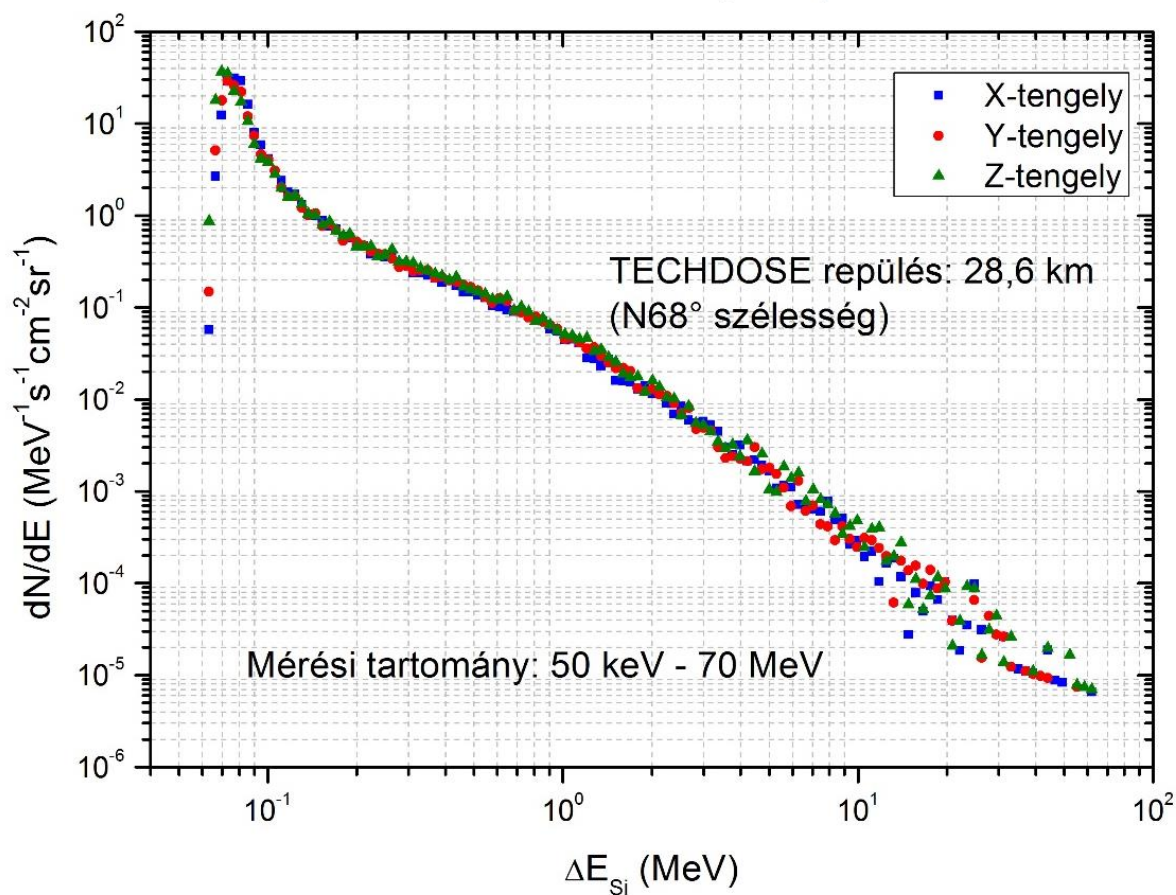
A 13. táblázat alapján a Pfozter-maximumot 20-22 km-es magasságban sikerült azonosítani, amely egyezésben van korábbi, szakirodalomban található mérési eredményekkel (lásd 5. ábra).

Érdeemes kiemelni egy különleges eredményét az időspektrumok tanulmányozásának. Láthatóan a TRITEL Y-tengelye (amely a zenit irány felé mutat) különlegesen viselkedik a többihez képest: a Pfozter-maximum magasságáig értéke – a mérési pontok bizonytalanságát is figyelembe véve – egyértelműen magasabb a vízszintes síkban mérő tengelyeknél, majd ez a tendencia éppen a Pfozter-tartományában megfordul az ellenkezőjére. Ugyanezen viselkedés figyelhető meg a GM-csövek esetében is, amelyek közül a zenit irányba mutató görbéje azonos lefutású, mint a TRITEL Y-tengelye. Ráadásul megfigyelhetjük, hogy a kitüntetett, zenit irányú tengelyekkel (TRITEL Y és GM\_2) meghatározott Pfozter-maximum értékek némileg alacsonyabbak a többi irányok által mérteknél. Az eredmények egyértelműen a sugárzás térbeli anizotrópiájára ebben a magasságban történő változására utalnak, melyet két különböző műszerrel is sikerült egyszerre megfigyelni, így nem tulajdonítható a mérések bizonytalanságának. Munkám folytatásában a mért eredmények részletesebb

összehasonlításával és irodalmi adatok kigyűjtésével az anizotrópia lehetséges forrásait illetően fogok foglalkozni.

