

Magyar Űrkutatási Fórum 2023

Válogatott közlemények

Sopron, 2023. május 3-5.



Magyar Űrkutatási Fórum 2023
Sopron, 2023. május 3-5.
Válogatott közlemények

ISBN: 978-963-7367-33-5

Szerkesztette:

Bacsárdi László
Barta Veronika
Szárnya Csilla
Wesztergom Viktor

Programbizottság

Bacsárdi László (társelnök)
Csurgai-Horváth László
Hirn Attila
Kis Árpád
Lichtenberger János
Németh Zoltán
Szűcs Eszter
Wesztergom Viktor (társelnök)

Helyi szervezőbizottság

Barta Veronika (elnök)
Berényi Kitti
Cziráki Kamilla
Szárnya Csilla
Bozóki Tamás
Bozsó István
Buzás Attila
Németh Kolos
Rubóczki Tibor

Kiadja:

a Magyar Asztronautikai Társaság
1044 Budapest, Ipari park u. 10.
www.mant.hu
Budapest, 2023

Felelős kiadó:

Arnócz István főtitkár
Minden jog fenntartva.

Köszöntő

Az 1972-es és 1973-as év jelentős fordulópont volt nemcsak az én életemben, hanem egyesületünk, a MANT jogelődjének, a MTESZ Központi Asztronautikai Szakosztályának (KASZ) életében is. A KASZ megalakulása, vagyis 1959 óta sikeresen működött Fonó Albert akadémikus elnöklétével. A vezetőség összetétele és a működés rendje is stabil volt. 1972 második felében azonban váratlan és súlyos veszteség érte a Szakosztályt: elhunyt Fonó Albert, majd Érdi Krausz György is, aki akkoriban ügyvezető titkár volt. A vezetőség többi tagja vitte tovább a megkezdett munkákat, köztük az 1972 késő őszére tervezett első Ionoszféra és Magnetoszféra Fizikai Szeminárium szervezését is. 1973 elején átalakult vezetőséggel, de a korábbi, eredményes időszak célkitűzéseire alapozva vittük tovább a KASZ működését egészen 1986-os egyesületté alakulásáig.

Horvai Ferenc kétkötetes alapművéből, az „Egyesületünk 50 éves története” címűből idézek néhány, az Ionoszféra- és Magnetoszféra Fizikai Szemináriumokra vonatkozó részletet:

„A Szakosztály még 1972-ben tartotta meg első Ionoszféra- és Magnetoszféra Fizikai Szemináriumát. A siker alátámasztotta a szervezők reményét, hogy a Szeminárium egy sorozat kezdete lehet, amely éveken keresztül megrendezésre kerülhet.”

Konkréten tavaly ősszel volt a sorozat megkezdésének 50. évfordulója. Mivel időközben a szemináriumok már tavasszal kerültek megrendezésre, most jött el az alkalom, hogy megemlékezzünk a fél évszázados rendezvény célkitűzéséről és kezdetéről. Horvai így folytatja a történetet:

„A szervezők ügyeltek arra, hogy a szemináriumra az ország különböző pontjain kerüljön sor, így biztosítva a lehetőséget arra, hogy a kutatók megismerjék egymás kutatóhelyét. Volt, hogy egy szeminárium alkalmával több kutatóhelyet is felkerestek a résztvevők, így például a harmadik, debreceni szeminárium alkalmával a jelenlévők látogatást tettek az MTA Napfizikai Obszervatórium debreceni munkahelyein és a Gyulai Megfigyelő Állomáson, valamint az Országos Meteorológiai Szolgálat Légműfizikai Intézet békéscsabai ionoszféra állomásán. A szeminárium több alkalommal fogadott neves külföldi szakembereket.” „A Szeminárium szervezői általában is próbáltak figyelni arra, hogy a lehetőségek szerint minél több nyugati szakember adhasson elő.”

„A rendezvény egyik legfontosabb célja az volt – írja Horvai – hogy a szakemberek megismerjék egymás kutatását, témájuk határterületét. Összefogva ugyanis olyan kutatásokat tehettek, melyekre nagy szükség volt akkor és van ma is a világon.”

A szeminárium sorozat elindításában és szakmai irányításában eleinte két Pál keresztnévű geofizikusnak, a budapesti Szemerédi Pálnak és a soproni Bencze Pálnak volt kezdeményező szerepe. Ahogy fejlődött maga a témakör, úgy változott, bővült a szemináriumok témaköre is. Horvai így írt erről: *„A szemináriumok elnevezésében szereplő ionoszféra és magnetoszféra fizika eleinte a Nap-Föld fizikai kapcsolatok irányába bővült. A hetvenes évek második felétől a kutatók már az űrfizika bármely területéről, így időnként még a planetológia témájában is tartottak előadást az alkalmanként 30-40 fős rendezvényen.”*

Az 1980-as évek pénzügyi nehézségei miatt többnyire Budapestre kerültek az immár kétévente tartott szemináriumok. A GGKI meghívására 1995-ben újra vidéken, éspedig harmadszor ismét Sopronban rendeztük meg a szemináriumot, amelyen külföldi előadók is szerepeltek. A szeminárium sikere akkora volt, hogy a XXI. században a soproni GGKI, közösen a MANT-tal, egyre gyakrabban vállalta a szemináriumok megrendezését. A tematika ekkor már szinte az egész űrkutatásra kiterjedt, így időszerűvé vált a szeminárium patinás nevének megváltoztatása Magyar Űrkutatói Fórumra. A rendezvény ezáltal nemcsak az Ionoszféra és Magnetoszféra Fizikai Szemináriumok, hanem az 1967 és 1981 között megrendezett Asztronautikai Tudományos Ülésszakok folytatásának is tekinthető.

Az 50 éves hagyomány folytatását mindenképpen kívánatosnak tartom. Ahogy az elmúlt évtizedekben is így volt, továbbra is segíthet a következő évtizedek magyar űrkutatóinak képzésében. Remélem, hogy az idei soproni szemináriumra is úgy fogunk visszaemlékezni, mint egy olyan rendezvényre, amelyen egyaránt érdemes volt részt venni, előadást tartani, poszttert bemutatni. A MANT büszke erre a fél évszázados múlttal rendelkező szeminárium-sorozatra, amit szeretne folytatni amíg erre szükség és lehetőség van.

Budapest, 2023. április 21.

Almár Iván
a MANT örökös tiszteletbeli elnöke
az 1972-es (első) Ionoszféra és Magnetoszféra Fizikai
Szeminárium résztvevője

Programbizottsági köszöntő

Soproniként mindketten örülünk annak, hogy a Magyar Asztronautikai Társaság (MANT) és a HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI) közös kezdeményezésére a legrégibb hagyományokkal rendelkező hazai űrkutatási szakmai-tudományos rendezvény ismét városunkban került megrendezésre.

1972-ben kezdődött az Ionoszféra- és Magnetoszféra-fizikai Szemináriumok sorozata, idén immáron 33. alkalommal kerül találkozni a területtel foglalkozó szakemberek. Sőt, a tágabb értelemben vett űrkutatással foglalkozó szakemberek, nem véletlen, hogy 2015 óta a rendezvény új nevet visel, Magyar Űrkutatási Fórum, és azóta minden alkalommal próbálunk valami új dolgot kipróbálni. Az űrutatás sokoldalúságát jelezve az évben először egy űrorvosi szekcióval is találkozhattak a rendezvény résztvevői a korábban megszokott szekciók mellett.

A rendezvényt Ferencz Orsolya űrkutatásért felelős miniszteri biztos nyitotta meg, majd Arnócz István MANT-főtitkár üdvözölte a résztvevőket, majd egy kerekasztal-beszélgetést tartottunk a HUNOR magyar űrhajós programról. A rendezvényen elhangzott 30 plenáris előadás és 15 poszter előadás többek közt az űrfizika, földmegfigyelés, űridőjárás, napfizika, geofizika, légkörfizika, űrsziliológus, planetológia, adatelemzés és orvostan témáit érintette.

A konferencia sokszínűségének köszönhetően alkalom nyílt az űrkutatáshoz, űrtevékenységhez kapcsolódó más tudományterületeken, műszaki fejlesztésekben elért hazai eredmények bemutatására, megvitatására is. A rendezvény hagyományaihoz híven az idei évben is nagy hangsúlyt kapott a poszterszekció. Bár egyre többen foglalkoznak hazánkban az űrtevékenységgel, kritikus kérdésnek tartjuk a jövő generációjának a megszólítását. Ezért a konferencia az idei évben is kiemelt hangsúlyt fektetett a fiatalok, egyetemisták, doktoranduszok kutatómunkába való bevonására, s a HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet anyagi támogatásával kedvezményes részvételi díjat biztosított számukra.

A szervezést a konferencia a programbizottsága (Bacsárdi László, Csurgai-Horváth László, Hirn Attila, Kis Árpád, Lichtenberger János, Németh Zoltán, Szűcs Eszter és Wessztergom Viktor), másrészt Barta Veronika vezetésével az FI fiatal kollégáiból álló helyi szervezőbizottság segítette. Fáradhatatlan munkájukat ezúton is köszönjük!

Az előadásokból összesen 10 konferenciaközlemény született, melyet jelen kiadványban változatlan formában közlünk. Ezúton is köszönjük az előadóknak, társszerzőknek, témavezetőknek, segítőknek és valamennyi résztvevőnek a befektetett időt és energiát!

Bacsárdi László és Wessztergom Viktor

Program

Helyszín: Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI)
Tárczy-Hornoch Antal előadó

2023. május 3. (szerda)

12:30	13:15	Regisztráció
13:15	13:30	Megnyitó Ferencz Orsolya, Űrkutatásért felelős miniszteri biztos – Külgazdasági és Külügyminisztérium Arnócz István, főtitkár, Magyar Asztronautikai Társaság
13:30	14:30	Kerekasztal beszélgetés: HUNOR program tudományos kísérletei
14:30	14:50	Kávészünet
		Plenáris előadások (szekcióvezető: Hirn Attila)
14:50	15:05	Kereszturi Ákos, Leszállóhely kijelölés a holdi jeget fúró NASA-ESA űrszonda számára
15:05	15:20	Szarka László Csaba, Éghajlatváltozás
15:20	15:35	Vincze Miklós, Bolygó légkörök és óceánok nagyléptékű áramlásainak laboratóriumi modellezése
15:35	15:50	Pinczés Patrik, Pille adatok a Dél-atlanti Anomália áthaladások tükrében
15:50	16:05	Vitaforum
16:05	16:25	kávészünet
		Plenáris előadások (szekcióvezető: Bacsárdi László)
16:25	16:40	Hegedüs Tibor, Planetary defense és "közeli világűr" ballonkísérletek
16:40	16:55	Galambos Máté, 860, 1060 és 1536 nanométeres kvantumcsatorna összehasonlítása műholdas kvantumkommunikációhoz
16:55	17:10	Vitaforum
17:10	17:50	2 perces szóbeli poszter bemutatók
Albrecht Gábor	Kalibrációs célú és árnyékolás számítások a TRITEL sugárzásmérő teleszkópra	
Berényi Kitti	A 24. napciklus legnagyobb geomágneses viharjaira adott ionoszféra-válasz több műszeres elemzése Európa felett	
Cziráki Kamilla	A Hold gravitációs terének ellipszoidi közelítése Fibonacci-gömb alkalmazásával a GRAIL adatai alapján	
Domján Ádám	Egytengelyes fluxgate magnetométer érzékelők összemérése	
Hegedüs Tibor	Műholdmegfigyelési program Baján - 35 év után ismét	
Heilig Balázs	Swarm L2 tadatermékek fejlesztése az ULF hullámtevékenység jellemzésére	
Kis Árpád	Űridőjárási adatok mérése a Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézetben	
Kovács Péter	Swarm műholdak GPS és mágneses regisztrátumainak elemzése a felső ionoszféra dinamikai folyamatainak megismerésére	
Malatinszky Adél	RADMOS, TECHDOSE és Stratolab-12 ballonfedélzeti sugárzásmérő kísérletek összehasonlítása	
Nagy Imre	Zsúfolt-e a Föld körüli pálya?	
Nagy János	Magyar részvétel az Európai Űrügynökség JUICE (Jupiter Icy Moons Explorer), a Jupiter jeges holdjait felfedező küldetésben	
Papp Paszkál	Radiális reakciófront terjedése súlytalanságban	
Tacza José	A Nap forgási periódusának megjelenése Schumann-rezonancia paraméterek idősoraiban	
Tomasik Máté	Elektromos áramok vizsgálata a földi magnetoszférában	
Vizi Pál Gábor	Kísérletek a „Hunveyor Tesztudvaron” - A bolygótudományi oktatási program keretében a HUSAR-18 rover talajnedvességet mér	
18:00	19:00	Poszterbemutató (borkóstolóval egybekötve) a Kántás Károly előadóban
19:00		Hidegtálas vacsora a Kántás Károly előadóban

2023. május 4. (csütörtök)

		Plenáris előadások (szekcióvezető: Lichtenberger János)
9:00	9:15	Kobán Gergely: Az ionoszféra vizsgálata a Swarm műholdak GPS jeleinek szcintillációi alapján
9:15	9:30	Bór József: A Hunga Tonga - Hunga Ha'apai vulkán 2022. január 15-i kitörésének hatása a globális légköri elektromos áramkör egyenáramú és váltóáramú komponenseire
9:30	9:45	Barta Veronika: T-FORS – magyar részvétellel megvalósuló H2022 projekt
9:45	10:00	Szárnya Csilla: Egyedi meteorok plazmanyomának detektálása digiszonda adatokkal 2019 Leonidák és Geminidák alatt
10:00	10:15	Vitaforum
10:15	10:40	Kávészünet
		Plenáris előadások (szekcióvezető: Kis Árpád)
10:40	10:55	Buzás Attila: Flerek vizsgálata új generációs ionoszonda adatok alapján három különböző módszer segítségével
10:55	11:10	Bozóki Tamás: A légkör-világűr határán végbemenő energiacsatolási folyamatok vizsgálata keskenysávú VLF mérések segítségével
11:10	11:25	Murár-Juhász Lilla: A sugárzási övek forrás populációjának származtatása felszínen mért (AWDANet) kórusokból
11:25	11:40	Lichtenberger János: FARBES - kész sugárzási öv forgatókönyvek
11:40	11:55	Vitaforum
12:00	14:30	Ebéd a Deák étteremben; Kávé, tea, süti a FI első emeleti előterében
		Plenáris előadások (szekcióvezető: Erdős Géza)
14:30	14:45	Kálmán Béla, Napfoltminimumok és a most felfutó 25. ciklus
14:45	15:00	Muraközy Judit, Napfoltcsoportok visszafejlődésének dinamikája
15:00	15:15	Németh Zoltán, Igazából miért is fúj a napszél?
15:15	15:30	Bíró Nikolett, Napszél struktúrák térbeli és időbeli fejlődése a belső helioszférában
15:30	15:45	Bebesi Zsófia, Hullámtevékenység és lökeshullám-reformáció a Merkúrná
15:45	16:05	Vitaforum
16:05	16:30	Kávészünet
		Plenáris előadások (szekcióvezető: Németh Zoltán)
16:30	16:45	Erdős Géza, Az első magyar mágnesesen árnyékolt kamra építése Nagycenken.
16:45	17:00	Horváth Dezső, Gravitációmoduláció hatása reaktív határfelületre
17:00	17:15	Krezinger Máté, Rádiókvázárok relativisztikus plazmanyalábjai és a RadioAstron műhold
17:15	17:30	Vitaforum
18:30		Konferenciafogadás a Kántás Károly előadóteremben

2023. május 5. (péntek)

		Plenáris előadások (szekcióvezető: Frey Sándor)
9:30	9:45	Fockter Zoltán Péter, Az infravörös űrcsillagászat jelentősége a csillagkörüli anyag és a Nap-típusú csillagok keletkezésének vizsgálatában
9:45	10:00	Nagy Zsófia, Fiatal csillagok fényességváltozásainak vizsgálata a Gaia űrtávcső adatai alapján
10:00	10:15	Perger Krisztina, Kozmikus útjelzők mentén: A JUICE űrszonda pontos navigációja rádiócsillagászati eszközökkel
10:15	10:30	Vitaforum
10:30	11:15	Kávészünettel egybekötött poszterbemutató a Kántás Károly előadóban
		Plenáris előadások (szekció elnöksége: Merkely Béla, Réthelyi János, Nagy Klaudia Vivien, Szabó Sándor András, levezető elnök: Merkely Béla)
11:15	11:30	Nagy Klaudia Vivien, HUNOR űrhajós szelekció tanulságai
11:30	11:45	Réthelyi János, Az űr hatása az emberi pszichére – az űrhajós pszichológiai felkészítésének aktuális kérdései

11:45	12:00	Sydó Nóra, Fizikális tréning szerepe az űrhajós felkészítésében
12:10	12:15	Papp Renáta, Az űrfarmakológia aktuális kérdései
12:15	12:30	Nagy-Bozsoki József, Űrtelemedicina, folyamatos egészségügyi monitorozás az űrutazás során
12:30	12:50	Vitaforum
12:50	13:00	Zárszó - Merkely Béla, rektor, Semmelweis Egyetem
13:00	14:00	Büfébéd a Kántás Károly előadóban

Tartalomjegyzék

- Bebesi Z., Timár A., Erdős G. Juhász A.,
Hullámtevékenység és lökéshullám-reformáció a Merkúrnál
MÚF2023-K-01
- Bór J., Bozóki T., Sátori G., Buzás A., Steinbach P., Szabóné André K., E. R. Williams, S. A. Behnke, M. J. Rycroft, H. G. Silva, M. Kubicki, R. Said, C. Vagasky, M. Atkinson
A globális légköri elektromos áramkör egyenáramú és váltóáramú komponenseinek kvázi-azonnali változásai a Hunga Tonga-Hunga Ha'apai vulkán 2022. január 15-i kitörésének hatására
MÚF2023-K-02
- A. Buzás, D. Kouba, J. Mielich, D. Burešová, Z. Mošna, P. Koucká-Knížová, V. Barta
Flerek vizsgálata új generációs ionoszonda adatok alapján három különböző módszer segítségével
MÚF2023-K-03
- Hegedüs T., Kereszty Zs., Ledneczki I.
Műholdmegfigyelési program Baján - 35 év után ismét
MÚF2023-K-04
- Hegedüs T., Jäger Z., Goda Z, Kereszty Zs, Lang Á., Papp L.
Planetary defense és "közeli világűr" ballonkísérletek
MÚF2023-K-05
- Kálmán B.
Napfoltminimumok és a most felfutó 25. napfoltciklus
MÚF2023-K-06
- Muraközy J.
Napfoltcsoportok visszafejlődésének dinamikája
MÚF2023-K-07
- Nagy I.
Zsúfolt-e a Föld körüli pálya?
MÚF2023-K-08
- Nagy Zs., Ábrahám P., Kóspál Á., Kun M., Szabados L., F. Cruz-Sáenz de Miera, E. Fiorellino, Marton G., S. Park, M. Siwak, Szabó Zs. M., Szilágyi M.
Fiatall csillagok fényességváltozásainak vizsgálata a Gaia űrtávcső adatai alapján
MÚF2023-K-09
- Szarka L.
Éghajlatváltozás
MÚF2023-K-10

Szervezők

HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet

A HUN-REN soproni székhelyű kutatóhelye az egykori Selmezbányai Akadémia geodéziai és geofizikai utódintézményeiből és a Kövesligethy Radó által 1905-ben alapított Földrengésjelző Intézetből több szervezeti átalakulással jött létre. Feladatai közé tartoznak a geodéziai és geofizikai alap kutatások, melyek célja a Föld-rendszer fizikai állapotának és folyamatainak megfigyelése, modellezése, értelmezése, valamint az ezekhez kapcsolódó elméleti (matematikai, fizikai) és gyakorlati módszerek, vizsgálati eszközök fejlesztése, létrehozása. Mindemellett számos közcélú szolgáltatást végez, mint a Föld körüli térség űreszközökön és folyamatos obszervatóriumi megfigyeléseken alapuló diagnosztikája (űridőjárás), az országos szeizmológiai hálózat és szolgálat fenntartása, a nemzetközi együttműködésekben fakadó adatszolgáltatás, valamint időszakos megfigyelőrendszerek működtetése. Az intézet alap kutatási tevékenységével összefüggésben részt vállal természeti erőforrások kutatásában, földtani-földfizikai természeti kockázatok elemzésében is. A földfizikai és űrtudományi kutatások keretét öt kutatási szervezeti egység adja (Földmegfigyelés, Geodéziai és Geofizika, Litoszféra-fizika, Szeizmológia, Űrkutatás és űrtechnológia), de a kutatások tárgyából és módszereiből adódóan az intézeti munkát igen erős projekt és szervezeti szintű nemzetközi beágyazottság jellemzi.

További információk: www.epss.hu



Magyar Asztronautikai Társaság

A Magyar Asztronautikai Társaság (MANT) jogelődje 1956-ban alakult. Küldetése azóta is változatlan, legfontosabb célkitűzései az alábbiak: terjeszteni az űrhajózási-űrkutatási ismereteket; egységes magyar szaknyelv kialakítása az asztronautikában; foglalkozni az ifjúsággal, és erősíteni azt az elvet, hogy az űrtan nem csak az űrhajózást jelenti, hanem jelen van mindennapi életünkben: a katasztrófa-előrejelzéstől kezdve a termésbecslésen és a műholdas helymeghatározáson át az orvos- és jogtudományig egyaránt. A MANT az űrkutatás iránt érdeklődő és az űrtevékenységgel aktívan foglalkozó hazai szakembereket tömöríti. A társaság szakmai programok (konferenciák, szemináriumok, találkozók) szervezése mellett minél szélesebb közönséghez szeretne szólni, a fiataloktól az idősekig egyaránt. Az általános és középiskolás fiatalok számára pályázatokat, programokat, űrtáborokat és versenyeket szervez, a nagyközönség számára pedig ismeretterjesztő rendezvényeket és szakmai workshopokat.

További információ a Társaságról: www.mant.hu



Hullámtevékenység és lökeshullám-reformáció a Merkúrnál

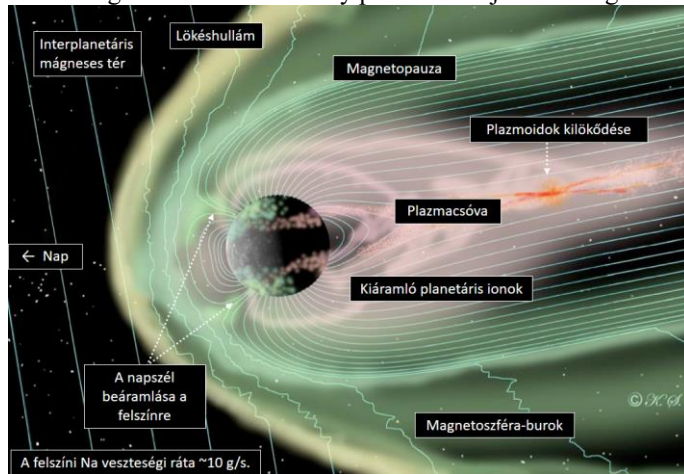
Z. Bebesi, A. Timár, G. Erdős, A. Juhász

Wigner Fizikai Kutatóközpont
Budapest

A Merkúrt és plazmakörnyezetét mostanáig egyetlen keringő egység, a NASA MESSENGER űrszondája vizsgálhatta folyamatosan, hosszabb időn keresztül (2011-2015). Ennek során lehetőség adódott a bolygó fejhullámának környezetében zajló részecske-hullám kölcsönhatások megfigyelésére is. A foreshock tartományban észlelt ULF-hullámok frekvenciája a Merkúrnál jellemzően a 0,05-0,41 Hz-es tartományban mérhető. Az ULF-hullámok meredekké válása révén kialakuló SLAM struktúrák (Short Large Amplitude Magnetic Structures) vagy különálló jelenségeként, vagy az ULF-hullámokra szuperponálódva észlelhetők. A hullámtevékenység intenzitása, frekvenciája, valamint a SLAMS események gyakorisága korreláltható az upstream paraméterek (elsősorban az IMF térerőssége, geometriája, valamint az Alfven Mach szám) változásával. A SLAMS események gyakorisága a bolygó Naptól mért távolságával is korrelációt mutat. A lökeshullám-reformáció a Merkúrnál nyugodt napszél esetén rendkívül stabil, ciklikus és jelentős mértékben hozzájárulhat a magnetoszférában észlelt oszcillációk kialakulásához is.

