

Különböző sugárzásmérési rendszerek összehasonlítása meteorológiai ballonos kísérletekben

Tudományos Diákköri Dolgozat

Készítette:

Malatinszky Adél

Fizika BSc II.

Témavezető:

Hirn Attila

fizikus, laboratóriumvezető

Úrkutatói Laboratórium

KFKI

Energiatudományi Kutatóközpont

Úrkutatói Laboratórium

2021

Kivonat

A troposzféra és a sztratoszféra alsóbb légrétegei részben a meteorológiai ballonos méréseknek köszönhetően sugárzásmérési szempontból aránylag jól definiáltak, azonban az elmúlt években megnőtt az emberi aktivitás a régióban. Az űrturizmus megjelenésével a sugárzási tér ismeretének jelentősége fokozatosan nő, hiszen eddig nem látott mennyiségben lesznek emberek kitéve a kozmikus eredetű ionizáló sugárzás hatásainak. A sugárzási tér elégséges megismeréséhez mindemellett elengedhetetlen a megfelelő mérési struktúra kialakítása, egyes mérési összeállítások korlátainak ismerete. Kutatómunkámmal az Energiatudományi Kutatóközpont Űrkutatási Laboratóriumának régóta fennálló űridőjárási és űrdozimetriai munkájába kapcsolódtam be, ahol 2020 nyarán a Stratolab Kft. közreműködésével Bácsszentgyörgyről felbocsájtott sztratoszféra ballon által gyűjtött adatok kiértékelésével foglalkoztam. A mérés során egy GMC-300 típusú Geiger-Müller számláló és egyéb kiszolgáló eszközök repültek, közel 3 órán keresztül, egészen 33,7 km tengerszint feletti magasságig. A mért eredményekből numerikus módon, függvényillesztéssel meghatároztam a sugárzási tér intenzitásának maximumát, az úgynevezett Pfozter-maximumot, melynek értéke: $19,2 \text{ km} \pm 1,8 \text{ km}$, továbbá megvizsgáltam ezen érték érvényességét és a mérés korlátait. Dolgozatomban mindezek mellett kiemelt figyelmet kap a kutatócsoport egy korábbi ballonos mérése, mely az Európai Űrügynökség BEXUS diákprogramja keretein belül a svédországi ESRANGE Space Centre-ből valósult meg, ahol több különböző típusú aktív és passzív detektorral vizsgálták a sugárzási teret a Föld északi poláris régiójában. A BEXUS projekt mérési eredményeinek bevonásával, illetve az irodalomban fellelhető hasonló mérések figyelembevételével arra keresem a választ, milyen körülmények közt szolgálhatnak elégséges adatokkal a bácsszentgyörgyihez hasonló kisméretű ballonos mérések. A mérési geometriák összehasonlításából levont következtetéseket a 2022-re tervezett HEMERA projekt keretein belül megvalósuló, szintén az ESRANGE állomásról felbocsátandó mérési összeállítás optimalizálásához nyújt majd alapot, segíti a majdani mérések kiértékelését.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és motiváció	3
1.1. Sugárzási tér jellemzése	3
1.2. Sugárzási tér mérése	6
1.2.1. Részecskeszám mérése	7
1.2.2. Sugárzási spektrum mérése	8
1.2.3. Dózismérők	8
1.3. Kísérletek a légkörben, meteorológiai ballonok fedélzetén	8
2. Stratolab 12-es mérés	9
2.1. Mérés bemutatása	9
2.2. Űridőjárási körülmények a mérés során	11
2.3. GMC-300 Geiger-Müller számláló	11
3. Adatok kiértékelése	12
3.1. Környezeti adatok	12
3.2. Sugárzási adatok	13
3.3. Kiegészítő tényezők kiértékelése	16
3.3.1. Holtidő becslése és beütésszám-gyakoriság	16
3.3.2. Árnyékolások	17
4. Eredmények	18
5. Diskusszió	18
5.1. Korlátozó tényezők	19
5.2. Kísérletek összehasonlítása	19
5.2.1. TECHDOSE kísérlet bemutatása	19
5.2.2. Eszközök és korlátozó tényezők összehasonlítása	20
5.2.3. Körülmények és eredmények összehasonlítása	20
5.3. Irodalmi vonatkozásban	21
5.4. Kihívások az értékelés során	22
6. Konklúzió	22
6.1. Tanulságok a HEMERA projekthez	22
7. Köszönetnyilvánítás	22

1. Bevezetés és motiváció

Föld körüli térség megismerésének alapvető vágya mellett közvetlen kozmikus környezetünk és a légkör kutatásának szerepe és praktikuma is felértékelődik. Az elmúlt több mint száz évben az ember aktívan próbálta meghódítani a világűrt. Egyre több eszköz és ember jut a légkörön keresztül a világűrbe vagy csupán annak közvetlen környezetébe, hogy ne csak meghódítsa, hanem meg is vizsgálja, hogy azt a társadalom számára a későbbiekben hasznosítani is tudja. Ennek a kutatásnak szerves részét képezi az úgynevezett közeli világűr kutatás, mely az ember által speciális védőöltözet segítségével elérhető, úgynevezett Armstrong-határ és a széles körben a világűr alsó határának tekintett Kármán-vonal közötti térséget jelenti. [19] Ezen térség alsó rétegeinek feltérképezésére alkalmas eszközök a meteorológiai ballonok.

Az Energiatudományi Kutatóközpont Űrkutatási Laboratóriumában és jogelődjeiben az 1970-es évek óta folynak sugárzásméréssel kapcsolatos kutatások, melyek eredményeképp több űrkvalifikált mérőműszer (Pille, TriTel, RadMag)¹ is eljutott a világűrbe, valamint az Európai Űrügynökség (ESA) REXUS/BEXUS² programjai által egyes eszközökkel méréseket végeztek a közeli világűrben is. A Stratolab Kft. magyar közeli világűr kísérletekkel foglalkozó céggel közreműködve 2020 nyarán repült meteorológiai ballon fedélzetén végrehajtott mérés során egy gyári, alapvetően a háttérsugárzás környezeti dózisteljesítményének a mérésére szolgáló (az iparban vagy akár repülőgépeken is használható) GMC-300-as típusú Geiger-Müller számláló repült. A demonstrációs repülés célja annak a vizsgálata volt, hogy mennyiben tud releváns adatokkal szolgálni a közeli világűr sugárzási teréről egy ilyen jellegű sugárzásmérő detektor. Kutatómunkám során ezen kérdésre kerestem a választ. A távlati cél egy olyan szolgáltatásszerűen működtethető ballonos rendszer lenne, mellyel itthon is monitorozni lehetne az űridőjárást és vizsgálni az abban bekövetkező eseményeket, ehhez nyújthat segítséget a Stratolab-12 adatainak elemzése.

1.1. Sugárzási tér jellemzése

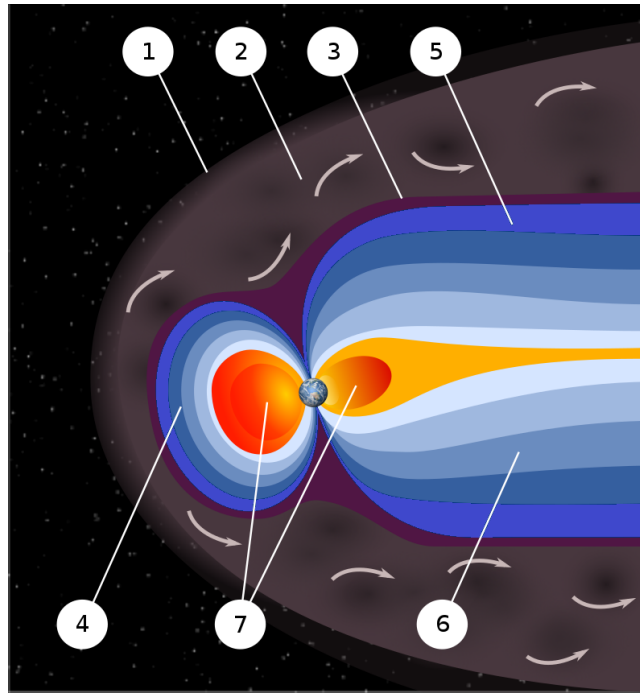
A kozmikus eredetű sugárzást az 1910-es évek óta ismerjük Victor Hess munkássága nyomán. A korábbi elmélet, miszerint a földfelszínen mérhető sugárzás teljes egészében a kőzetekből származik, megdőlt. Kísérletei során hőléggalonnal több ezer méteres magasságig jutva nemhogy nem csökkent a sugárzás intenzitása a felszínen mérhetőhöz képest, de körülbelül 700 m-es magasság után növekedett, majd a magasság növekedésével többszörösére nőtt. A napfogyatkozás alatt végzett kísérlete bizonyította, hogy ezen sugárzás forrása nem lehet kizárólagosan a Nap. Azóta ez a ballonos kísérlet a részecskefizika több területét virágoztatta fel, olyan alapvető eredményeket hozott, mint például a pozitron felfedezése, amiért 1936-ban Carl Anderson, Victor Hess-szel közösen Nobel-díjat is kapott. [1].

Az elmúlt több mint száz évben sokat finomodott és bővült a képünk a Föld közeli tér leírásáról. Mára bizonyított, hogy a kozmikus sugárzásnak két fő forrása határozza meg a teret: a galaktikus eredetű kozmikus sugárzás (GCR-Galactic Cosmic Rays) és a Napból eredő kozmikus sugárzás (SCR-Solar Cosmic Radiation). A sugárzás összetételét tekintve közel 90%-ban protonsugárzás 9%-ban α -sugárzás és csupán az egy százalékát alkotják az egyéb komponensek (elektronok, nehezebb ionok stb.).[2] Ezen részecskék igen széles energiatartományban, a keV nagyságrendtől egészen 10^{11} GeV-os nagyságrendig előfordulhatnak.[3]

A világűrbeli érkező primer részecskék jelentős részétől a galaktikus és a naptevékenység által alakított interplanetáris magnetoszféra nyújtják a kezdeti, majd a Föld belső folyama-

¹RadMag technológiai demonstrációja jelenleg is folyik a magyar fejlesztésű, a C3S Kft. által biztosított RADCUBE műhold fedélzetén

²Rocket and Balloon Experiments for University Students



1. ábra. A képen nyilakkal jelölt részek: 1) Fejhullám (Bow shock). 2) Magnetoszféra burok (Magnetosheath). 3) Magnetopauza. 4) Magnetoszféra. 5) Mágneses csóva északi lebenye (Northern tail lobe). 6) Mágneses csóva déli lebenye (Southern tail lobe). 7) Plazmaszféra. [7]