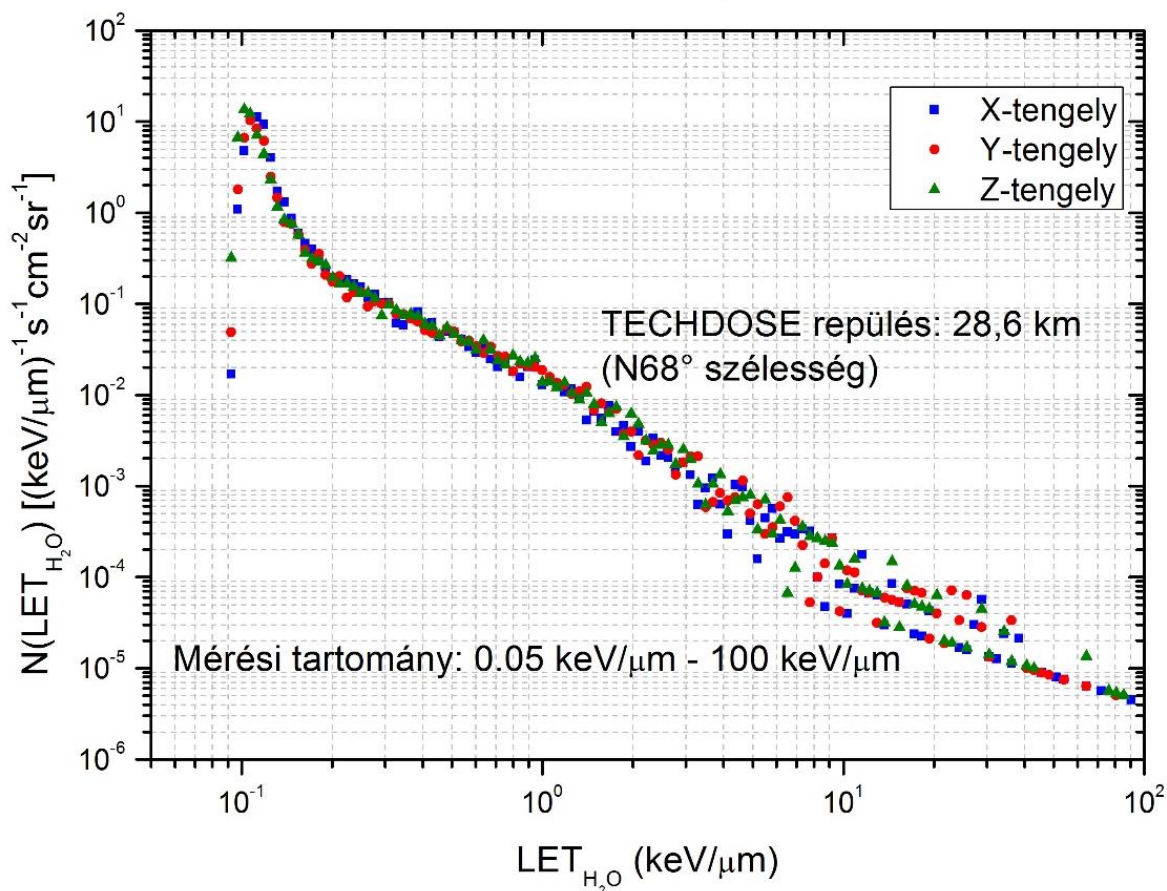
A TRITEL spektrumainak értékeléséből – a kalibrációs eredményeimet felhasználva – meghatároztam a mért leadott energia-, illetve LET-spektrumokat, melyeket az alábbi ábrákon tüntettem fel.

