

A légkörűtés kutatásának közeljövője

A fentiekben röviden összefoglaltunk néhány népszerű magyarázatot a naplégkörűtésére. A naplégkörben, illetve a csillaglégkörökben valószínűleg különféleűtési folyamatok működnek. Ezen folyamatok vélhetően egyidejűleg zajlanak, és egyidejűleg hagy-
nak nyomot a nagy felbontású spektroszkópiái és képalkotási adatokban. A nap- és csillaglégkörökűtésének, valamint a Nap-Föld rendszer kölcsönhatásainak alapvető asztrofizikai kérdéseit remélhetőleg hamarosan sikerül megválaszolni a következő generációs űreszközök, köztük a nemrégiben felbocsátott *Parker Solar Probe* vagy a 2020 februárjában indított *Solar Orbiter*, valamint új, illetve hamarosan elkészülő földi távcsövek, például a Magyar Napfizikai Alapítvány által gondozott GYSAMM (*G*Yula *S*olar *M*agnetic *A*ctivity *M*onitor *S*olar *T*elescope) [17] és óriástávcsövek, így a DKIST (*D*aniel *K*. *I*nouye *S*olar *T*elescope) és az EST (Európai Naptávcső, *E*uropean *S*olar *T*elescope) segítségével. A mágneses tér megfigyelése a légkörűtés megértésén kívül az űridőjárás előrejelzésében is kiemelkedő fontosságú – ez utóbbi területen hazánkban fontos szerepet játszik a Magyar Napfizikai Alapítvány [17, 18].

Irodalom

1. R. Erdélyi, C. J. Nelson: On The Role of MHD Waves in Heating Localised Magnetic Structures. Coimbra Solar Physics Meeting: Ground-based Solar Observations in the Space Instrumentation Era. *ASP Conference Series 504* (2016) 153–178.
2. R. Erdélyi: Magnetic Seismology of the Lower Solar Atmosphere. *Proceedings of SOHO 18/GONG 2006/HELAS I, Beyond the Spherical Sun (ESA SP-624), 7–11 August 2006, Sheffield, UK. Editor: Karen Fletcher. Scientific Editor: Michael Thompson* (2006) 15.

3. S. Wedemeyer-Böhm, E. Scullion, O. Steiner, L. Rouppe van der Voort, J. de La Cruz Rodriguez, V. Fedun, R. Erdélyi: Magnetic tornadoes as energy channels into the solar corona. *Nature 486* (2012) 505–508.
4. P. Ulmschneider: Heating of Chromospheres and Coronae. *Highlights of Astronomy 11A* (1998) 831.
5. R. Erdélyi: Coronal heating: Heating in the solar atmosphere. *Astronomy and Geophysics 45/4* (2004) 4.34–4.37.
6. R. Erdélyi, V. Fedun: Are There Alfvén Waves in the Solar Atmosphere? *Science 318* (2007) 1572.
7. M. Mathioudakis, D. B. Jess, R. Erdélyi: Alfvén Waves in the Solar Atmosphere. From Theory to Observations. *Space Science Reviews 175* (2007) 1–27.
8. M. Goossens, R. Erdélyi, M. Ruderman: Resonant MHD Waves in the Solar Atmosphere. *Space Science Reviews 158* (2011) 289–338.
9. J. A. Ionson: Resonant absorption of Alfvénic surface waves and the heating of solar coronal loops. *The Astrophysical Journal 226* (1978) 650–673.
10. M. Allcock, D. Shukhobodskaia, N. K. Zsámberger, R. Erdélyi: Magneto-hydrodynamic waves in multi-layered asymmetric waveguides: solar magneto-seismology theory and application. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences 48* (2019)
11. T. V. Zaqarashvili, R. Erdélyi: Oscillations and Waves in Solar Spicules. *Space Science Reviews 149* (2009) 355–388.
12. M. S. Ruderman, R. Erdélyi: Transverse Oscillations of Coronal Loops. *Space Science Reviews 149* (2009) 199–228.
13. N. K. Zsámberger, M. Allcock, R. Erdélyi: Magneto-acoustic Waves in a Magnetic Slab Embedded in an Asymmetric Magnetic Environment: The Effects of Asymmetry. *The Astrophysical Journal 853* (2018) 136.
14. A Sheffieldi Egyetem Solar Wave Theory Group MHD hullám animációi: http://swat.group.shef.ac.uk/mhd_waveguides.html
15. N. K. Zsámberger, R. Erdélyi: Magneto-acoustic waves in a magnetic slab embedded in an asymmetric magnetic environment: Thin and wide slabs, hot and cold plasmas. *The Astrophysical Journal* (2019) [béküldve].
16. L. Golub, J. Pasachoff: *The Solar Corona*. 2. kiadás. Cambridge University Press, 2010.
17. A Magyar Napfizikai Alapítvány leírása a SAMNET hálózatról és a gyulai állomásról: <http://hspf.eu/szuok.html>
18. M. B. Korsós, S. Yang, R. Erdélyi: Investigation of pre-flare dynamics using the weighted horizontal magnetic gradient method: From small to major flare classes. *Journal of Space Weather and Space Climate 9* (2019) A6.

ŰRDOZIMETRIA A PILLE ŰRÁLLOMÁS-FEDÉLZETI TERMOLUMINESZCENS RENDSZERREL

Hirn Attila,¹ Apáthy István,^{1,2} Deme Sándor,¹ Csöke Antal¹

¹Energiatudományi Kutatóközpont

²REMRED Kft.

A világűrben történő tartózkodás és munkavégzés – mind a mai napig – egyik legjelentősebb korlátja az űrhajósokat, űreszközöket ott folyamatosan érő, a földinél jelentősen összetettebb és legalább két nagyságrenddel nagyobb intenzitású ionizáló sugárzás. A naptevékenységtől, a közvetlen környezet (bolygófelszín, légkör, űreszköz fala, űrhajós teste) árnyékoló és konverziós hatásától függően a kialakult sugárzási tér emellett időben és helyről helyre is jelentős mértékben változik. A Föld körüli térségben kialakuló sugárzási tér jellemzőiről, a világűrben alkalmazott sugárvédelmi gyakorlatról a *Fizikai Szemle* egy korábbi számában részletesebben írtunk [1]. A sugárzási tér

összetettsége miatt nem létezik olyan dózismérő eszköz, amely a sugárzási tér valamennyi komponensére és annak teljes energiatartományában érzékeny lenne, ezért a sugárzás biológiai károsító hatását jellemző dózis becsléséhez különböző elven működő dózismérő rendszerek alkalmazására és modellszámításokra van szükség. A kis LET^1 értékű ($LET_{vz} < 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$) sugárzások dózisének mérésére – mind a földi gyakorlatban, mind pedig a világűrben – széles körben

¹Lineáris energiaátadási tényező ($LET = dE/dl$): a töltött részecskékre jellemző mennyiség; a dl úton lokálisan az adott közegnek átadott dE energia és a dl hányadosa.