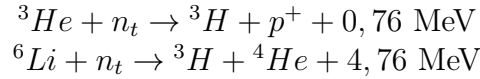
ai által keltett geomágneses mező és a légkör a végső, de a földi élet számára legjelentősebb védelmi vonalat. A mágneses mező a földfelszín közelében ezen terek összege, mely földrajzi elhelyezkedéstől függően nagyjából $30\text{--}60 \mu\text{T}$ nagyságú.[3] Az interplanetáris magnetoszféra változékony, és változásában ciklikusság figyelhető meg, mint a naptevékenység minimumának és maximumának 11 éves ciklusa. Jelentősebb tevékenység esetén a Napból kilökődő plazma több galaktikus részecskét képes "kisöpörni" a Naprendszerből.[4] Ezen hatás következtében a primer sugárzás fluxusa nagyban függ a kiáramló plazma energiaeloszlásától. A primer részecskék energiájának növekedésével csökken a naptevékenység moduláló hatása.[3]

A Föld mágneses tere több mező összege, de csaknem 90%-ban a Föld külső magja generálja, melynek változása igen lassú[5]. A felszín közelében és attól pár Föld-sugár távolsáig jó közelítéssel dipólus, ez néhány Föld-sugár távolságra megváltozik. A szuperszonikus sebességű napszél a Nap felé eső oldalán "összenyomja" a teret, míg a Naptól távoli oldalon az erővonalak elnyúlnak. A napszél nagysebességű részecskéi a mágneses mező hatására eltérülnek két-három Föld-sugár távolságban lökéshullám alakul ki a mágneses egyenlítő körül. A beérkező részecskék energiájának egy része termikus mozgássá alakul, így lelassulva áramolnak tovább a részecskék a mágneses tér mentén. Ez a zóna elválasztó réteget képez a Nap mágneses tere, valamint a földi mágneses mező közt. Azonban ezek nem élesen elkülönülő rétegek, hanem topologikusan kapcsolódhatnak egymáshoz. Ez a rendszer például a napszél sebességétől, intenzitásától való függése miatt dinamikus lesz. [6]

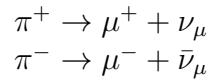
A felszínhez közel fénysebességgel közeledő, primer sugárzás a mágnes mező mellett a légkör molekuláival is elektromágneses, illetve magköölcsönhatásba lép részecskétől és energiától függően. Ezen kölcsönhatások eredményeként másodlagos sugárzás jön létre, melyek típusa és energiája függ a primer részecskék jellemzőitől, energiájától és a közeg összetételétől. Alapvetően nem mindegy a sugárzás részecskéjének típusa, ha például a sugárzás neutronsugárzás, akkor a részecske neutrális jellege miatt nem fog kölcsönhatásba lépni az elektronfelhővel, csak az atommaggal (ez elektron sugárzás esetén éppen ellenkezőleg a legvalószínűbb.) Az energiától függően a nagy energiájú neutronok ütközhetnek rugalmasan egy atommaggal, vagy akár

protonokat is szakíthatnak ki belőle. Az sem mindegy, hogy a légkör mely molekulájával lép kölcsönhatásba a sugárzás.¹Ez a sokféleség detektálási szempontból is kihívást jelentő kérdés, ugyanis detektortípustól függően eltérő sugárzástípusokra és energiákra lesz érzékeny a műszer.

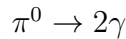
A detektálás során az előző neutron példájánál maradva, számszerűsíthetjük is a termikus neutronok különböző anyagokkal való kölcsönhatását. Ezen neutronok hélium atommaggal ütközve nehéz hidrogén atom (trícium) és proton keletkezik 0,76 MeV energia felszabadulása közben. A lítium ${}^6\text{Li}$ izotópja esetében a deutérium mellett hélium atommag keletkezik és 4,76 MeV energia szabadul fel. [8]



A légkörben keletkező másodlagos részecskék közül a leggyakoribbak a pionok. Megkülönböztethetünk töltött pionokat, melyek legnagyobb valószínűséggel müonokra és neutrínókra bomlanak, és csak igen kis valószínűséggel jönnek létre fotonok. Müonsugárzás ezen kívül létrejöhet bájos részecskékből, illetve kaonokból is.[3]



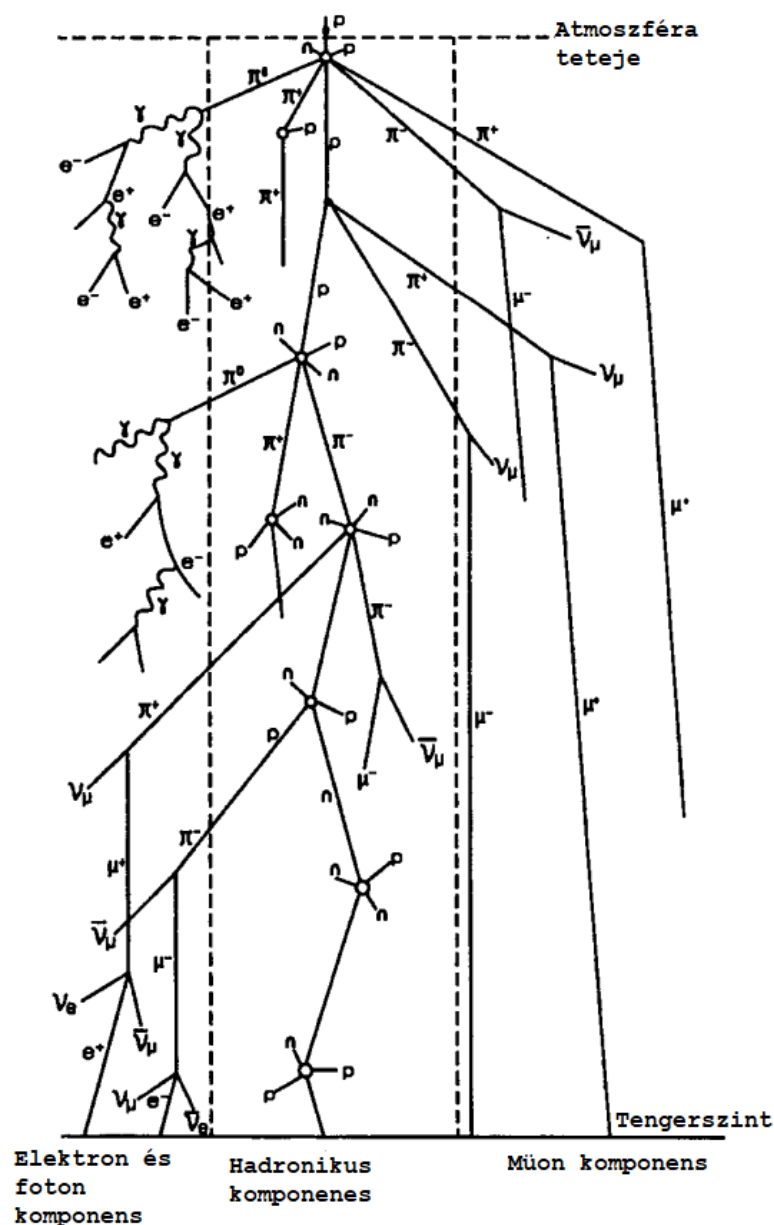
A neutrális pionok esetében két foton keletkezik, melyek képesek elektron-pozitron párkeltéssel kaszkád reakciót beindítani.[3]



Ezen kívül létrejöhet hadronikus kaszkád reakció, mely során az elsődleges részecske erős kölcsönhatáson keresztül lép kapcsolatba a légkör molekuláival, további mezonsugárzást létrehozva. Így elmondható, hogy egy megfelelően nagy energiájú elsődleges részecske több millió másodlagos részecskét képes generálni, ezzel úgynevezett részecske záport kialakítva. Az általános bomlási utakat a 2. ábra foglalja össze. Az egyes kozmikus részecskék előfordulása tehát jellemzően más és más az atmoszféra egyes légrétegeiben. A leggyakoribb részecskék légköri mélység szerinti előfordulását a 3. ábra foglalja össze.

A másodlagos részecskék fluxusa a kaszkádreakcióknak köszönhetően bizonyos atmoszférikus mélységig növekedik, majd az energiaveszteség, a bomlás és az abszorpció miatt a felszín közelében csökken az értéke. A másodlagos részecskék keletkezésének maximumát először Pfofzer és Regener fedezte fel; a megfelelő tengerszint feletti magasságot a két tudós után Regener-Pfofzer-maximumnak nevezték el. A Regener-Pfofzer-maximum 18-25 km tengerszint feletti magasságban található, a mágneses szélességtől függően a pólusok felé növekszik a magassága, valamint kimutathatóan irányfüggő is [21] [20] .

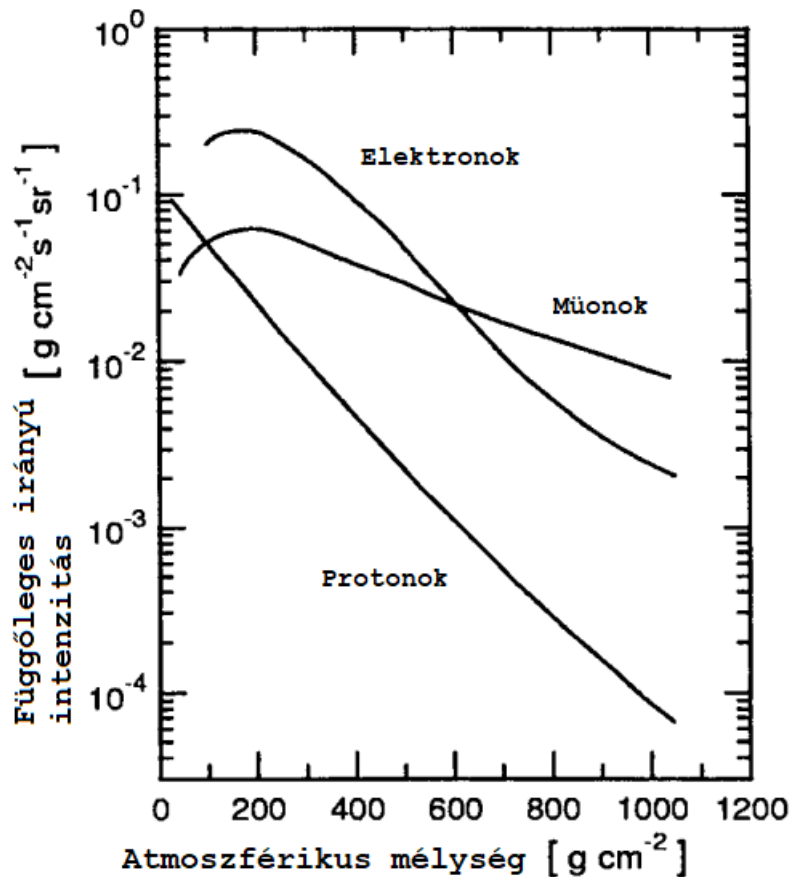
¹Ezen hatások eredményezik például a kozmogén radonukleotidok keletkezését.