### TRITEL leadott energia spektrum



36. ábra: A TRITEL által mért leadott energia spektrum

## TRITEL LET spektrum



**37. ábra: A TRITEL által mért LET-spektrum**

A BEXUS-14 küldetésben 28,6 km magasságban (N68°) mért LET-spektrum sok hasonlóságot mutat a TRITEL által a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén mért eredményekkel. A három tengely esetében a spektrum alakja azonos, a kis LET-értékeknél egy csúcsot találhatunk, majd a nagyobb LET-értékek felé egyre rosszabb a mérési statisztika (egyre kisebb a részecskék fluxusa), azonban a közel 100 keV/μm értékeknél is találtunk részecskéket! A kis LET-értékeknél tapasztalt csúcs eredete kérdéses: elképzelhető, hogy a mérőrendszer hibájából fakad. Az eredmények értékelése és a spektrum alakjának vizsgálata a munkám folytatásának részét képezi:

- a TECHDOSE kísérletben mért spektrumalakok összehasonlítása a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén mért spektrumokkal;
- a kis LET-értékeknél található csúcs eredetének tisztázása: elektronikai és TRITEL szoftveres tesztekkel;
- együttműködés keretében a német DOSIS kísérlet által a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén mért spektrumok összehasonlítása a TRITEL spektrumokkal.



A spektrum alakjának vizsgálata szintén nagy jelentőséggel bír, hiszen az elkövetkező években a TRITEL módosított változatai várhatóan számos műhold fedélzetére is felkerülhetnek (többek között az egyik ilyen küldetés az általam koordinált ESEO-TRITEL, amely keretében a TRITEL egy változata kerül majd fel az ESEO európai diákműhold fedélzetére várhatóan 2016-ban), így az esetleges elektronikai vagy szoftveres mérés technikai hibákat feltétlenül fel kell deríteni az újabb küldetések kezdete előtt.

## 8. Kitekintés

A TECHDOSE kísérlet jelentős részben tekinthető kutatás/fejlesztésnek, hiszen egy tudományos kísérletet kellett megtervezni a TRITEL szilícium detektoros mérőrendszerre alapozva a kozmikus sugárzás vizsgálatára a sztratoszférában. Mérési eredményeket sikerült nyerni mintegy 30 km-es magasságig a kozmikus sugárzásra vonatkozólag. Számos mérési eredmény áll rendelkezésünkre a Nemzetközi Űrállomás magasságából (350-400 km), azonban a kettő közötti tartományban viszonylag kevés irodalomban is megtalálható mérésre hivatkozhatunk, hiszen a sztratoszférikus ballonok maximális magassága 35-40 km, a műholdak pedig 200 km alá nem merészkedhetnek (a légkör fékező hatása miatt). A 30 km és 100 km közötti tartomány sugárzási jellemzőinek vizsgálatára rakétakísérlet ötletét vettem fel, melyet pályázat formájában a REXUS programba benyújtottam. A kísérleti elképzelés a REM-RED elnevezést kapta (*GM Sounding Rocket Experiment to Measure the Cosmic Radiation and Estimate its Dose Contribution*). A pályázatot elfogadta az Európai Űrügynökség és jelenleg a kísérlet már meg is épült és a tesztelésével foglalkozom, amely 2015. márciusában repülhet majd a REXUS 17 továbbfejlesztett Orion rakéta fedélzetén az ESRANGE űrbázisról. A REM-RED kísérlet alapvetően GM-csőveket tartalmaz (kétféle típusból összesen hat darabot), illetve a szükséges elektronikát a rakétamodulba ágyazottan.

Sikerült együttműködési megállapodást aláírnom a Delfti Egyetem STRATOS projektet koordináló csapatával, amely a STRATOS II diákok által fejlesztett hibrid kísérleti rakéta megépítésén dolgozik. GM-csővekre alapozott kísérleti elrendezést dolgoztam ki a STRATOS II fedélzetére, amely jelenleg szintén a tesztelési fázisban jár már és 2015. második felében várható repülési lehetősége (a megcélzott pályamagasság 65 km).

Jövőbeli munkám keretében a TRITEL ESEO diákműholdra szánt verziójának fejlesztésén is dolgozok, amely műhold mintegy 520 km-es poláris pályán fog majd keringeni, ezáltal még tovább kiterjesztve azon magasságtartományt, ahonnan szerezhetünk sugárzásra





vonatkozó mérési adatokat. A poláris pálya pedig külön lehetőséget nyújt majd a sugárzási övezetek behatóbb vizsgálatára a TRITEL segítségével. Jelenleg az ESEO-TRITEL projekt koordinálása a feladatom, a TRITEL-el kapcsolatos méréstechnikai kérdések vizsgálata, tesztelések elvégzése, kapcsolattartás a külföldi partnercéggel (ALMASpace), illetve a költségvetési háttér megteremtése, amely PECS szerződés keretében valósulhat meg.