A Merkúr plazmakörnyezete

A Merkúr magnetoszférája [1] lényegesen kisebb kiterjedésű és gyengébb a Föld mágneses terénél (~1,1 %-a). A Naphoz való közelsége folytán rendszeresen ki van téve a belső helioszférában zajló intenzív folyamatoknak. A Merkúr és a Föld helioszférikus környezetére jellemző napszél-paramétereket az 1. táblázat tartalmazza. A Merkúr közelében áramló napszél nagy dinamikus nyomása (~10 nPa) drasztikus változásokat idézhet elő a Merkúr plazmakörnyezetében. Dinamikus folyamatait gyakori rekonnekció, heves fluxus-transzfer események, mágneses viharok és a csóvában leváló plazmoidok jellemzik (1. ábra). Rekonnekció esetén a magnetoszférában néhány perc alatt teljes rekonfiguráció játszódhat le.



1. ábra. A Merkúr magnetoszférája és kölcsönhatása a környező napszéllel. (Forrás: MPS)

Annak ellenére, hogy a Merkúr dipólmomentuma elég kicsi, belső mágneses terének kölcsönhatása a környező napszéllel nagyfokú hasonlóságot mutat Naprendszerünk más,

mágneses térrel rendelkező objektumával. Azonban a Merkúr mágneses terének kiterjedése a bolygó méretének nagyságrendjébe esik, mágneses dipóltengelye és forgástengelye közel párhuzamos, valamint a dipól $0,196 R_M$ -nyi távolsággal (ahol $R_M = 2439,7$ km a Merkúr sugara) el van tolódva az északi pólus felé. A Merkúr magnetoszférája a többi bolygóéhoz képest kevésbé kompresszibilis.

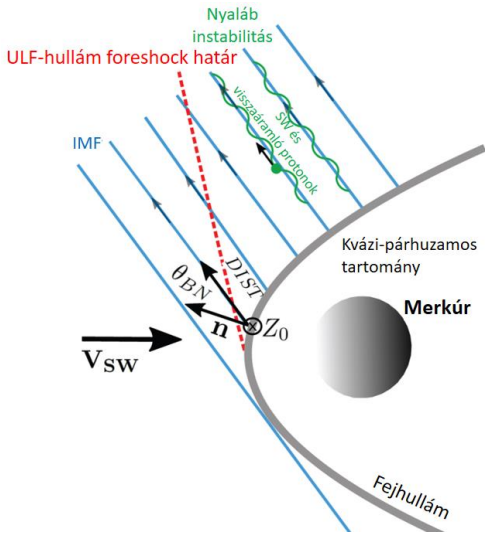
Paraméter	Merkúr	Föld
Naptól mért távolság (CsE)	0,31 - 0,47	1
Napszél sebesség (km/s)	250 - 650	320 - 710
Napszél sűrűség (cm ⁻³)	15 - 105	3,2 - 20
Interplanetáris mágneses tér (nT)	31 ± 11	~6
Parker-spirál szög (°)	~20	~45
Alfvén Mach-szám	2-5	6 - 11

1. táblázat. Tipikus napszél-paraméterek a Merkúrnál és a Földnél.

A Merkúrnál zajló részecske-hullám kölcsönhatások szempontjából ugyancsak nem elhanyagolható a bolygó ritka exoszférája, amely az üstökösökhöz hasonlóan csóva-szerűen oszlik el a környezetében. Az exoszféra főbb összetevői a hidrogén, a hélium (feltehetőleg napszél eredetűek), az oxigén és a nátrium (a kéregből származhatnak).

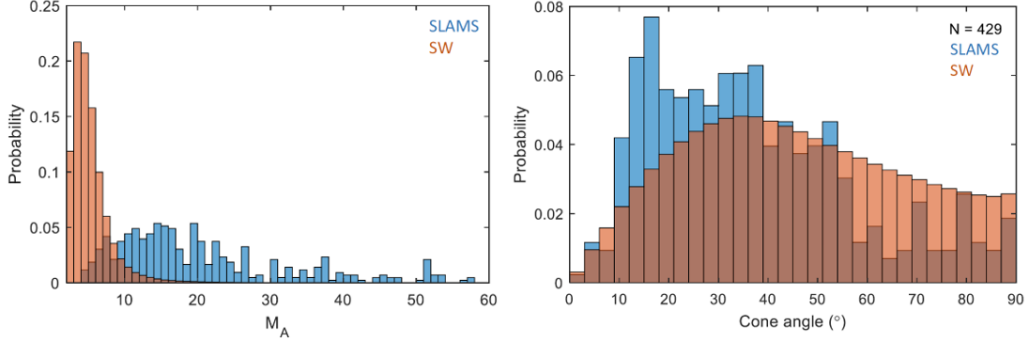
Hullámtevékenység a Merkúr foreshock tartományában

A Merkúr fejhullámának kvázi-párhuzamos tartománya előterében (foreshock) a lökeshullámról a diffúzív lökeshullám gyorsítás (DSA) folyamat révén visszavert napszél eredetű ionok kölcsönhatásba lépnek a beérkező napszéllel. Ennek során instabilitások jönnek létre, melyek ULF-hullámkeltéshez vezetnek (2. ábra). Az ULF-hullámtevékenység csak a foreshock tartományára korlátozódik. A hullámok először az upstream irány felé terjednek, majd a napszél hatására visszakonvektálnak a fejhullám irányába, ahol meredekké válnak, és létrejönnek a SLAM struktúrák (Short Large Amplitude Magnetic Structures; SLAMS). Ezek végül beépülnek a kvázi-párhuzamos fejhullámba, így hozzájárulnak annak folyamatos fenntartásához. A jelenséget a Földnél [11] kiterjedten vizsgálták már, és bizonyos esetekben a Szaturnusznál is megfigyelhető volt [2].



2. ábra. Az ULF-hullámok kialakulása és észlelhetőségi tartománya a Merkúr kvázi-párhuzamos lökeshulláma előtti térségben [13].

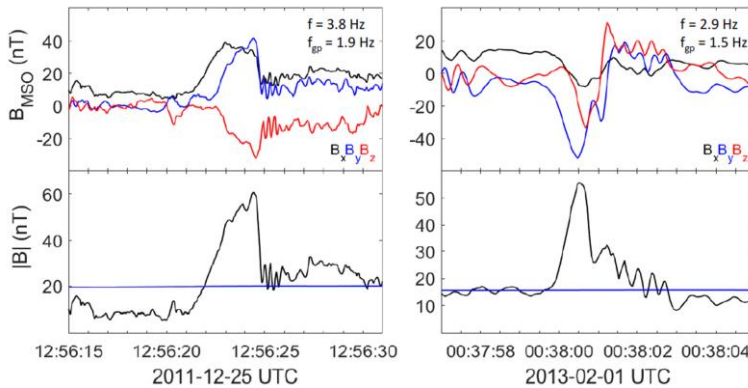
A SLAM struktúrák térbeli kiterjedése (korrelál az ULF-hullámok hullámhosszával) az ion girosugárral skálázódik, mely az interplanetáris mágneses tér nagyságától függ. A Merkúr foreshock-jában mérhető ULF-hullámok frekvenciája jellemzően a 0,05-0,41 Hz-es tartományban mérhető. Növekvő mágneses térerősség hatására az ULF hullámok frekvenciája is növekszik, valamint a frekvencia ugyancsak függ az interplanetáris mágneses tér kúpszögétől (a növekvő kúpszöggel arányosan csökken) [10][12].



3. ábra. A Merkúrnál megfigyelt SLAM struktúrák észlelési valószínűsége és az Alfvén Mach-szám (M_A), valamint a kúpszög közötti összefüggés [9].

Egy nemrégiben megjelent tanulmány [13] 429 beazonosított SLAMS esemény esetében vizsgálta többek között az események észlelésének valószínűségét az Alfvén Mach-szám (M_A) és a kúpszög függvényében. A szerzők úgy találták, hogy a Merkúrnál a SLAM struktúrák megjelenésének szempontjából a kisebb interplanetáris mágneses tér kedvezőbb (3. ábra bal oldali panelje), ami magasabb M_A -ot jelent. A kúpszögre vonatkozóan a kapott összefüggés azt mutatja, hogy a SLAM struktúrák detektálására kisebb kúpszögek esetében van nagyobb esélyünk (3. ábra jobb oldali panelje).

Az Alfvén Mach-számmal kapcsolatos eredményt egy független tanulmány is megerősítette, mely szerint az ULF-hullámok megjelenési valószínűsége relatíve kis interplanetáris mágneses térerősség és kvázi-radiális mágneses tér konfiguráció esetén a legnagyobb. Ezek a feltételek kedvezőek egy relatíve nagyobb kiterjedésű foreshock zóna kialakulásához. A statisztikai vizsgálatok azt is kimutatták, hogy a hullámok megjelenési valószínűsége a Naptól távolodva egyre nagyobb lesz, azonban a jelenséget kiváltó visszaverődő protonok megjelenéséhez szükséges feltételek a Merkúr pályájának minden pontján jelen voltak, az alacsony M_A ellenére is [13].



4. ábra. SLAMS eseményekhez társuló whistler prekursor hullámok a Merkúrnál [9].

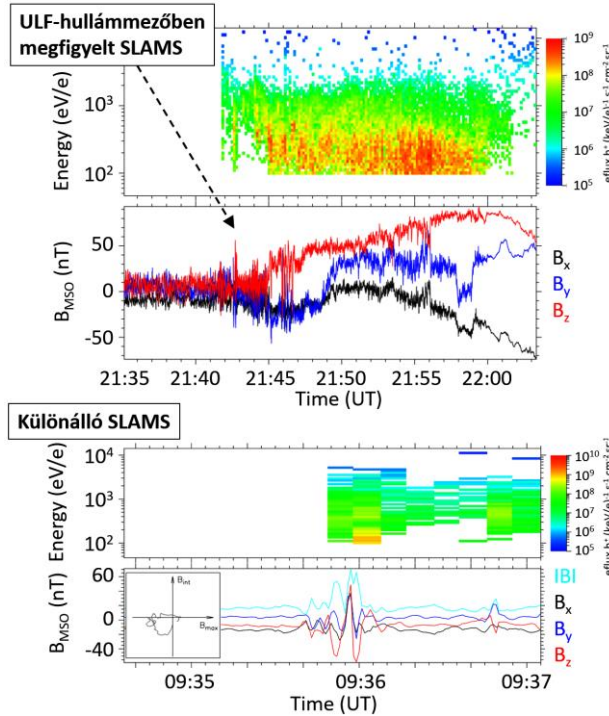
A más bolygók környezetében észlelt SLAMS esetében (például a Földnél [15] és a

Szturnusznál [2]) megfigyelték, hogy a meredekké váló struktúra upstream peremén whistler prekursor hullám válik le. A Merkúrnál detektált [9] whistler-szerű hullámok esetében azonban a mért frekvencia a (háttér mágneses térből meghatározott) lokális proton girofrekvenciának (f_{gp}) nagyjából a kétszerese volt (4. ábra), közel cirkuláris polarizációval. Ennek magyarázata a Merkúr környezetében lévő napszél-eredetű hidrogén és hélium, valamint a kéregből kipárolgó oxigén, nátrium, magnézium és szilícium keveredésében keresendő.

A SLAMS észlelések további sajátosságai a Merkúrnál

A továbbiakban a NASA MESSENGER (MErcury Surface, Space ENvironment, GEOchemistry, and Ranging) űrszondájának adatait felhasználva, bemutatunk néhány példát, amelyek tovább demonstrálják a Merkúrnál zajló ULF-hullámtevékenységgel kapcsolatos fizikai folyamatokat. Észlelési szempontból a MESSENGER egy érdekes időszakban, a 24. napfoltciklus maximumának környékén tartózkodott a Merkúrnál [7]. Ebben a ciklusban a Nap atipikus polaritásváltáson ment keresztül, mely az északi és a déli féltekén eltérő időpontokban történt.

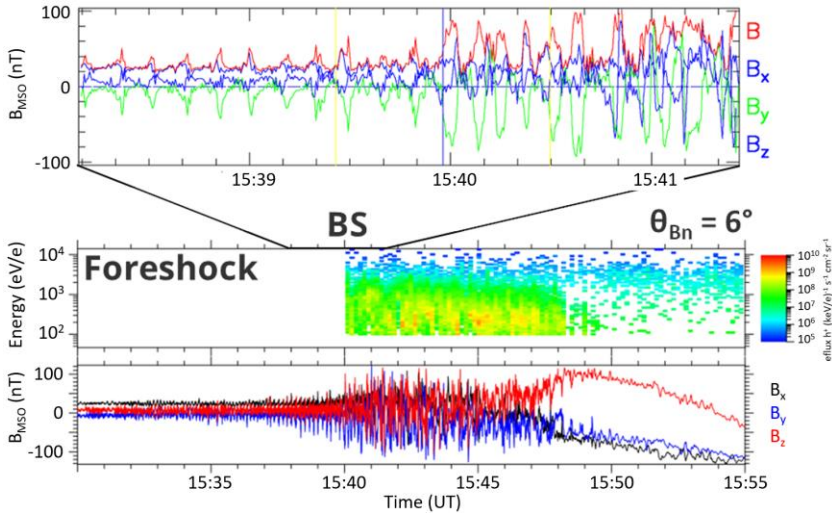
A SLAMS események felkutatásához a MESSENGER Magnetométer és az EPPS (Energetic Particle and Plasma Spectrometer) berendezés FIPS (Fast Imaging Plasma Spectrometer) detektorának adatait használtuk. Az adatok az AMDA adatbázisból (<http://amda.irap.omp.eu/>) bárki számára hozzáférhetők. A mágneses tér adatok felbontása 0,05 másodperc, a plazmaadatokat csak a lökeshullám pontos helyzetének beazonosításához használtuk. A SLAM struktúrák esetében általánosan elfogadott kritérium, hogy az amplitúdó legalább a háttér mágneses térnek a 2,5-szerese legyen [11]. A Merkúrnál SLAM struktúrák önállóan (ez a ritkább), vagy az ULF-hullámokra szuperponálódva fordulnak elő.



5. ábra. SLAMS események a Merkúr fejhullámának előterében (AMDA adatbázis, MESSENGER-MAG és MESSENGER-FIPS adatok). Felső ábra: ULF-hullámmezőben megfigyelt SLAM struktúra. Alsó ábra: különálló SLAMS az upstream tartományban.

Egy tetszőlegesen kiválasztott, ~ 1 Merkúr évre kiterjedő időintervallumban 24 SLAMS eseményt figyeltünk meg, ezek közül 2 esetben különálló, 22 esetben pedig az ULF-hullámtérbe beágyazott struktúrát találtunk (5. ábra). A SLAMS események a szonda rendszerében jobbkezes, elliptikus polarizációt mutattak, maximális észlelési távolságuk a modell [16] fejhullámtól $2 R_M$ volt. Az eredményeket bemutató publikációnk beküldés előtt áll.

A Merkúrnál a SLAMS észlelések nem korlátozódnak a $\theta_{Bn} < 45^\circ$ tartományra. A korábbi tapasztalatok azt mutatják, hogy a kvázi-párhuzamos lökeshullám előterében lévő foreshockra jellemző fizikai sajátosságok egészen $\theta_{Bn} \sim 60^\circ$ -ig kiterjedhetnek ([4], [8], [5]), különösen abban az esetben, amikor az IMF-nek erőteljes radiális komponense van [3]. Ezt az észlelések is alátámasztják, mivel $\theta_{Bn} \sim 60^\circ$ felett már nem detektálunk SLAMS eseményeket, valamint az is, hogy a SLAMS megfigyelések szempontjából a kisebb kúpszögek kedvezőbbek. További magyarázatul szolgálhat a Merkúr fejhullámának kis mérete. Valószínűsíthető, hogy a Merkúr környezetében észlelt SLAMS térbeli kiterjedése és a bolygó mérete hasonló nagyságrendbe esik. Ezért amennyiben a mágneses struktúra a napszél inercia-rendszerében nem stacionárius, a mozgás azt eredményezheti, hogy a SLAMS bizonyos szegmensei áttegyedjenek a kvázi-merőleges fejhullám tartomány felé.



6. ábra. Ciklikus lökeshullám reformáció a Merkúr kvázi-párhuzamos lökeshullámánál. (AMDA adatbázis, MESSENGER-MAG és MESSENGER-FIPS adatok).

A földi plazmakörnyezetben észlelt SLAMS esetében már régóta ismeretes, hogy ezek a struktúrák alapvető szerepet játszanak a kvázi-párhuzamos lökeshullám folyamatos fenntartásában, azaz a lökeshullám-reformációban. Azonban a földi fejhullámnál megfigyelt felsorakozó, „patchwork”-szerű SLAM struktúrák helyett a Merkúrnál inkább a lökeshullám ciklikus reformációja történhet (6. ábra).

Az észlelések szerint a Merkúrnál a lökeshullám-reformáció stabil napszél esetén közel tökéletes periodicitást mutat [14]. Például egy 25 perces megfigyelési intervallum alatt a pulzáció periódusa mindössze 10 %-ban tért el az átlagos 10 másodperces értéktől. Ez a kváziperiodicitás a lökeshullám rekonfigurációs folyamatainak részletes tanulmányozását teszi lehetővé a számunkra, beleértve ebbe a lökeshullám előtti hullámaktivitást és a magnetoszféraburok tartománya közötti átmenet és csatolás fizikájának részleteit is. Arra is fény derült, hogy a Merkúr esetében a lökeshullám-reformáció a magnetoszféra belsejében észlelhető hullámaktivitással [6] is kapcsolatba hozható, és esetenként a magnetoszféra nappali oldalán 40-50 nT-ás amplitúdójú hullámokat is gerjeszthet. A két helyszín közötti direkt csatolásra a magnetoszférikus hullámok nagyfokú periodicitása utal, mely egyben azt is implicálja, hogy a szubszoláris magnetoszférában észlelt hullámtevékenységet elsődlegesen a ciklikus

lökéshullám-reformáció dinamikus folyamata indukálja, és nem a SLAM struktúráknak a lökéshullámnál felsorakozott térben és időben változó szekvenciája, mint ahogy azt a földi magnetoszféra kvázi-párhuzamos fejhullámánál megfigyelhetjük.

A MESSENGER adatokkal végzett, jelenleg is folyamatban lévő munkánk révén igyekszünk felkészülni az ESA és a JAXA BepiColombo űrszondájának 2025 decemberére tervezett pályára állítására, és a tudományos adatok fogadására. A BepiColombo révén további lehetőségünk nyílik majd a Merkúr különleges plazmakörnyezetének tanulmányozására, beleértve a napszél és a magnetoszféra között végbemenő csatolási folyamatokat is.

Irodalom

- [1] Anderson, B.J, Acuña, M.H., Korth, H. et al., (2010), Space Sci. Rev. 152, 307–339
- [2] Bebesi, Z., Erdos, G., Szego, K., (2019), Icarus, 333, 306–317
- [3] Blanco-Cano, X., Omidi, N., Russell, C., (2009), JGR, Space Phys., 114, A01216
- [4] Bonifazi, C., Moreno, G., (1981), JGR, Space Phys., 86, 4405–4413
- [5] Glass, A.N., Tracy, P.J., Raines, J.M. et al., (2023), JGR, Space Phys., e2022JA031111
- [6] James, M.K., Bunce, E.J., Yeoman, T. K. et al., (2016), JGR. Space Phys. 121, 8755–8772
- [7] James, M. K., Imber, S. M., Bunce, E. J. et al., (2017), JGR Space Phys. 122, 7907–7924
- [8] Karlsson, T., Raptis, S., Trollvik, H. et al., (2021) JGR, Space Phys. 126, e2021JA029 269
- [9] Karlsson, T., Plaschke, F., Glass, A.N., (2023), Ann. Geophys. Discuss. <https://doi.org/10.5194/angeo-2023-13>
- [10] Le, G., Russell, C.T., (1996), J. Geophys. Res. 101 (A2), 2571–2575.
- [11] Lucek, E., Horbury, T., Dunlop, M., et al., (2002), Ann. Geophysicae, vol. 20, pp. 1699–1710
- [12] Russell, C.T., (2004), Adv. Space Res. 33
- [13] Romanelli, N., DiBraccio, G.A., (2021) Nature Communications volume 12, Art.Nr. 6748
- [14] Sundberg, T., Boardsen, S.A., Slavin, J.A. et al., (2013) JGR: Space Phys. 118, 6457-6464
- [15] Walker, S., Balikhin, M., Nozdrachev, M., (1999), GRLetters, 26, 1357–1360
- [16] Winslow, R.M., Anderson, B.J., Johnson, C.L., (2013) JGR, Space Phys., 118, 2213–2227

A globális légköri elektromos áramkör egyenáramú és váltóáramú komponenseinek kvázi-azonnali változásai a Hunga Tonga-Hunga Ha'apai vulkán 2022. január 15-i kitörésének hatására

Bór J. ¹, Bozóki T. ^{1,2}, Sátori G. ¹, Buzás A. ^{1,3,4}, Steinbach P. ^{4,5}, Szabóné André K. ¹, E. R. Williams ⁶, S. A. Behnke ⁷, M. J. Rycroft ⁸, H. G. Silva ⁹, M. Kubicki ¹⁰, R. Said ¹¹, C. Vagasky ¹¹, M. Atkinson ¹²

¹ Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI), Sopron

² Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szegedi Tudományegyetem, Szeged

³ Földtudományi doktori Iskola, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

⁴ ELKH-ELTE Űrkutató kutatócsoport, Budapest

⁵ Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

⁶ Parsons Laboratory of the Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA

⁷ Space and Remote Sensing, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA

⁸ CAESAR Consultancy, Cambridge, UK

⁹ Department of Physics, University of Évora, Portugal

¹⁰ Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

¹¹ Vaisala, Louisville, CO, USA

¹² HeartMath Institute, Boulder Creek, CA, USA

A globális légköri elektromos áramkör (GLEK) az elektromosan jó vezető földfelszín és az alsó ionoszféra által határolt térrészben zajló nagyskálájú, elektromos vonatkozású folyamatok rendszere. A GLEK egyenáramú (DC) részét a földfelszín és a felső kiegyenlítő réteg közötti elektromos feszültség és az ehhez kapcsolódó nagyskálájú áramok képezik. A DC komponens a felszín közelében mérhető vertikális elektromos tér erősségével jellemeztük. A váltóáramú (AC) komponens a Föld-ionoszféra hullámvezetőben terjedő elektromágneses hullámok alkotják. Jellemzésére a globális villámaktivitást legjobban tükröző Schumann-rezonanciák (SR) intenzitását használtuk. A Hunga Tonga-Hunga Ha'apai vulkán 2022. január 15-i kitörésének felhője extrém elektromos aktivitást mutatott. A GLD360 és a WWLLN globális villámészlelő-hálózatok adatai alapján a kitörés csúcsidejében a vulkáni felhő villámaktivitása összemérhető volt bolygónk teljes zivatarvevényességével. Eredményeink szerint a GLEK AC és DC komponensében is lényegében azonnal megmutatkozó, globális anomália alakult ki. A Nagycenki Geofizikai Obszervatórium és a HeartMath Intézet alacsonyfrekvenciás mérőállomásainak az adataiban a SR egyértelmű, egyidejű felerősödése látható a kitörés idején. A DC GLEK válasza ugyanakkor kevésbé egyértelmű. Európai és amerikai állomások vertikális elektromos térerősségméréseinek az együttes elemzése arra utal, hogy a földfelszín közelében az elektromos tér bolygószerűen, kb. 15%-kal megnőtt olyan időszakokat követően, amikor a vulkáni felhőben szinte kizárólag negatív polaritású villámkisülések fordultak elő.

Bevezetés

A Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HT-HH) víz alatti vulkán (Hunga vulkán; 20°32' D, 175°22' Ny) egy 2015 óta tartó viszonylag nyugodt periódus után éledt fel 2021 decemberében. Előzetes, viszonylag kisebb kitörések után a szeizmikus adatok szerint 2022. január 15-én, világidőben (UTC) 4 óra 16 perckor egy erős robbanás formájában extrém kitörés vette kezde-

tét [1]. A földfelszíni észlelőhálózatoknak és az űreszközöknek köszönhetően egyértelműen állíthatjuk, hogy ez a vulkánkitörés több vonatkozásban is példa nélküli volt a modern mérési eszközökkel megfigyelt vulkánkitörések tekintetében. A kitörés fő fázisában (kb. 4:16–6:00 UTC) bekövetkező robbanások egy több mint 600 km átmérőjű kitörési felhő kialakulásához vezettek, amelynek a legmagasabb pontja mélyen a sztratoszférába hatolt 50–55 km-es rekordmagasságig [2]. A robbanáskor keletkező Lamb-hullámok többek között ionoszférikus zavarokat (traveling ionospheric disturbances, TID) is okoztak, amelyek többször megkerülték a Földet és még 100 órával a kitörés után is észlelhetők voltak [3,4]. A kitörés által keltett szökőár [5] és a kialakuló atmoszférikus akusztikus rezonancia hatása [6] tetten érhető volt a geomágneses tér változásaiban is.