1. ábra. Sally Ride amerikai űrhajós 1984 októberében a Challenger űrsikló fedélzetén végez méréseket a Pille dózismérő rendszerrel.

alkalmaznak termolumineszcens dózismérőket (TLD). A TLD-k olyan, jellemzően kristályos anyagok, amelyben az ionizáló sugárzás hatására a kristály egyes elektronjai gerjesztett állapotba kerülnek, majd a kristály szennyező atomjainak helyén, a csapdában befogódnak. Az így eltárolt energia a fizikai dózissal arányos. A csapdákból az elektronok felmelegítés hatására kilépnek, és látható, vagy ahhoz közeli hullámhosszú fény kibocsátása mellett visszatérnek az alapállapotba. Az emittált fotonok száma arányos a TLD-kristályban eredetileg elnyelt sugárdózissal.

A Pille rendszer a Nemzetközi Űrállomáson

40 évvel ezelőtt, 1979-ben készült el a termolumineszcens dózismérők űrhajók fedélzetén való kiolvasására alkalmas Pille dózismérő rendszer első változata, amellyel először 1980-ban *Farkas Bertalan*, az első

Készült a 30. Magyar Fizikus Vándorgyűlésen (Sopron, 2019. augusztus 21–24.) elhangzott előadás alapján.



Hirn Attila mérnök-fizikus, űrkutató, az Energiatudományi Kutatóközpont Űrkutatási Laboratóriumának vezetője. 2004 óta foglalkozik űrdozimetriai rendszerek fejlesztésével, űrállomás-fedélzeti mérések kiértékelésével.



Apáthy István villamosmérnök, űrkutató mérnök, a KFKI 1970-ben létrehozott Űrelektronikai (később Űrdozimetriai) Kutatócsoportjának alapító tagja. Számos – műholdon, űrszondán, űrállomáson repülő – mérőműszer, így az új generációs Pille főkonstruktor.

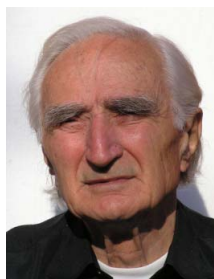


2. ábra. A kép tetején balra a régebbi, 2003-as és jobbra a 2018 júniusában felvitt új kiolvasó az Nemzetközi Űrállomáson.

magyar űrhajós végzett méréseket a Szaljut-6 űrállomás fedélzetén (lásd a címképet). A KFKI Atomenergia Kutatóintézetben kidolgozott műszert azóta többször is továbbfejlesztettük, legújabb változata jelenleg – a jogutód Energiatudományi Kutatóközpont Űrkutatási Laboratóriumának gondozásában – a Nemzetközi Űrállomás (International Space Station, ISS) orosz szegmense szolgálati dózismérő rendszerének része. Az elmúlt negyven év küldetéseit az *Űrtan Évkönyv 2018* című kötetben foglaltuk össze (1. ábra) [2], a műszaki fejlesztésről a *Sugárvédelem* folyóiratban, valamint a *Fizikai Szemle* korábbi évfolyamainak hasábjain olvashatnak [3–5].

A Pille rendszer felépítése és jellemzői

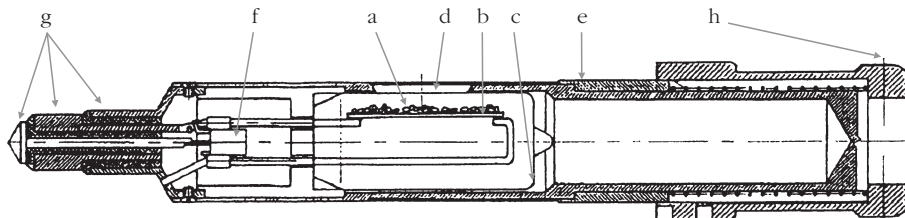
Az ISS-en jelenleg szolgálatot teljesítő Pille rendszer egy könnyű, kompakt, hordozható TLD kiolvasóból és 17 termolumineszcens dózismérőből áll. A 2003-ban rendszerbe állított Pille kiolvasó egységét 15 év szolgálati idő után, 2018-ban, a szavatossági idő lejártá miatt új kiolvasó egységre cserélték (2. ábra). Az



Csőke Antal tervező mérnök. 1958 óta fejleszt radioaktivitással, ionizáló sugárzásokkal kapcsolatos műszereket, eszközöket, berendezéseket. A Pille mechanikai tervezője.



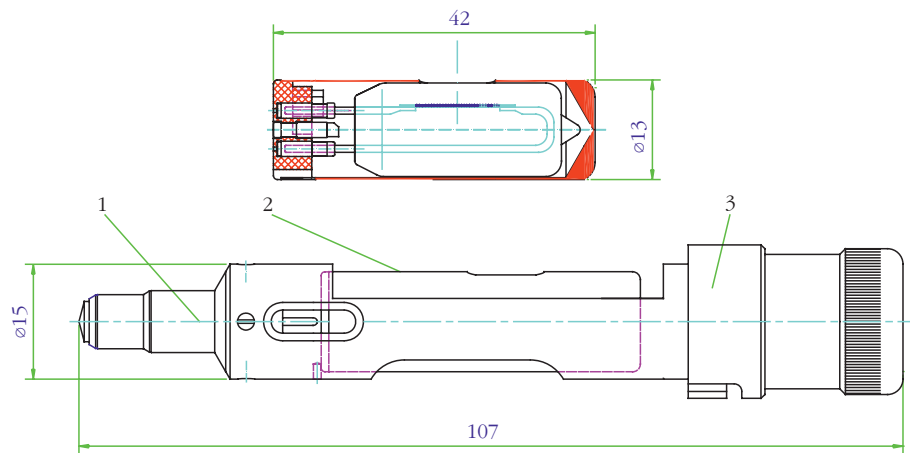
Deme Sándor, a fizikai tudományok kandidátusa, a KFKI Atomenergia Kutatóintézet nyugalmazott tudományos főmunkatársa a Moszkvai Energetikai Intézetben szerzett villamosmérnöki diplomát. Főbb kutatási területe az űrsugárzás dozimetriája és az atomerőművek környezetellenőrzése. Kezdetől fogva részt vett a Pille dózismérő fejlesztésében, majd továbbfejlesztésében, annak földi alkalmazásában.