2. ábra. Részecskezápor sematikus ábrázolása [3]

1.2. Sugárzási tér mérése

Az 1.1-es fejezetben felvázolt sugárzási tér igen bonyolult összetételét és karakterisztikáját tekintve is, így komoly mérés technikai kihívást jelent a tér feltérképezése. Általánosan kijelenthető, hogy minden detektor működési alapja a sugárzás kölcsönhatása az anyaggal. Éppen ezért körülményesebb a semleges részecskék detektálása, hiszen azok közvetlen nehezen detektálhatók, csak az esetleges magreakciókból származó izotópok sugárzása, illetve a valamely anyagban elnyelődött másodlagos töltött részecskék mérhetőek.[11] Töltött részecskék esetén ezzel szemben detektortípustól függően a detektor anyaga és a sugárzás kölcsönhatása eredményeként bekövetkezhet ionizáció, fékezési röntgensugárzás, elektromos impulzusváltozás, fényemisszió, kémiai átalakulás vagy szerkezetváltozás.[11] Különböző mérés technikákat különböztethetünk meg. Detektorainkkal alapvetően mérhetünk részecskeszámot, a sugárzás energiaspektrumát vagy közvetett módon különböző dózismennyiségeket. Az eszköz energiaellátása szempontjából megkülönböztethetünk aktív és passzív detektorokat, illetve műszereket.[8] Az aktív műszerek szinte azonnali választ adnak a sugárzásra, míg a passzív detektorokkal valamilyen időintervall-



3. ábra. A leggyakoribb részecskék intenzitásának magasság szerinti változása [3]

lumon keresztül zajlik az információgyűjtés. Ezen eszközökből az információ utólagos kiolvasással, kiértékeléssel nyerhető ki. A mérőrendszerek fő egységei a detektor és a jelfeldolgozó egység.[11] Felhasználás szerint megkülönböztethetünk részecskeszámlálókat, spektrométereket és dózismérőket, melyekről a következő fejezetekben a teljesség igénye nélkül bemutatásra kerül néhány példa.

1.2.1. Részecskeszám mérése

Részecskeszám mérésekor az elsődleges kérdés, hogy áthalad-e részecske a detektoron, ezáltal mérve a sugárzás létét vagy nemlétét. Az ilyen típusú detektorokkal a sugárzás intenzitására lehet következtetni. Részecskeszámlálók közé soroljuk a Geiger-Müller számlálókat.[8] Az ilyen típusú detektorok rendszerint gázzal töltött kondenzátorok, melynél a töltött részecske által keltett ionok és elektronok, az elektromos vonzásnak megfelelően gyorsulnak az adott elektróda felé. A mért jel, egy bizonyos feszültség felett a keletkező áram esetében, csak kis mértékben fog függeni a feszültségtől. Ebben a tartományban működnek a GM-számlálók. Ekkor a keletkező elektronok energiája kellően nagy lesz ahhoz, hogy a teljes anódon kisülés alakuljon ki ezáltal jóval megkönnyítve a jelfeldolgozást. A teljes kisülés miatt megnő a holtideje az eszközöknek, ekkor a bejövő sugárzást nem képes detektálni.[11] A GM-számlálókon kívül léteznek még egyéb gáztöltésű detektorok, az ionizációs kamrák és a proporcionális számlálók, melyek a GM-csőveknél alacsonyabb feszültségen működnek, így az adott töltött részecske ionizációja nem vált ki teljes kaszkád reakciót. Ezen detektorokkal lehetséges spektrális információkat is mérni. A detektorok alkalmazhatóak impulzus üzemmódban, mely során a beütésszámot lehetséges detektálni, illetve integrál üzemmódban, ahol a sugárzás ionizálása által létrehozott áram

mérhető. Utóbbi használata, nagy intenzitású sugárzás esetén előnyös, mivel ekkor az egyes töltött részecskék által okozott impulzus összefolyhat.

1.2.2. Sugárzási spektrum mérése

A sugárzási spektrum mérésének egyik lehetséges módja, hogy bizonyos anyagokban fotonok keletkeznek az ionizáló sugárzás hatására. Ezen detektorokat a jelenség elnevezése alapján szcintillációs detektoroknak nevezzük. A sugárzás hatására keletkező 350-600 nm körüli fotonokat, fotoelektronsokszorozó segítségével alakul érzékelhető elektronikus jellé. A szcintillációs kristályok elnyelik a beérkező sugárzás energiáját több lépésben, részben vagy egészben, majd ezzel az energiával arányos mennyiségű fotont emittálnak. A fotoelektronsokszorozóba belépő fotonok gyorsulnak majd egyre több elektront leszakítva a dinódákról, válaszjelet létrehozva. Ez a válaszjel egyenesen arányos lesz a detektált részecske energiájával, így egy mérés során elkészíthető az adott sugárzási tér energia spektruma. A szcintillátorok anyaga szerint megkülönböztetünk szerves, szervetlen és folyadék szcintillátorokat.[11]

Szilárd ionizációs kamráknak tekinthetők a félvezető detektorok. Ezek működési elve a félvezetők azon tulajdonságán alapszik, hogy alacsony hőmérsékleten csak a hőmérséklet emelkedésével, vagy sugárzás hatására léphetnek ki az elektronok az alapállapotból. Vagyis itt a fotonok helyett elektron-lyuk párok keletkeznek ionizáló sugárzás hatására. A gáztöltésű ionizációs kamrákkal ellentétben itt a létrejövő töltéshordozók száma egyenesen arányos lesz az elenyelt sugárzási energiával .[8]

1.2.3. Dózismérők

Lévén, hogy az elnyelt dózis (D) egy az ionizáló sugárzás által közvetlenül leadott energiájának átlaga ($\bar{\epsilon}$) kis térfogatú elem tömegére (dm) nézve, így közvetlen nehezebben mérhető, mint sugárzás energiája [12] .

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (1)$$

Mértékére általában számítással lehetséges következtetni. Úgymond közvetlenebb dózismérésre többnyire a passzív eszközöket alkalmazzuk, hiszen ezekkel meghatározható, hogy a detektort mennyi sugárzás érte adott időintervallum alatt. Ehhez olyan anyagok szükségesek, melyek képesek szerkezetükben megőrizni a sugárzás által keltett változásokat. A termolumineszcens anyagok ilyenek, melyeknél sugárzás hatására az elektronok magasabb energia szintre kerülnek, a kristályrácsszerkezetnek köszönhetően ott is maradnak. Melegítéssel visszaállíthatóak az alapállapotba foton kibocsátás közben, a fotonok mennyisége arányos lesz az elnyelt dózissal. Ezen dózismérők általában kis rendszámú a szövetekkel ekvivalens anyagokból készülnek, így az arányosság a környezeti dózisegyenértékkel lesz arányos.[8] Fontos, hogy az elnyelt dózis még nem mondja meg közvetlenül a sugárzásvédelemben fontos biológiai károsítás mértékét. Annak a valószínűségére, hogy adott elnyelt dózis milyen mértékű biológiai károsodást vált ki, az effektív dózist szokták használni a dozimetriai gyakorlatban. Ez olyan tényezőket is figyelembe vesz mint a részecske pályája mentén keletkező ionizációsűrűség. Gyakran használt mennyiség a lineáris energiaátadási tényező (LET), mely az adott úthosszon a közegnek átadott energia és az úthossz hányadosa. [12]

1.3. Kísérletek a légkörben, meteorológiai ballonok fedélzetén

Ahogy az Victor Hesse, Pfozter és Regener kísérlete nyomán is láttuk a különböző hőléggalonnal, majd később meteorológiai ballonnal történő mérések és a földközeli légkör rétegek sugárzási

terének megismerése összefonódott az elmúlt évszázadban. A műholdakkal, rakétákkal és az űreszközökkel mára jócskán kibővült mind az eszköztára a légköri sugárzás mérésével foglalkozó kutatóknak, mind a feltérképezhető terület. Azonban a rakétás és műholdas kísérletekhez képest jóval költséghatékonyabb módszer a ballonnal történő mérés, habár ennek is megvannak a maga korlátai. A módszerek kvalitatív összehasonlítását a 1. táblázat tartalmazza. Egy átlagos

Vizsgálati módszer	Költség	Magasság	Időtartam	Hasznos teher tömege
Meteorológiai ballon	alacsony-közepes	<40km	órák-napok	100g-pár kg
Rakéta	közepes-magas	~80-90 km	percek	akár pár 10 kg
Műhold	közepes-magas	100+ km	hónapok-évek	akár pár 10 kg

1. táblázat. A különböző közeli világűr kutatási módszerek összehasonlítása.

meteorológiai ballon repülési ideje néhány óra, de méretétől, a légkör állapotától (hőmérséklet, nyomás stb.) és a hordozott teher méretétől jelentősen függ, csak úgy mint az emelkedési magassága, mely általában nem magasabb 30-35 km-nél ¹. Passzív platform, vagyis feleresztés után nem irányítható ², ezenkívül landoláskor igen nagy az esélye a műszerek sérülésének, valamint elvesztésének. [19]. Ezeken kívül megjelentek ultra hosszú repülési idejű ballonok, melyek fedélzetén akár heteken keresztül lehetséges méréseket végezni. Az eddigi leghosszabb mérés 55 nap 1 óra 34 perc volt a Super-TIGER névre keresztelt projekt során.[18] Ezen a sarkok környezetében főként nagy energiás primer sugárzást vizsgálnak[13]. Az egyes sugárzásmérő eszközök tömeggyártásával még kisebb költségekkel lehetséges méréseket végezni a légkörben, azonban gyakorta, mint például hazánkban is a reptetés bejelentés köteles, így nem készíthetőek mérések tetszés szerint akármikor.

Talán ezért is viszonylag kevés meteorológiai ballonos sugárzásmérés lelhető fel. Az általam az irodalomban megtalált, az elmúlt 10 év meteorológiai ballonos sugárzásmérési kísérleteit 2. táblázat foglalja össze. Ezen kísérletek nem mind ugyanazon sugárzástípusra és többnyire különböző működési elvű műszerekkel készültek a világ több pontján.

Eszköz	Helyszín	Év
mikroszcintillátor	Egyesült Királyság[17]	2018
RD2014	Bulgária [14]	2018
szintillációs detektor	Nyugat-Bengál (India)[16]	2017
TEPC, TID, Liulin (félvezetős), RaySure	Új-Mexikó [15]	2015
TRITEL (félvezetős), Pille (TLD)	Svédország [30]	2011

2. táblázat. Az elmúlt 10 évben általam fellelt, publikált ballonos mérések

2. Stratolab 12-es mérés

2.1. Mérés bemutatása

Hazánkban 1913-ban indult útnak az első önműködő magaslégkör-kutató ballon, ezzel megindítva a légkörkutató tevékenységet. 1953-ban megindult a meteorológiai ballonok rendszeres felbocsátása, melyekkel a meteorológusok leginkább a légkör alsó 20 km-es tartományának

¹Egyes repülések lehetnek ennél magasabbak például Felix Baumgartner ugrásakor a ballon 39 km magasra emelkedett

²Ballasztokkal legfeljebb a repülési magasság szabályozható

állapotát vizsgálják.[19] Publikációra is alkalmas tudományos igényű rendszeres mérések elvégzésére jött létre a Stratolab Kft., mely 2014 óta foglalkozik ballonos repülések lebonyolításával Magyarország déli országrészében.[19]

A Stratolab-12 repülés során egy alapvetően környezeti háttérsugárzás mérésére szolgáló, M4011 Geiger-Müller számlálóval felszerelt, GMC-300 típusú kézi műszerrel térképeztük fel a sugárzási teret az eszköz lehetőségeit és korlátait is figyelembe véve.