A kitörési felhő elektromos aktivitása és az ehhez kapcsolódó elektromágneses (EM) anomáliák meghaladtak minden eddig tanulmányozott vulkáni tevékenységnél tapasztaltat. A kitöréshez köthető zavarokat mutattak ki a geomágneses tér 2–5 Hz-es frekvenciatartományában [7]. Ezeket a szerzők a felső magnetoszonikus hullámvezető villámaktivitás általi gerjesztésének tulajdonítják. Az elemzések szerint a vulkáni felhő elektromos terének a geomágneses ellentétes (konjugált) pontba való átvetülése állhat a kitörés következményeként létrejött egyenlítői plazmabuborék kialakulásának a hátterében [8].

Munkánkban arra fókuszáltunk, hogy hogyan jelenik meg a kitörési felhő elektromos aktivitásának azonnali hatása a globális légköri elektromos áramkör (GLEK; a szakirodalomban 'global electric circuit', GEC) [9] néhány közvetlenül mérhető paraméterében. A GLEK áramforrásai a légkörben zajló természetes töltésszétválasztó folyamatok, amelyek túlnyomó részben zivatarfelhőkben és elektromos töltést hordozó esőfelhőkben (electrified shower clouds) mennek végbe. Ezeken az ún. 'generátor területeken' negatív többlettöltés kerül a földfelszínre, míg a felső kiegyenlítő rétegbe pozitív töltések jutnak. Az alsó ionoszféra potenciálja a felszínhez képest így kb. +250 kV lesz. Ez a potenciálkülönbség az ún. 'szép idő' (fair weather) területeken gyenge vertikális áramot indukál. Ez a dinamikus egyensúlyban lévő rendszer alkotja a GLEK egyenáramú ('direct current', DC) komponensét. Az ionoszférikus potenciálhoz tartozó vertikális elektromos térerősség (illetve ellentettje, az elektromos potenciálgradiens, PG) a magassággal csökken, de a földfelszín közelében jól mérhető és a DC GLEK egyik informatív paramétere.

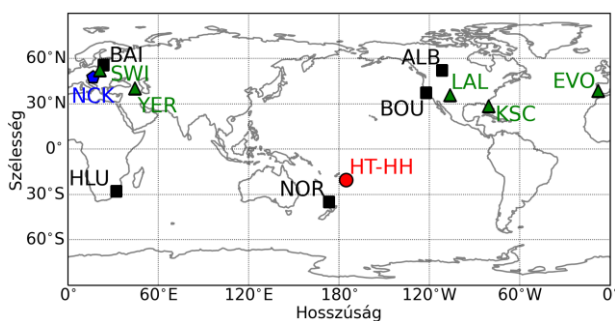
A földfelszín és az alsó ionoszféra közötti térség az alacsonyfrekvenciás EM hullámok tekintetében hullámvezetőként viselkedik (Föld-ionoszféra hullámvezető, FIH). A FIH és a benne terjedő EM hullámok tekinthetők a GLEK váltóáramú ('alternating current', AC) komponensének [9]. A FIH jó közelítéssel tekinthető gömbhéjnak, amelynek EM sajátrezgései vannak. Az első (alsó) néhány sajátrezgéshez tartozó rezonanciacsúcs (kb. 7.8 Hz, 14.0 Hz, 20.1 Hz stb.) jól mérhető az extrém alacsonyfrekvenciás ('extremely low frequency', ELF, 3–3000 Hz) EM háttérzaj spektrumában. Ezek az ún. Schumann-rezonanciák (SR) [10], amelyek aktuális csúcsfrekvenciái és intenzitásai a globális villámaktivításra jellemzők.

Amíg a HT-HH vulkánkitörés AC GLEK komponensben megjelenő hatását (elsősorban a WWLLN (World Wide Lightning Location Network) villámészlelései alapján) számos tanulmány tárgyalja [7,11,12,13,14,15], a GLEK DC komponensére vonatkozóan, PG mérésekre alapulón tudomásunk szerint az itt bemutatott eredmények az elsők. Munkánkban a SR intenzitásában a kitöréshez kapcsolható anomália megjelenését is demonstráljuk a többi publikációban nem szereplő állomások adatsorain. Lényegesebb azonban, hogy mind a feldolgozott PG mérésekben, mind a SR frekvenciasávban (itt 5–40 Hz) az intenzitás változásának tekintetében elsősorban a GLD360 (Global Lightning Detection Network) globális villámészlelő hálózat adatait használtuk a tapasztalatok értelmezéséhez. Ebben a közleményben összefoglaljuk és a témában időközben megjelent publikációk figyelembevételével kommentáljuk a vizsgált kérdéskörben elért eredményeinket, amelyeket részletesebben korábban angol nyelven közöltünk [16].

Felhasznált adatok és módszerek

A globális zivataraktivitást és a HT-HH kitörési felhőjében kialakult villámok időpontját, helyét és más tulajdonságait globális villámészlelő hálózatok szolgáltatták. A GLD360 hálózat [17] megadja az észlelt kisülések polaritását és a kisülési áram csúcsertékét is. A World Wide Lightning Location Network (WWLLN) [18] ezeket a paramétereket nem szolgáltatja, ellenben a kisülés energiáját becsli. A tapasztalatok szerint a GLD360 hálózat közel egy nagyságrenddel több villámot észlelt, mint a WWLLN [16]. Habár néhány részletben voltak eltérések, a villámaktivitás változását a két hálózat lényegében hasonlóan képezte le. Emiatt a következőkben a GLD360 hálózat adataira hivatkozunk.

A SR alsó néhány módusát lefedő 5–40 Hz-es frekvenciasávban a FIH-ben jelen levő EM energiát ELF mérőállomások adataiból határoztuk meg. A vizsgálatba a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban működő SR állomás elektromos méréseit [19,20,21], valamint a HeartMath intézet (<https://www.heartmath.org/gci/>) 5 ELF állomásának mágneses méréseit vettük be. Utóbbiak a Földön négy különböző kontinensen helyezkednek el (1. ábra).



1. ábra. A vizsgálathoz tartozó helyszínek. A HT-HH vulkán (korong), a Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium (ötszög), a HeartMath intézet ELF mérőállomásai (négyszögek: Alberta, ALB; Boulder Creek, BOU; Baisogala, BAI; Hluhluwe, HLU; Northland, NOR), valamint a PG mérőállomások (háromszögek: Evora, EVO; Swider, SWI; Yerevan, YER; Los Alamos National Laboratory, LAL; Kennedy Space Center, KSC).

ramétereinek a statisztikáit. A villámszámokat összegeztük, a PG értékeket átlagoltuk. Az ELF adatok spektrális energiasűrűségének ('power spectral density', PSD) változását kiemelten az 5–40 Hz-es tartományban vizsgáltuk, és az ELF adatokból a spektrogramokat is 1 perces felbontásban számoltuk.

A PG idősorok az egyébként szépidős helyi körülmények ellenére is jelentős változékonyságot mutatnak elsősorban a levegő helyi vezetőképességének különbségéből és változékonyságából adódóan [22,23]. A minden állomáson megjelenő, globális változások kiemelése céljából egy, a PG adatok szokásos, korreláció alapú kezeléséhez képest új előfeldolgozási módszert alkalmaztunk. Minden PG idősort a 4:15–6:20 UTC időszakban felvett átlagértékére normáltunk, majd a normált idősorok átlagát képeztük. Az átlagolás során a különböző állomásokon a helyi, nem azonos fázisban megjelenő zavarok kioltják egymást, miközben a koherens változások az átlagban is megmaradnak. A normáláshoz kiválasztott időszakban volt a legintenzívebb a kitörési felhő villámaktivitása (2a. ábra).

A villámkisülések elektromos áramának átlagos erősségét az áramerősség csúcscértéke alapján becsültük a kisülési áram átlagos változásának menetét figyelembe véve [24].

A GEC DC komponensét jellemző PG adatokat is bolygónk több pontján található állomások szolgáltatták, köztük a Széchenyi István Geofizikai Observatórium is (1. ábra). Ellenőriztük, hogy ezeken az állomásokon a kitörés vizsgált időszakában legalább nagyjából szép idő volt, így a mért adatok a GEC globális állapotát elvileg jobban tükrözik [22]. Az állomások tulajdonságait és a különböző helyi körülményeket illetve műszerezettséget részletesen a megjelöltetett közleményünkben tárgyaljuk [16].

Az időbeli változások követéséhez 1 perces felbontásban állítottuk elő a villámok pa-

Eredmények

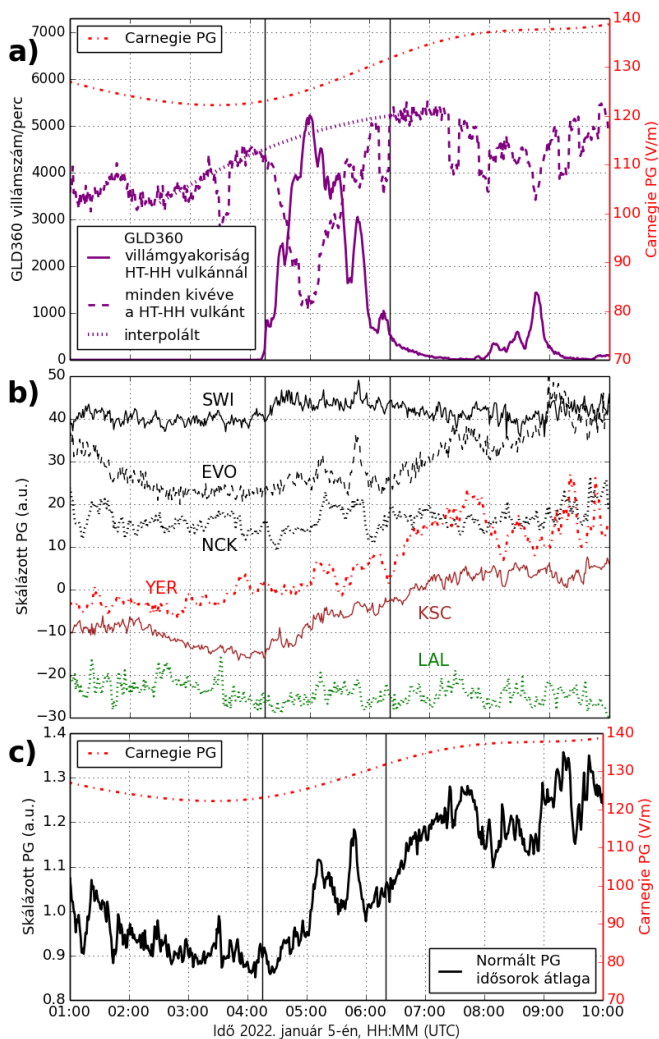
A villámgyakoriság a vulkáni felhőben a kitörés elektromos aktivitásának a csúcsideszakában (4:10 UTC és 6:20 UTC között) összemérhető volt a villámgyakorisággal a Föld összes többi részén együttvéve (2a. ábra).

A vizsgált 5–40 Hz-es frekvenciatarományban a SR intenzitás közvetlenül követte a villámgyakoriság változását. A GLEK AC komponense minden mérőállomáson azonnali és koherens választ adott a vulkáni villámaktivitás extrém értékeire (3. ábra). A kisebb villámaktivitás (8 UTC után) leginkább a vulkán közelében (NOR állomáson), valamint a Föld átelles pontjához közel az elektromos térkomponensben (NCK állomáson) jelent meg nyilvánvalóbban.

A normált PG idősorok átlaga a vizsgált időszakban általában jól követi az ún. Carnegie-görbét (2c. ábra), amely a GEC DC elektromos tér átlagos napi változására nézve egy széles körben elfogadott referencia [25]. Látható azonban két nyilvánvaló kiugrás, amelyek következtetésen, kb. 7–8 perces késéssel követnek olyan időszakokat, amikor a vulkáni felhőben szinte kizárólag negatív polaritású villámkisülések fordultak elő (4a. ábra). A negatív polaritású villámlás során negatív töltések mozdulnak el a Föld felé. A kitörési felhőben a villámok becsült elektromos áramának változását a 4b. ábra mutatja. Látható, hogy a dominánsan negatív polaritású villámlás időszakában a villámok összaráma is kiemelkedő értékeket mutat.

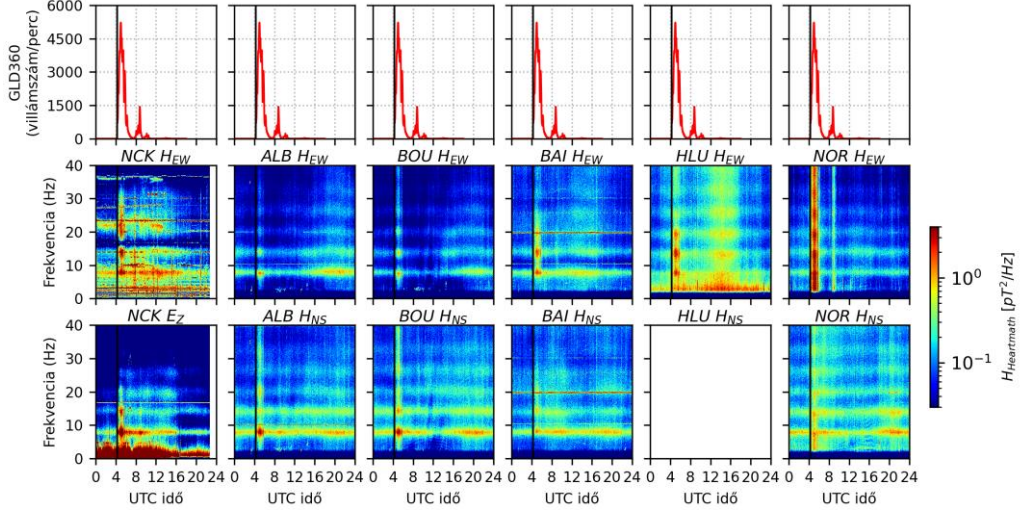
Értelmezés és következtetések

A 4:10 UTC és 6:20 UTC közötti időszakban az észlelt globális villámgyakoriság látszólagos csökkenése (2a. ábra) csak a hálózat nyilvánvaló túlterhelése miatt jelent meg [14,16], ezért itt a globális villámgyakoriságot interpolálással becsültük. Ebből fakadóan valószínűsíthető, hogy a hálózat által jelentett vulkáni villámok száma a valódi villámszámot alulbecsli. Megjegyezzük, hogy a vulkáni villámok GLD360 által jelentett gyakorisága (83/másodperc) [16] alig marad el a SR adatokból becsült értéktől (90/másodperc) [11]. A



2. ábra. a) Villámgyakoriságok a GLD360 hálózat adatai alapján; b) PG idősorok; c) a normált és átlagolt PG idősor.

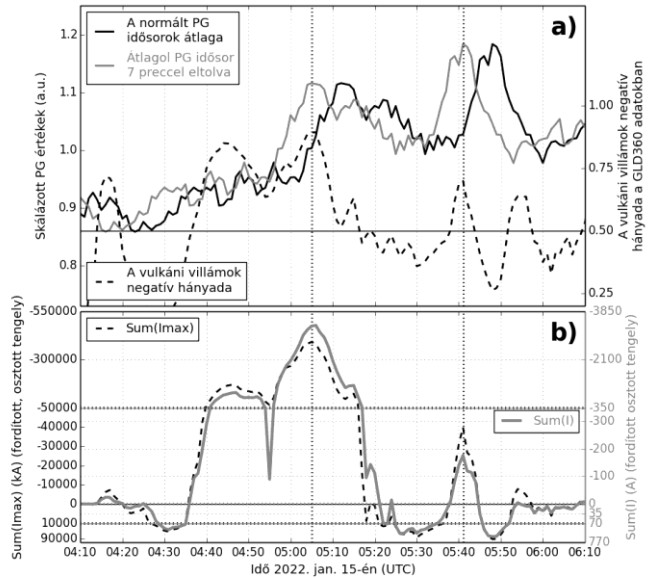
villámgyakoriság változásának részletei és a villámok térbeli elrendeződésének illetve csúcsáram erősség eloszlásának a tárgyalása túlmutat ennek az összefoglalónak a keretein, azonban megjegyezzük, hogy ezeknek a tulajdonságoknak a változásai tükrözik a kitörés dinamikáját és felhasználhatók a főbb robbanások hatásának és a vulkáni felhő fejlődésének az értelmezésében [16].



3. ábra. Villámgyakoriság időbeni változása a HT-HH vulkáni felhőben 2022. január 15-én (felső panelsor) és az ELF állomások adataiból előállított spektrogramok az elektromos (E_z) és a horizontális mágneses térkomponensekben (H_{NS}, H_{EW}).

A SR spektrogramokban a 8–9 UTC közötti kisebb intenzitásnövekedés viszonylag intenzív megjelenése az elektromos térkomponensben az antipodális helyhez közeli NCK állomáson (3. ábra) azt erősíti meg, hogy a SR fő gerjesztő forrása a vulkáni villámok sokasága volt a kitörés fő fázisában. Ez a FIH pontszerű gerjesztésének felel meg, ami természetes körülmények között a gyakorlatban elvétve, ha előfordul, miközben a SR modellek ezen az absztrakción alapulnak [26,27]. Ez az esemény tehát lehetőséget biztosít a SR modellek érvényességének kísérleti ellenőrzésére [12].

A PG mérések normált és átlagolt idősorában a két kiemelkedő csúcs (2c. ábra) a Föld-ionoszféra rendszerben az elektromos tér átmeneti, de globális megnövekedésére utal a kitörés fő fázisában. Hipotézisünk szerint e növekmények a Föld extra elektromos feltöltésének



4. ábra. a) az átlagolt PG idősor és a negatív vulkáni villámok hányadának az összehasonlítása; **b)** a vulkáni villámok összehasonlított csúcsáram értéke (I_{max}) és becsült elektromos árama (I) összesítve.

átmeneti, de globális megnövekedésére utal a kitörés fő fázisában. Hipotézisünk szerint e növekmények a Föld extra elektromos feltöltésének

a következményei, amelyet elsősorban a vulkáni felhőből a Föld felszínére jutó nagy mennyiségű negatív töltés okozhatott. Sajnos nincs megbízható információnk a vulkáni villámok típusáról, így nem becsülhető meg, hogy pl. a lecsapó villámok mennyi töltést szállítottak közvetlenül a felszínre a negatív polaritású villámaktivitás időszakaiban. Annyi bizonyos, hogy a villámok árama jóval meghaladta a -64 A és -66 A értékeket, amelyekre a tapasztalt hatás eléréséhez szükség volt (4b. ábra). Figyelembe véve az intenzív zivatarok dinamikájából és más vulkánkitörésekből származó tapasztalatokat [9,16], a DC GEC vulkáni villámok általi gerjesztése a HT-HH vulkán kitörésének az esetében egy realizisztikus lehetőség.

A PG növekmények 7–8 perces következetes időeltolódása a negatív villámepizódokhoz képest a GLEK korábban meghatározott időállandójával jó egyezést mutat [16]. Az időállandó a DC GLEK dinamikáját jellemzi megadván a DC tér csökkenésének az ütemét abban a hipotetikus esetben, ha a rendszer elektromos töltése hirtelen teljesen megszűnne. Esetünkben ennek fordítottjáról, azaz a rendszer feltöltéséről van szó, ezért a tapasztalt időeltolódás azoknak a töltésszállító folyamatoknak is tulajdonítható lehet, amelyek a villámlástól függetlenül, de a negatív villámepizódok miatti töltéssúlypont-áthelyeződés következtében erősödtek meg. Ilyenek lehetnek pl. az elektromosan töltött vulkáni hamu kihullása vagy a vulkáni felhő és a felszín közötti megerősödő elektromos térben folyó megerősödött vertikális konvekciós áramok [16,28].

Összefoglalásul elmondhatjuk, hogy a HT-HH vulkán kitörési felhőjének 2022. január 15-én példátlan elektromos aktivitása volt. A vulkáni villámok elhelyezkedése és tulajdonságaik változása segít a kitörési felhő fejlődésének az értelmezésében. A felhő a kitörés fő szakaszában bolygónk légköri elektromosságának egyértelműen domináns forrásává lépett elő. Mind a villámkisülések EM hullámai, mind a felhő töltései a GLEK AC és DC komponensében is kvázi azonnali, globálisan kimutatható változást okoztak. A helyi mérési körülményekre érzékenyebb PG-hez képest a SR-ban tapasztalt határozott válasz jelzi a SR használatának előnyét a villámaktivitás globális léptékű változásainak a vizsgálatában. Ugyanakkor a PG idősorok normált átlagának ebben a munkában bevezetett használata [16] hatékonyabb eszközzé teheti a PG méréseket a DC GLEK globális változásainak a vizsgálatában is.

Köszönetnyilvánítás

A munkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta (OTKA projekt K138824).