Összegezvén a kutatómunkám folytatásában igyekszek olyan kísérleteket megvalósítani (rakétákon és műholdakon), amelyek segítségével a Föld felszínétől egészen 500-600 km-es magasságokig képet alkothatok a sugárzási tér jellemzőiről, összetételéről és dozimetriai mennyiségeiről, vizsgálhatom a sugárzási teret a Föld-közeli térségben.

## 9. Összefoglalás

A TECHDOSE projekt keretében sikerrel pályáztam hazánkból az Európai Űrügynökség BEXUS programjában való részvételre, melynek eredményeképpen megszületett a TRITEL-re alapozott, kozmikus sugárzási ballonos mérőrendszer, mely 2012 szeptemberében repülhetett a Svédországban található ESRANGE űrbázisról. A repülés teljes sikerrel zárult, a mérési adatok megérkeztek a földi irányító központba, melyeknek a részletes kiértékelése még jelenleg is folyamatban van. A kapott adatok tudományos szempontból is jelentős eredményeket szolgáltatottak, melyeket a nemzetközi PAC (*21<sup>st</sup> ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research, Svájc, Thun, 2013*) és a COSPAR (*40<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, Oroszország, Moszkva, 2014*) konferenciákon mutattam be a tudományos közösség számára. Remélhetőleg az eredményekből hamarosan a hazai tudományos közösséget gazdagító nemzetközi publikációk születnek majd (megcélzott folyóirat: *Advances in Space Research*).

Munkám során koordináltam a TECHDOSE projektet és diákcsapatot, melynek keretében tartottam a kapcsolatot az Európai Űrügynökség Oktatási Irodájával és szakértőivel, részt vettem a különböző európai űrkutatási központokban megrendezett oktatási kurzusokon, megfelelttem az ESA által szervezett felülvizsgálatokon, melyek feltételei voltak a kísérlet folytatásának minden egyes mérőföldkőnél. Folyamatosan dokumentáltam a TECHDOSE kísérlettel kapcsolatos munkámat, illetve a többi diák munkáját is az ESA számára (*SED – Student Experiment Documentation*). Elvégeztem a kísérlet részletes verifikációs tesztelését, kalibrációs méréseit, illetve a felbocsátása során a kísérlettel kapcsolatos minden tevékenységet.



Elemeztem a kísérlet repülése során gyűjtött technológiai adatokat és összehasonlítottam őket a tervezési fázisban készített modellszámításaim, illetve a verifikációs tesztek során nyert eredményeimmel. A modellszámítások és a verifikációs tesztek meglehetősen pontosnak bizonyultak. A kísérlet mechanikai szempontból ellenállt a repülés alatt tapasztalt nagy gyorsulásoknak, illetve a mért hőmérsékleti értékek sehol nem lépték át a javasolt határértékeket, vagyis a hőtani tervezési munkám sikeresnek mondható.

A tudományos mérőműszerek méréstechnikai háttérének kidolgozásával, valamint a kalibrációs mérések elvégzésével felkészültem a repülés során nyerhető adatok értékelésére. Elvégeztem a Pille és GM-csöves mérések teljes kiértékelését, illetve a TRITEL méréseinek előzetes eredményeit mutattam be. Előzetes irodalmi adatok tanulmányozásával megmutattam, hogy a Pille dózismérő rendszer alkalmas egy néhány órás sztratoszférikus repülésben az elnyelt dózis monitorozására, melyet a mért eredmények alátámasztottak. A TRITEL és a Pille által mért elnyelt dózisok jó egyezésben hasonló értéket szolgáltatottak, némi eltéréssel, melyet a Pille TL anyagok érzékenységének ismeretében előre vártam is. A TRITEL és GM mérések időspektrumainak tanulmányozásából számos érdekes tanulságot vonhattam le, melyek legfontosabbika az egyértelműen tapasztalható sugárzási tér anizotrópiája, melynek irányítottága a jól kimérhető Pfozter-maximum tartományában változik meg. A TRITEL LET-spektrum tanulmányozása során számos kérdést vettem fel a spektrum alakjával kapcsolatban, melyek megválaszolása jelenleg is kutatás tárgyát képezik.