A ballon felszereltsége:

- GMC-300 Geiger-Müller számláló
- Hwoyee márkájú 1600 g-os latex ballon
- Hungarocell (EPS) gondola
- ernyő
- leválasztó modul
- akkumulátor
- GPS mobilkommunikációs eszköz
- FEDAT egység
- hőmérséklet szenzorok
- RS41 tracker

A műszer egy 1600 g-os hidrogéntöltésű latex ballonnal emelkedett (33702 ± 9654) m- es magasságig, majd ott a ballon kidurranása után ejtőernyők segítségével jutott vissza sikeresen a felszínre. A 4 cm vastag hungarocell gondola és a mikecell töltőanyag (habosított polisztirol) biztosította a felszerelés védelmét és hőszigetelését, így a hőmérséklet a doboz belsejében nem csökkent 0°C alá.

A telemetriai adatok APRS rendszer frekvencián kerültek lesugárzásra RS41 tracker eszközzel. A pozícióadatokat egymástól független GPS mobilkommunikációs eszköz és a FEDAT egység biztosították. A mérés során a ballon a földfelszínre vetítve az 4.ábrán látható útvonalat tette meg. A GMC-300-zal mért adatokat az eszköz saját memóriájában tárolta és csak a repülést követően kerültek letöltésre. A berendezés teljes tömege nem haladta meg a 2,5 kilogrammot. A külső szenzorokkal mért környezeti hőmérsékleteket és légnyomás adatokat a 3.1. fejezetben közlöm.

A mérés során a műszerek 10.13-kor 2 percre leálltak. Ezen leállás pontos oka ismeretlen. Feltehetően az emelkedés során bekövetkező környezetváltozás okozhatta. Az alacsony légnyomás következtében a vezetőkben megváltozik az átütés maximuma, mely okozhat rövid műszerhibát.



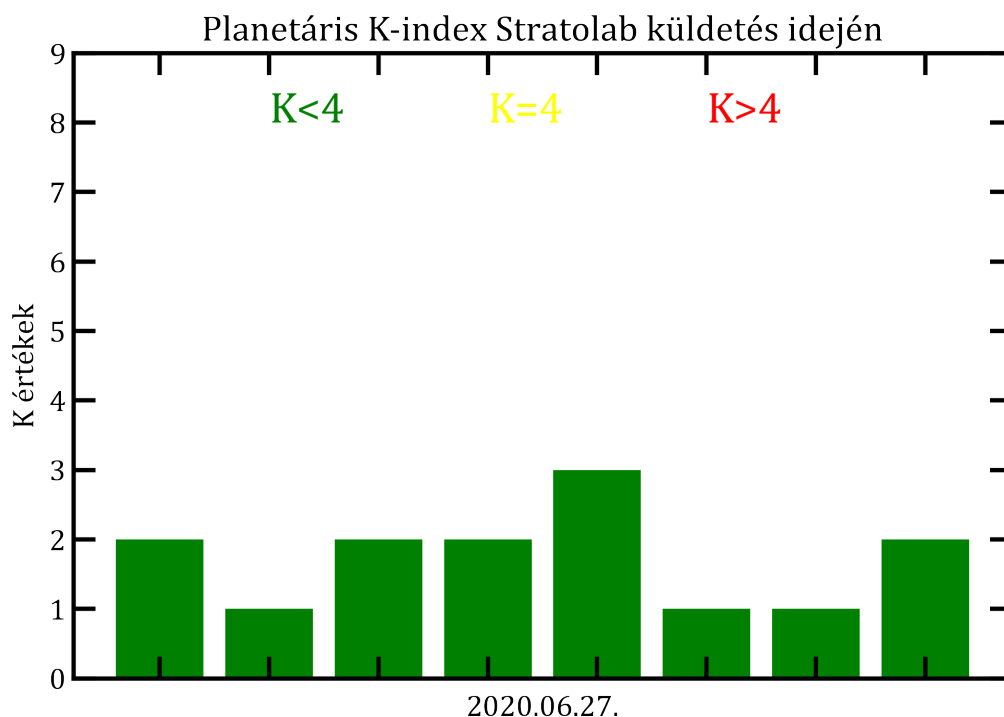
4. ábra. A rögzített földrajzi hosszúsági és szélességi adatok alapján a ballon repülése közben megtett út a földfelszínre vetítve, Google Earth programmal ábrázolva.

2.2. Űridőjárási körülmények a mérés során

Ahogy azt az 1.1.bekezdésben már tárgyaltam, a sztratoszférában mérhető sugárzási teret jelentős mértékben befolyásolja a naptevékenység. A geomágneses aktivitás jellemzésére a K-index mennyiséget használják, amely a Föld adott mágneses komponensében bekövetkező zavarok mértéke. A K-index egy 0-9-ig terjedő skálán kerül beosztásra a mágneses mező horizontális komponensének maximum fluktuációja alapján. Az adatokat 3 órás intervallumokra adják meg. 13 különböző földrajzi elhelyezkedésű mérőállomás átlaga alapján becsülik meg a teljes Földre vetített zavarok mértékét; ezt nevezik planetáris K-indexnek (K_p).[24] Az 5 fölötti K-indexek geomágneses vihart jelölnek. A mérés napján a planetáris K-index nem haladta meg a 3 értéket, mely átlagos naptevékenységre utal. A mérés napján az állomásokon mért K-adatok átlagát a 5.grafikon foglalja össze.

2.3. GMC-300 Geiger-Müller számláló

A sugárzási tér mérésére a GMC-300-as sugárzásmérővel került sor, mely részei az 6. ábrán láthatóak. A műszer egy hordozható bel- és kültéren is használható, ionizáló sugárzás detektálására alkalmas eszköz. Főbb tulajdonságait a 3. táblázat tartalmazza.



5. ábra. A NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) Űridőjárési centrumának adatai alapján [24]



6. ábra. A mérés során felhasznált Geiger-Müller számláló benne M4011 GM-csővel.

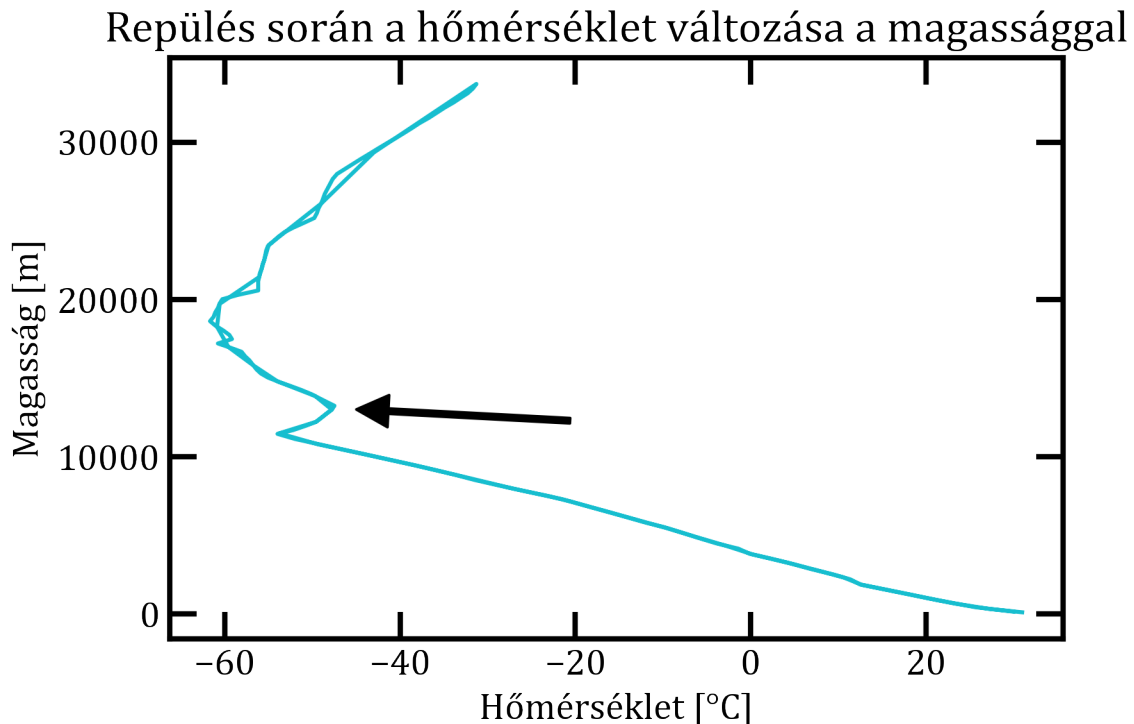
3. Adatok kiértékelése

3.1. Környezeti adatok

A szenzorok alapján a külső hőmérsékletet a 7. ábra, a légnyomást a 8. ábra mutatja. A légnyomásgörbén szépen látható az elméleti elvárásnak megfelelő exponenciális csökkenés. A hőmérséklet minimuma 19 km-es magasságban található, ami figyelembe véve a földrajzi koordinátákat, és hogy a mérés nyáron történt reális. A tropopauza áthaladása után szépen látszik az ózonréteg hőtermelése miatt bekövetkező hőmérsékletnövekedés.[23] Érdekes még az 7.ábrán nyíllal jelölt lokális hőmérsékletnövekedés, melynek ugyanakkor nincs hatása a mérésekre.

	M4011 (Stratolab)
Érzékeny hossz	88 mm $\pm$ 2 mm
Érzékeny átmérő	10 mm $\pm$ 0,5 mm
Érzékenység gamma sugárzásra*	0,1 MeV-1 MeV
Geometriai tényező	92 cm ² ·sr
Mérhető dózistartomány*	2 · 10 ⁻¹ – 1 mGy/h

3. táblázat. A GMC-300 alapadatai. A gamma sugárzásra való érzékenység alatt az elnyelt dózisteljesítmény kalibrálásához releváns tartomány van megjelölve. A mérhető dózistartományon kívül is üzemel a műszer azonban ez a működés nagyobb hibával terhelt.