Irodalom

- [1] Poli, P., Shapiro, N.M. (2022), Geophysical Research Letters, 49(8), e2022GL098123. <https://doi.org/10.1029/2022GL098123>
- [2] Carr, J. L., Horváth, Á., Wu, D. L. et al. (2022), Geophysical Research Letters, 49(9), e2022GL098131. <https://doi.org/10.1029/2022GL098131>
- [3] Verhulst, T.G.W., Altadill, D., Barta, V. et al. (2022), J. Space Weather Space Clim. 12, 35. <https://doi.org/10.1051/swsc/2022032>
- [4] Zhang, S.-R., Vierinen, J., Aa, E. et al. (2022), Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 9. <https://doi.org/10.3389/fspas.2022.871275>
- [5] Schnepf, N. R., Minami, T., Toh, H. et al. (2022), Geophysical Research Letters, 49, e2022GL098454. <https://doi.org/10.1029/2022GL098454>
- [6] Yamazaki, Y., Soares, G., Matzka, J. (2022), Journal of Geophysical Research: Space Physics, 127, e2022JA030540. <https://doi.org/10.1029/2022JA030540>
- [7] Martinez-Bedenko V. A., Pilipenko V. A., Shiokawa K. et al. (2023), Solar-Terrestrial Physics. (1), 47-55. <https://doi.org/10.12737/stp-91202306>

- [8] Shinbori, A., Sori, T., Otsuka, Y. et al. (2023), Sci. Rep. 13, 645. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33603-3>
- [9] Rycroft, M. J., Nicoll, K. A., Aplin, K. L. et al. (2012), Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 90–91, 198– 211. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.03.015>
- [10] Price, C. (2016), Atmosphere, 7(9), 116. <https://doi.org/10.3390/atmos7090116>
- [11] Nickolaenko, A. P., Schekotov, A. Y., Hayakawa, M. et al. (2022), Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 237, 105897. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2022.105897>
- [12] Nickolaenko A.P., Shvets A.V., Galuk Yu.P., et al. (2023) Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 247, 106078, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106078>
- [13] D’Arcangelo, S., Bonforte, A., De Santis, A. et al. (2022), Remote Sensing, 14(15), 3649. <https://doi.org/10.3390/rs14153649>
- [14] Mezentsev, A., Nickolaenko, A. P., Shvets, A. V. et al. (2023), Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128, e2022JD037841. <https://doi.org/10.1029/2022JD037841>
- [15] Gorbunova, E.M., Ryakhovskiy, I.A., Gavrilov, B.G. et al. (2022) Izv. Atmos. Ocean. Phys. 58, 1350–1366. <https://doi.org/10.1134/S0001433822110044>
- [16] Bór, J., Bozóki, T., Sántori, G. et al. (2023), Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 128, e2022JD038238. <https://doi.org/10.1029/2022JD038238>
- [17] Said, R. K., Inan, U. S., Cummins, K. L. (2010), Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D23), D23108. <https://doi.org/10.1029/2010JD013863>
- [18] Rodger, C. J., Werner, S., Brundell, J. B. et al. (2006), Annales Geophysicae, 24(12), 3197– 3214. <https://doi.org/10.5194/angeo-24-3197-2006>
- [19] Bór, J., Sántori, G., Barta, V. et al. (2020), History of Geo- and Space Sciences, 11(1), 53– 70. <https://doi.org/10.5194/hgss-11-53-2020>
- [20] Sántori, G., Szendrői, J., Verő, J. (1996), Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 58(13), 1475– 1481. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(95\)00145-X](https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00145-X)
- [21] Sántori, G., Rycroft, M., Bencze, P. et al. (2013), Surveys in Geophysics, 34(3), 255– 292. <https://doi.org/10.1007/s10712-013-9222-6>
- [22] Nicoll, K. A. (2012), Surveys in Geophysics, 33(5), 991–1057. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9188-9>
- [23] Conceição, R., Silva, H. G., Bennett, A. et al. (2018), Boundary-Layer Meteorology, 166(1), 69– 81. <https://doi.org/10.1007/s10546-017-0298-2>
- [24] Schoene, J., Uman, M. A., Rakov, V. A. (2010), Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 115(D12), D12107. <https://doi.org/10.1029/2009JD013066>
- [25] Harrison, R. G. (2013). Surveys in Geophysics, 34(2), 209–232. <https://doi.org/10.1007/s10712-012-9210-2>
- [26] Prácser E., Bozóki T. (2021), Magyar Geofizika, 62 : 2 pp. 95-104. , 10 p.
- [27] Prácser E., Bozóki T., Sántori G. et al. (2021), IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 69, no. 7, pp. 4093-4099, <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3044669>
- [28] Vonnegut, B., (1963), in Severe local storms, Meteorological Monographs, szerk. Atlas, D., Booker, D. R., Byers, H. et al., pp. 224– 241, American Meteorological Society. https://doi.org/10.1007/978-1-940033-56-3_11

Flerek vizsgálata új generációs ionoszonda adatok alapján három különböző módszer segítségével

A. Buzás^{1,2,3*}, D. Kouba⁴, J. Mielich⁵, D. Burešová⁴, Z. Mošna⁴, P.
Koucká Knížová⁴, V. Barta¹

¹ ELKH Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI), Sopron

² Földtudományi Doktori Iskola, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

³ ELKH-ELTE Űrkutató Kutatócsoport

⁴ Légekörfizikai Kutatóintézet, Cseh Tudományos Akadémia, Prága, Csehország

⁵ Leibniz Légekörfizikai Kutatóintézet, Németország

* buzas.attila@epss.hu

A napkitörések során a földközeli térséget elérő megnövekedett elektromágneses (EM) sugárzás (főként a röntgen és EUV tartományban) fokozott ionizációt és az EM hullámok megnövekedett abszorpcióját okozhatja az ionoszférában. Jelen tanulmányban a napkitörések során kialakuló flerek ionoszférára gyakorolt hatását Juliusruh (54,63°É, 13,37°K), Příhonice (49,98°É, 14,55°K) és San Vito (40,6°É, 17,8°K) állomások ionoszonda adatainak felhasználásával vizsgáltuk három különböző módszer segítségével. 13 intenzív (>C4,8 osztályú) fler hatását elemeztük, amelyek 06:00 és 16:30 óra között (UT, LT=UT+1 h) következtek be 2017. szeptember 04–10. között. Először az EM hullámok mért amplitúdó adatain alapuló új módszerrel számítottuk ki és vizsgáltuk a flerek során fellépő relatív (a csendes időszakhoz képesti) abszorpciós változásokat. Az amplitúdó adatokat összehasonlítottuk az ún. f_{min} paraméter változásával (f_{min} , a minimális mért frekvencia az adott ionogrammon). Továbbá az ionoszonák által mért jel-zaj viszonyt (SNR) is felhasználtuk a részleges és totális elnyelődési események és az ionoszférikus abszorpció számszerűsítésére és jellemzésére. Teljes és részleges elnyelődést, az f_{min} paraméter megnövekedett értékeit (+0,4–318%) és +20–1430%-os amplitúdóváltozásokat (2,5 és 4 MHz-en mérve) tapasztaltunk a vizsgált fler események alatt és után. Általában a megfigyelt változások a flerek intenzitásától, zenitszögétől és időtartamától függtek. Bár a három különböző módszernek megvannak a maga előnyei és hátrányai, valamint saját korlátaik, ezek kombinációja azonban hatékony megközelítésnek tűnik a flerek okozta ionoszférikus változások nyomon követésére.

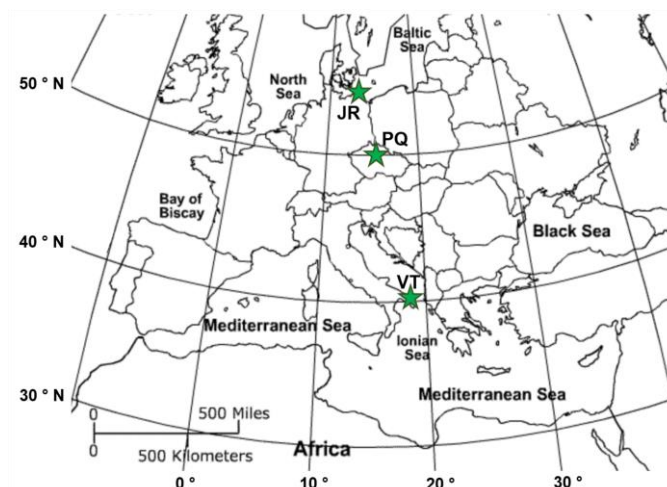
Bevezetés

Az ionoszféra a felsőlégkörnek a Napból érkező elektromágneses (EM) sugárzás (főként a röntgen és az EUV tartományokban) által részlegesen ionizált tartománya, amelyet hagyományosan D- (kb. 60–90 km), E- (kb. 90–150 km), és F-rétegre (kb. 150 km felett), osztanak fel [1][2]. Az ionoszférában található plazma közeg hatással van az EM hullámok terjedésére, ezzel befolyásolva a rádiós és műholdas kommunikációt. A közeg csillapítása a rádiókommunikációban kitüntetett szerepet játszó rövidhullámú sávban (HF, 3–30 MHz) a legjelentősebb [3]. A napkitörésekhez kapcsolódó ún. flerek tranziens jelenségek, amelyek rövid idő alatt (~30 perctől néhány óráig) óriási mennyiségű EM energiát sugároznak ki, amely adott esetben az ionoszférát is elérheti [4]. A flereket a kibocsátott röntgen fluxusuk alapján három fő kategóriába sorolják: X-osztályba ($>10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$), M-osztályba ($10^{-5}–10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$) és C-osztályba ($10^{-6}–10^{-5} \text{ Wm}^{-2}$). A flerek által kibocsátott EM sugárzás az ionoszférában a rádióhullámok megnövekedett abszorpciójához vezet, ami akár több tíz percig vagy órákig tartó teljes elnyelődést jelenthet az adott frekvenciasávban [1][4][5][6]. Mivel az utóbb említett megnövekedett elnyelődés fennakadásokat okozhat a rádiókommunikációban, ezért az ionoszférikus abszorpció vizsgálata és modellezése kiemelt fontosságú.

Az ionoszféra rutinszerű monitorozására az egyik leggyakrabban használt műszer az ún. ionoszonda, amely különböző frekvenciákon (tipikusan 1,5–12 MHz között) bocsát ki EM impulzusokat és veszi az ionoszféra különböző rétegeiről visszavert bejövő jeleket. A kibocsátott jel frekvenciáját növelve az ionoszféra egyre magasabb rétegeiről kapunk ezáltal információt [7].

Adatok és módszerek

Jelen tanulmányunkban egy globális ionoszonda mérőhálózat (GIRO, Global Ionospheric Radio Observatory) [7] három állomásának adatait használtuk fel: Juliusruh (JR, 54,63°É, 13,37°K), Průhonice (PQ, 49,98°É, 14,55°K) és San Vito (VT, 40,6°É, 17,8°K) (*1. ábra*). A vizsgálat során 13 db nagy (>C4,8 osztályú), 2017. szeptember 04. és 10. között bekövetkezett flert elemeztünk három különböző fizikai módszer segítségével.



1. ábra A tanulmányban felhasznált ionoszonda állomások földrajzi elhelyezkedése.

Az első felhasznált módszer a G. Sales által bevezetett ún. „amplitúdó módszer” volt [8]. A módszer lényege, hogy a Friis-féle távközlési egyenlet alapján [9] az adott ionoszféra rendszerre jellemző $P_t G_t G_r$ szorzat (tehát a kibocsátott jel amplitúdójának, az adó erősítésének és a vevő erősítésének szorzata) számszerűsíthető, ha azt feltételezzük, hogy az üridőjárási és geomágneses szempontból nyugodt időszakok éjszakai (18–03 UT) során a jelvesztés elhanyagolható (*1. képlet*). Ezután ezt a $P_t G_t G_r$ szorzatot kvázi-állandónak véve kiszámítható a flerek által okozott relatív (a nyugodt időszakbeli éjszakai adatokhoz képesti) abszorpció a bejövő jel amplitúdó értékei alapján. Jelen tanulmányban összesen 173 nyugodt napot (2017-ből és 2018-ból) használtunk fel a $P_t G_t G_r$ szorzat kiszámítására (ez az adott ionoszonda rendszer „kalibrációja”). Az abszorpció értékeket a 2,5 MHz±200 kHz, 3 MHz±200 kHz, 3,5 MHz±200 kHz, 4 MHz±200 kHz, 4,5 MHz±200 kHz, 5 MHz±200 kHz és 5,5 MHz±200 kHz frekvencia sávokban számoltuk ki [10].

$$10 \lg(L) = 10 \lg(P_t G_t G_r) + 20 \lg \frac{\lambda}{4\pi 2h} - 10 \lg(P_r) \quad (1)$$

ahol L a veszteségi tag (ami tartalmazza az abszorpciót is), P_t a kibocsátott jel amplitúdója, G_t az adó erősítése, G_r a vevő erősítése, λ a kibocsátott EM jel hullámhossza, h a visszaverődés magassága és P_r a bejövő jel amplitúdója.

A második felhasznált módszer az ún. *fmin* módszer volt. Az *fmin* paraméter az adott ionogrammon (a reflektált hullámok ábrázolása a magasság és a frekvencia függvényében) a legelső ionoszférikus reflexióhoz kapcsolódó legkisebb frekvencia. Az *fmin* paraméter a D-rétegben előforduló nondeviatív rádióhullám abszorpció kvalitatív mérőszámának tekinthető [1]. Tanulmányunkban a SAO Explorer nevű szoftver [11] automatikus skálázási algoritmusával meghatározott *fmin* értékeket használtuk fel a 173 nyugodt naphóból származtatott átlagos napi *fmin* variációhoz, míg manuálisan skálázott, ellenőrzött *fmin* értékeket használtunk a vizsgálati időszak során (2017. szeptember 04–10.).

Az utolsó, harmadik alkalmazott módszer a jel-zaj arány táblázatok módszere, röviden az SNR (Signal-to-Noise Ratio) módszer. Korábbi kutatások már megmutatták, hogy az adott frekvenciájú, adott magasságból visszaverődő, bejövő EM jel amplitúdójából és a zajsztintból származtatható jel-zaj arányban nagyfokú csökkenés megy végbe a flerek hatására, így ez a mennyiség is alkalmas az ionoszférikus abszorpció tanulmányozására [12].

A flerek okozta hatás számszerűsítésére az amplitúdó és az *fmin* módszerek esetében a százalékos maradékok módszerét használtuk, azaz a fleret követő maximális amplitúdó és *fmin* értékek és a fler csúcs időpontja ± 1 órás időablakban vett nyugodtnapi átlag százalékos eltérését vettük. Az SNR módszer esetében pedig a 10 dB-nél kisebb értékek arányát képeztük a fler csúcsidejét követő egy órás időablakban.

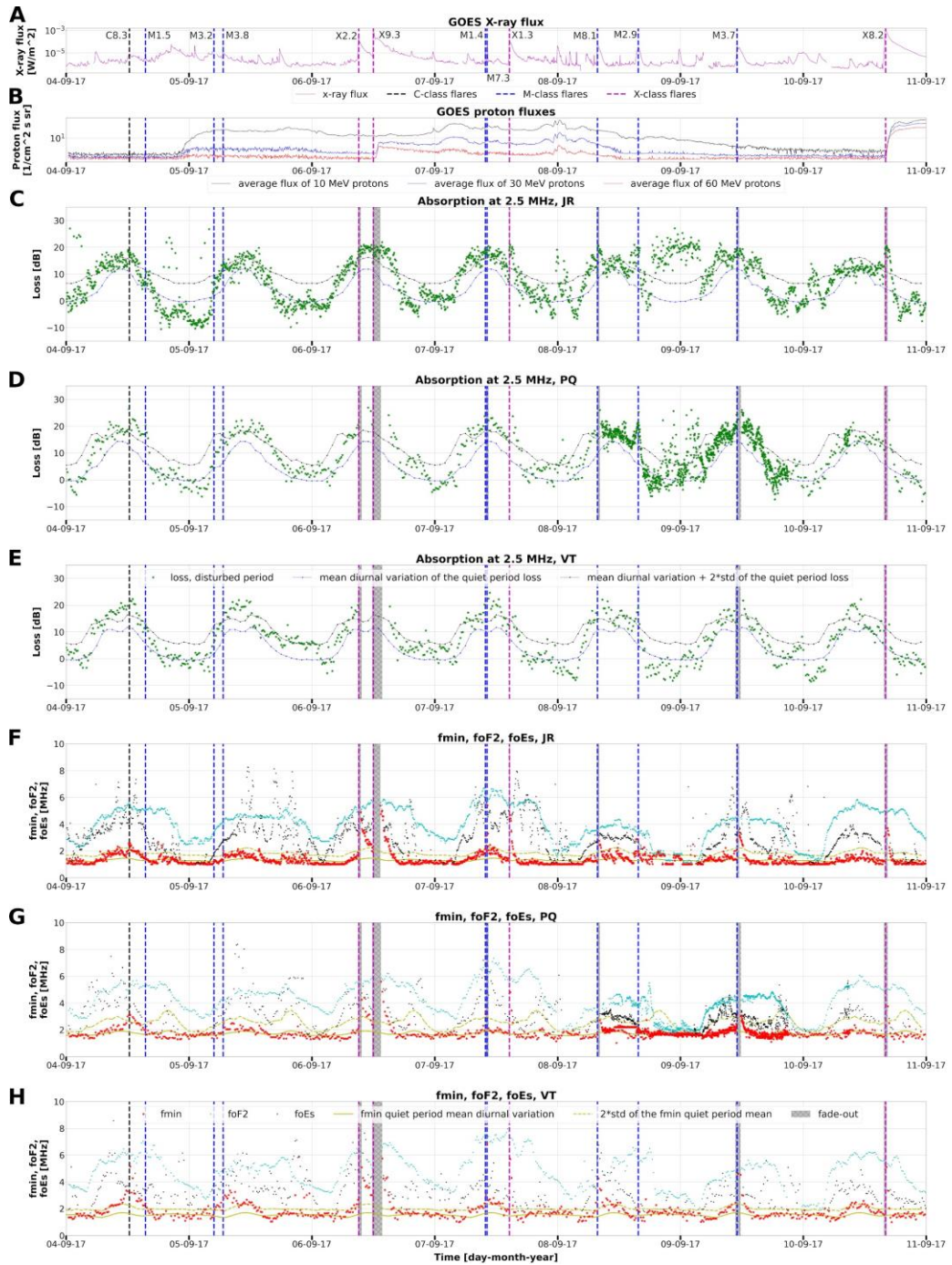
Eredmények és diszkusszió

A kiszámított elvesztés és *fmin* adatoknak a vizsgálati időszakban való időbeli variációját a 2. ábrán, míg az SNR értékeket (terjedelmi okokból) egy kiválasztott napon a 3. ábrán mutatjuk be (a többi eredmény megtalálható az alábbi tanulmányban: [10]).

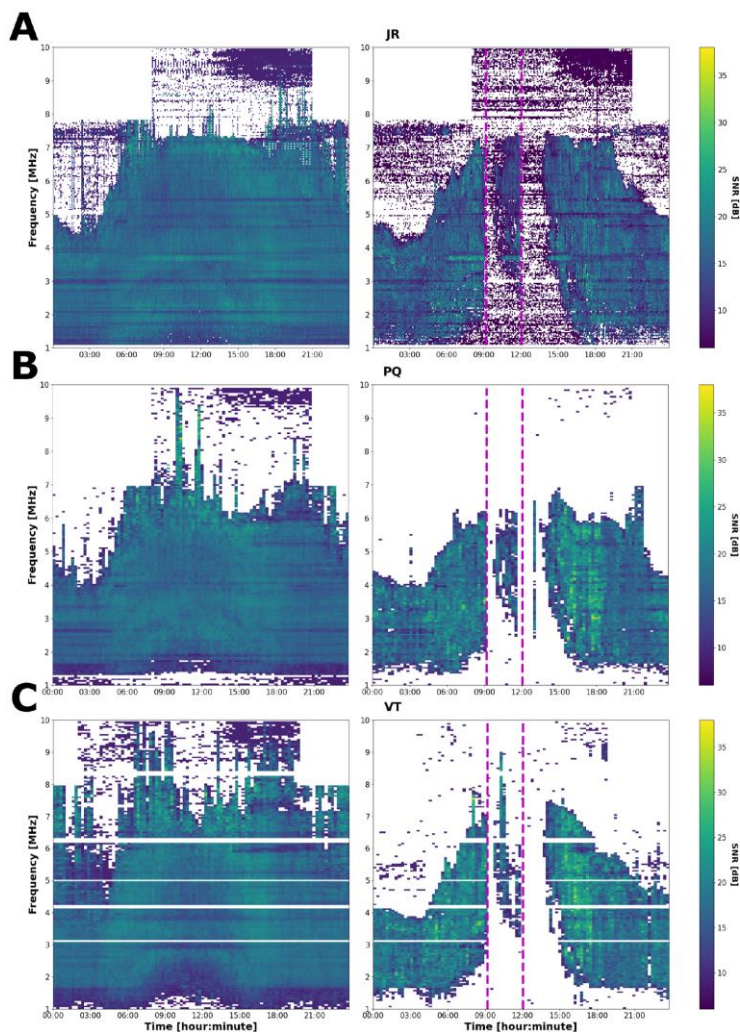
A 2. ábra (A) paneljén megfigyelhetők a GOES műhold által mért röntgen fluxusban bekövetkező változások, különös tekintettel az éles ugrásokkal jellemezhető flerekre (a flerek időbeli helyét vertikális szaggatott vonalak jelölik, osztályuk pedig mellőlük leolvasható). Az amplitúdó értékekből számított abszorpció adatokban (2. ábra C, D és E panel) jól kivehető a napi variáció mind a nyugodt (vonallal összekötött csillagok), mind a vizsgálati időszakból (csillagok) származtatott értékeken mindhárom állomás esetében. A napi menetekben a flerek által okozott kiugrás is jól megfigyelhető, néhol a nyugodtnapi variáció plusz kétszeres szórás értékeket is jócskán meghaladva (pl. 2D ábra szeptember 08. M2.9-es fler), de nem minden esetben egyértelmű a hatás. A néhány éjszaka tapasztalható megemelkedett értékek (pl. 2. ábra C panel, Juliusruh szeptember 08–09. éjszaka) magyarázata, hogy ilyenkor a vizsgálati frekvencián a csökkent ionizáció következtében nem kapunk fizikailag értelmezhető adatokat, hanem csupán kvázi zajt, ugyanis ekkor az adott frekvenciasávnak megfeleltethető magassági tartományban nincsen érdemi ionoszférikus reflexió.

Az *fmin* paraméterben jóval kevésbé határozott a napi menet (2. ábra F, G és H panelek), viszont itt a flerek által okozott hatás, azaz a megnövekedett *fmin* értékek, jóval egyértelműbben mutatkoznak meg az adatokon, a legtöbb esetben túllépve a nyugodtnapi variáció plusz kétszeres szórás határt.

A 3. ábrán megfigyelhető, hogy a nyugodtnapi variációhoz képest (bal oszlop) a vizsgálati időszakból kiválasztott és két erős, X-osztályú fler által jellemzett napon (jobb oszlop) a flerek által okozott abszorpció szignifikáns csökkenést okoz az SNR értékekben. Megfigyelhetők továbbá a teljes elnyelődés időszakai, valamint az ionoszféra flerek utáni visszaállása (először a magasabb frekvenciákon, majd azt követően az alacsonyabbakon is).



2. ábra A vizsgálati időszak áttekintő ábrája. A GOES műholdon mért röntgen-fluxus (A) és proton fluxus (B) variációja, valamint a három ionoszonda állomáson mért abszorpció adatok (2,5 MHz-en mérve) (C, D, E) és az f_{min} paraméter (F, G, H) időbeli változása. A szürkével satírozott részek a teljes elnyelődést mutatják. A vertikális szaggatott vonalak a flerek csúcsidejét jelölik.



3. ábra Az SNR értékek időbeli variációja egy nyugodt napon (2017.08.07., 16., 26. és 2017.09.16., 21. öt nap átlaga) a bal oldali oszlopban, míg egy a vizsgálati időszakból kiválasztott napon (2017.09.06.) a jobb oldali oszlopban látható. Az X2.2-es és X9.3-as flereket vertikális szaggatott vonalak jelzik.

Konklúziók

Tanulmányunk főbb megállapításai a következők:

1. Az amplitúdó módszer által kapott, flerek által okozott abszorpció növekedés +68% és +1430% között változott (a nyugodtnapi átlaghoz képest) a 2,5 MHz-es ($2,5 \text{ MHz} \pm 200 \text{ kHz}$) frekvenciasávban (ami főként a D-rétegben bekövetkező abszorpcióra jellemző), míg a 4 MHz-es vizsgálati frekvenciasávban ($4 \text{ MHz} \pm 200 \text{ kHz}$) +18% és +565% között. Ez alátámasztja azt a feltételezést, hogy a D-rétegben nagyobb változások történnek a flerek hatására. Az amplitúdó módszer fő korlátai, hogy nem alkalmazható megbízhatóan magasabb frekvenciákon ($>3,5 \text{ MHz}$) a hajnali és késő esti, éjszakai órákban, amikor az ionizáció mértéke minimális. Továbbá, hogy alacsony frekvenciákon (2,5–3,5 MHz) az intenzív flereket ($>M3$) követő időszakban a részleges és/vagy teljes elnyelődés következtében nincsen kiértékelhető amplitúdó adat.
2. Az f_{min} paraméterben bekövetkező növekmény +0,4% és +318% között változott,

amely értékek jó egyezést mutatnak a szakirodalomban található egyéb tanulmányok eredményeivel [6]. Az *fmin* módszer hátránya, hogy az *fmin* paraméter értéke függhet a háttér rádió zaj mértékétől és az ionoszonda rendszer technikai karakterisztikáitól, beállításaitól. Azonban előnye, hogy nem függ a napszaktól, mint az amplitúdó módszer.

3. Az SNR módszer alapján kapott változás a 10 dB-nél kisebb vagy hiányzó (teljes elnyelődés) értékekben pedig +1% és +100% (jelen számítási módszer esetén 100% a maximum) között volt. Az itt alkalmazott számítás esetén az SNR módszer hátránya, hogy a maximálisan detektálható változás 100%-os, ez azonban javítható például hosszabb időablak vételével (azaz a fler csúcsideje után 1 óránál hosszabb időszakban vizsgáljuk az SNR értékeket). A módszer előnye pedig, hogy nem függ a napszaktól, az ionizáció mértékétől és az adott ionoszféra rendszer technikai karakterisztikáitól és beállításaitól.

4. Megállapítható, hogy bár mindhárom vizsgálati módszernek megvan a maga előnye és hátránya, valamint saját korlátja, azonban a három módszer együttes alkalmazása megfelelő megközelítést jelenthet a flerek által az alsó ionoszférában okozott változások számszerűsítésére és tanulmányozására.