A Pille, TRITEL és GM-csöves mérések eredményeinek diszkussziója során számos további, a munkám folytatásában kutatásra váró területet sikerült definiálnom:

- a Pille dózismérők eredményeinek vizsgálata kapcsán a mechanikai elemek által keltett másodlagos sugárzás befolyásoló hatásának vizsgálata, illetve jövőbeli kutatása (akár újabb ballonkísérlettel célzottan erre a kérdésre vonatkozólag);
- Pille korrekciós faktor definiálásának részletes kidolgozása TRITEL-Pille együttes mérésekre alapozva, a jövőbeli űrállomáson történő Pille mérések pontosítására;
- a sztratoszférikus sugárzási tér anizotrópiájának további vizsgálata a mérési eredmények kiterjesztésével 100 km-es magasságig rakétakísérletek során;
- TRITEL kalibráció pontosítása gyorsítóokban végzett további bemérések segítségével;
- a TRITEL spektrumok alakjának tanulmányozása, illetve az esetleges okok felderítése, összehasonlítás űrállomáson mért spektrumokkal;
- a LET-spektrum magasságfüggésének vizsgálata;





- a folyamatosan nyert sztratoszférikus kísérleti eredmények értékelése a naptevékenység függvényében felhasználva a 4.3. fejezetben összegzett műholdak mérési eredményeit.

A fenti pontok mindegyike egy-egy önálló kutatási téma, melyek a munkám folytatását képezik majd.

## 10. Köszönetnyilvánítás

Ez úton szeretnék hálás köszönetet nyilvánítani témavezetőmnek, Dr. Hirn Attilának, akinek állandó útmutatása folyamatos támaszom volt a munkám során. Köszönet illeti Dr. Légrády Dávid Tanár Urat, hogy elvállalta a belső konzulensi feladatokat a diplomamunkám kapcsán. Köszönetemet fejezem ki mindazoknak a munkájáért, akik nélkül a TECHDOSE kísérlet nem valósulhatott volna meg. Elsősorban azoknak a hallgatóknak, akik a csapat tagjaként munkájukkal hozzájárultak a sikerhez: Gyovai Ágnes, Ludmány Orsolya, Korsós Marianna Brigitta, Hurtony Tamás, Pálfalvi József és Mesterházy Dávid. Köszönet illeti Dr. Zagyvai Pétert, aki a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem tanáraként elvállalta, hogy támogató professzora lesz a csapatnak. Külön köszönet illeti Dr. Hirn Attilát, akinek áldozatos segítsége és támogatása folyamatos támasza volt a magyar diákoknak a program során. Köszönet az MTA Energiatudományi Kutatóintézet mindazon munkatársainak, akik időt és fáradságot nem kímélve segítettek munkánkat (Apáthy István, Cseri Sándor, Csikós József, Csöke Antal, Dr. Deme Sándor, Dr. Pázmándi Tamás, Szántó Péter). Kiemelt köszönet illeti a BL-Electronics céget az elektronikai fejlesztésekben nyújtott segítségéért (Bodnár László, Szegedi Péter). Köszönet az Űrvilág szerkesztőségének a folyamatos tudósításokról a TECHDOSE kísérlet kapcsán.

Külön köszönet illeti az ESA szakértőket és az Európai Űrügynökség Oktatási Irodájának munkatársait, akik a munkájukkal, tanácsaikkal folyamatosan segítettek a TECHDOSE kísérletet az előrehaladásban: Alex Kinnraid, Dr. Alan Owens, Helen Page, Koen Debeule, Mark Fittock, Martin Siegl, Olle Persson, Paul Stevens, Mikael Inga. Köszönet a Magyar Űrkutatási Irodának a projekt pénzügyi finanszírozása terén nyújtott segítségéért.

A TECHDOSE projekt a 4000107210-es számú PECS szerződés keretében valósult meg.