3. ábra. A Pille dózismérő kulcs keresztmetszete.

vel biztosítható, hogy a kiolvasó – a búra egyedi érzékenységet is figyelembe véve – mindig a megfelelő kifizetési és kiértékelési programot használja, illetve a tárolt adatok utólag egyértelműen azonosíthatók legyenek. A fűtőáram bevezetése és a programozható memóriacsip elérése a dózismérő kulcs végén található három aranyozott kontaktuson (g) keresztül történik. A dózismérő kulcs másik végén recézett fogantyú (h) segíti a könnyű kezelhetőséget.

Minden egyes dózismérő kulcsot a mérési (expozíciós) időszakban egy-egy alumíniumból készült, henger alakú, zárt védőtokban tartanak, úrsétára is abban viszik ki azokat. A dózismérőket az űrállomás kijelölt mérőhelyein a szokásos módszerrel, a tokjukon lévő tépőzárhoroggal



4. ábra. Az új típusú Pille dózismérő és univerzális kiolvasó kulcs keresztmetszete.

eredetileg felbocsátott 10 dózismérőből (A0301–A0310) nyolcat jelenleg is használnak. 2009-ben a magyar származású Charles Simonyi második űrrepülése alkalmával további négy dózismérőt vitt az űrállomásra (A0311–A0314); az A0303 és A0308 azonosító számú dózismérőket, azok lecsökkent érzékenysége miatt pedig további vizsgálatok céljából visszahozták a Földre. 2018-ban az új kiolvasó egységgel együtt további 5 dózismérővel (A0151–A0155) bővült a rendszer.

A dózismérőkben (3. ábra) a termolumineszcens kristályszemcsék (a) egy elektromosan fűthető kántál fémlapkára (b) felragasztva egy kicsiny, zárt, vákuumozott üvegbúrában (c) helyezkednek el. A TL anyag diszpróziummal adalékolt kalcium-szulfát egykristály (CaSO₄:Dy). Ugyan korábban készültek közel testszövet-ekvivalens LiF(Mg, Ti)-ot tartalmazó Pille dózismérők is, végül – nagyobb érzékenysége miatt – a CaSO₄:Dy-ot tartalmazó változat van az ISS-en. Ez utóbbi széles dózistartományban – 3 μGy-tól 10 Gy-ig – alkalmas az ionizáló sugárzás mérésére. A dózismérő búra egy hengeres, kulcsszerű, alumíniumból készült tartóban foglal helyet. A dózismérő kulcs ablakát (d) alapállapotban egy rozsdamentes acélból készült cső (e) védi a mechanikai és fényhatásoktól, amely csak a kiolvasóba helyezve, a mérőpozícióban, azaz a TLD kiolvasásakor húzódik hátra. A dózismérő házában elhelyezkedő elektronikusan programozható memóriacsip (f) tartalmazza a dózismérő azonosító kódját (A0xxx) és az egyedi kalibrációs jellemzőket, amelynek segítségével

erősítik az űrállomás falához. A Pille dózismérő befoglaló méretei tokkal együtt 60 mm × Ø 20 mm.

Az elmúlt években elkészült a Pille dózismérő legújabb, kisebb méretű és egyúttal kisebb önárnyékolású változata, amely – a jelentős átalakítás ellenére a hozzá tartozó univerzális kiolvasó kulcs segítségével – kiolvasható a jelenleg is az ISS fedélzetén használt Pille kiolvasó berendezéssel (4. és 5. ábra). A dózismérő búra és az egyedi kalibrációs adatokat tároló csip egy 42 mm hosszú és 13 mm átmérőjű, vékony falú, hengeres patronba került; az univerzális kulcs csupán csatlakozóként szolgál a kiolvasások során. A dózismérők kisebb önárnyékolásának elsősorban úrséták során – amikor az űrhajósok szemét és végtagjait csak kismértékben védi az űruha a kozmikus sugárzástól – van szerepe. Az expozíció során a fény-

5. ábra. Az új típusú Pille dózismérő és univerzális kiolvasó kulcs.





6. ábra. Az új típusú Pille dózismérő (lent) és a fényzárást és védelmet biztosító Nomex tároló tasak.

zárást és mechanikai védelmet fémtok helyett egy tűz- és hőálló anyagból (Nomex) készült, tépőzárral ellátott tároló tasak biztosítja (6. ábra).

A Pille TLD kiolvasója egy 1,4 kg tömegű és 70 mm × 190 mm × 120 mm méretű, kis fogyasztású (kiolvasás alatt a maximális fogyasztás 7 W) mikroprocesszoros vezérlésű egység (7. ábra). Kiolvasáshoz a Pille dózismérőt a kiolvasó előoldali lapján található foglalatba kell helyezni, majd elforgatás után a kiolvasó a megfelelő fűtőárammal, szabályozható teljesítményen üzemelve melegíti a dózismérő kantál fűtőlapját és így közvetve a TL anyagot. A dózismérő búra által kibocsátott fényt egy fotoelektron-sokszorozó méri, amelynek a fény mennyiségével arányos áramát egy három fokozatban váltható érzékenyséű konverter feszültséggé alakítja, amelyet egy 12 bites felbontású A/D konverter digitalizál; a konverter különböző méréstartományai közötti váltást a mikroprocesszor vezérli. A Pille rendszer a fotoelektron-sokszorozó zaját minden kiolvasás kezdetén megméri, és a kiértékelésnél automatikusan figyelembe veszi. A fűtött TL anyag által kibocsátott fény mennyiségét mérve határozható meg az elnyelt dózis, amely a kiolvasást követően – a dózismérő azonosítójával együtt – megjelenik a kijelzőn, és egyidejűleg egy cserélhető flashmemória-kártyán is tárolásra kerül. Az információk és az üzenetek a Pille nyolc alfanumerikus LED-ből álló kijelzőjén jelennek meg; a kiolvasó menürendszerrel, nyomógombokkal vezérelhető. A memóriakártyán egy-egy mérési blokk a dózismérő azonosító kódján, a mérés időpontján, a mért dózison és számos egyéb mérési paraméteren kívül minden egyes mérés kifutási görbéjét is tartalmazza. Egy-egy expedíciós ciklus végén a memóriakártyát a mérések kiértékelésére visszahozzák a Földre, helyére új kártya kerül. A Pille automatikus üzemmódban is használható: a kiolvasóban tartott dózismérő programozható időközönként automatikusan kiolvasásra kerül.

A Pillével végzett mérések pontossága 10 μGy dózis fölött $< 5\%$. 10 keV/ μm alatt a $\text{CaSO}_4\cdot\text{Dy}$ TLD hatásfoka $1(\pm 10\%)$, nagyobb $LET_{\text{víz}}$ értékek esetén jelentősen

csökken, az irodalmi adatok szerint 100 keV/ μm fölött kevesebb mint 50%. A Pille dózismérők kalibrálása ^{137}Cs gamma-sugárforrással történik. A 10 keV/ μm fölötti tartományra való korrekció nagy LET értékű sugárzásra érzékeny detektorokkal (például félvezető detektorokkal, nyomdetektorokkal) történő mérések révén valósítható meg.