Irodalom

- [1] Rishbeth H. and Garriot, O. K. (1969), in: Introduction to Ionospheric Physics, Academic Press, New York.
- [2] Zolesi B. and Cander L. (2014), in: Ionospheric Prediction and Forecasting, Springer Geophysics, New York.
- [3] George P. L. and Bradley P. A. (1973), Proc. Inst. Electr. Eng., 120, 1355–1361.
- [4] Tsurutani B. T., Verkhoglyadova O. P., Mannucci A. J. et al. (2009), Radio Science, 44, 1–14.
- [5] Davies K. (1990), in: Ionospheric Radio, London Peregrinus.
- [6] Barta V., Natras R., Srećković V. et al. (2022), Front. Environ. Sci., 10:904335.
- [7] Reinisch B. W., Galkin I. A. (2011), Earth Planet Sp., 63, 377–381.
- [8] Sales G. S. (2011), HF absorption measurements using routine digisonde data. Conference material, XII. International Digisonde Forum, University of Massachusetts.
- [9] Friis H. T. (1946), Proc. IRE., pp. 254–256.
- [10] Buzas A., Kouba, D., Mielich, J. et al. (2023), Front. Astron. Space Sci., doi: 10.3389/fspas.2023.1201625 (preprint).
- [11] <https://ulcar.uml.edu/SAO-X/SAO-X.html> Link utoljára megtekintve: 2023.06.10.
- [12] de Paula V., Segarra A., Altadill D. et al. (2022), Remote Sens., 14, 1898.

Műholdmegfigyelési program Baján - 35 év után ismét

T. Hegedüs ^{1,2}, Zs. Kereszty ², I. Ledneczki ¹

¹ Szegedi Tudományegyetem Bajai Observatóriuma

² AstroTech KFT, Baja

1958-1988 között a Bajai Observatórium meghatározó tevékenysége volt a műholdak optikai megfigyelése. A tudományos célkitűzés a felsőléggör fizikai tulajdonságainak vizsgálata volt. 35 év elteltével az ESA és az EU űrbiztonsági kérdések miatt fontossá vált SST programjához csatlakozva indult újra a műholdkövetés az intézetben.

Bevezetés

Az űrkutatás tényleges űrbéli tevékenységben megnyilvánuló szakasza 1957-ben kezdődött a Szputnyik-1 pályára állításával. A szovjet vezetés kérésére világszerte (ezen belül is elsősorban a szocialista országok) vizuális észlelésekkel kísérték az első műhold keringési pályáját. Az eltervezett űrprogram további műholdjainak rendszeres követésére észlelőhálózatot szerveztek, amire a Bajai Observatórium akkori vezetője (Borbás Mihály) is jelentkezett. Kezdetben e célra a Szovjetunióból baráti támogatásként érkező egyszerű AT-1 távcsőre alapult a vonulások megfigyelése (a bajai észlelési napló első bejegyzése Ill Mártontól származik, és 1958. június 18-án történt, *1. ábra*). A későbbiekben először az időmérési-időzítési pontosságot igyekeztek javítani, majd hamarosan újabb szovjet megfigyelőeszközök (pl. a NAFA kamera) érkezésével fotografikus módszerekkel is bővült a fegyvertár. 1966-ra tudományos igényességű szintre sikerült hozni az észleléseket, és több más hasonló hazai állomással együtt nemzetközi hálózat formálódott az Interkosmosz program keretében. A megfigyelésekhez szükséges előrejelzések akkoriban korszerűnek mondható telex-kapcsolaton keresztül érkeztek a központból. A megfigyelt objektumok pályáinak pontosításán kívül a tudományos célkitűzés az akkor még eléggé ismeretlen semleges felsőléggör és ionoszféra fizikai tulajdonságainak vizsgálata volt a pályaelemek változásának elemzésével. A program fénykorát a bajai ötletként született, és mindvégig Bajáról koordinált INTEROBS projekt fémjelzi, és az akkori korszak technikai csúcát jelentő AFU75 kamerák képeinek pontos kiértékelésére alapult (*2. ábra*).



1. ábra
Ill Márton AT-1 távcsővel



2. ábra
Ikonikus bajai műholdészlelő műszerek: AFU75 és DVT

A műhold-megfigyeléses felsőlégkör-kutatásnak részben a 80-as években pályára állított francia műholdak in-situ mérései vetettek véget (nagyságrendekkel pontosabb, direkt sűrűségértékeket mértek a pályájuk mentén, valós időben, korábban elképzelhetetlen térbeli felbontásban), részben pedig a rendszerváltozást megelőző utolsó néhány évben gyorsan csökkenő Interkozmosz támogatás¹.

Űrkutatási tevékenység Baján 2009 után

A Bács-Kiskun Megyei Önkormányzat által újraindított bajai obszervatórium tudományos programja 1994-től tisztán klasszikus csillagászati megfigyelés volt (elsősorban fedési kettőscsillagok többszín-fotometriája, fénygörbéik és periódusváltozásaik analízise). A műszeres infrastruktúra fejlesztés is ezt szolgálta: előbb egy 50 cm-es $f/8,4$ RC távcsővel, fotomultiplier-alapú fotométerrel, BVRI sávokban folytak a mérések – később, 2005-ben (részben az intézet saját fejlesztéseként) kiegészült egy 50 cm-es $f/6$ módosított Cassegrain rendszerű, nagy látószögű robottávcsővel (BART-1). Ezzel akkoriban hazánk legnagyobb képalkotó felületű (4x4 cm) hűtött CCD kamerájával, szintén elsőként honosított új fotometriai rendszerben: az SDSS $g'r'i'z'$ sávjaiban készültek mérések. A fedési kettőscsillagok tanulmányozása ekkoriban már kikerült a nemzetközi szakma érdeklődésének frontvonalából. Azonban a Kepler Űrtávcső felbocsátásával (2009) rövid időn belül a helyzet megváltozott: a nagy mennyiségű, korábban elképzelhetetlen pontosságú fotometriai idősorokban talált furcsa, akkoriban megmagyarázhatatlan fénygörbéket bajai kutatók ezidőtájt kifejlesztett komplex programcsomagjával kiválóan értelmezni lehetett, és sorra születtek a magas idézettséget elérő cikkek. A többszörös fedésű, többes csillag-rendszerek tanulmányozása, dinamikai modellezésük a téma reneszánszát hozta el, és az űrtávcső adattömegének felhasználása tekinthető Baja űrkutatási aktivitása újraindulásának. Borkovits Tamás kollégánk e témából akadémiai doktori címet szerzett 2018-ban [1]. A program azóta is töretlenül folytatódik, jelenleg már ELKH kiemelten támogatott kutatóhelyi pályázat keretében, a TESS űrtávcső adattömegének elemzésével – egyre több fiatal kutató bevonásával, iskolateremtő módon.

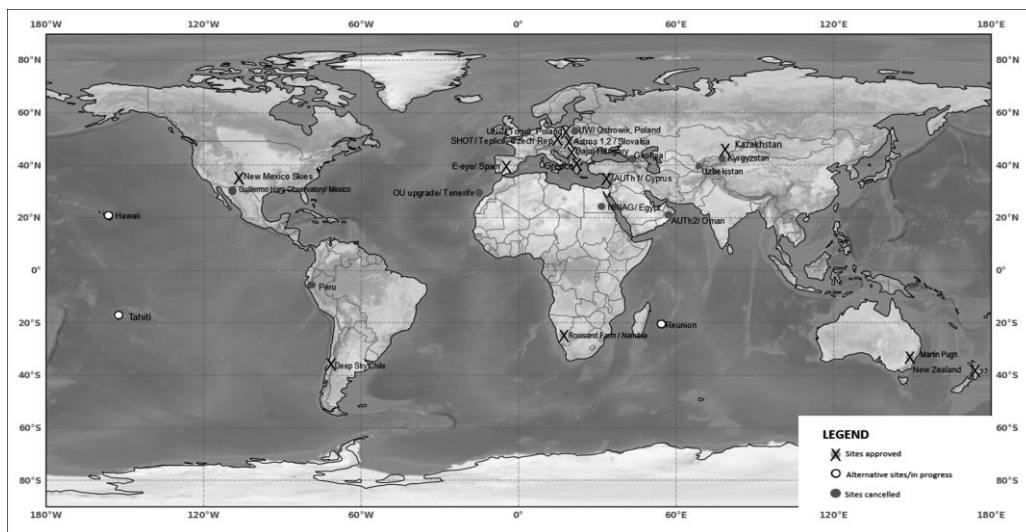
Egy másik, akkoriban még nem űrkutatási aktivitásként elkönyvelt munka is megindult kísérletileg 2010-ben: amatőrcsillagászok kezdeményezésével létesült hazai videometeor-észlelési hálózat több kameráját telepítettük a bajai intézetbe, és a többi hazai és környező országbeli hasonló állomások hálózatos adatfeldolgozásának egy adott szegmensén (a legfényesebb tűzgömbök pályájának kimérésén, fotometriáján, és az esetleges meteorithullások szórásmezejének lemodellezésén) kezdtünk dolgozni. Ez ma már a „planetary defense” űrtevékenységi témakörbe tartozik. Ez a kamerarendszer aktivitása csúcsát kb. 2015 körül érte el, és a kamerák és kapcsolódó elektronikájuk elavulása miatt kb. 2020-ig futott ki. A program, jelentős minőségi továbbfejlődéssel (új multi-kamerás észlelőberendezésekkel) 2022-től indult újra, erről a MŰF2023 konferenciára benyújtott poszteren számolunk be [2].

A harmadik, „interdiszciplináris” űraktivitásnak tekinthető terület a 2014-től kezdetben csak kísérleti próbálkozásként elindított, később rutinszerzési célú, végül pedig egyre rendszeresebben tudományos célokat is szolgáló magaslégköri ballon projektünk. A munka több felsőoktatási intézmény kutatói, és civil foglalkozású rádióamatőrök együttműködésében folyik azóta is – erről szintén a már idézett poszteren számoltunk be [2].

¹ Az Interkozmosz program 1967-1994 között létezett. A Szovjetunió 1991-es átalakulásával együtt járó gazdasági krízis jelentős megrázkódtatást jelentett a programban is, ezt legelőször a tagországok űrtevékenysége finanszírozásának drasztikus csökkenésén lehetett észrevenni. A bajai obszervatóriumot 1992. december 31-én be is kellett zárni a támogatás megszűnése miatt.

A bajai műhold-megfigyelési program újraindítása (2022)

Egy 2021 márciusi megkeresés nyomán indult el a lengyel Sybilla Technologies konzorcium-vezetésével az ESA-hoz benyújtott új nemzetközi optikai műhold-megfigyelő hálózati pályázathoz történő csatlakozásunk. A pályázat sikeres lett, az ESA szerződés szám 4000136665/21/D/MRP, a projekt rövid megnevezése: „EON” (European Optical Network). A műhold-megfigyelő hálózat ténylegesen megvalósult és működésbe lépett 13, és eredetileg tervezett de végül nem megvalósult 9 állomásának, valamint további három alternatív helyszínének elhelyezkedését ábrán mutatjuk be (3. ábra).



3. ábra

Az EON hálózat már üzemelő (szürke körben fekete X) állomásai a térképen – köztük a bajai

Az EON projekt keretében a (Panoptes-8, röviden PAN-8 jelölést kapott) bajai állomásra egy 28 cm szabad nyílású Rowe-Ackermann típusú asztrográf (Celestron, USA) került, amely egy altazimutális szerelésű L-350 típusú félvillás, két tengelyű direkt drive meghajtású mechanikára (PlaneWave, USA) került. Az optikai szenzor egy ASI QHY268M hűtött CMOS kamera, amely az asztrográf primer fókuszában foglal helyet. Az észlelő komplexumot a forgó villára szerelt vezérlődobozba épített kontroll számítógép vezérli. Az időszolgáltatást, és a távcső-kamera expozíciók pontos együttműködését saját GPS vevő segíti. A megfigyelési munka előrejelzéseinek és ütemezett éjszakai tevékenységeinek előkészítését, valamint magát a konkrét vonulások megfelelő stratégia szerinti követését, fényképezését és a kapott képek processzálását mind a Sybilla Technologies saját fejlesztésű programjai végzik (WebPlan, ABOT, data pipeline, stb.). A műszer 2022. augusztusában került a helyére, a korábbi, hasonló méretű BAT robottávcső oszlopára. A rendszer főbb jellemzőit a mellékelt táblázatba foglaltuk (1. táblázat), és a teljes távcsövet is bemutatjuk (4. ábra).

Műhold-, és űrszemét megfigyelési program elindulása

Az EON program hálózatának alkalmasságát a 2022. őszi-téli teszt-időszakban a GNSS műholdak hálózatos észlelésével kellett igazolni. A bajai állomás 2023. április végéig összesen kb. 130 óra (hasznosítható TDM adatsort adó) tiszta észlelési időt teljesített.

Az egyidejűleg leképezhető égbolt-terület:	$\sim 2,2^\circ \times 1,5^\circ$ (össz pixelszám= $\sim 26,5$ MP)
A kamerával alkalmazható expozíciós idők:	30 μ sec – 3600 sec
A CMOS chip hűtése és sötétárama:	2 fokozatú Peltier; 0,0005 e/pixel/sec @ -20 C
A CMOS chip kiolvasási zaja:	1,1 e @ High Gain mode, 3,5 e @ Low Gain
Kép letöltési frekvencia (FPS/frame per sec):	teljes felbontásnál, 16 bit ADC-nél: 6 FPS
A mechanika ráállási pontossága:	<10 arcsecond RMS with PointXP Model
A mechanika maximális követési sebessége:	max. 50° / sec

1. táblázat

A bajai PAN-8 műholdmegfigyelő szenzor főbb adatai



4. ábra

A bajai műholdészlelő távcső nyitott tetőnél, parkolva. Inzertben egy tipikus követési kép.

A projekt 2023. végéig tartó időszakában légkörbeli visszatérés felé közeledő, gyorsuló pályaelem-változást mutató üreszközök, ütköző-, v. szétváló nagyobb űrszemét objektumok, ill. az ESA más szempontok miatt ajánlott célpontjainak észlelése fog folyni fő időben. Eközben már folynak az előkészületei a program kiterjesztésének, amely CCN megnevezést kapott. Ennek keretében a követett üreszköz koordinátáinak kimérésén felül egyidejűleg több sávban történne fotometria is, amelytől az ESA a vizsgált objektum karakterizálhatóságát is reméli.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak az SzTE Bajai Observatórium és a Sybilla Technologies többi munkatársának, valamint Áts Gellért magánvállalkozónak (Pécs) a távcső felszerelésében, és az észlelőmunka sikeres elindításában nyújtott nélkülözhetetlen segítségükért.

Irodalom

- [1] Borkovits T. (2018), A fedési kettős és többes csillagrendszerek vizsgálatának járatlan útján (Akadémiai doktori dolgozat)
- [2] Hegedüs T., Jäger Z., Goda Z. et al. (2023), Magyar Űrkutatási Fórum elfogadott poszttere

Planetary defense és "közeli világűr" ballonkísérletek

T. Hegedüs ^{1,2}, Z. Jäger ¹, Z. Goda ³, Zs. Kereszty ², Á. Lang ⁴, L. Papp ⁵

¹ Szegedi Tudományegyetem Bajai Obszervatóriuma

² Magyar Meteoritikai Társaság

³ Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Kar, Baja

⁴ Soproni Egyetem, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

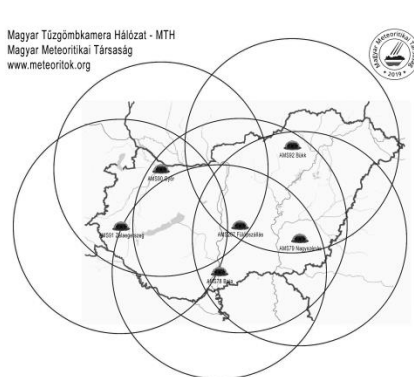
⁵ APRS Hungarian Node, rádióamatőr HG8LXL, Csongrád

Három hazai csoport alkotta konzorcium korábbi individuális aktivitása kapcsolódott össze 2022-ben, és erőfeszítéseik eredményeképpen folyamatosan elérhető „planetary defense” szolgáltatásokkal állnak a jövőbeli érdeklődők, együttműködni kívánók rendelkezésére 2023-tól: egy új, független, 6 állomásos "allsky7/8" tűzgömb-megfigyelő hálózat kezdte meg működését.

A több különböző szervezet, intézmény munkatársaiból álló, 2014 óta működő DAMBALL magaslégköri ballon csoport, és más, korábbi űrkutatási tárgyú sikeres pályázatai alapján is ismert SOPROBOTICS diákcsoport együttműködése egy új, izgalmas kísérlet megvalósításához vezetett, amely a ballonozást összekapcsolja a meteor-kutatással: ez egy intelligens "mű-meteor" ejtési kísérlet. A ballonos csoport rendelkezésére áll bármely hazai űripari cég számára a világűrbe szánt műszerek, részegységek tesztelésére alkalmas bér-indításokra a közeli világűrbe, ill. kutatási programokhoz magaslégköri in-situ mérések elvégzésére.

Planetary defense szolgáltató teljes-égbolt kamerarendszer

Három magánszemély saját finanszírozásával 2021-22 folyamán 6 db korszerű, 7 (későbbi modelleknél 8) kamerás álló teljes-égbolt megfigyelő műszerkomplexum került be az országba. Közös erőfeszítéseik eredményeképpen a hazai űrszektor számára folyamatosan elérhető szolgáltatások állnak a jövőbeli érdeklődők, együttműködni kívánók rendelkezésére 2023-tól. A Magyar Meteoritikai Társaság (MMT), a Szegedi Tudományegyetem Bajai Obszervatóriuma és a Vega Csillagászati Egyesület által menedzselte új, független "allsky7/8" tűzgömb-megfigyelő hálózat kiépítése 2022-ben érte el teljes konfigurációját. Hazánk 6 pontján (Győr, Zalaegerszeg, Baja, Fülöpszállás, Nagyszénás és Répáshuta), alkalmas helyszíneken, mindenütt hozzáértő helyszíni asszisztencia közreműködésével létesültek állomások. Minden állomáson saját GPS vevővel rendelkező, akril kupolával védett, a teljes helyi égboltot csaknem teljesen lefedő 7 (8) kamera üzemel éjjel-nappal, az internetre csatlakoztatva (1. és 2. ábra).



1. ábra: az új kamerarendszer állomásai és látókörük

2. ábra: az AMS90 jelű győri állomás

Már az első évi működés alatt is több robbanó tűzgömböt rögzített a rendszer, amelyekre pályaszámolás és valószínű hullásmező meghatározás is történt. A szoftver állandó finomítás alatt áll a minél pontosabb pályaadatok kinyerése, és minél pontosabb fotometria megvalósítása céljából. A fő cél, hogy lehetővé váljon a közeljövőben tényleges hullást eredményező bolidák meteoritjainak begyűjtése, és tüzetesebb vizsgálata.

A rendszer szerves része a nyugat európai Allsky7 Network-nek, adatait korlátozás nélkül megosztja a többi állomással. A későbbiekben fényesebb műholdak és űrszemét objektumok automatikus felismerésének és pályájuk kimérésének lehetővé tételét-, ill. tranziens és időszaki fényjelenségek (TLE-k, NLC-k, stb.) rögzíthetőségét is tervezzük megvalósítani.

„Közei világűr” ballonkísérletek

A több különböző szervezet, intézmény munkatársaiból álló, 2014 óta működő DAMBALL magaslégköri ballon csoport, és korábbi űrkutatási tárgyú sikeres aktivitása alapján ismertté vált SOPROBOTICS diákcsoport együttműködése (3. ábra) új, izgalmas kísérlet megvalósításához vezetett, amely a ballonozást összekapcsolja a meteor-kutatással: intelligens „mű-meteor” ejtési kísérlet. A D=10 cm átmérőjű, különböző átlagsűrűség-értékre beállított „mű-meteor” testek (4. ábra) saját beépített telemetriával rendelkeznek, a gondolából 30 km felett kiejtve esés közben folyamatosan lesugározzák pozíciójukat a földi vevőállomásra, ill. az ejtőernyővel ereszkedő gondolára. Az ismert kezdőfeltételekből a robbanó tűzgömbök nyomán földre hulló meteorit-törmelék pályáit számító "sötét-repülési" integrátor programunk „elméleti” leesési helyének, és az intelligens „mű-meteorok” ismert tényleges földetérési pontjainak összevetése a módszerünk tesztelését fogja valós adatokkal segíteni.



3. ábra: egy korábbi közös ballon-indítás (2018)



4. ábra: egyik intelligens „mű-meteorunk”

A ballonos csoport ezen felül rendelkezésére áll bármely hazai űripari cég számára a világűrbe szánt műszerek, részegységek közei világűrbeni tesztelésére, kutatási programokhoz magaslégköri in-situ mérések elvégzésére (sugárzásmérések, pormintavétel, stb.). Rutinszerűen tudunk 30 km feletti tartományba juttatni max. 1 kg hasznos terhet, és azt biztonságosan visszahozni és begyűjteni. Összesített megbízhatósági statisztikánk (azaz a fedélzeti eszközök sikeres működésével, valamint a műszeres gondola épségben történő visszaérkezésével és begyűjtésével zárult indítások aránya az összes indításokhoz képest) a 2014. augusztusa óta történt indítások tekintetében 95,65% , a 2018. augusztusa óta történeteket tekintve pedig 100% .

A 25 km feletti tartományban tartózkodás max. 30 percre biztosítható, nem kontrolláltan. A gondolában rendelkezésre álló belső hely-, ill. a gondola külsejére felszerelhető egyéb idomok méretezése tekintetében előzetes egyeztetésekre van szükség.

Napfoltminimumok és a most felfutó 25. napfoltciklus

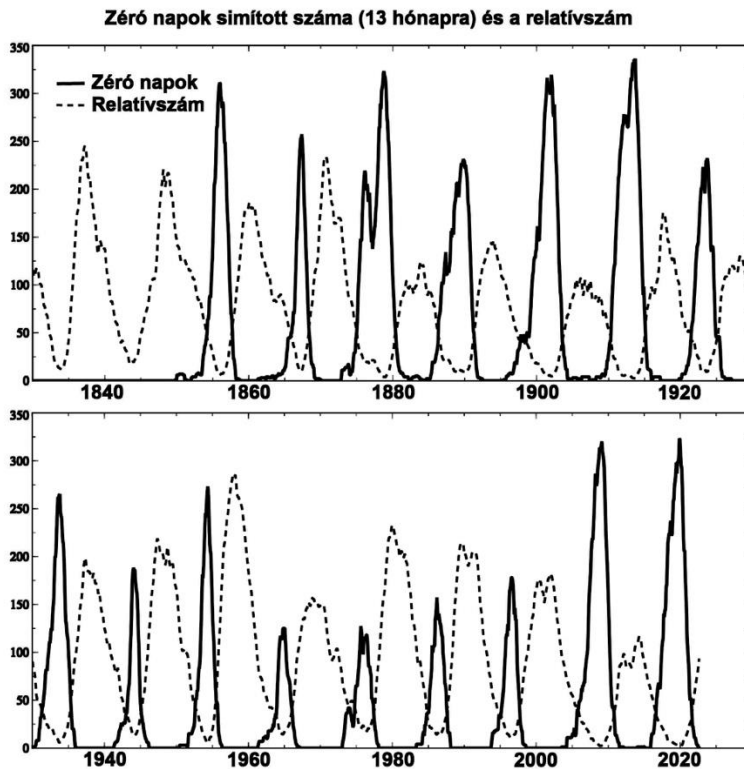
Kálmán Béla ¹

¹ Konkoly Observatory, Budapest

A napfizikusokat erősen meglepő, de végülis történelmileg nem egyedülálló 24. ciklus befejeződött 2019 decemberében. Megnéztük, hogy a napfolt nélküli napok száma mutat-e összefüggést a következő maximum nagyságával (nem). Az új, 25. ciklus elég meredeken indul, valószínűleg magasabb lesz valamivel az előzőnél, bár az előrejelzés nehéz. Két napfoltcsoport fejlődése esetében különleges mozgásokat találtunk.