7. ábra. A szenzorok által mért hőmérséklet a ballon repülése során. A nyíl feltehetően valamilyen helyi anomáliára utal

3.2. Sugárzási adatok

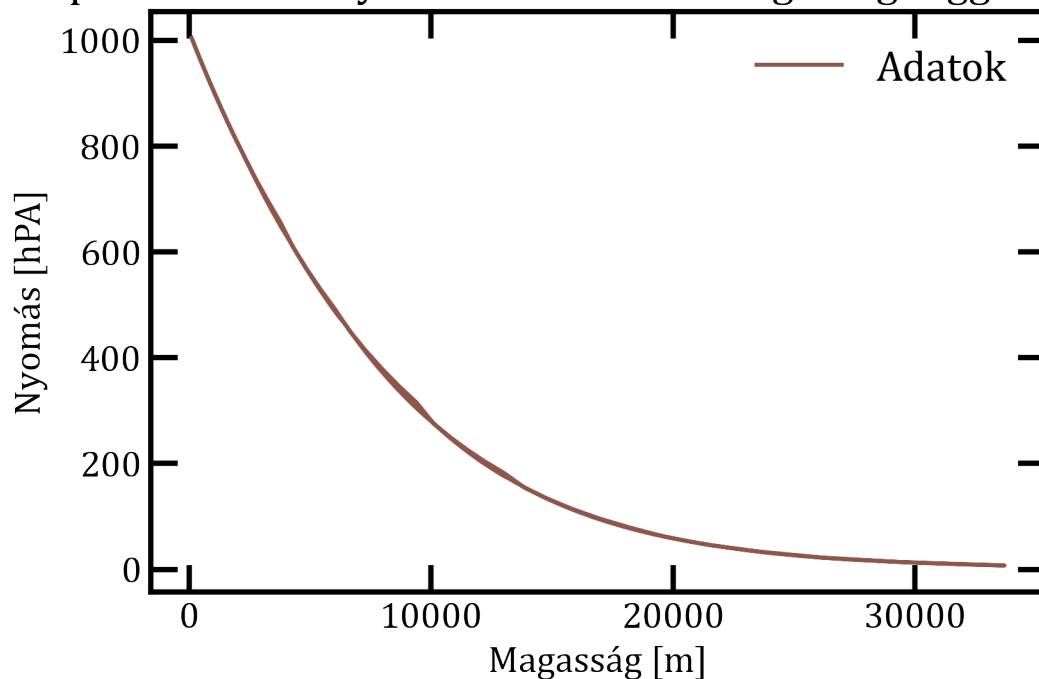
A GMC-300 egységgel a repülés során mért beütésszámokat a 9. és a 10. Ábra mutatja. Az itt feltüntetett adatok nem tartalmazzák a 2 perces műszerleállás okozta hibás (nem fizikai) értékeket, ezeket kiszóró pontként kezeltem.

A 9. ábrán 9.30 és 10.40 környékén láthatóan megnövekszik a beütésszám, mely indokolható a 1.1. fejezetben említett másodlagos részecskék maximumán történő áthaladással, mind emelkedéskor, mind a ballon kidurranása után, tekintve, hogy a maximumok ugyanahhoz a magasságértékhez tartoztak, ld. 10

A 10. ábrán a magasság függvényében a beütésszámok növekvő majd csökkenő tendenciát mutatnak. Ez az első közelítésben jól megfelel az elméleti várakozásainknak, hiszen a légkör sűrűségének csökkenésével, melyet az 8. ábrán láthatunk a bomlási folyamatok mennyisége is csökken[23].

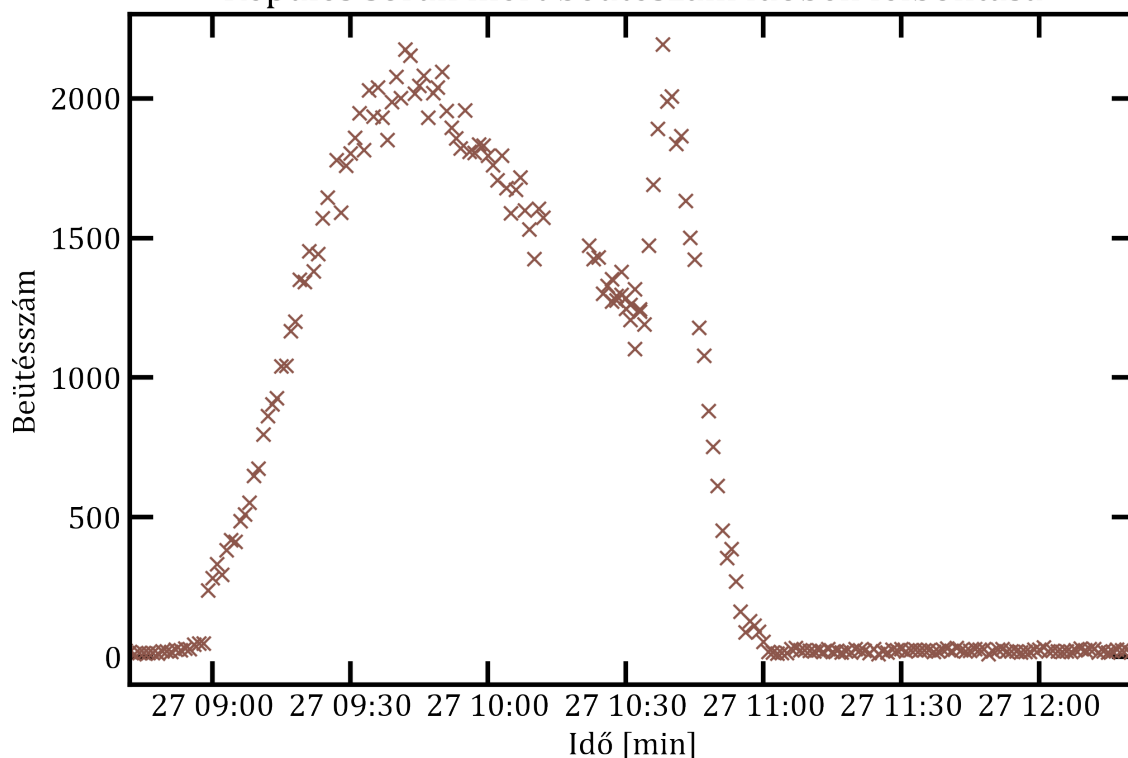
Lévén, hogy a mérések perces felbontásban készültek, az beütésszám adatokhoz pontokhoz a mérési időtartamhoz tartozó magasság értékek közepértékét rendeltem, és a közepek eltérését

Repülés során a nyomás változása a magasság függvényében



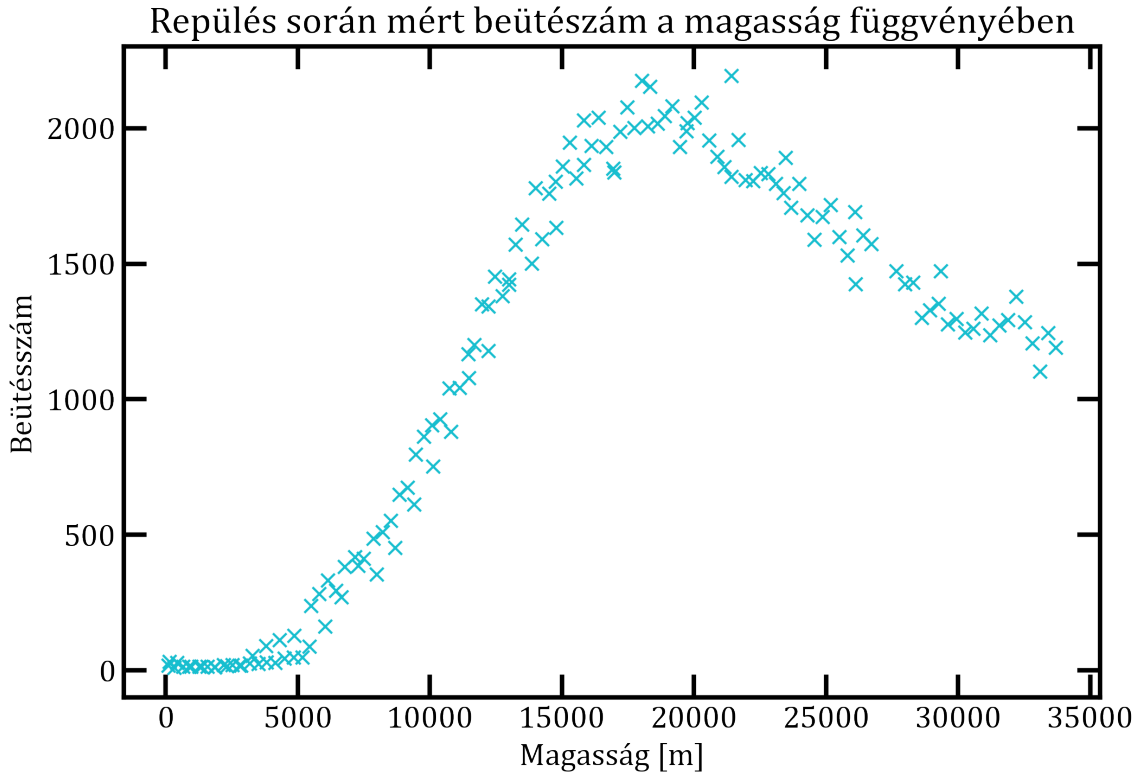
8. ábra. A szenzorok által mért légnyomás adatok a ballon repülése során.

Repülés során mért beütésszám időbeli felbontása



9. ábra. A kísérlet során mért beütésszámok az idő függvényében.

az adatoktól tekintettem a mérés hibájának. A beütésszámokra feltételeztem, hogy Poisson-eloszlást követnek, így azok szórását vettem hibának. A közelítés alapjául a Poisson-eloszlás tulajdonsága utal, miszerint adott idő alatt konstans valószínűséggel bekövetkező diszkrét eseményekről beszélünk, melyek tekinthetők függetlennek, hiszen a detektorba való becsapódása

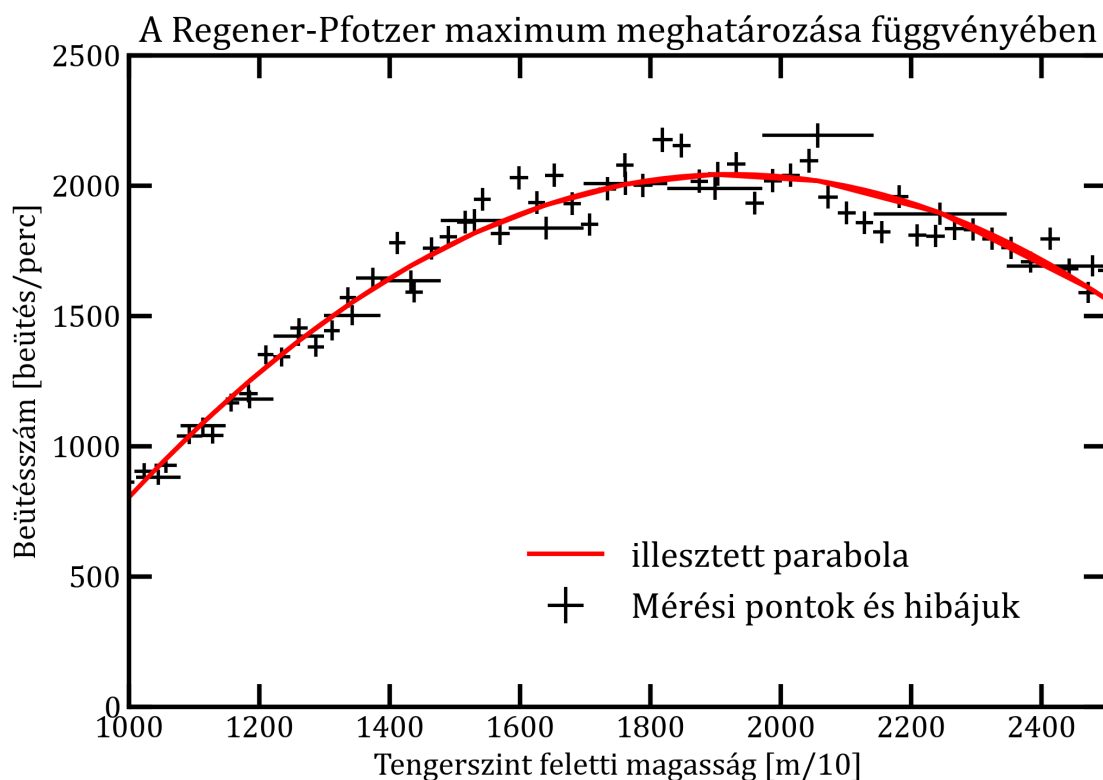


10. ábra. A kísérlet során mért beütésszámok a magasság függvényében.