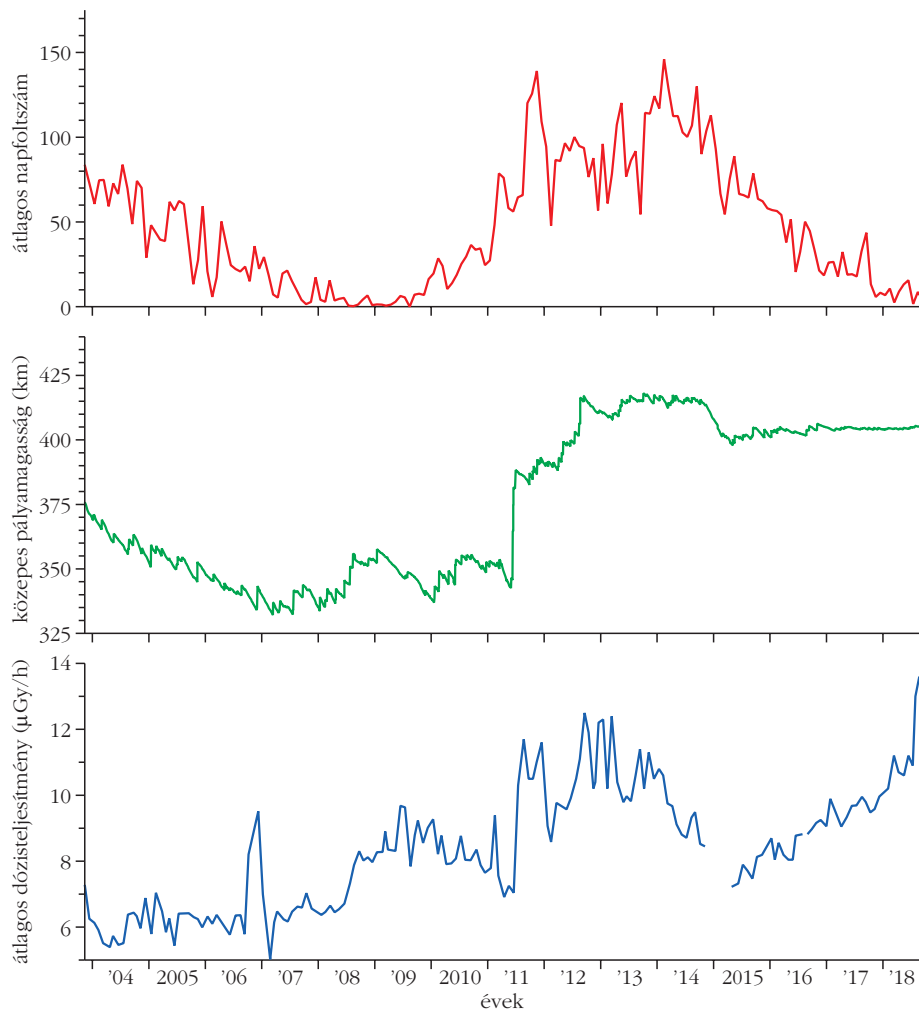
Dózistérképezés Pille dózismérőkkel az ISS-en

A Pille dózismérők legfőbb alkalmazási területe a Nemzetközi Űrállomás orosz szegmensének dózistérképezése. Az űrhajósok a Pille dózismérőket az űrállomás különböző árnyékolású pontjaiban, elsősorban a Zvezda, a Pirsz, a Poisz, a Raszvet és a Harmony moduljaiban helyezik el, és egy hónapos expozíciót követően egymás után kiolvasják őket. Sajnos a mérési pontokat időről-időre megváltoztatják, így egy adott pontban a hosszú távú változások sok esetben nem követhetők nyomon. Kivéteklént az A0305 dózismérővel az ISS Zvezda moduljának nagytérű „szalonjában” a 327-es panelen 15 éven át mért, havi kiolvasásokból számított átlagos napi dózist mutatja a 8. ábra az idő függvényében.

A Nap mágneses pólusváltásainak megfelelően a naptevékenység egy átlagosan 11 éves periódusú változást mutat. A napszél a galaktikus eredetű kozmikus sugárzással kölcsönhatásba lép, amelynek eredményeképpen gátolja a galaktikus komponens bejutását a Naprendszerbe. A részecskék energiát veszítenek, a kisenergiás részecskék pedig el sem jutnak a Földre. Ez a hatás a naptevékenység maximuma idején a legerősebb. A naptevékenység maximuma idején a naprészecske-események (koronaki-dobódások) gyakorisága is megnő, ez a kisenergiás szoláris eredetű részecskék fluxusának növekedését, ezt követően pedig a galaktikus kozmikus sugárzás fluxusának hirtelen csökkenését eredményezi (For-

7. ábra. A Pille TLD kiolvasója, tetején dózismérő kulcsok tokban.





8. ábra. Az A0305 dózismérővel az ISS Zvezda moduljának nagytérű „szalonjában” a 327-es panelen 15 éven át mért havi kiolvasásokból számított átlagos dózisteljesítmény időfüggése. Az ábra felső két grafikonja a havi átlagos napfoltszámot és az ISS átlagos pályamagasságát mutatja.

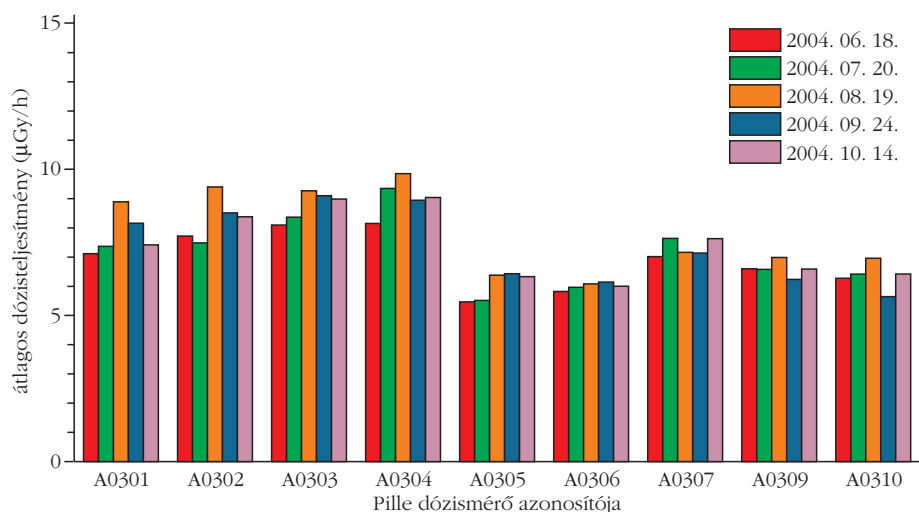
bush-csökkenés). A galaktikus kozmikus sugárzásra gyakorolt közvetlen hatás mellett a szoláris moduláció a befogott részecskék intenzitására is hatással van. A naptevékenység maximuma idején a légkör kitágul, így

a pályamagasság növelésénél. 2013 után a pályamagasságot csak kismértékben csökkentették. Ebben az időszakban a mért dózisteljesítmény növekedése jelentős részben ismét a csökkenő naptevékenységnek

volt az eredménye. Hasonló változásokat mértek ugyanabban az időszakban a DOSIS és DOSIS-3D kísérletekben az európai Columbus-modul fedélzetén [6].