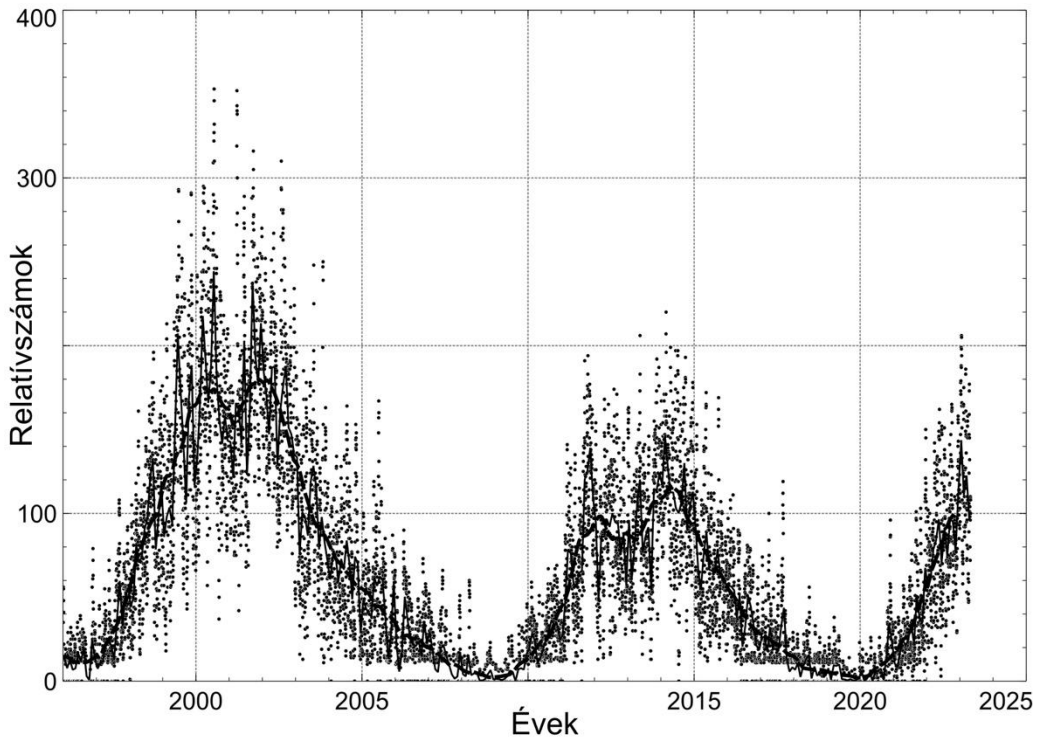
Napfolt nélküli napok

A napfoltciklust S. H. Schwabe tulajdonképpen az évenkénti foltnélküli napok számában mutatkozó 10 évente mutatkozó maximumok alapján fedezte fel. Az egy évszázadon belül legkisebb 24. ciklus minimumának bekövetkeztével 2019 decemberében érdekes volt megvizsgálni, hogy a havonta észlelt foltnélküli napok számát a relatívszámokhoz hasonlóan 13 havi mozgó átlagolással felrajzolva található-e valami szabályosság e görbe és a következő, vagy előző maximumok magassága között. Az eredményt az 1. ábra mutatja.



1. ábra. A napfolt nélküli (zéró) napok 13 havi mozgó összege és a simított havi napfolt-relatívszám

A könnyebb összehasonlítás kedvéért a zero napok esetében 13 havi összegek vannak feltüntetve. Feltűnő összefüggés a két görbe közt nem látható, ami több okkal is magyarázható. Egyrészt a minimum idején a kifutó és a kezdődő ciklus együttesen működik, tehát mindkettő hatással lehet az aktivitásra. Másrészt a szoláris dinamó működésében amúgy is jelenlévő erős véletlenszerű komponens mellett az időnként megjelenő rendellenes („rogue”) aktív vidékek kimutathatóan befolyásolják a napciklus további menetét [2]. Emiatt a 25. ciklus magasságára adott előrejelzések erősen szórnak, 50 és 230 közt [3].



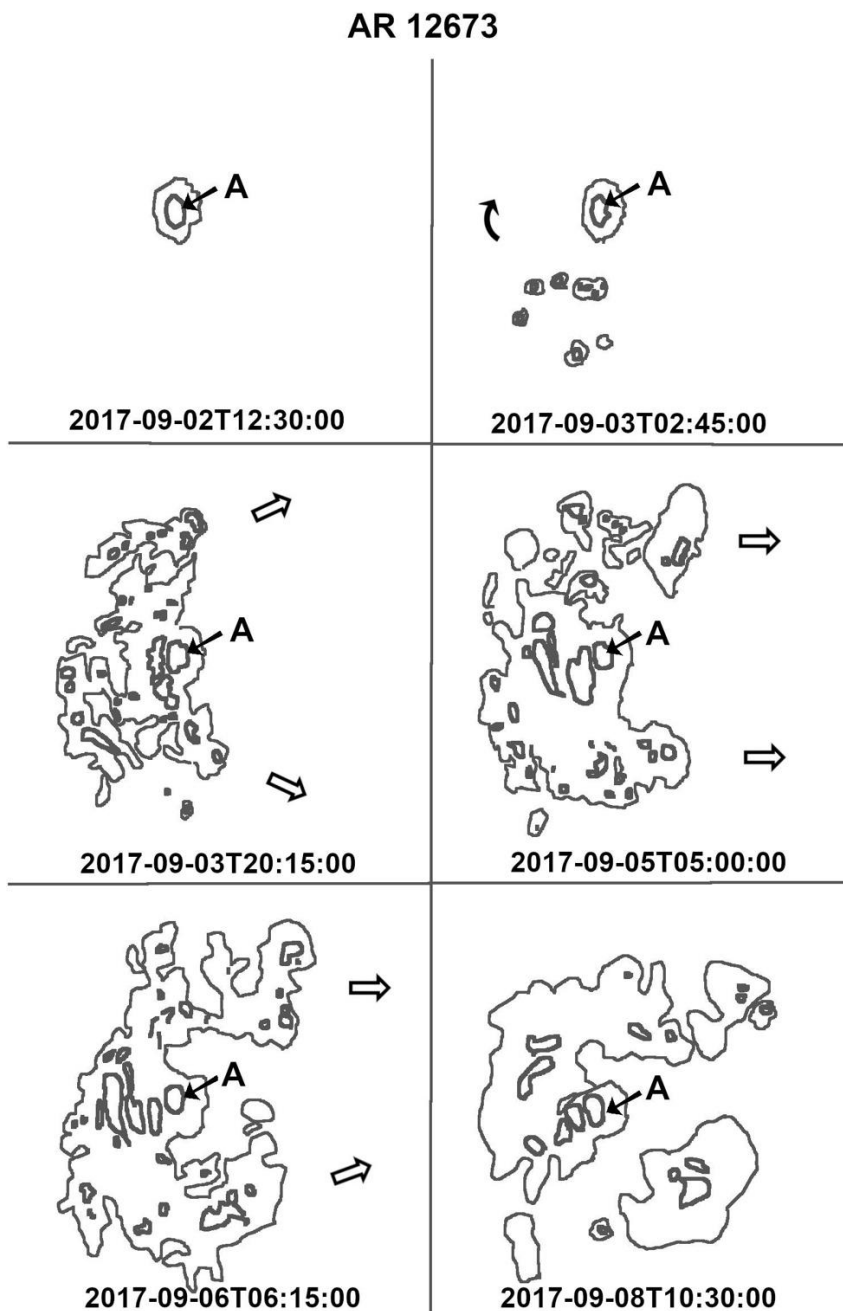
2. ábra. A 23, 24 és 25 napciklus: napi (pontok), havi (vékony vonal) és havi simított (vastag vonal) napfolt-relatívszámok (a 2.0, korrigált változat)

A 25. napciklus indulása

Ellentétben a 24. ciklus indulásával, a 25. ciklus elég átlagosan indult. A 23. napciklus hossza (minimumtól – minimumig) 12,6 év volt, emlékezhetünk a hosszan elnyúló csökkenésre a lezáró minimum előtt. A 24. ciklus hossza 11,0 év, éppen az átlag. Kissé lassan indult, de azután megnőtt az aktivitás, bár egy évszázadon belül ez volt a legalacsonyabb maximum (116,4). Alacsonyabbak voltak nála az 1906-os 14. (107,1), az 1816-os 6. (81,2) és az 1805-ös 5. (82,0). Nagyon kifejezett kettős csúcsa volt, a második érezhetően magasabb. Mivel a 23. ciklusnak az első csúcsa volt a nagyobb, a két maximum között 14 év telt el. A 24. ciklus csökkenő évei meglehetősen pontossággal követik a 23. ciklus befejeződését, csak alacsonyabbról indulva, nem húzódnak el annyira. A minimumok viselkedése a zero napok tekintetében is nagyon hasonló (1. és 2. ábra). Az aktivitás hasonlóan folytatódik a 25. ciklus kezdetével is, ugyanolyan meredekséggel indul, és 2023 májusára már elérte az előző ciklus első maximumának magasságát. Egyes kutatók szerint lehetséges, hogy már ez a maximum, de teljes biztonsággal majd 3-4 év múlva lehet erről beszélni. Jelenleg inkább úgy tűnik, hogy 2024-25 fordulóján, 130-140 körüli magasságban várható a 25. napfoltciklus maximuma.

Egy rendellenes foltcsoport kialakulása

Nagy, bonyolult, rendellenes mágneses szerkezetű aktív vidékek gyakran alakulnak ki különböző korú napfoltcsoportok kölcsönhatásából. Ilyen szempontból tanulságos végignézni pl. a 2017 szeptemberének elején kifejlődött NOAA 12673 sz. aktív vidéket (3. ábra).



3. ábra. A NOAA AR12673 aktív vidék fejlődése (l. a szövegben)

Sajnos, a fekete-fehér ábra nem tudja visszaadni a mágneses terek teljes kuszaságát, de a lényegyet le lehet írni. Az adott aktív vidék, mint egy szabályos, kerek, vezető mágneses polaritású napfolt jelent meg a napkorong keleti peremén 2017. aug. 28-án déltájban (időadatok UTC szerint). Ez a folt (a 3. ábrán A-val jelölve) gyakorlatilag változatlanul tartotta magát egészen a nyugati peremen való kifordulásig (szept. 9.). Helyzete nem változott, akadályt képezett a szept. 2-án 14h tájban tőle délre felbukkanni kezdő új mágneses fluxus mozgása ellen. Az új foltok az A folt mögött (balra), annak közvetlen közelében jelentek meg, a vezető polaritású umbrák az A folt mellett közvetlenül, mögöttük a követő polaritás. Az előre mozgás akadályozása az umbrák formáján is jól látszik. Az új aktivitás vezető polaritású umbrái délről (alulról), a követő polaritásúak döntően északról (felülről) kerülnek meg az A umbrát (a mozgások általános irányát nyílak jelzik a 3. ábrán), de az A umbra keleti (bal) oldalán feltorlódik a közvetlenül érintkező vezető, és az ennek nekiütköző követő polaritás. Ezen a részen a mágneses gradiens jelentős, és a mozgások következtében az is marad, az aktív vidékben lezajló nagy flerek mind a mágneses polaritás-eltválasztó vonal ezen szakaszán történtek. Ez megfelel a korábbi tapasztalatoknak, miszerint az azonos polaritású umbrák kölcsönhatása inkább hidrodinamikai jellegű, míg az ellentétes polaritásoknál már a magnetohidrodinamika dominál [1].

Különös sajátmozgás egy közepes aktív vidékben

Szintén animációban lehetett követni a 25. ciklusban, 2023. febr. 16-28 közt megfigyelhető NOAA 13229 aktív vidéket. Beforduláskor a keleti peremen egy rendellenes hajlásszögű bipoláris foltcsoportnak tűnt, bár a vezető umbrát fényes hidak szabdalták fel. A későbbiekben a vezető folt mellett felbukkanó követő polaritású foltok és a vezető folt umbrájának kétfelé válása, sőt febr. 21-re két külön foltta alakulása az aktív vidéket két, egymással párhuzamosan fekvő dipóllá alakította. A követő részek ezután gyengülni kezdtek, míg a két vezető folt egymást kergetve kissé délre húzódott. Febr. 24-én 07:59 körül a két vezető folt közti réstől északra új mágneses fluxus jelent meg, először északabbra követő, majd 14:29-re közvetlenül a rés északi végében vezető polaritású kis umbra. Ez febr. 25-én 05:29-re végighaladt déli irányban a két vezető polaritású folt közti résen, mintegy elvágva egymástól a két foltot, miközben az új követő polaritás umbrái a nyugati vezető folttól északra maradtak. Ezután az új kis umbra visszaindult volna, de a csökkenésnek indult két vezető folt összezárulva elzárta előtte az utat, és az új mágneses tér visszafejlődött. Kiforduláskor a nyugati peremen (febr.26. 23:59) a NOAA 13229 aktív vidék már csak az erősen töredezett, kettős szerkezetű vezető foltból és egy kis kompakt követő foltból áll.

Bár a 24. ciklus ráijesztett a napfizikusokra, a Nap továbbra is aktív, és mindig kész új meglepetésekkel szolgálni.

Irodalom

- [1] Kálmán, B. (1997), *Astronomy and Astrophysics*, 327, 779
- [2] Nagy M., Petrovay K., Lemerle A., et al (2020), *Journal of Space Weather and Space Climate* 10, 46
- [3] Nandy, D. (2021), *Solar Physics*, 296, 54

Napfoltcsoportok visszafejlődésének dinamikája

Muraközy Judit¹

¹ Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

A napfoltcsoportok felbukkanását és visszafejlődését eltérő mechanizmusok hajtják. Jelen cikkben kizárólag a visszafejlődési fázist vizsgálom. A fejlődés nagy statisztikai anyagon történő részletes vizsgálatát a debreceni SoHO/MDI - Debrecen Sunspot Data (SDD) napfoltadatbázis teszi lehetővé. A katalógus főként a 23. napfoltciklus foltjainak adatait tartalmazza, hiszen az 1996-2010 időtartamot fedi le. Összesen 142, szigorú peremfeltételek alkalmazása után kiválogatott, már a valóban visszafejlődési fázisban lévő foltcsoport vizsgálatával arra kerestem a választ, hogy pontosan mi történik a foltcsoportok területi maximumától a nullás terület közeli állapot elérése közötti időtartamban. Hogyan jutunk el odáig, hogy -főként a nagy területű- foltcsoportok élete végén jellemzően egyetlen, vezető polaritású, nagy, magányos folt marad? A vizsgálatok eredményeként kimutatható, hogy a vezető/követő aszimmetria három különböző fázisban változik a visszafejlődés során, és közte, illetve a foltcsoportok maximális területe között fordított arányosság figyelhető meg. Az umbra-penumbra arány és a maximális terület között szintén fordított arányosság mutatható ki, azaz nagyobb területek esetén relatíve kisebb umbra jellemző, tehát a penumbra mintegy stabilizálhatja a foltot. A félgömbi aszimmetria vizsgálatai nagyobb értékeket mutatnak a déli félgömb esetén.

Bevezetés

A napfoltcsoportok felbukkanása, és a maximális állapotot követő visszafejlődése aszimmetrikus folyamat. Míg a felbukkanás rövid idő alatt (órák - napok) végbemegy, addig a visszafejlődés jóval hosszabb folyamat, mely heteket, vagy akár hónapokat is igénybe vehet. Ezen fejlődési fázisokat különböző folyamatok alakítják, amelyek részletes leírása alapvető fontosságú a szoláris sebességterek és mágneses terek kölcsönhatásainak megértéséhez. A konvektív zóna aljáról, a tachoklínából történő felbukkanást a felhajtóerő szabályozza, de más folyamatok (pl. Coriolis-erő, mágneses feszültség, konvektív mozgások, mágneses fluxuskötegek megcsavarodása) is szerepet játszanak benne. A visszafejlődést a konvekciós folyamatok irányítják, melyek feldarabolják, errodálják a napfoltokat [5]. [12] szerint a visszafejlődés akkor kezdődik, amikor a fluxuskötegek kiegyenesednek, azaz elveszítik a csavarodottságukat.

A két fejlődési fázist korábban tanulmányozó munkák jelentős része kis számú mintát vizsgált, illetve csak egyes napfoltokat figyelt meg. Ha foltcsoportokat követett nyomon, akkor sem különböztette meg azok vezető és követő részeit, és nem vizsgálta külön az umbrák és penumbrák fejlődését. Mások elméleti modellek segítségével tanulmányozták a napfoltcsoportok fejlődését. [13] elméleti úton vizsgálta a penumbrával rendelkező és nem rendelkező napfoltok élettartamát, és azt találta, hogy azon foltok, amelyeknek nincs penumbrája, sokkal rövidebb életűek, mint azok, amelyeknek van. Ezért az feltételezhető, hogy a penumbrák valahogyan stabilizálhatják a felszínen a napfoltokat, vagy a felszín alatti rétegekben megakadályozzák azok fragmentálódását. Mások (pl. [6] és [7]) a lehetséges félgömbi aszimmetriákat vizsgálták a szoláris aktív régiók fejlődésében, és különbséget mutattak ki pl. az északi és déli fejlődési- és visszafejlődési ráták, illetve dőlésszögek között.

Jelen munkámban (mely főként [10] magyar nyelvű kivonata) kizárólag a visszafejlődés dinamikájának vizsgálatára szorítkozom. A visszaforduló foltcsoportokat nem vizsgálom, tehát csak a napkorongon észlelhető, egy rotáció alatt végbemenő változásokat követem.

Adatok és eljárások

Vizsgálataim során a SoHO/MDI - Debrecen Sunspot Data (röviden SDD) napfoltkatalógus [1] és [2] adatait használtam. Ezen adatbázis különlegessége, hogy a foltcsoportok által tartalmazott minden egyes folt esetén megadja - a pozíció- és területadatok mellett - az umbrában és a teljes foltban mérhető mágneses tér értékeit is. Ezen adatok lehetővé teszik a foltcsoportok vezető és követő részeinek pontos elkülönítését, így segítségükkel vizsgálható a visszafejlődés során bekövetkező vezető-követő területi és foltszámbeli aszimmetria változása. Az SDD az 1996-os évtől 2010-ig tartalmaz adatokat, mely időszak főként a 23. napciklust fedi le.

A vizsgálatom bemenő adatai a már visszafejlődési fázisban lévő, bipoláris foltcsoportok, melyek kiválasztására a következő szigorú feltételeket szabtam. Csak olyan foltcsoport tekinthető visszafejlődőnek, amely a maximális területű állapota előtt legalább két napig, azt követően pedig legalább négy egymást követő napon át megfigyelhető volt, és az első, illetve utolsó megfigyelt területe a maximális terület 40 százalékánál kisebb volt, illetve a teljes terület csökkenésével egyidőben mind a vezető, mind pedig a követő rész területeinek is csökkennie kellett. E feltételek alkalmazásával, majd a kiválasztott foltcsoportok ellenőrzése után összesen 142 foltcsoport visszafejlődését követtem.

Az aszimmetria jellemzésére az ún. normált aszimmetria indexet (AI) használtam

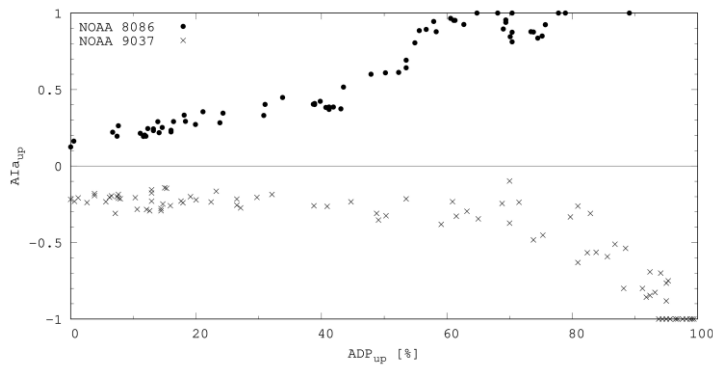
$$AI_a = \frac{a_v - a_k}{a_v + a_k} \quad (2)$$

ahol a_v a vezető rész területe, a_k pedig a követő rész területe. Belátható, hogy az aszimmetria index értéke 0, ha a vezető és követő rész területei egyenlőek, -1 ha a vezető rész már eltűnt, és 1 ha pedig a követő rész területe nulla.

A visszafejlődés jellemzésére, az idő kiküszöbölésére az ún. területi visszafejlődési fázist (areal decay phase, ADP) vezettem be, amely a következőképpen számolható:

$$ADP = \left(1 - \frac{a}{A}\right) * 100 \quad (2)$$

ahol a a foltcsoport észlelt területe, A pedig a maximális területe. Az ADP értéke a maximális terület időpontjában 0 %, míg a visszafejlődési fázis végén 100 %. Az AI-t minden észlelési időpontra, azaz minden ADP-re meghatároztam, majd értékeit vizsgálat során 10 %-os ADP tartományonként átlagoltam.

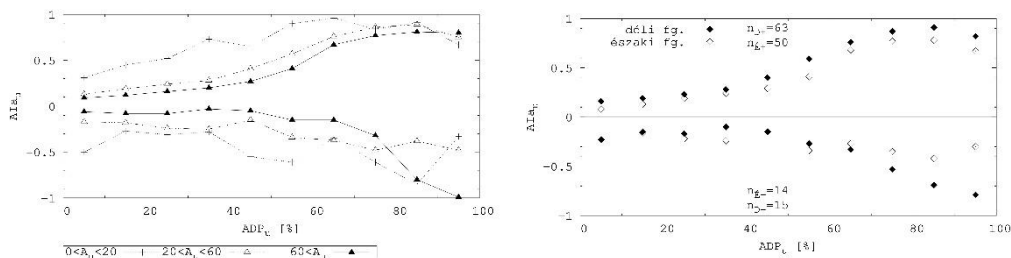


1. ábra: Területi aszimmetria változása két foltcsoport (NOAA 8086 pontokkal, NOAA 9037 keresztekkel) visszafejlődése alatt [10].

Az 1. ábra felső részén egy tipikus foltcsoport (NOAA 8086) visszafejlődése során bekövetkező vezető/követő területi aszimmetria változása követhető. Bár jellemzően a vezető rész területe a követőénél nagyobb (tehát az aszimmetria index pozitív), akadnak kivételek. Ilyenre példa a NOAA 9037-es számú foltcsoport (1. ábra negatív tartomány).

Eredmények és diszkusszió

Az előző, a foltcsoportok visszafejlődését vizsgáló munkáim ([8] és [9]) kimutatták, hogy a foltcsoportok ellentétes mágneses polaritású részei különböző visszafejlődési rátákat mutatnak: a vezető részek hosszabb távon észlelhetők, míg a követő részek gyorsabban eltűnnek. Ezek a munkák csak a visszafejlődés gyorsaságát vizsgálták a foltcsoportok területeinek függvényében, viszont a vezető és követő részek dinamikájának változásaival nem foglalkoztak. A foltcsoportok visszafejlődése közben bekövetkező vezető-követő dominancia változást a területi aszimmetria index, az ellentétes polaritású részek fragmentáltságának, illetve az umbra-penumbra arányának elemzésével vizsgálom.



2. ábra: Területi aszimmetria index változása három terület-tartományban (bal panel); illetve az északi és déli félgömbön (jobb panel) a visszafejlődési fázis függvényében [10].

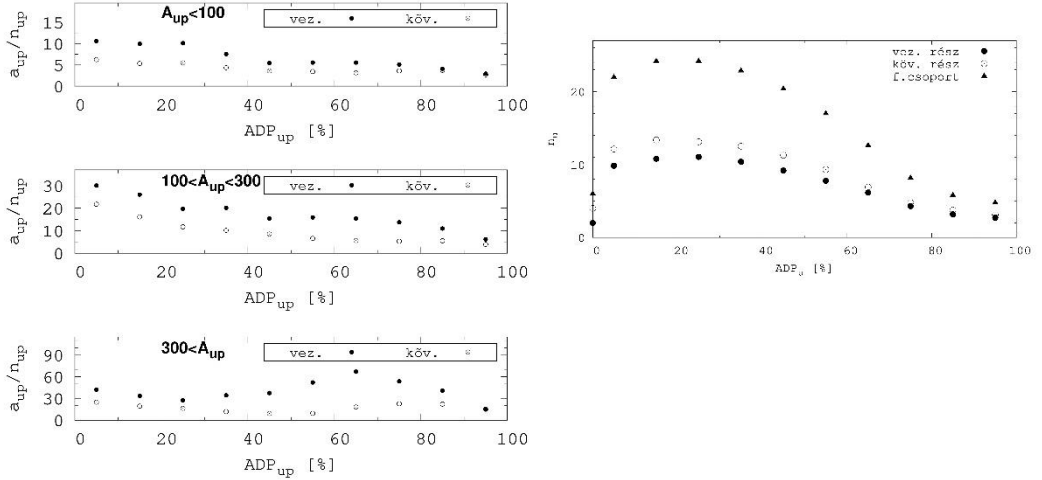
A 2. ábrán jól látszik, hogy a vezető-követő részek közötti területi aszimmetria három fázison keresztül változik a foltcsoportok visszafejlődése során. Az első fázis kb. az ADP 40 %-áig tart, és itt az aszimmetria nem, vagy csak kissé változik a maximális terület időpontjában észlelhető aszimmetriához képest. A második fázis során a területi aszimmetria index viszonylag meredek változást mutat. Ez a fázis kb. az ADP 70 %-áig tart. Az utolsó fázisban az aszimmetria értéke újra közel változatlan marad, és a legnagyobb területű csoportok esetén közel egyes értéket vesz fel, azaz ebben a fázisban a követő rész eltűnik. Ez a változás a pozitív tartományban kifejezettebb, mely azt jelenti, hogy a foltcsoportok nagy részénél a vezető rész legnagyobb foltja(i) észlelhetők legtovább. Erre utalnak azon megfigyelések is, melyek szerint az öreg, magányos foltok általában vezető polaritásúak. [4] egyetlen követő folt visszafejlődésének tanulmányozásával arra jutott, hogy a visszafejlődés egy három fázisú folyamat. Elmélete szerint az első fázisban az umbra fragmentálódása, a másodikban az ellentétes polaritások kioltása, míg az utolsóban a fluxusnak a mozgó mágneses részek általi elszállítása figyelhető meg.