## 11. Irodalomjegyzék

- [1] V.F. Hess, Phys. Zeitschr. 13, 1084 (1912)
- [2] P. K. F. Grieder, Cosmic rays at Earth Researcher's reference manual and data book, 2001
- [3] L.I. Dorman, Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground (Kluwer, Dordrecht, 2004)
- [4] McAulay, I., et al. (Eds.), EURADOS, radiation protection 85. In: Exposure of air crew to cosmic radiation. EURADOS Report 1996-01, Luxembourg, 1–77, 1996
- [5] Thomas K. Gaisser, Cosmic rays and particle physics, 2001
- [6] Gerald Edward Brown and A. D. Jackson, The Nucleon-Nucleon Interaction, (1976) North-Holland Publishing, Amsterdam ISBN 0-7204-0335-9
- [7] J. Beringer et al. (Particle Data Group), PR D86, 010001 (2012) (URL: <http://pdg.lbl.gov>)
- [8] J. Beringer et al. (Particle Data Group) (2012). "PDGLive Particle Summary 'Leptons (e, mu, tau, ... neutrinos ...)'" . Particle Data Group. Retrieved 2013-01-12.
- [9] G.A. Bazilevskaya, A.K. Svirzhevskaya, Space Sci. Rev. 85, 431 (1998)
- [10] G.A. Bazilevskaya, I.G. Usoskin, E.O. Flückiger, R.G. Harrison, L. Desorgher, R. Bütikofer, M.B. Krainev, V.S. Makhmutov, Y.I. Stozhkov, A.K. Svirzhevskaya, N.S. Svirzhevsky, G.A. Kovaltsov; Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere, Space Sci Rev (2008) 137: 149–173
- [11] Lemaître, G., Vallarta, M.S. On Compton's latitude effect of cosmic radiation. Phys. Rev. 43, 87, 1933.
- [12] Størmer, C. On the trajectories of electric particles in the field of a magnetic dipole with applications to the theory of cosmic radiation. Astrophys. Norvegica 2 (4), 193–248, 1937.



- [13] Smart, D.F. and Shea, M.A., The Use of Offset Dipole Coordinates for Interpolating Cosmic Ray Cut-off Rigidities in Three Dimensions. Proceedings – 15th Int. Cosmic Ray Conference 11, Bulgarian Academy of Sciences, 256-261, 1977
- [14] Noyes, Robert, \_The Sun, Our Star\_, 1982, pp 196-206.
- [15] Lang, Kenneth, "Unsolved Mysteries of the Sun- Part 1", Sky and Telescope, August 1996, p. 42.
- [16] Feldman U., et al, 1998: "Coronal Composition above the Solar Equator and the North Pole as Determined from Spectra Acquired by the SUMER Instrument on SOHO", The Astrophysical Journal 505, pp. 999-1006
- [17] Galvin, A.B. et al, 1996: "Solar Wind Composition: First Results from SOHO and Future Expectations", Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 28, p.897
- [18] J. K. Hargreaves, The solar-terrestrial environment, Cambridge University Press, 1992
- [19] Shatendra K. Sharma, Atomic and Nuclear Physics, 2008
- [20] John R Herman and Richard A. Goldberg, Sun Weather and Climate, 1978
- [21] EuroLaunch: BEXUS User Manual (2010), REXUS User Manual (2010)
- [22] Canberra Industries, Canberra Product Catalog, Edition Twelve, 95-101, 2002
- [23] Pázmándi, T., Deme, S. Láng, E., Space dosimetry with the application of a 3D silicon detector telescope: response function and inverse algorithm, Radiation Protection Dosimetry, Vol. 120, pp. 401-404, 2006
- [24] Hirn, A., Űrdozimetriai rendszerek fejlesztése, PhD értekezés, BME-NTI, 2009
- [25] 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



- [26] I.Apáthy, L.Bodnár, A.Csóke, S.Deme, and I. Héjja, An on-board TLD system for dose monitoring on the International Space Station (ISS), Radiation Protection Dosimetry, Vol.85, Nos.1-4, pp.321-323; 1999
- [27] I.Apáthy, S.Deme, I.Fehér, Y.A.Akatov, G.Reitz and V.V.Arkhanguelski, Dose measurements in space by the Hungarian Pille TLD system, Radiation Measurements, Vol.35, pp. 381-391; 2002
- [28] TECHDOSE Team, BX14\_TECHDOSE\_SEDv5-0\_09FApr13, European Space Agency Student Experiment Documentation, 2013
- [29] Davies, D.M., 1993: "Cosmic Radiation in Concorde Operations and the Impact of New ICRP Recommendations on Commercial Aviation". Radiat. Prot. Dosim. 48, pp121-124 (1993)
- [30] Akatov, Yu.A., 1993: "Some Results of Dose Measurements Along Civil Airways in the USSR". Radiat. Prot. Dosim. 48, pp59-64 (1993)
- [31] Advisory Committee for Radiation Biology Aspects of the SST, Final Report., 1975: "Cosmic radiation exposure in supersonic and subsonic flight". Aviat. Space Environ. Med. 46, pp1170-1185 (1975)