A 2004 júniusa és októbere között végzett havi kiolvasások eredményeit a 9. ábra mutatja. Az egyes pozíciókban mért dózisek közötti különbség a pozíciók eltérő árnyékolásával magyarázható. Az A0301–A0304 dózismérőket közvetlenül egy-egy kitekintő ablak oldalán, viszonylag kevés árnyékolt helyeken, míg az A0305 és az A0306 dózismérőket a Zvezda modul zenit

9. ábra. A 2004 júniusa és októbere között végzett havi kiolvasások eredményei.



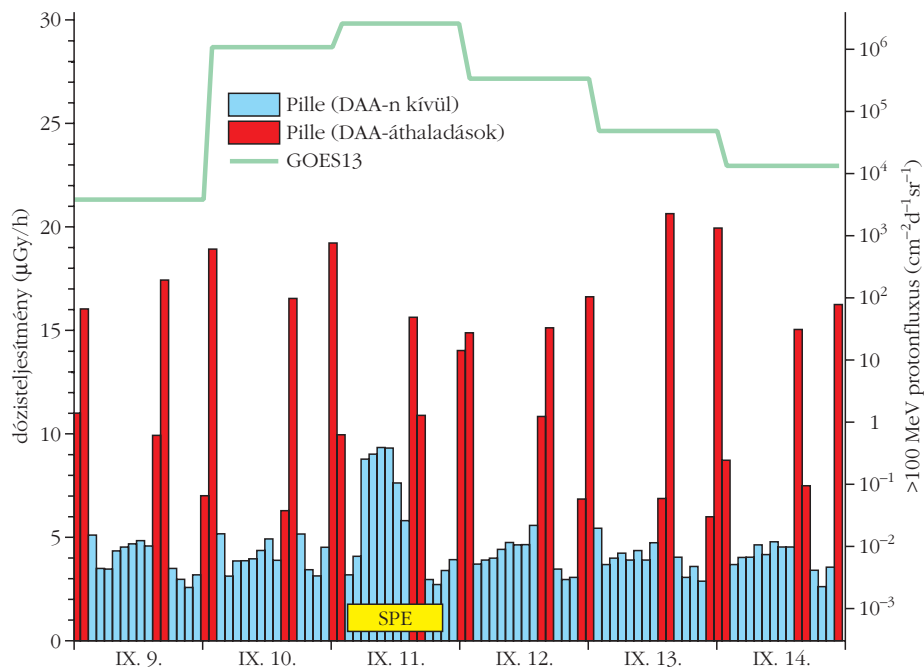
felé néző oldalán, az A0307 dózismérőt pedig a mosdó helyiség zenit felé néző oldalán helyezték el, e pontok viszonylag jól árnyékoltak. Az A0309 és az A0310, űrséta alatt használt dózismérőket a közbeeső időben a Pille kiolvasó egységének csomagolásában tárolták.

A dózismérők esetleges érzékenységsökkenésének kimutatására 2009 óta évente legalább egy alkalommal az űrhajósok keresztkalibrációt végeznek: a dózismérők többségét hosszabb ideig egymás mellett, az űrállomás egy adott pontján helyezik el. Ekkor – a szomszédos dózismérők okozta árnyékolástól eltekintve – a dózismérők lényegében ugyanazt a dózist mérik. Ha valamelyik dózismérő

szignifikánsan kisebb dózisértéket mutat, érzékenységsökkenése megbecsülhető, a további méréseknél figyelembe vehető. Érzékenységsökkenés eddig azoknál a dózismérőknél volt megfigyelhető, amelyek több ezer kiolvasáson estek már át (lásd automata mérések), így összességében több órányi (200-300 °C-os) kifűtésnek voltak kitéve. Ez összhangban van azon korábbi, földi mérések eredményeivel, amelyben 9-12 órányi 280 °C-on végzett kályházást követően a $\text{CaSO}_4:\text{Dy}$ bura dózismérők érzékenysége közel 30%-kal csökkent.

2007-ben, első űrutazása alkalmával Charles Simonyi számos mérést végzett a Pille rendszerrel (Pille-Simonyi-1 űrkísérlet). Többek között folyamatosan mérte a dózist a hálólhelyén. Hasonló mérést csak egyszerű – saját elhatározásból, programon kívül – *Cibljjev* orosz űrhajós végzett (a Pillével) 1997-ben a Mir űrállomáson: az eredmények birtokában hálólhelyet is változtatott. A közvetlenül az űrhajó falánál kialakított hálólhelyen ugyanis jelentősen nagyobb volt a dózisteljesítmény, mint a műszerek által árnyékolta, védett munkahelyen. Charles Simonyi küldetésének első szakaszában az ISS hátsó végéhez csatlakoztatott Szojuz űrhajó lakóterében aludt, majd pár nappal később hálólhelyét átköltöztették a dokkoló egységbe. A következő legjobban exponált helynek a Földre néző ablak környéke adódott, ahol korábban még nem végeztek méréseket.

Az űrállomás kevésbé árnyékolta helyein indokolt lehet kiegészítő árnyékolások alkalmazása. Célszerű ehhez az űrállomáson már amúgy is rendelkezésre álló anyagokat, mint például – az űrhajósok tisztálkodására szolgáló – vízzel átitatott kendőket, törülközőket tartalmazó csomagokat felhasználni. A csomag magas hidrogéntartalmának köszönhetően ugyanis hatékonyan képes árnyékolni a kisebb energiájú protonokat. A vízfűgönykísérletben az orosz űrhajósok



10. ábra. A 2017. szeptemberi napkitörés (solar particle event, SPE) hatása a Pille automata mérési adatsorában.

az űrállomás egyik kevésbé árnyékolta falát, a Zvezda modul 442–444-es számú paneljeit ilyen csomagokkal (vízfűgönyvel) fedték be, és a vízfűgöny külső és belső oldalán is mérték a dózist. A Pille dózismérőkkel végzett mérések alapján a vízfűgönyön belül mért dózisek 24(±9)%-kal voltak alacsonyabbak, mint kívülről. Egyéb, nyomdetektoros mérésekkel és Monte-Carlo-számításokkal azt is igazolták, hogy a dózis csökkenése mellett a nagyobb *LET* értékű szekunder sugárzás fluxusa sem nőtt, így a biológiai hatást jellemző dózisegységérték is csökkent.