A 2. ábra bal panelje azt is mutatja, hogy az aszimmetria változás a legnagyobb és közepes területű foltcsoportok esetén a legsimább, míg a legkisebb területek esetén a görbe kevésbé kifejezett, főleg a kevésbé tipikus, negatív aszimmetriájú csoportok esetében.

Az aszimmetria nem csak a területtől függ, hanem attól is, melyik félgömbön helyezkedik el a foltcsoport (2. ábra, jobb panel). A vizsgált minta szerint a déli félgömbön helyezkedik el a foltcsoport (2. ábra, jobb panel). A vizsgált minta szerint a déli félgömbön mind a negatív, mind pedig a pozitív tartományban nagyobb az aszimmetria értéke. Ez a területfüggés következménye lehet, hiszen a vizsgált foltcsoportok főként a 23. napciklusból származnak, amelynek legnagyobb része alatt a déli félgömb aktivitása erőteljesebb volt [3].

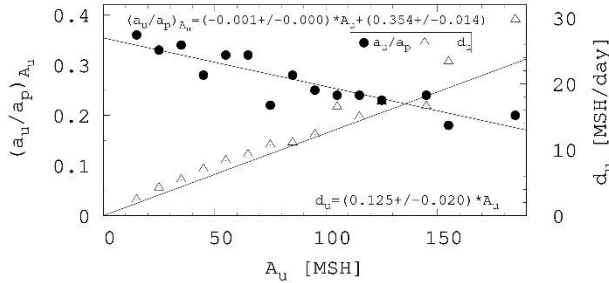
A 2. ábra bal paneljét a 3. ábrával összevetve információt kaphatunk a foltcsoportok vezető-követő részei fragmentáltságának a visszafejlődés során mutatott változásairól. A visszafejlődés első fázisában, amikor az aszimmetria index értéke változatlan, a foltokra jutó átlagos terület erős csökkenést mutat (kb. felére esik vissza), miközben a foltszám mind a vezető, mind pedig a követő részben nő (3. ábra, jobb panel). Ekkor zajlik a fragmentálódás. A középső fázisban az átlagterület változatlan, miközben a foltszám egyre csökken. Itt tehát a kisebb foltok tűnnek el, míg az utolsó szakaszban újra csökkenést mutat az átlagterület, viszont a foltszám csökkenése

lassul, azaz itt a területvesztés dominál.



3. ábra: Bal panel: napfoltok átlagos területének változása a visszafejlődési fázis függvényében [10]. Az egyes panelek különböző területtartományokra vonatkoznak. Jobb panel: az átlagos foltszám változása a visszafejlődés során.

Ez alól a legnagyobb területű csoportok kivételek. Esetükben a középső visszafejlődési szakaszban az átlagos terület hirtelen növekedést mutat, amely a legkisebb területű foltok gyors eltűnésére utal. Így a legnagyobb foltcsoportok esetén a visszafejlődés végére jellemzően egyetlen nagy vezető polaritású folt marad.



4. ábra: Az umbra-penumbra területek aránya a maximális umbra terület időpontjában 10 MSH területsávonként átlagolva (fekete pöttyökkel). Az umbrák visszafejlődési rátája [10] szintén 10 MSH területsávonként átlagolt (üres háromszögekkel, a jobb függőleges tengelyen skálázva).

Mivel az umbrák és a penumbrák eltérő körülmények között fejlődnek, ezért különböző folyamatok hatnak rájuk, melyek a területeik egymáshoz viszonyított arányát befolyásolhatják. [11] kimutatta, hogy a penumbrákat a mágneses erővonalak nagy dőlése formálja a felszínen, míg az umbrák a felszín alatti folyamatok által formálódnak.

A 4. ábra a vizsgált foltcsoportok umbra-penumbra arányait (fekete pöttyökkel ábrázolva) mutatja a maximális terület függvényében, és közöttük fordított arányosság rajzolódik ki. A visszafejlődési ráták [9] a maximális területtel viszont egyenes arányosságot mutatnak. Jól látható tehát közöttük az egyértelmű fordított arányosság, mely szerint a nagyobb umbrák gyorsabban

bomlanak, viszont az umbra-penumbra arányuk kisebb, mint a kisebb területű foltcsoportoké. Amennyiben a bomlási ráta területfüggését elimináló százalékos bomlási rátát [9] vesszük figyelembe, a nagyobb umbrák bomlási rátája kisebb lesz, mint a kisebb umbráké. [13] elméleti megfontolások után azt kapta, hogy a nagyobb penumbra valahogyan stabilizálja a foltot.

Konklúzió

Amennyiben a kezdeti, a maximális, illetve az utolsóként észlelt területét ismerjük egy foltcsoportnak, akkor a fejlődés és visszafejlődés sebessége kiszámítható (pl. [8], [9]). Az idő- és térbeli felbontás növelésével, illetve mágneses tér értékek ismeretében ([1], [2]) a foltcsoportok fejlődése nagy számú mintán, nagy részletességgel tanulmányozható [10]. Így a foltcsoportok evolúciójáról nem csak "állóképet" kapunk, de annak belső dinamikája is feltárható. Kimutatható, hogy a visszafejlődés három-fázisú folyamat, illetve a különböző területű foltcsoportok visszafejlődése eltérő módon valósul meg, hiszen a rájuk ható fizikai feltételek különbözőek. A nagyobb területű foltcsoportok bomlása simább folyamat, míg a kisebb területűek kaotikusabb viselkedést mutatnak. A foltcsoportok kisebb, szétszórtabb követő része hamarabb eltűnik, mint a nagyobb területű, kompaktabb vezető rész foltjai, melyek közül a legnagyobbak több rotációt is képesek megélni. Ezek vizsgálata viszont már a következő munka témája lesz.

Köszönetnyilvánítás

A bemutatott munkát az NKIF Hivatal OTKA FK 141895-ös számú projektje támogatta.

Irodalom

- [1] Baranyi T., Győri L., Ludmány A. (2016), *Solar Physics*, **291**, 3081
- [2] Baranyi T. (2015), *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **447** (4), 1857
- [3] Chowdhury P., Choudhary D. P., Gosain S. (2013), *The Astrophysical Journal*, **768**, 188
- [4] Deng N., Choudhary D. P., Tritschler A., Denker C., Liu C., Wang H. (2007), *The Astrophysical Journal*, **671**, 1013
- [5] van Driel-Gesztelyi L., Green L. M. (2015), *Living Reviews in Solar Physics*, **12**, 1
- [6] Howard R. F. (1993), *Solar Physics*, **145**, 95
- [7] Javaraiah J. (2012), *Astrophysics and Space Science*, **338**, 217
- [8] Muraközy J. (2021), in: *Űrtan Évkönyv 2020*, szerk. Frey S., Magyar Asztronautikai Társaság, Budapest, **151**, 77
- [9] Muraközy J. (2021), *The Astrophysical Journal*, **908**, 133
- [10] Muraközy J. (2022), *The Astrophysical Journal*, **925**, 87
- [11] Panja M., Cameron R. H., Solanki S. K. (2021), *The Astrophysical Journal*, **907**, 102
- [12] Piddington J. H. (1975), *Astrophysics and Space Science*, **34**, 347
- [13] Rempel M., Cheung M. C. M. (2014), *The Astrophysical Journal*, **785**, 90

Zsúfolt-e a Föld körüli pálya?

Nagy Imre

Nemzeti Köszolgálati Egyetem, Budapest

Napjainkban korábban elképzelhetetlennek tartott méretű műholdseregek kiépítése zajlik. Jelenleg a Starlink rendszer a legnagyobb kb. 4000 taggal, ami akár a tízszeresére is nőhet. Ez már önmagában is több, mint pár évvel ezelőtt volt azoknak a testeknek a száma, amelyeknek a pályáját követni lehetett, beleértve az űrtörmeléket is. Ugyanakkor sajtóhírekben olvasni lehet már akár 300000 műholdból álló rendszer terveiről is. Ezek alapján lehetséges, hogy középtávon akár egymilliót meghaladó számú műhold is Föld körüli pályára kerülhet.

Joggal merül fel a kérdés, hogy van-e hely ennyi mesterséges hold számára alacsony Föld körüli pályán? A kérdést több oldalról is vizsgálhatjuk. Egyrészt ha túl közel keringenek egymáshoz a műholdak, akkor zavarhatják egymás működését, illetve kommunikációját. Másrészt a geopotenciál gömbszimmetrikustól való eltérése, a Naprendszer égitestjei és a nem konzervatív erők (pl. légellenállás) okozta perturbációk hatására időről időre ütközés közeli állapotok állhatnak elő. Az alábbiakban a gravitációs eredetű perturbációk hatásának numerikus vizsgálatával adunk felső becslést a mesterséges holdak maximális számára.

Bevezetés

Míg pár éve még „csak” néhány ezer műhold keringett a Föld körül, mára csak a Starlink rendszer 4023 tagból áll (2023. május 6.) [1]. A mesterséges holdak nem egyenletesen töltik ki a Föld körüli térséget. A legpopuláltabb a geostacionárius pálya, ahol több száz üzemel. Erre a pályára 0,1°-os közökkel osztják a pozíciókat. Alacsonyabb tartományokban változatos pályákat láthatunk. A legtöbb mesterséges hold 2000 km alatti magasságban, közel kör alakú pályán kering. A pályahajlások sokkal változatosabb képet mutatnak. Az egyenlítői pálya ritka, ellenben viszonylag gyakori a közel poláris. Balesetek és fegyverkísérletek miatt néhány tartományban sok törmelék kering, illetve nagyobb magasságokban úgynevezett temetői pályákat is találunk, amelyeken hasznos élettartamuk végére ért műholdak keringenek.

Napjainkban egyre több és nagyobb alacsony pályára szánt műholdsereg tervei válnak ismertté [2]. A jelenleg „biztosan” megvalósuló tervek között a legnagyobb a Starlink (kb. 42 ezer tag). A OneWeb jelenleg 648 tagú rendszer kiépítésén dolgozik, amit idővel nagyjából tízszeresére növelnének, ám korábban ötvenezret közelítő számot is említettek. Idén kezdődik a Kuiper rendszer kiépítése, amely háromszáz meghaladó számú mesterséges holdból fog állni. Szintén ebben az évben kezdődik Kína saját, 13000 tagú műholdseregének a kiépítése. A napi sajtóban már 300000 tagból álló rendszer tervei is felbukkantak. Felmerül a kérdés, hogy elfér-e ennyi mesterséges hold alacsony, 2000 km alatti pályákon?

A kérdés megválaszolásához először áttekintjük a mesterséges holdak mozgását. Ezután megvizsgáljuk, hogy mennyire állandó a pályamagasság, illetve hogy hogyan változik két, azonos pályán keringő műhold közötti távolság. Az eredmények alapján megbecsüljük, hogy legfeljebb hány mesterséges hold fér el alacsony Föld körüli pályán.

Mesterséges holdak mozgása

A mesterséges holdak mozgása alapvetően égi mechanikai egy centrum probléma, azaz a Föld tömegközéppontja körül keringenek. Ezt a mozgást azonban több perturbáció is éri, tehát valójában perturbált egy centrum problémáról beszélhetünk. A zavaró hatások közül alacsony pályák esetén a legjelentősebb a Föld gravitációs terének a gömbszimmetrikustól való eltérése.

Jelentős még a Hold és a Nap hatása is. Minél alacsonyabb a pálya, annál jelentősebb a légköri fékeződés hatása. Nagyjából 450 km alatt válik szükségessé a légköri fékeződés miatti magasságcsökkenés rendszeres kompenzálása, hogy a műhold elérje a tervezett élettartamát.

Kevésbé erős perturbációt okoznak a bolygók a gravitációs terek által. Kimutatható a Föld mágneses tere által okozott elektromágneses fékeződés, valamint a Nap közvetlen, illetve a Földről és a Holdról visszaverődő sugárzásának perturbáló hatása.

A gravitációs eredetű perturbációk a pálya fél nagytengelyében, az excentricitásban és a pályahajlásban periodikus perturbációkat okoznak. Ugyanakkor ezek is elvezethetnek a mesterséges hold pusztulásához, amennyiben a perigeum túl alacsonnyá válik, mint az az Interball-1 esetében is történt [3]. Fontos, hogy a gravitációs eredetű perturbációk miatt gyakorlatilag nem beszélhetünk körpályáról, mivel az excentricitás legfeljebb csak pillanatnyilag lehet nulla. A perigeum nem rezonáns pályák esetén szekuláris változásokat mutat, azaz körbefordul, akár csak a felszállócsomó. A pályasík körbefordulásának jelenségét például a napszinkron pályák esetében ki is használjuk.

A gravitációs eredetű perturbációkkal szemben a légköri fékeződés hatása a fél nagytengely szekuláris változását okozza, aminek hatására hosszabb-rövidebb idő elteltével bemerül a műhold a sűrűbb légrétegekbe. Az excentricitás szintén csökken, azaz egy elliptikus pálya körösödik a légköri fékeződés miatt.

Míg perturbálatlan egy centrum probléma esetén tetszőleges számú mesterséges holdat lehetne elhelyezni Föld körüli pályán az ütközés veszélye nélkül, addig perturbált esetben ez már nem teljesül a pályaelemek folyamatos, hely és időfüggő változásai miatt. A műholdak száma maximumának meghatározásához elengedhetetlen a mozgásegyenletek megoldása.

Vizsgálati módszer

A vizsgálatok két részből tevődnek össze. Először is vizsgálni kell, hogy az egymás felett húzódó pályák közötti mekkora minimális magasságkülönbséget kell hagyni. Ennek eldöntéséhez azt kell megnézni, hogy az egyes magasságtartományokban mennyivel változik a ténylegesen megvalósuló pályák pillanatnyi magassága. Ezek alapján már megbecsülhető, hogy a 2000 km alatti tartományban hány egymás felett húzódó pályát lehet megvalósítani.

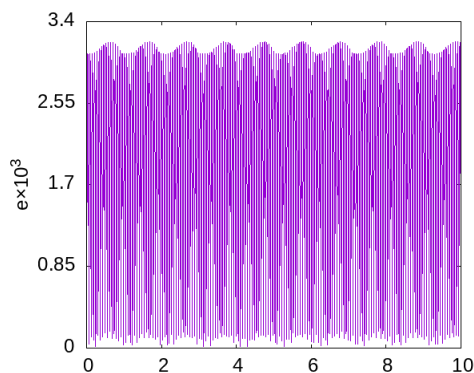
Egy-egy pályán természetesen nem csak egy mesterséges holdat lehet elhelyezni, mint ahogy geostacionárius pályán is $0,1^\circ$ -os közökkel lehet pozíciókhoz jutni. A két műhold között szükséges minimális kezdeti távolság meghatározásához egymáshoz közeli párok mozgását vizsgáljuk.

Mivel felső becslés a cél, csak a gravitációs hatásokat vettem figyelembe, és első sorban egyenlítői körpályákat vizsgáltam. A mozgásegyenletek 1000 napra történő integrálására egy RKN 7(8) Runge-Kutta-Nystrom-Fehlberg váltakozó lépésközü integrátort használtam [4]. A program a geopotenciált 12-ed rendig veszi figyelembe, a Hold mozgását az ELP 2000-85 elméletből [5], a Nap mozgását pedig a VSOP 87 elméletből [6] számolja. Ugyanezt a programot használtuk korábban az Interball-1 műhold mozgásának vizsgálatára Zare-féle regularizációs eljárással kiegészítve [3]. Jelen munkához a mesterséges holdak regularizálatlan mozgásegyenleteit integráltuk, mivel az érdeklődésünk tárgyát képező körpályák esetén a regularizáció nem jár előnnyel.

Eredmények

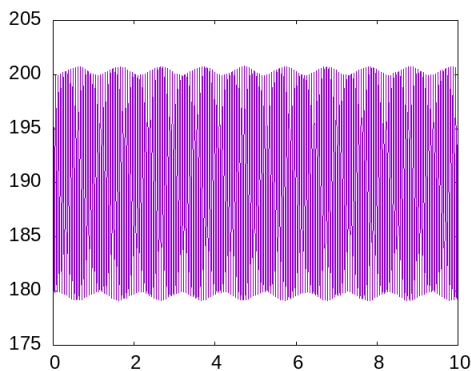
A pályaelemek tapasztalt változásai megfelelnek az elméleti megfontolások alapján vártak: A fél nagytengelyben csak periodikus változások látszanak, az excentricitásban úgyszintén, az inklináció pedig lényegében a teljes integrálási idő alatt jó közelítéssel nulla marad. Az 1. ábra a kezdetben 200 km magas körpálya excentricitását mutatja az idő függvényében. Jól látható,

hogy a kezdeti körpálya excentricitása egy perióduson belül eléri 0,003 értéket. A továbbiakban időről-időre ismét nullává válik, majd hozzávetőlegesen 0,0032 -ig emelkedik. Ha figyelembe vesszük, hogy eközben a fél nagytengely csak egy minimális, 400 m széles tartományban változik, a perigeum magasságában jelentős, 20 km-t meghaladó változást várunk.



1. ábra. Az excentricitás az idő függvényében.

A számított perigeummagasság helyett célszerűbb a mesterséges hold pillanatnyi koordinátáiból kiindulva meghatározni a pályamagasság változásait, ami a 2. ábrán látható. Megállapíthatjuk, hogy a változások itt is periodikusak. A bejárt magasságtartomány 21,6 km széles, ám ez a tartomány nem szimmetrikus a kezdeti 200 km-es pályamagasságra. Ez a tartomány a kezdeti magasság emelésével monoton csökken, és 2000 km magasságban 16,4 km lesz. Ezek alapján két pálya közötti magasságkülönbség nem lehet kisebb, mint 21,6 km 200 km magasságban, illetve 16,4 km 2000 km magasságban. Hatványfüggvényt illesztve látható, hogy a tartomány szélessége a fél nagytengely 1,15-dik hatványával fordítottn arányos. Megállapítható, hogy amennyiben ki szeretnénk zárni a mesterséges holdak közötti ütközések lehetőségét, 2000 km magasságig összesen mintegy száz különböző magasságú pálya valósítható meg egy pályasíkban.

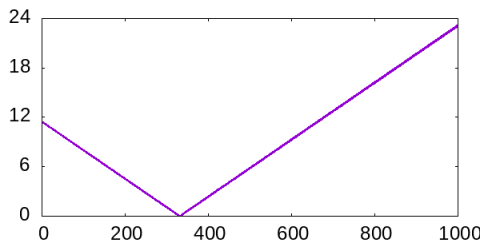


2. ábra. A pályamagasság az idő függvényében

Egy adott magasságú pályára – hasonlóan a geostacionárius pályához – több mesterséges holdat is fel lehet juttatni. Ilyen esetben felmerül a kérdés, hogy milyen közöket kell hagyni az egyes műholdak között. A kérdést vizsgálhatjuk egyrészt égi mechanikai oldalról, másrészt műszaki oldalról is. Míg az előbbi függ a konkrét pályáktól, az utóbbi független ettől,

így kiindulhatunk a geostacionárius pálya esetéből. Ott a zavartalan működést biztosítandó $0,1^\circ$ -os közzel osztják a pozíciókat, így célszerű azt vizsgálni, hogy alacsonyabb pályák esetén égi mechanikai szempontból is elfogadható-e egy ilyen kicsi szeparáció.

A 3. ábra két, 200 km kezdeti magasságú egyenlítői körpályán keringő, egymástól $0,1^\circ$ -kal eltérő pálya menti kezdőhelyzetű mesterséges hold közötti távolságot mutatja az idő függvényében az indítástól számított 1000 napos intervallumra. Látható, hogy a kezdetben $11,4\text{ km}$ körüli távolság lineárisan csökken, majd egy T_{krit} kritikus időpontban nullává válik, azaz fennáll az ütközés veszélye. A továbbiakban ismét lineárisan növekszik a távolság. A 3. ábrán látható görbe jól illeszthető egy abszolút érték függvénnyel.

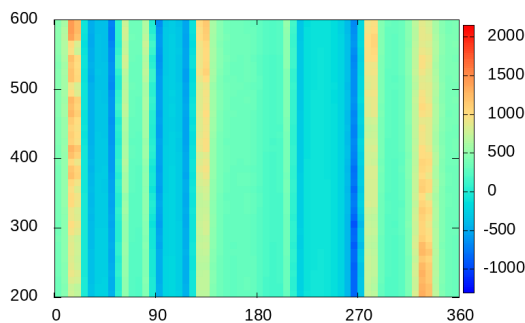


3. ábra. Két, kezdetben $0,1^\circ$ -os szeparációval, azonos pályán keringő műhold közötti távolság az idő függvényében.

A 4. ábrán egy térkép látható, amely a pálya menti kezdőhelyzet és a pályamagasság síkon mutatja a T_{krit} időpont egy színskála alkalmazásával. Látható, hogy a térképen alapjában függőleges struktúrák változtatják egymást. Ez azt jelenti, hogy T_{krit} elsősorban a pálya menti kezdőhelyzettől függ, és csak másod sorban a pályamagasságtól. Megfigyelhető, hogy a magasságtól való függés nem egyértelmű. Általában igaz, hogy a magassággal nő T_{krit} értéke, ám például 18° kezdőhelyzetnél a magasság növekedésével a korábbi értékeknél alacsonyabbak is jöhetnek. 330° -nál a magasság növekedésével már egyértelműen csökken T_{krit} . A színskála azt is mutatja, hogy nem csak pozitív értékeket kapunk az illesztés eredményeként. Ez azt jelenti, hogy már a kezdetektől fogva távolodik egymástól a két műhold. Mivel a pálya sugara nem változik, ez nem jelent könnyebbiséget, mert így akkor a másik oldali szomszédhoz fog közeledni. Mivel T_{krit} abszolút értéke 70 és 2150 nap között változik, azt mondhatjuk, hogy a kezdeti $0,1^\circ$ -os szeparáció égi mechanikai szempontból nem okoz problémát. A 70 napot alapul véve is csak nagyon alacsony ($0,007\text{ km/h}$) relatív sebesség adódik a két műhold között, amit elég néhány hetes időközönként korrigálni. A korrekció elmaradása esetén sem feltétlenül kell jelentős törmelékkepződéssel járó ütközéstől tartani. Így tehát azt mondhatjuk, hogy egy pályán akár 3600 mesterséges hold is kényelmesen elfér. Sőt, ha biztosítható, hogy a műholdak ne zavarják egymás működését, illetve kommunikációját, akkor ez a szám növelhető is.

Következtetések és összefoglalás

Az egyenlítői síkban húzódó körpályák vizsgálata alapján az látszik, hogy a pálya pillanatnyi magassága jelentős, akár több mint 20 km nagyságú változásokat is mutathat. Egy ekkora változás különösen az alacsonyabb, 200 km körüli magasságú pályák esetében bír jelentős hatással, mivel így a keringési idő jelentős részét a felső légkör nagyobb sűrűségű tartományában tölti a mesterséges hold. Ennek hatására gyorsan fékeződik, és egy-két napon belül olyan sűrű légrétegekbe ér, ahol a sebességvesztés drasztikussá válik, és egyetlen keringésen belül lezuhan, vagy elég. A keringési magasság növelésével a műhold által bejárt tartomány csökken, de 2000 km magasságban is $16,4\text{ km}$.



4. ábra. T_{krit} a pálya menti kezdőhelyzet és a magasság síkon.