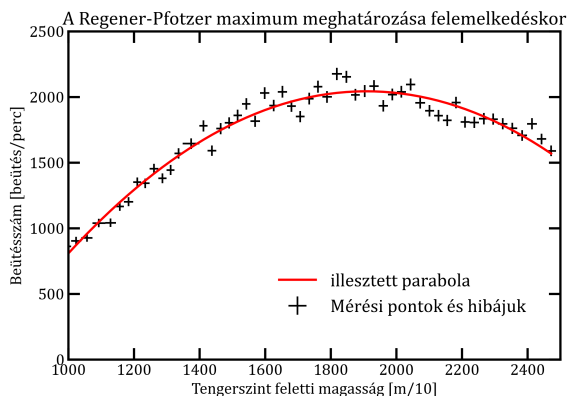
egyes részecskéknek egymástól független (a detektorok kis mérete miatt a részecskezáporban keletkező két részecske egymást követő detektálása elhanyagolható). [26] Az egyes pontok hibáival feltüntetett adatok a 11. ábrán láthatóak.

A Regener-Pfotzer maximum becsléséhez a magasság függvényében megadott mért percenkénti beütésszám adatokra másodfokú polinomot illesztettem numerikusan, a nem-lineáris legkisebb négyzetek módszerével, a $[10000, 25000]$ m-es tartományra (67 mérési pont). Az illesztett görbét mint matematikai segédeszközt használtam; nem tartalmaz fizikai intuíciót. A későbbiekben fizikai jelentéssel is rendelkező görbék vizsgálatát is tervezem. Az illesztés eredménye a 11. ábrán látható.

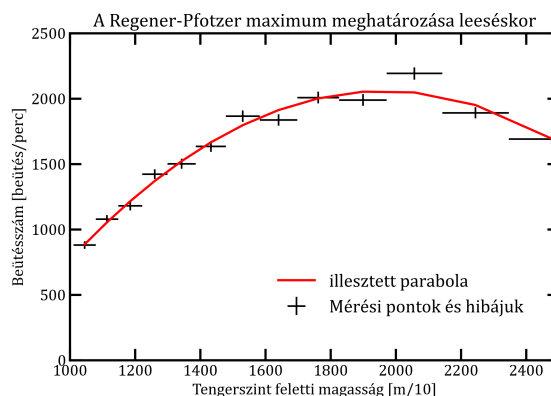
Lévén, hogy a kísérlet emelkedési és esési fázisában a ballon sebessége eltérő, eséskor gyorsabb, így az adatok felbontása sem lesz egyforma. Megvizsgáltam, külön az emelkedéskor, valamint az eséskor mért maximumokat. Eredménye a 14. ábrán látható. Az eszköz ezen kívül még gyárilag kalibráltan képes dózisegyenértéket meghatározni, melyek adatait a 13. ábrán szemléltetem. Az adatok földi gamma sugárzásra vannak kalibrálva a 3. táblázatban feltüntetetteknek megfelelően a sugárzási térben elnyelt dózisra vonatkozóan addig adhat releváns információt, amíg a térben inkább a gamma-sugárzás dominál. Ez a repülőgépek repülési magasságáig (nagyjából 10000 m) jól egyezik az irodalmi elvárásokkal, azonban a teljes térre vonatkozóan nem tekinthetőek validnak. Az adatok beütésszámból származtatottak köztük az összefüggés lineáris, így térbeli eloszlásuk is megegyezik a beütésszám eloszlásával.



11. ábra. A beütésszám maximuma közelében illesztett parabola



(a)



(b)

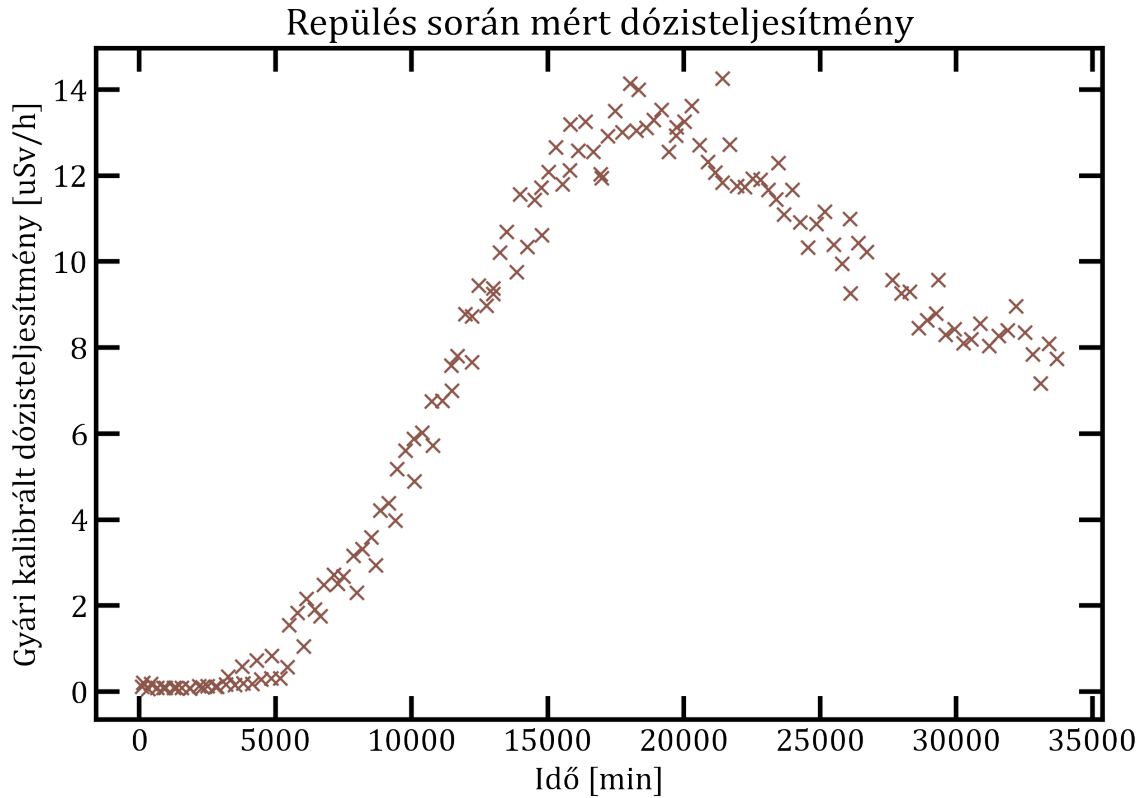
12. ábra. Láthatóan kevesebb az adat és nagyobb hibával rendelkezik leeséskor (b)

3.3. Kiegészítő tényezők kiértékelése

A mérés elemzése szempontjából fontos kiegészítő tényezők a műszer sajátosságából adódó holtidő és a műszert körülvevő árnyékolás.

3.3.1. Holtidő becslése és beütésszám-gyakoriság

A GM-csőben az ionizációt követően lezajló kaszkád reakció következtében véges idő szükséges ahhoz, hogy a rendszer visszaálljon eredeti állapotába, és az újabb ionizációk detektálhatók legyenek. Ezen idő alatt a detektoron áthaladó részecskék nem tudnak kiváltani impulzust, így nem kerülnek detektálásra. Alapvetően a holtidő nem haladhatja meg a GM-cső 1 s alatti bekövetkező beütések 10%-át, vagyis 100 μ s-os nagyságrendű. Az ez alatt esetlegesen bekövetkező beütések száma feltéve, hogy azok Poisson eloszlást követnek, még a maximális beütésszámot



13. ábra. A repülés során a beütésszámból származtatott környezeti dózisegyenérték gamma sugárzásra kalibrálva

tekintve(2193 beütés/perc) is csak 8 beütéssel többet lehetne érzékelni percenként. .

3.3.2. Árnyékolások

A detektálható részecskék mennyiségét, vagyis a detektorral mért beütésszámot csökkentheti az azt körülvevő anyagban elnyelt sugárzás. Töltött részecskék, mint például a sugárzási tér nagy részét képező protonok behatolási mélysége függ az adott töltött részecske kezdeti energiájától (E_0) és a közeg sűrűségétől(ρ), valamint egy empirikus konstanstól (A .) Az összefüggés származtatható a Bethe-Bloch formulából annak inverzének energia szerinti integrálásából.[8] Empirikus formáját a 2. összefüggés írja le.

$$R = \frac{A}{\rho} E_0^p \quad (2)$$

50-250 MeV közti energiatartományon $p=1,5$ közelítés használható. Különböző anyagokban vizsgált elnyelődése között félempirikus összefüggés áll fenn, mellyel becsülhető egy másik anyagban való behatolási mélység(3. egyenlet). Ez a Bragg-Kleeman szabály.

$$\frac{R_1}{R_0} \approx \frac{\rho_0 \sqrt{A_1}}{\rho_1 \sqrt{A_0}} \quad (3)$$

A becslés meglepően jó, még aránylag nagy hibák esetén is kisebb mint 20%. Az anyagok szerkezetének összetettségének növekedésével kötések és többféle atomokból álló molekuláknál megjelenő polarizációnál a becslés egyre pontatlanabbá válik.[29]

Az űrhajósok és űreszközöket érő sugárzás vizsgálatakor alumínium ekvivalens értékek használata terjedt el, lévén, hogy az alumínium igen gyakori szerkezeti anyag az űrtechnikában. Az

alumíniumnak és ezáltal az ekvivalens megadásnak a másodlagos sugárzások miatt megkérdőjelezhető a sugárzásvédelmi szempontból vett értéke, azonban az árnyékolások összehasonlításához praktikus megközelítés.[28] Az alumínium egyenérték meghatározásához SRIM szimulációs program által kalkulált értékeket használtam. A szimulációs program Bragg-Kleeman szabályt használja, és ezt korrigálja CAB (Core and Bond) megközelítéssel. [29] A (30 ± 0.5) mm vastag hungarocell (habosított polisztirol $\rho = 0,015\text{g/cm}^3$) és a $(0,34 \pm 0,011)$ mm vastagságú GM-cső doboza (polietilén $\rho = 0,93\text{g/cm}^3$) által elnyelt energia értékeit 4.táblázat tartalmazza. Vagyis

Árnyékoló réteg	Általa elnyelt energia
polisztirol	$3,5 \text{ MeV} \pm 0,25 \text{ MeV}$
polietilén	$4,5 \text{ MeV} \pm 0,25 \text{ MeV}$

4. táblázat. Árnyékolások elnyelése az anyagban

$(8 \pm 0,5)\text{MeV}$ energiájú protonok már képesek eljutni a detektorba. Az elnyelés szempontjából ez egy $(0,42 \pm 0,091)$ mm vastag alumínium lapnak felel meg.