Dózismonitorozás

Dózismonitorozás céljából az űrhajósok a havi kiolvasások között egy Pille dózismérőt folyamatosan a kiolvasóban hagynak, amelyet a kiolvasó készülék automatikusan, rendszeresen, alapértelmezetten 90 perces gyakorisággal kiolvas. Ez megközelítőleg a Nemzetközi űrállomás egy Föld körüli keringési idejének (92 perc) felel meg. Mivel az automata mérést végző kulcs állandóan benne van a kiolvasóban, ezek a mérések – a berendezés árnyékoló hatása miatt – körülbelül 10%-kal kisebb dózisteljesítményt mutatnak, mint a többi kulccsal végzett mérések. További fontos különbség a jelentős ofszethiba, amelyet az elektron termikus gerjesztése okoz a kristályban. Ennek nagysága a havi kiolvasásoknál elhanyagolható, az automata kiolvasások esetében viszont jelentős bizonytalanságot eredményez. Az űrállomáson a rendszer besugárzás nélküli háttérét közvetlenül nem lehet megmérni, ehelyett értéke a különböző hosszúságú expozíciók adatai alapján extrapolációval és – az időben változó sugárzási tér miatt – csak jelentős bizonytalansággal becsülhető.

Azon keringések – és az ennek megfelelően automata mérések – alkalmával, amikor a Nemzetközi Űrállomás áthalad a Dél-atlanti anomálián (DAA), a kapott dózisteljesítményben jelentős növekedés látható. A DAA a főként protonokat befogott belső sugárzási öv egy része, amely a dél-atlanti térségben 200 km-es tengerszint feletti magasságig is lenyúlik. Ez annak a következménye, hogy a Föld mágneses tengelye és forgástengelye nem esik egybe. Az űrhajósok a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén az elnyelt dózis akár 50%-át az – amúgy legfeljebb naponta összesen fél óra időtartamú – DAA-n történő áthaladások során kapják.

A Dél-atlanti anomália kiterjedése miatt az űrállomás több egymást követő keringésnél is áthalad ezen a tartományon, ami a mért adatsorban végső soron egy 2-3 mérés széles csúcsban jelenik meg. A csúcsok közötti távolság megközelítőleg 8, illetve 16 óra. A DAA-n kívüli automata mérésekben egy 24 órás periodikus változás figyelhető meg, amely annak tulajdonítható, hogy a Föld az ISS alatt elfordul, így az az egymást követő keringések során különböző mágneses szélességtartományok fölött halad el.

A DAA áthaladások okozta változások mellett nagyobb napkitörések hatása is megfigyelhető az automata kiolvasások eredményeiben. Erre akkor van esély, ha a 100 MeV fölötti energiájú protonok fluxusa jelentős mértékben megnő; az ennél kisebb energiájú protonokat ugyanis az űrállomás fala és a környező műszerek jelentős mértékben leárnyékolják. Példaként a 2017. szeptemberi esemény hatását mutatjuk be (10. ábra). A geostacionárius pályán keringő GOES13 műhold mérési adatai szerint 2017. szeptember 11-én a 100 MeV-nél nagyobb energiájú protonok integrális fluxusa elérte $2,5 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ értéket. Ekkor a Pille mérési adatsorában a Dél-atlanti anomálián kívüli keringéseknél jelentős mértékben megnőtt az átlagos dózisteljesítmény, ugyanakkor a Dél-atlanti anomáliát keresztező keringéseknél nem történt szignifikáns változás.

Személyi dozimetria

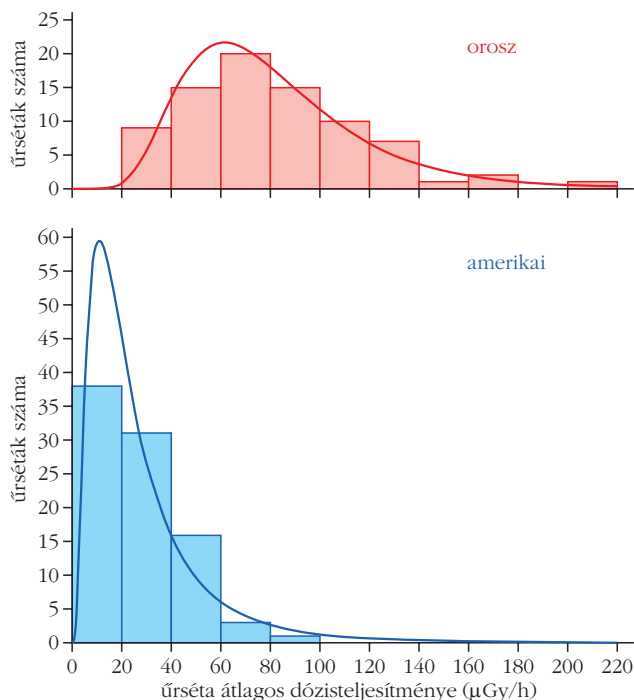
A testszövet 10 mm-es mélységében az űrhajósokat érő nagyenergiás részecskékre rendszerint nem áll fenn a szekunder töltött részecske-egyensúly, így – a földi gyakorlatban előforduló áthatoló sugárzásokkal, úgy mint a foton- vagy neutronsugárzással ellentétben – az effektív dózis becslésére a személyi dóziségyenérték nem alkalmazható. Ehelyett az űrhajósok által hordott, valamint az űrállomás különböző pontjaiban elhelyezett dózismérők és sugárzásmonitorok mérési adatainak felhasználása mellett különféle determinisztikus vagy Monte-Carlo-módszereken alapuló részecsketranszport-számításokra van szükség ahhoz, hogy előbb a mélységi dózisokat és a mélységi LET-eloszlást, majd ebből a sugárzás károsító hatására jellemző effektív dóziségyenértéket megbecsüljék. A számítások validálására pedig időről időre antropomorf fantomokban végeznek méréseket.