4. Eredmények

A 3.2.fejezetben leírt módon meghatároztam az adatokból a Regener-Pfotzer maximumot, valamint szétválasztott adatsorokra. Az eredményeket a 5. táblázat tartalmazza. Ahogy azt a

	Maximum értéke
Összes adat	$19,2 \text{ km} \pm 1,8 \text{ km}$
Felszállás adatai	$19,1 \text{ km} \pm 2,0 \text{ km}$
Leesés adatai	$20,6 \text{ km} \pm 3,7 \text{ km}$

5. táblázat. A Regener-Pfotzer maximum értéke a Statolab-12 mérés során

mérési adatokból is sejthettük, a ballon eltérő emelkedési és leesési sebessége miatt a maximum középértéke is változik, azonban az értékek minden esetben hibahatáron belül megegyeznek.

5. Diskusszió

Demonstráltam, hogy egyszerű környezeti mérésekre tervezett gyári GM-számláló segítségével is ki lehet mutatni a Regener-Pfotzer maximumot. Azonban a sugárzási térre vonatkozó egyéb információk, mint az effektív dózis vagy a LET érték² nem meghatározhatóak. A mérőműszer által megadott dózisteljesítmények, mivel földi körülményekre, valamint gamma sugárzásra vannak kalibrálva, csak bizonyos magasságig alkalmazhatók, viszont addig a beütésszámgyakoriság és a műszer által mutatott környezeti dózisegyenérték-teljesítmény közt fennáll az arányosság. A gamma térre való kalibráltság jelentősége abban rejlik, hogy ezen részecskék sugárzási tényezője 1, míg a magasság növekedésével a proton és pionsugárzás intenzitása nő, ennek sugárzási tényezője 2 az IAEA General Safety Requirements Part 3 közlésének megfelelően, amire az eszköz nincsen felkészítve. A kiértékelést tovább nehezíti, hogy ezen a súlytényezők a földinél sugárzási szempontból diverzebb energiájú térben nem nyújtanak kellően jó közelítést.³[31]

²Lineáris energiaátadási tényező: a töltött részecskékre jellemző mennyiség; a dl úton lokálisan elnyelt energia és a dl hányadosa

³Az ürdozimetriai gyakorlatban éppen ezért LET függő minőségi tényezőt használnak.

5.1. Korlátozó tényezők

Az első és legfontosabb korlátozó tényező a detektor típusa és érzékenysége. Lévén, hogy részecskeszámlálóról beszélünk így egyrészt töltött részecskéket vagyunk képesek érzékelni vele illetve gamma sugárzást, ami ugyan a tér jelentős részét leírja nem ad teljes képet. Például gamma sugárzást is csak közvetetten a detektor falában esetlegesen létrejövő Compton szorás, fotoeffektus és párkeltés lévén lehetséges, ám ez meglehetősen energiafüggő. [3]

A beérkező részecskék számát az eszköz borítása és hőszigetelése jelentette árnyékolás befolyásolta. A hungarocell rétegen és a detektor polietilén külső burkolatán ($8 \pm 0,25$) MeV vagy annál nagyobb energiájú protonsugárzás képes áthatolni.

5.2. Kísérletek összehasonlítása

A következőekben a kutatócsoport egy korábbi mérésének fényében elemzem a Stratolab-12-es mérést. A BEXUS-14 küldetésben repült TECHDOSE kísérlet során több különböző eszközzel együttesen végeztek méréseket, így itt alapvetően tágabb képet nyújtott a sugárzási térről.

5.2.1. TECHDOSE kísérlet bemutatása

A mérés további kontextusa érdekében összehasonlítom a kutatócsoport egy már említett korábbi ballonos kísérletével. A 2012. szeptember 14-en a svédországi ESRANGE állomásról indított BEXUS-14 küldetés a TRITEL háromtengelyű félvezető detektoros teleszkóp működésének fejlesztése céljából, több kiegészítő eszközt is szállított:

- TriTel 3D szilícium detektoros teleszkóp (aktív)
- ZP1210 GM számlálók (aktív)
- Pille termolumineszcens dózismérő (passzív)
- nagyérzékenységű termolumineszcens dózismérők (passzív)
- szilárdtest nyomdetektorok

A mérés céljai:

- Tritel eszköz működésének fejlesztése a korábbi BEXUS-12 küldetéshez képest
- A Geiger-Müller számlálók kalibrálása
- A LET érték meghatározása a szilárdtest nyomdetektorokkal
- Az elnyelt dózis meghatározása a Pille dózismérő rendszerrel
- Termikus neutronok hatásának vizsgálata neutron konverterekkel ellátott szilárdtest nyomdetektorokban
- Kozmikus sugárzási tér feltérképezése

A ballon 28,6 km magasságig repült, a teljes repülési idő 4,5 óra volt.

	ZP 1210 (BEXUS)	M4011 (Stratolab)
Érzékeny hossz	140 mm	88mm
Érzékeny átmérő	20 mm	10mm
Geometriai tényező cm^2sr	296	85
Mérhető dózistartomány*	$3 \cdot 10^{-4} - 10 \text{ mGy/h}$	$2 \cdot 10^{-1} - 1 \text{ mGy/h}$
Árnyékolt protonok energiája	$<20\text{MeV}$	$<8 \text{ MeV}$

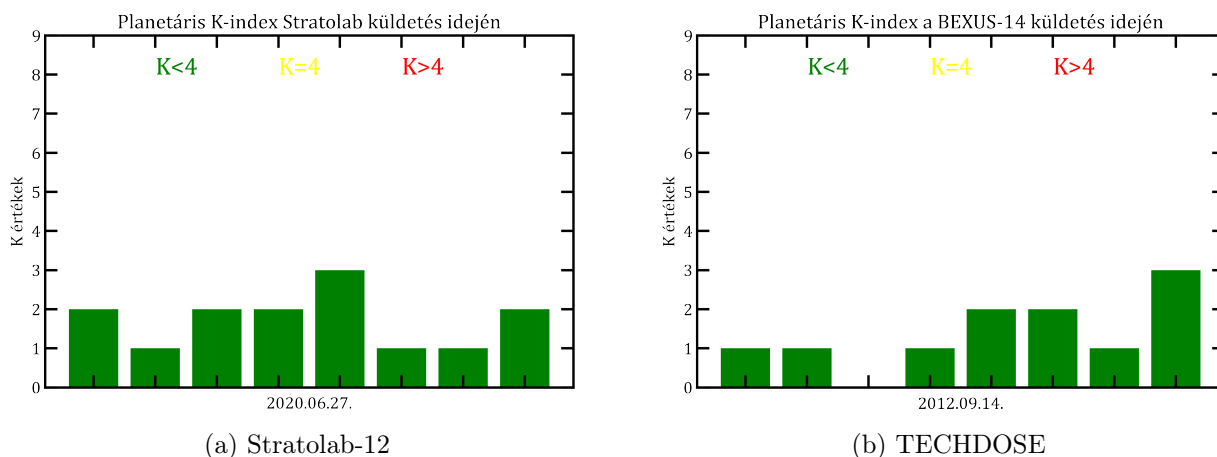
6. táblázat. A mérésben használt GM-cső összehasonlítása. A gamma sugárzásra való érzékenység alatt az elnyelt dózisteljesítmény kalibrálásához releváns tartomány van megjelölve. A mérhető dózistartományon kívül is üzemel a műszer azonban ez a működés nagyobb hibával terhelt.

5.2.2. Eszközök és korlátozó tényezők összehasonlítása

A mérés szempontjából releváns összehasonlítást a GM-számlálók között lehet tenni, hiszen a TriTel spektrális adatokat szolgáltatott, a TL és szilárdtest nyomdetektorok adataiból pedig a dózisra lehetett következtetni. A felületek arányából megkapott beütésszám ráta arány 0,31, vagyis az M4011-beütési rátája közel harmada kéne legyen a ZP1210-nek, amely így jóval kevesebb beütés mérését tenné lehetővé csak a geometriákat tekintve. Azonban a mérhető részecskéket befolyásolja az árnyékolás is, mely több mint kétszerese a BEXUS küldetés esetében, ez okozhat a vártnál nagyobb eltérést a mért beütésszámokban. Az igazán korrekt összehasonlítás akkor lenne lehetséges, ha két műszerrel párhuzamosan, ugyanazon kísérlet alatt végeznénk a méréseket.

5.2.3. Körülmények és eredmények összehasonlítása

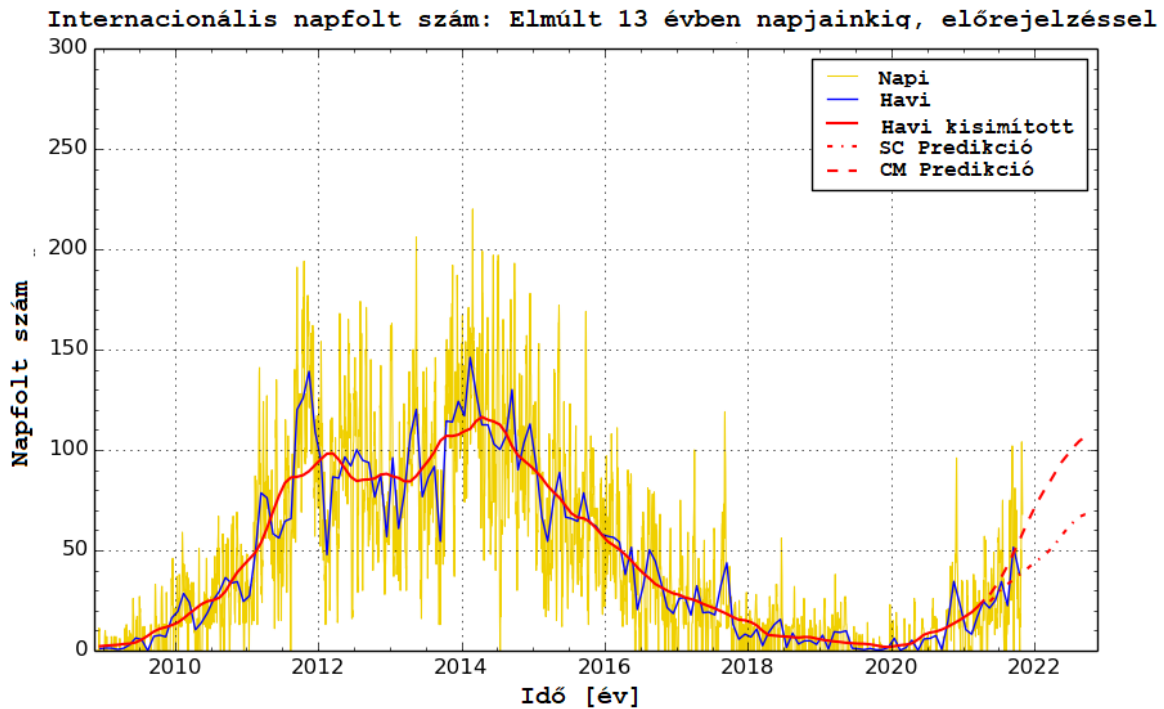
Az űridőjárási körülmények tekintetében egyik mérés során sem volt különösebb naptevékenység a mérés napján. A két mérés közt kicsit kevesebb mint 8 év telt el, mely így két



14. ábra. Egyik kísérlet alatt sem volt számottevő mágneses vihar

különböző napciklusban történt mérésnek felel meg.[5] Az napciklus adatait a 15. ábra foglalja össze. Láthatóan 2012 napfoltok számát tekintve aktívabb év volt azonban a napi planetáris K-index szerint a mérés időtartamában nem volt éppen geomágneses vihar.

Az egyenlítői távolság alapján 1.1.kifejtett módon a várakozásoknak megfelelően a GM-számlálók által mért Regener-Pfotzer maximum magasságának értéke különbözött, a sarkokhoz



15. ábra. Az elmúlt 13 év napciklusának adatai napi felbontásban [5]

közelebbi BEXUS-14 mérésnél szignifikánsan magasabban volt.[21] A mért értékeket 7.táblázat tartalmazza.

	Maximum értéke
Stratolab-12	19,2 km $\pm$ 1,8 km
BEXUS-14 GM1 (horizontális)	22,4 km $\pm$ 0,2 km

7. táblázat. A két mérés során az egyes eszközökkel mért Regener-Pfotzer maximumok

5.3. Irodalmi vonatkozásban

Az 1.3.fejezetben bemutatott sugárzási tér mérések az elmúlt 10 évben a BEXUS-14 TECH-DOSE kísérlet és az Angliában lezajló mérés kivételével nem tartalmaztak Geiger-Müller számlálókat még kiegészítő mérések szempontjából sem.[17] [30] Ennek oka lehet, hogy önmagában ezek a számlálók a részecske fluxuson kívül, viszonylag kevés adatot szolgáltatnak. Viszont pont egyszerűbb elektronikájukból kifolyólag megbízható eszközök, illetve a beütésszámnál hasznosabb információ lehet a dózis. Az oka továbbá lehet, hogy a félvezető detektorok elérhetőbbé váltak, illetve gyakran helytakarékosabbak. Például a Bulgáriában lezajló diákmérés során RD2014 detektor körülbelül egy 1 eurós méretével rendelkezik. [14] Azonban nem megfelelő jelfeldolgozó rendszerrel ezek az eszközök sem alkalmazhatóak spektrális mérésekre. Az ilyen rendszerek beszerzése azonban már jelentős költségnövekedéssel jár.

5.4. Kihívások az értékelés során

A legnagyobb kihívást az eszközök hiányos dokumentációja jelentette, ez főként a GMC-300-as eszközre volt igaz. Alapvető adatok nem voltak fellelhetőek, mint az eszköz holtideje, így ezekre becsléseket igyekeztem adni, viszont ezek jósága csak méréssel lenne ellenőrizhető, melyre az eddigiek során nem volt lehetőségem.

6. Konklúzió

A mérés távlati célja szempontjából ígéretes lehet az a megközelítés, hogy egy relatív olcsó úridőjárás monitorozására alkalmas kísérleti összeállítást lehessen, esetlegesen valamilyen kozmikus esemény ideje alatt felbocsájtani, aránylag kis anyagi kockázattal. További előnye lehet egy ilyen kisebb kaliberű mérésnek, hogy aránylag érzékeny hiszen nagyon kis árnyékolás veszi körbe a számlálót. Azonban hátránya, hogy a térről nem tudunk meg spektrális információkat. Azonban több különféle eszköz együttes alkalmazásával ez is javítható.

6.1. Tanulságok a HEMERA projekthez

HEMERA projekt keretein belül szintén űrbéli sugárzások mérésére fejlesztett eszközt fog-nak tesztelni, mely a RADTEL névre hallgató 6 szilícium lemezből álló teleszkóp lesz. A projekt során szükséges lesz több eszköz az ellenőrző adatok biztosítására. GM csövek használata mint kiegészítő mérőműszer egy megbízható megoldás lehet mely, általánosan a sugárzásítér kvalita-tív feltérképezésére alkalmas, azonban spektrális összehasonlítás nem lehetséges vele. Az alap-vetően spektrumot vizsgáló szilícium detektoros összeállítások mellett kiegészítő információval szolgálhat a beütésszám mérése, viszont egy GM-számláló ezen kívül pontosabb információval nem szolgál. Több eszköz együttes alkalmazásával nemcsak a sugárzási teret lehetséges átfo-góbban elemezni, hanem annak esetleges irányfüggését is vizsgálni lehet, mint azt Zábori is tette.[30] A továbbiakban szeretném folytatni a munkát és segíteni a HEMERA projekt megva-lósítását, annak megvalósítása után esetlegesen a RADTEL eszközzel kapott eredmények fényé-ben megpróbálni hitelesíteni annak GM-csőves dózisteljesítmény-mérővel mért, hitelesnek nem elfogadható értékek korrekcióját. Amennyiben lehetőség adódik rá további Stratolab-12-höz hasonló mérésekben részt venni, esetlegesen más típusú eszközökkel vagy azok kombinációjával vizsgálni a közeli világűr itthoni szegletét.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani konzulensemnek Hirn Attilának, hogy kitartóan segítette munkámat, Stratolab Kft.-nek (személyesen Tóth Zoltánnak és Szing Attilának), hogy reptették a műszerünket és a környezeti adatokat biztosították számunkra.

Hivatkozások

- [1] Friedlander, M. A century of cosmic rays. Nature 483, 400–401 (2012).<https://doi.org/10.1038/483400a>
- [2] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_11/cosmic_rays.html
- [3] Grieder P.K.F., Cosmic Rays at Earth Researcher's Reference Manual and Data Book (2001)
- [4] <https://www.spaceweather.ac.cn/chinese/knowledge/knowledge1.htm> (Utolsó megtekintés:2021.11.02.)
- [5] <https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geomaginfo.shtml> (Utolsó megtekintés:2021.11.10.)
- [6] Martin Walt, Introduction to Geometrically Tapped Radiation, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, 1994.
- [7] By Magnetosphere_Levels.jpg: Dennis Gallagher derivative work: Frédéric MICHEL - Magnetosphere_Levels.jpg, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9608059>
- [8] Dr. Sükösd Csaba, Kísérleti atommagfizika, 2013.09.30.
- [9] Regener, E., Pfozter, G. Intensity of the Cosmic Ultra-Radiation in the Stratosphere with the Tube-Counter. Nature 134, 325 (1934). <https://doi.org/10.1038/134325b0>
- [10] Pfozter, Georg: Zeitschr. f. Physik, 102, p. 23 (1936a).
- [11] Csige István, Tóth-Bodrogi Edit, Várhegyi András, Sugárvédelem és dozimetria, Tanfolyami jegyzet, Paks, 2019. május 31.
- [12] Hirn Attila, Pázmándi Tamás, Deme Sándor, Sugárvédelem a világűrben, Fizikai szemle LXIV., 7–8. szám, 221.o.(2014)http://real-j.mtak.hu/1904/7/FizSzem-2014_07-08.pdf#page=7
- [13] Cherry, M. (2006). Approaching the knee-balloon-borne observations of cosmic ray composition. Journal of Physics: Conference Series, 47 (1), 31-40. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/47/1/004>
- [14] A. Terziyski, et al., Balloon-borne measurements in the upper troposphere and lower stratosphere above Bulgaria, Bulgarian Chemical Communications, Volume 51, Special issue D (pp. 153 – 157) 2019
- [15] Christopher J. Mertens, Overview of the Radiation Dosimetry Experiment (RaD-X) flight mission, Space Weather, 14, 921–934. <https://doi.org/10.1002/2016SW001399>
- [16] R. Sarkar, et al., Measurement of secondary cosmic ray intensity at Regener-Pfozter height using low-cost weather balloons and its correlation with solar activity, Astro ph, 2017 <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.014>
- [17] K. L. Aplin, G. J. Marlton, and V. Race, Stratospheric X-rays detected at mid-latitudes with a miniaturized balloon-borne microscintillator-PiN diode system, (2021) <https://doi.org/10.1029/2021SW002809>

- [18] https://www.nasa.gov/home/hqnews/2013/feb/HQ_13-037_Balloon_Records.html(Utolsó megtekintés:2021.11.04.)
- [19] Magyar Asztronautikai Társaság, Űrtan évkönyv 2018
- [20] Zábori Balázs, et al., Characterization of cosmic rays and direction dependence in the Polar Region up to 88 km altitude, Space Weather Space Climate. <https://doi.org/10.1051/swsc/2016006>
- [21] G.A. Bazilevskaya, et al., Cosmic Ray Induced Ion Production in the Atmosphere, Space Sci Rev (2008) 137: 149–173. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9339-y>
- [22] J. D. Sullivan, Geometrical factor and directional response of single and multi-element particle telescopes, Nuclear instruments and methods 95 (1971) 5-I. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(71\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(71)90033-4)
- [23] Bartholy Judit et.al. Meteorológiai alapismeretek. Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2013
- [24] <https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index>(Utolsó megtekintés:2021.11.10.)
- [25] https://www.ggelectronicsllc.com/comersus/store/comersus_viewItem.asp?idProduct=4570(Utolsó megtekintés:2021.11.10.)
- [26] Haight, Frank A. (1967), Handbook of the Poisson Distribution, New York, NY, USA: John Wiley and Sons, ISBN 978-0-471-33932-8
- [27] W. Ulmer, Theoretical aspects of energy–range relations, stopping power and energy straggling of protons, Radiation Physics and Chemistry, Volume 76, Issue 7, 2007, Pages 1089–1107, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2007.02.083>
- [28] Francis F. Badavi, Daniel O. Adams, John W. Wilson, On the validity of the aluminum equivalent approximation in space radiation shielding applications, Advances in Space Research, Volume 46, Issue 6, 2010, Pages 719–727, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.04.006>
- [29] <http://www.srim.org/SRIM/Compounds.htm>(Utolsó megtekintés:2021.11.10.)
- [30] B. Zábori, et al., Space dosimetry measurements in the stratosphere using different active and passive dosimetry systems, Radiation Protection Dosimetry (2015), pp. 1–10 <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv442>
- [31] Task Group on Radiation Protection in Space, ICRP Committee 2, Dietze G, Bartlett DT, Cool DA, Cucinotta FA, Jia X, McAulay IR, Pelliccioni M, Petrov V, Reitz G, Sato T. ICRP, 123. Assessment of radiation exposure of astronauts in space. ICRP Publication 123. Ann ICRP. 2013 Aug;42(4):1-339. <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2013.05.004>