A Nemzetközi Űrállomásról végrehajtott űrséták (Extra-Vehicular Activity, EVA) során valamennyi űrhajós magával visz egy-egy Pille dózismérőt, amelyet az űrruhájuk egy adott zsebében helyeznek el (ez az űrruha típusától függően eltérő helyeken lehet). A mérések célja, hogy megbecsüljék, mekkora többletdózist jelentett az adott űrséta ahhoz képest, amekkora dózist az űrhajós a dozimetriai szempontból is jelentősebb védelmet nyújtó űrállomás belsejében kapott volna. A mérésekhez az űrséta-dózismérőkön kívül referenciaként legalább egy dózismérőt az űrállomás adott pontján helyeznek el. Az űrsétát megelőzően a két űrséta-dózismérőt és a referenciadózismérőt közel egyidőben kiolvassák (törlik a bennük tárolt dózist), majd az űrséta után ismét kiolvassák azokat. Az űrséták időtartama (t_{EVA}) jellemzően 6-8 óra, de az űrhajósok időbeosztása miatt az űrséta előtti és utáni kiolvasások közötti időtartam (t_{teljes}) közel 50 óra. Az űrhajósok által magukkal vitt dózismérő és a referenciadózis-mérő által mért értékek ($D_{\text{űrhajós}}$ és D_{ref}) különbsége adja meg az űrséta többletdózisát ($D_{\text{többlet}}$). Ezt elosztva az űrséta időtartamával (t_{EVA}) az űrséta alatti átlagos többletdózis-teljesítményt kapjuk meg. Az űrséta alatti átlagos dózisteljesítményt pedig a következőképpen becsülhetjük meg:

$$\dot{D}_{EVA} \cong \frac{D_{EVA}}{t_{EVA}} = \frac{\frac{D_{ref}}{t_{teljes}} t_{EVA} + D_{\text{többlet}}}{t_{EVA}}$$

Az űrséta során kapott dózis az űrállomás belsejében eltöltött több napi dózisterhelésnek is megfelelhet. A fenti számításban jelentős bizonytalanságot okoz, hogy az űrséta alatti referenciadózist a két kiolvasás közötti átlagos dózisteljesítményből számítjuk. Pontosabb értéket lehetne kapni, ha az automata mérések alapján figyelembe vennénk a dózisteljesítmény változását is. Az esetek többségében az automata mérések az űrséták során szünetelnek, így általában erre nincs lehetőség.

Az egyes űrséták többletdózisát számos tényező befolyásolja, úgy mint a munkavégzés helye (szomszédos modulok árnyékolása), a dózismérő elhelyezkedése az űrhajós űrruhájában (mennyire árnyékolja le az űrhajós teste), a referenciadózis-mérő elhelyezkedése (mennyire van leárnyékolva), valamint, hogy közben az űrállomás áthaladt-e a Dél-atlanti anomálián. A mért adatok alapján megállapítható, hogy a korábbi években az orosz űrhajósok átlagos űrsétadózis-teljesítménye jelentősen meghaladta az amerikai űrhajósokét (11. ábra). Ennek magyarázata az, hogy az orosz űrsétákat olyan pályaszakaszokon hajtják végre, amikor a jellemzően Moszkva körzetében elhelyezkedő földi követőállomások közvetlen rádiókapcsolatban vannak a Nemzetközi Űrállomással, ezen pályaszakaszok viszont keresztezik a Dél-atlanti anomáliát. Az ISS-szel történő kommunikáció érdekében az utóbbi időben az oroszok is alkalmaznak reléállomásként geostacionárius pályán keringő műholdakat, így űrsétaikat egyre gyakrabban időzítik úgy, hogy elkerüljék a Dél-atlanti anomáliát. Az orosz űrsétáknál



11. ábra. Az orosz és amerikai űrséták átlagos dózisteljesítményei a Pille dózismérővel végzett mérések alapján 2004 és 2018 között.

látható nagyobb szórás is jelentős részben annak tudható be, hogy a nem befogott galaktikus komponensnél kisebb energiájú befogott protonokat a környező modulok, berendezések, eszközök, valamint az űrhajós teste jelentősebb mértékben árnyékolja attól függően, hogy az űrhajós az űrállomás mely részén milyen munkálatokat végez.

Egy-egy jelentősebb napkitöréstől, valamint az űrsétáktól eltekintve a Pille dózismérőit az űrhajósok közvetlen személyi dozimetriai célra nem használják. Ezért voltak különösen értékesek Charles Simonyi mérései, amelynek során egy Pille dózismérőt 2019. április 11–17. között mindvégig magán hordott, és azt naponta ki is olvasta. Ezzel nagy időbeli felbontású adatsort szolgáltatott az öt ért személyi dózisterhelésről, pontosabban annak kis LET értékű járulékaról. A mért értékek a többi dózismérő által mért dózisos átlaga körül alakultak, és közel két nagyságrenddel voltak nagyobbak, mint amekkora dózist itt a Földön kapunk. A küldetése során kapott többletdózis – az egész repülésre extrapolálva – körülbelül egy mellkasi CT által okozott dózissal felel meg. 2009-ben, második repülése alkalmával Simonyi a felbocsátás és az űrállomás-megközelítés során öt ért dózist is megmérte a Szozuz űrhajón.

Mérések antropomorf fantomokkal

Az űreszközök fedélzetén kialakuló sugárzási tér jellemzői mellett fontos ismerni az emberi szervezeten belül, pontosabban a bőrfelszín alatt különböző mélységekben elhelyezkedő és az ionizáló sugárzással szemben eltérő érzékenységgű szervekben kialakuló sugárzási teret is. Ehhez olyan, az emberi testet helyettesítő fanto-

mokat használnak, amelyekbe a detektorok tetszőleges pozíciókba elhelyezhetők és könnyen cserélhetők. A Nemzetközi Űrállomás Zvezda moduljának külső platformján, illetve az ISS moduljainak belsejében, 2004 és 2011 között végzett Matroszka kísérletsorozatban termolumineszcens dózismérőkkel és nyomdetektorokkal az Energiatudományi Kutatóközpont is részt vett. A Matroszka fantomban a lágy szöveteket és a tüdőt testszövet-ekvivalens, kis sűrűségű poliuretán helyettesítette, a csontok helyére valódi emberi csontokat helyeztek el. A fantomot szeletekből rakták össze azért, hogy a detektorok könnyen legyenek cserélhetők. A passzív detektorokkal végzett mérések hátránya, hogy azokat csak utólag, a Földön lehet kiértékelni, ezért a szállítás közbeni transzportdózissal is számolni kell, valamint nincs mód időbeli változások nyomon követésére. Az aktív dózismérőkkel végzett mérések lehetőségei pedig meglehetősen korlátozottak.

Az új típusú, kis méretű Pille dózismérők ugyanakkor alkalmasak arra, hogy a fantom belsejében különböző mélységekben méréseket végezzenek és a dózisoskat akár 1-2 heti rendszerességgel kiolvassák. A 2020-as évek elején várható, hogy az orosz Enyergia vállalat a Német Repülési és Űrkutatási Központtal (DLR) együttműködésben feljuttatja a Matroszka-III fantomot az ISS fedélzetére. Ennek érdekében az elmúlt években megépült egy testszövet-ekvivalens anyagból készült hengeres tartószerkezet prototípusa (12. ábra), amelynek segítségével a Matroszka-III fantom erre szolgáló üregében az új típusú Pille dózismérők különböző mélységekben lesznek elhelyezhetők.

Összefoglalás

A Pille mind a mai napig az egyetlen olyan űrqualifikált termolumineszcens dózismérő rendszer, amelyvel TL dózismérők fedélzetén történő kiolvasása megoldható. A 16 éve megbízhatóan működő és egyre bővülő rendszert a Nemzetközi Űrállomás szolgálati dozimetriai rendszerének részeként dózistérképezésre és személyi dozimetriai célokra egyaránt

12. ábra. Az új típusú Pille dózismérők fantomba való behelyezésére szolgáló hengeres tartószerkezet prototípusa.



használgják. A Pille az egyetlen olyan rendszer az ISS-en, amellyel űrsétadózist mérnek, továbbá az egyetlen olyan, a fedélzeten üzemelő passzív dózismérő rendszer, amellyel nagyobb napkitörések űrállomáson belüli hatása is kimutatható. Bár az aktív dózismérők vitathatatlan előnye a nagyságrendekkel jobb időfelbontás, illetve a helyszínen – akár valós időben – rendelkezésre álló adatok, de a ma használt aktív dózismérők mérete viszonylag nagy, folyamatos áramellátást igényelnek és igen kis számban állnak rendelkezésre. A passzív dózismérők alkalmazása biztonsági okokból is továbbra is indokolt.

Irodalom

1. Hirn A., Pázmándi T., Deme S.: Sugárvédelem a világűrben. *Fizikai Szemle* 64 (2014) 221–226.
2. Hirn A., Apáthy I., Csőke A., Deme S.: Pille 40 – egy korszakon átívelő történet. *Űrtan Évkönyv* 2018. *Asztronautikai Tájékoztató* 70 (2019) 47–58., http://www.mant.hu/kiadvanyok/urtan_evkonyv_2018.pdf
3. Deme S., Apáthy I., Csőke A., Hirn A.: 40 éves lett a Pille. *Sugárvédelem* 12/1 (2019) 51–71., http://elftsv.hu/svonline/docs/V12i1/Dem_V12i1.pdf
4. Deme S.: A Pille története, avagy hogyan lett az elefántból bolha. *Fizikai Szemle* 31 (1981) 32–36.
5. Deme S., Apáthy I.: Újra felszáll a Pille. *Fizikai Szemle* 49 (1999) 80–84.

FEKETELYUK-PERTURBÁCIÓK SKALÁR-TENZOR GRAVITÁCIÓELMÉLETEKBEN

Gergely Cecília

Szegedi Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék

Az általános relativitáselmélet érvényessége

A huszadik század elején *Einstein* megalkotta a speciális relativitáselméletet, amely a 3-dimenziós teret és az időt egyetlen 4-dimenziós téridőként egyesítette. Fő érdeme, hogy az inerciarendszerek a mechanikában is ugyanúgy transzformálhatók egymásba, mint az elektrodinamikában, azaz Lorentz-transzformációkkal. A 4-dimenziós formalizmus rendszerében egyszerűbbek az egyenletek és a 3-dimenziós látásmódból fakadó paradoxonok feloldhatók [1].

A gravitáció viszont nem fér bele ebbe a keretrendszerbe, mivel az a newtoni elméletben végtelen sebességgel terjed. Általános relativitáselméletében *Einstein* a gravitációt a téridő geometriájával, azaz annak görbültségével azonosította. A newtoni potenciál szerepét a szimmetrikus, nemdegenerált \tilde{g}_{ab} metrikus tenzor 10 független komponense vette át. A metrikus tenzort és forrásait, az anyag és mezők energia-impulzus tenzorát az *Einstein*-egyenletek kapcsolják össze. A szabad, spin nélküli részecskék pedig geodetikus egyenletet követnek.

Elhangzott a XXXIV. OTDK-n, pályázatával – témavezetője *Keresztes Zoltán*, SZTE – a szerző I. helyezést ért el az *Elméleti asztrofizika és asztrodinamika* szekcióban.



Gergely Cecília 2019-ben végzett fizikus mesterszakra az SZTE-n, jelenleg PhD hallgató. Kutatási területe a téridőfelbontások, a gravitációs Hamilton-dinamika és a feketelyuk-perturbációk skalár-tenzor gravitációelméletekben. Háromszor nyerte el az Új Nemzeti Kiválósági Program ösztöndíját, kétszer lett OTDK első helyezett. Megkapta az MTA Szegedi Akadémiai Bizottsága által kiírt pályázat első díját természettudományok területén. A nemzetközi CANTATA és QG-MM kollaborációk tagja.

Az általános relativitáselmélet igen pontosan írja le a gravitációs jelenségeket mind a Naprendszer léptékén (ahol a gravitáció gyengének tekinthető és a karakterisztikus sebességek kicsik a fény sebességéhez viszonyítva), mind az erős gravitáció olyan tartományaiban, amelyek megfigyelhető jelenségekhez vezetnek. Előbbibe tartoznak a perihéliumvándorlás, gravitációs fényelhajlás és gravitációs vöröseltolódás. Utóbbiba a gravitációs lencsésítés, a fekete lyukak akkréciójával és nagyenergiás részecskenyalábjajaival kapcsolatos jelenségek, valamint a gravitációs hullámok. A kompakt kettős rendszerek összeolvadásából keletkező, az Advanced LIGO és Virgo földi detektorai segítségével megfigyelt gravitációs hullámok [2–7] az általános relativisztikus jóslatoknak megfelelő tulajdonságokat mutattak [8]. A kettős neutroncsillag összeolvadásból keletkezett gravitációs hullám és a kísérő gamma-kitörés megfigyelt 1,7 s időkülönbsége a gravitációs hullámok fénysebességű terjedését [$-3 \cdot 10^{-15}$, $+7 \cdot 10^{-16}$] relatív pontossággal igazolta [9]. A gravitációs hullám terjedését jellemző diszperziós relációkra [10] kapott kényszerek a graviton tömegének eltűnését $7,7 \cdot 10^{-23}$ eV/ c^2 pontossággal mondták ki [4]. Szintén nagy pontossággal igazolják az általános relativitáselmélet jóslatait a kettőspulzár-megfigyelések [11] és különböző precessziós effektusokat a Gravity Probe B műhold mérései [12].

Módosított gravitációelméletek létjogosultsága

Az általános relativitáselméletet igazoló megfigyelések ellenére mind galaktikus, mind kozmológiai skálán problémák merültek fel. A galaxisok külső csillagainak forgása nem követi az általános relativisztikus jóslatot, ami a galaxiscentrumtól vett nagy távolság miatt tulajdonképpen a kepleri jóslat. A galaktikus