A pályamagasság változásának másik következménye, hogy az egy síkban húzódó pályák magasságát nem lehet tetszőlegesen megválasztani. Ha túl közel vannak az egymás feletti pályák, akkor az egyes mesterséges holdak által bejárt tartományok átfednek, így lesz egy olyan térrész, ahol mind a kettő időről időre megtalálható. Ebben a közös tartományban nagy lesz az ütközés veszélye. Az ütköző testek közötti sebességkülönbség 200 km magasság esetén akár 180 km/h, függően a magasságkülönbségtől. Ilyen relatív sebességű ütközés esetén nagy mennyiségű törmelék keletkezhet, ami nem megengedhető a többi műhold védelmében.

A pillanatnyi magasság változása ily módon meghatározza, hogy hány pályát lehet megvalósítani a vizsgált 200 km és 2000 km közötti magasságtartományban. Figyelembe véve, hogy a mesterséges hold által bejárt magasságtartomány a fél nagytengely 1,15-dik hatványával fordítottan arányos, a vizsgált tartományban nagyjából 100 különböző magasságú pálya kialakítására van lehetőség. Ez sajnos csak egy elméleti lehetőség, mert a korábban pályára állított műholdak egy része aktív élettartamuk végeztével is pályán maradt. Ezek az inaktív mesterséges holdak irányíthatatlanok, így a jelenleg aktív, illetve a majdan pályára kerülő műholdak pályáját kell hozzájuk igazítani. További problémát jelent a korábbi balesetek, illetve ürfegyver kísérletek során keletkezett nagy mennyiségű törmelék.

Mivel geostacionárius pályán $0,1^\circ$ -os szeparációval keringhetnek a mesterséges holdak, érdemes megvizsgálni, hogy alacsonyabb pályán is tartható-e ez a szeparáció. Ha az azonos pályán, de különböző pálya menti kezdőhelyzetű mesterséges holdak mozgását vizsgáljuk, azt tapasztaljuk, hogy időben változik az egymástól mért távolságuk. Az időbeli változást egy abszolút érték függvénnyel lehet leírni. A függvény minimuma a nullában van, azaz a két műhold egy bizonyos időpontban összeütközik. Ez az időpont az integrálás kezdőpillanatához képest pozitív és negatív irányban is lehet, függően a pálya menti kezdőhelyzettől. Ez arra utal, hogy a pálya menti sodródást a geopotenciál gömbszimmetrikustól való eltérése okozza. Mivel az egyenlítői síkban az ütközés a kezdőpillanat után legalább 70 nappal következik be, meglehetősen alacsony, legfeljebb 0,007 km/h sebességű, mozgásról van szó. Ilyen alacsony sebességek mellett a két műhold ütközése legfeljebb minimális sérüléseket okozhat, de természetesen továbbra is kerülendő. Az ütközések elkerüléséhez szükséges pályamódosítások csak minimális hajtóanyagot emésztene fel. Mivel legalább 70 nap telik el az indítás és az ütközés között elég lehet néhány hetente kompenzálni a sodródás hatását. Összehasonlításképpen egy 200 km magas pályán keringő mesterséges hold élettartama pályamódosítás nélkül a légköri fékezés miatt mindössze 1,2 nap. A légköri fékezés miatti élettartam és sodródás miatti ütközés várható időpontja nagyjából a 320–450 km közötti tartományban esik egy nagyságrendbe.

Ezek alapján egy pályán akár 3600 mesterséges hold is keringhet feltéve, hogy elfogadjuk, hogy időről időre módosítani kell a műholdak pályáját. Ehhez természetesen hajtóműveket kell elhelyezni mindegyiken.

Összességében tehát azt mondhatjuk, hogy alacsony Föld körüli pályán akár 360000

mesterséges hold is elhelyezhető egy pályasíkban. Felmerül a kérdés, hogy több pályasík alkalmazása mennyivel több műholdat tesz lehetővé. Ezzel kapcsolatban nem szabad elfelejteni, hogy n darab azonos magasságú pálya $n(n-1)$ csomópontban metszi egymást. A metszéspontok térbeli helyzete nem állandó, mert a perturbációk hatására a nullától különböző inklinációjú pályasíkok körbefordulnak. Ez kizárja annak a lehetőségét, hogy a metszéspontokon az egyes pályasíkokon keringő műholdak mindig felváltva, egymást nem túl szorosan megközelítve haladjanak át. Ezekben a pontokban nagyok az egyes pályasíkokon keringő műholdak között a sebességeik különbsége, így egy esetleges ütközés a mesterséges holdak pusztulásával, nagy mennyiségű törmelék képződésével járna. Ha a két pályasík oszcillációs tartománya csak részlegesen fed át, akkor az ütközés valószínűsége csökkenthető, de nem küszöbölhető ki. Vagyis a metszéspontok környezetében nagyon fontos szerep hárul a forgalomirányításra. Amennyiben sikerül megoldani a forgalomirányítás kérdését, egy magasságban két esetleg három pályasík engedhető meg valójában. A pontos szám meghatározása további vizsgálatokat igényel.

Mindent összevetve azt mondhatjuk, hogy alacsony Föld körüli pályán legfeljebb 1 millió műhold számára van hely. Ahhoz, hogy ezt a számot megközelítsük, szükséges a légköri fékezés hatásának gyakorlatilag folyamatos kompenzálása, amelyhez célszerű ionhajtóművet használni. Szóba jöhet légköri gázokkal táplált ionhajtóművek alkalmazása is, ami jelentősen csökkenti a szükséges hajtóanyag mennyiségét, illetve növeli a műhold élettartamát [7]. A jelenleg „biztosan” megvalósuló rendszerek összességében ennél lényegesen kevesebb tagból állnának, tehát még nem beszélhetünk zsúfoltságról. Azonban a sajtóhírekben felbukkanó 300000 CubeSatból álló rendszer már a lehetőségek határát súrolja. Ha azt is figyelembe vesszük, hogy bizonyos tartományok használhatatlanok az ott keringő „zombi” műholdak, illetve a korábbi véletlen ütközések, valamint az űrfegyverkísérletekből származó törmelékek miatt, akkor a 300000 tagú műholdsereg már minden bizonnyal túl van a lehetőségek határán.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA-16 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalom

- [1] Wikipedia The Free Encyclopedia: List of Starlink and Starshield launches, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Starlink_and_Starshield_launches
- [2] Nagy I. (2019), Repüléstudományi Közlemények, 33:2, 31
- [3] Nagy I., Érdi B. (2007), Astronomische Nachrichten, 328, 793
- [4] Fehlbeg, E. (1974), NASA Technical Report R-432
- [5] Chapront-Touzé, M., Chapront, J. (1988), Astronomy and Astrophysics, 190, 342
- [6] Bretagnon, P., Francou, G. (1988), Astronomy and Astrophysics, 202, 309
- [7] Nagy I., (2019), Repüléstudományi Közlemények, 31:1, 213

Fiatal csillagok fényességváltozásainak vizsgálata a *Gaia* űrtávcső adatai alapján

Nagy Zsófia^{1,2}, Ábrahám Péter^{1,2,3}, Kóspál Ágnes^{1,2,3,4}, Kun Mária^{1,2}, Szabados László^{1,2}, Fernando Cruz-Sáenz de Miera^{1,2}, Eleonora Fiorellino⁵, Marton Gábor^{1,2}, Sunkyung Park^{1,2}, Michał Siwak^{1,2}, Szabó Zsófia Marianna^{1,2,6,7}, Szilágyi Máté^{1,2,3}

¹Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest

²CSFK, MTA Centre of Excellence, Budapest

³ELTE Eötvös Loránd University, Institute of Physics, Budapest

⁴Max Planck Institute for Astronomy, Heidelberg, Németország

⁵INAF-Osservatorio Astronomico di Capodimonte, Nápoly, Olaszország

⁶Max Planck Institute for Radio Astronomy, Bonn, Németország

⁷University of St Andrews, St Andrews, UK

A csillagok kialakulásuk során egy tömegbefogási korongon keresztül növelik tömegüket. Az anyag behullásának következtében a fiatal csillagok többféle időskálán mutatnak fényességváltozásokat, rövid (órás-napos) időskálától egészen évtizedes időskáláig. Az eruptív fiatal csillagok azért különösen érdekesek, mert a legtöbb fiatal csillag által mutatott fényességváltozásnak sokszorosát produkálják, és hónapokig, évekig, vagy akár évtizedekig a kifényesedett állapotban maradnak. Az eruptív fiatal csillagok kitöréseit a tömegbefogás rátájának több nagyságrenddel történő növekedése okozza. Ez az úgynevezett epizodikus tömegbefogás kulcsfontosságú a csillagok keletkezésének megértésében. Mivel mostanáig mindössze körülbelül 50 eruptív fiatal csillagot ismerünk, újabb hasonló források felfedezése szükséges a megértésükhöz.

A Gaia űrtávcső, amely 2014 óta végez asztrometriai méréseket a Tejútrendszer feltérképezésére, új lehetőséget adott új eruptív fiatal csillagok felfedezésére, mivel minden 20,7 magnitúdónál fényesebb csillagot megmér, nagyjából havi gyakorisággal. A “Gaia Photometric Science Alerts” adatbázis olyan objektumok fénygörbéjét tartalmazza, amelyek néhány hónapos vagy éves időskálán jelentősebb fényességváltozást mutatnak. A Gaia Photometric Science Alerts adatbázisa alapján csoportunk számos eruptív fiatal csillagot fedezett fel. A csillagok klasszifikációjához a Gaia űrtávcső adatai mellett több más optikai és infravörös távcső fotometriai és spektroszkópiai mérési adatait használjuk. A következőkben ismertetjük az eruptív fiatal csillagok keresésének módszereit és néhány érdekes eredményt, amelyek alátámasztják, hogy a Gaia űrtávcső adatai a csillagok kialakulásának megértéséhez is jelentősen hozzájárulnak.

Fiatal csillagok fényességváltozásai

A Naphoz hasonló kis tömegű (2 naptömeg alatti) csillagok molekulafelhőkben születnek gravitációs összeomlás során [1,2]. A felhő összeomlása következtében kialakuló protocsillagra folyamatosan áramlik az anyag a környezetéből, és egy, a protocsillagot körülvevő akkréciós (tömegbefogási) korongból hullik a csillagkezdemény felszínére. A bezuhanás közben felhő kezdetben lassú forgása felgyorsul, ezért a csillagkezdemény körül hamar kialakul egy lapos, forgó korong. Erről az tömegbefogási (akkréciós) korongról jut a csillagkezdemény felszínére a behulló anyag. A felszabaduló gravitációs energia fűti a születő csillagot, a befogott anyag ionizálódik, majd beindul a deutérium fúziója és kialakul a

csillagkezdemény mágneses tere. A behulló anyag nagy részét a mágneses tér a korongról a csillagra vezeti, a legnagyobb sebességű részecskék viszont, nagyjából a korong síkjára merőlegesen kirepülnek. Ez a nagy sebességű szél néhány százezer év alatt szétfújja a felhőt a kialakuló csillag környezetéből. Ezáltal megszűnik a korong tömegének további növekedése, és ugyanakkor a por-gáz koronggal körülvett újszülött csillag láthatóvá válik az optikai színtéartományban, mint T Tauri típusú változócsillag.

A fiatal csillagok nagy része fényességváltozásokat produkál napos, hetes vagy hónapos időskálán [3]. A fényességváltozások többféle fizikai okra vezethetők vissza. A periodikus változások egy része abból ered, hogy a csillagot a korongban lévő anyag egy része időnként elfedi, és ez a fényesség periodikus csökkenéséhez vezet. Ennek egyik prototípusa az AA Tauri. A fényességváltozások más része abból ered, hogy a korongból az anyag nem egyenletesen áramlik a csillagra. Ez a jelenség napos-hetes változásokat okoz a fiatal csillagok fényességében kis, néhány tized magnitúdós amplitúdóval. A fiatal csillagok egy része hosszabb távú fényességváltozást is mutat, éves-évtizedes időskálán, 2-5 magnitúdós amplitúdóval. Ezek az eruptív fiatal csillagok, ahol a kifényesedést az okozza, hogy egy instabilitás hatására az akkréciós korongból a csillagra hulló anyag mennyisége ideiglenesen megnő (1. ábra).



1. ábra: Fantáziakép az eruptív fiatal csillagok kitörésének folyamatáról [3].

Az eruptív fiatal csillagoknak két főbb típusát különböztetjük meg. Az EXor típusba tartozók éves időskálájú, 2-4 magnitúdó amplitúdójú kifényesedést produkálnak, amelyek néhány évenként megismétlődnek [4]. A FUor típusba tartozók akár 5 magnitúdót is fényesednek, és évtizedekig a kitörés állapotában maradnak [5]. A FUor és EXor típusokon kívül más, köztes állapotú eruptív fiatal csillagok is léteznek. A fénygörbe azonban önmagában még nem elegendő a fiatal csillagok klasszifikálására. Különösen a kifényesedés kezdeti fázisában optikai és közeli infravörös spektroszkópia szükséges. Az egyik alapvető különbség a FUor és EXor típusú csillagok között, hogy míg az előbbiek spektrumában jellemzően abszorpciós vonalak vannak, az utóbbiakéban emissziós vonalak. Mindkét típus az epizodikus akkréció (tömegbefogás) példája, amin valószínűleg minden csillag keresztülmegegy, mire eléri végső tömegét.

A fiatal csillagok fényességváltozásának tanulmányozásához a fényességük rendszeres mérése szükséges. Ehhez segítséget nyújtanak az égboltfelmérő programok, amelyekből jelenleg több is működik. A Zwicky Transient Facility (ZTF) kétnapos gyakorisággal készít felvételt optikai tartományban az északi égboltról. Az All-Sky Automated Survey for Supernovae (ASAS-SN) a Föld több pontjáról méri az eget 24 távcsővel, és 9 és 18 magnitúdó közötti objektumok fényességéről szolgáltat adatokat. Az Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE) felmérés a chilei Las Campanas Obszervatórium 1,3 méter átmérőjű távcsőjével történik. Ezek a felmérések vagy csak az égbolt egy meghatározott részére koncentrálnak (ZTF, OGLE), vagy inkább a fényesebb objektumok detektálására alkalmasak (ASAS-SN). A következőkben bemutatandó *Gaia* űrtávcső égboltfelmérése az előbb felsoroltakkal szemben az egész égboltot lefedi és halványabb objektumok detektálására is alkalmas.

A *Gaia* űrtávcső és a *Gaia* Science Alerts rendszer

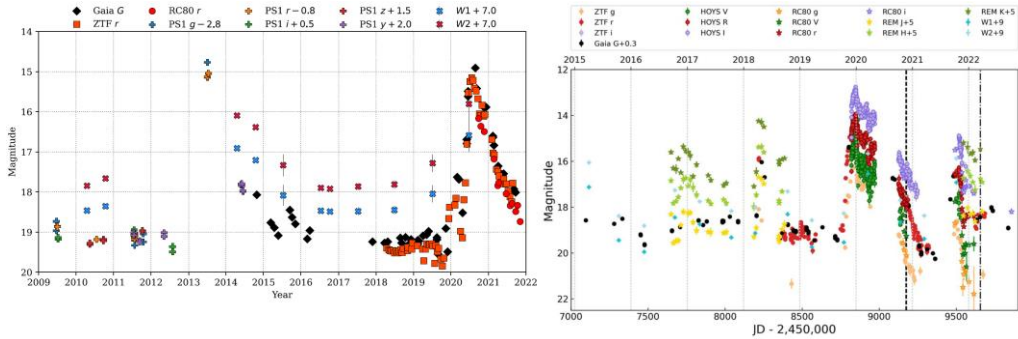
Az Európai Űrügynökség (ESA) által üzemeltetett *Gaia* asztrometriai űrtávcső 2014 óta szolgáltatja több mint egymilliárd csillag pontos pozíció- és fényességadatait. A 68 cm átmérőjű tükörrel ekvivalens fénygyűjtő képességű űrtávcső 3 és 20,7 magnitúdó közötti fényességű csillagok mérését végzi. A *Gaia* adatait nagyjából kétévenként publikálják (megfelelő feldolgozás után), kivéve azokról a forrásokról, amelyek hirtelen fényességváltozáson mennek keresztül. A rövid idő alatt kifényesedő vagy elhalványodó csillagok fénygörbéjét a *Gaia* Science Alerts (tudományos riasztás) rendszerben (<http://gsaweb.ast.cam.ac.uk/alerts/alertsindex>) publikálják [6], amivel lehetővé teszik, hogy ezeket az objektumokat más műszerekkel is megfigyelhessük, fotometriai és spektroszkópiai módszerekkel. A Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (CSFK) Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet Űrcsillagászat, Bolygó- és Csillagkeletkezés csoportjában azt vizsgáljuk, hogy a *Gaia* Science Alerts rendszerben nyilvánosságra hozott objektumok közül melyek a fiatal csillagok, illetve hogy mi a fényességváltozásuk fizikai eredete. A *Gaia* Science Alerts adatbázisához használt algoritmus kezdetben nem volt elég hatékony a fiatal csillagok fényességváltozásainak azonosításában, mivel más típusú objektumok alapján fejlesztették ki. Kutatócsoportunk egy része így egy ESA szerződés keretében továbbfejlesztette a *Gaia* Science Alerts rendszerhez használt algoritmusokat, hogy a fiatal csillagok jellegzetes fényváltozásait jobban felismerjék. Ennek eredményeképpen néhány év alatt jelentősen nőtt a fiatal csillagok aránya a riasztásokon belül.

Ha a *Gaia* Science Alerts rendszer egy potenciális fiatal csillagra riasztást ad, a meglévő, nyilvános archívumokban található adatok adnak arra vonatkozó információt, hogy a riasztott objektum valóban fiatal csillag-e. Amennyiben igen, további méréseket gyűjtünk, hogy a fényességváltozások fizikai okát felderítsük. A csillag fényességét optikai tartományban 1 méter körüli átmérőjű távcsövekkel mérjük, többek között a Piskésetői Observatóriumból, illetve a lengyelországi Mount Suhora Observatóriumból. Erre azért van szükség, mert a *Gaia* Science Alerts rendszer átlagosan havonta egy adatpontot szolgáltat csillagonként, valamint a mérés csak egyetlen széles sávú színszűrővel történik, míg az asztrofizikai vizsgálatok általában többszín-fotometriát igényelnek. Az optikai fotometria mellett fontos, hogy a csillagok fényességét közeli infravörösben is mérjük, erre a célra elsősorban a Kanári-szigeteken és Chilében található távcsöveket használunk. A csillag fényességének mérése mellett fontos, hogy a csillag spektrumát is mérjük, mind optikai, mind közeli infravörös tartományban. Az általunk használt műszerek között van a Nordic Optical Telescope (NOT, La Palma, 2,56 m átmérő), a Telescopio Nazionale Galileo (TNG, La Palma, 3,58 m), a Gran Telescopio Canarias (GTC, La Palma, 10,4 m), a Liverpool Telescope (Tenerife, 2,0 m), a New Technology Telescope (NTT, La Silla, 3,58 m), a Large Binocular Telescope (LBT, Arizona, 8,4 m), a Very Large Telescope (VLT, Cerro Paranal, 8,2 m) és az Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA, San Pedro de Atacama) távcsőrendszer. Ezeket a kutatásokat – a távcsőidőre benyújtott pályázatok írásától kezdve az adatok elemzéséig – több nemzetközi együttműködés részeként végezzük. A legfontosabb együttműködéseink a következő intézetek munkatársaival vannak: INAF-Osservatorio Astronomico di Roma (Olaszország), Varsói Egyetem (Lengyelország) és California Institute of Technology (USA). Csoportunk több *Gaia*-riasztáshoz kapcsolódó fiatal csillag adatait elemezte. A következőkben ismertetjük két EXorra, két FUorra, illetve két más típusú fiatal csillagra vonatkozó eredményeinket.

Eruptív fiatal csillagok keresése a *Gaia* Science Alerts rendszerben

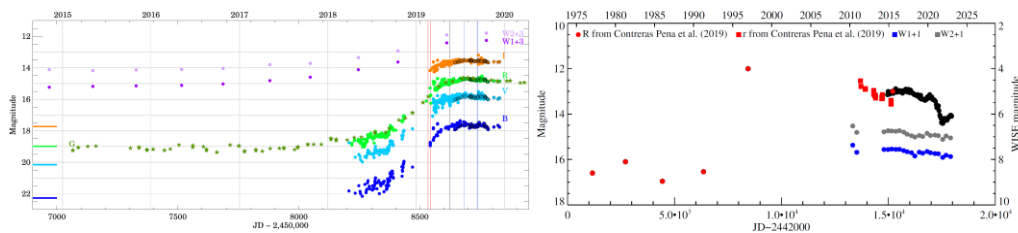
A *Gaia* Science Alerts adatbázis alapján csoportunk két EXor típusú csillagot fedezett fel. A Gaia20eae 2020-ban 3 magnitúdót fényesedett, és archív adatok alapján egy korábbi hasonló kifényesedése is azonosítható volt (2. ábra). A fényesedés amplitúdója és a kitörés ismétlődése EXor-ra utalt. Az optikai és közeli infravörös spektrumok is megerősítették ezt a következtetést: a Gaia20eae spektruma nagyon hasonló az EXor típusú eruptív fiatal csillagok prototípusa, az

EX Lupi spektrumához [7,8]. A másik felfedezett *Gaia*-riasztáshoz tartozó EXornak, a Gaia19fct-nek 2015 óta legalább öt kifényesedését sikerült azonosítani optikai és közeli infravörös fénygörbén (2. ábra). A csillag spektrumában abszorpciós és emissziós vonalak is látszanak, összességében mégis az EXorokra jellemző tulajdonságokat mutat [9].



2. ábra: Két EXor típusú csillag (balra: Gaia20eae, jobbra: Gaia19fct) optikai és infravörös fénygörbéje.

Két FUor típusú csillagot is felfedeztünk a *Gaia*-riasztások között. A Gaia18dvy több mint 4 magnitúdót fényesedett 2018 és 2019 során optikai tartományban (3. ábra). A fényesedés amplitúdója és időskálája is FUor-ra utalt [10], de a csillag FUor eredetének igazolása optikai és közeli infravörös spektroszkópiával történt. A csoportunk által felfedezett másik FUor esete még érdekesebb. A *Gaia* Alert rendszer egy ismert fiatal csillag halványodását jelezte Gaia21elv néven. A csillag korábbi fotometriai adatai alapján kiderült, hogy amellet, hogy fiatal csillag, egy 1990 és 1995 közötti kifényesedést követően még mindig a fényes állapothoz közeli a fényessége, tehát a fénygörbéje alapján valószínűleg FUor (3. ábra). A FUor eredet bizonyítására, illetve a halványodás megértésére optikai és közeli infravörös spektrumokat vettünk fel, és elemeztük azokat. A spektrumokból nyert információ (pl. a detektált abszorpciós vonalak és a magas akkréciós ráta) megerősítette a csillag FUor eredetét. Az is kiderült, hogy a csillag kitörése még nem közelít a végéhez, nem ez vezetett a fényesség hirtelen csökkenéséhez.

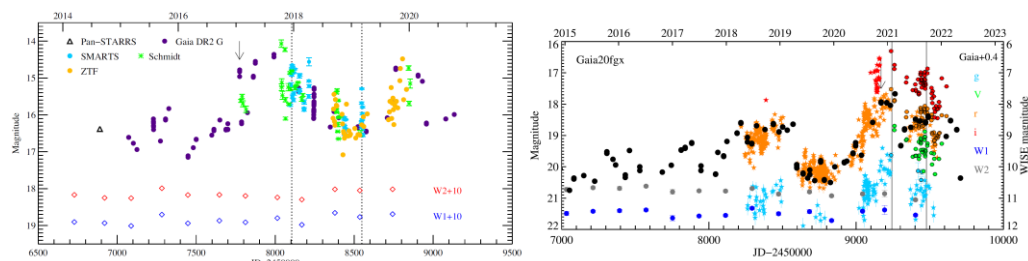


3. ábra: Két FUor típusú csillag (balra: Gaia18dvy, jobbra: Gaia21elv) optikai és infravörös fénygörbéje.

Olyan csillagokat is találtunk, amelyek fénygörbéje EXor típusú eruptív fiatal csillagra is utalhatott volna, de a spektroszkópiai eredmények alapján mégis más típusba tartoznak. Az egyik ilyen objektum a V555 Ori nevű T Tauri típusú csillag, ami 1,5 magnitúdós fényesedése miatt került be a *Gaia*-riasztások közé (Gaia17afn) 2017-ben. A kifényesedés időskálája körülbelül egy év volt, és 2019-2020 körül megismétlődött (3. ábra). A fénygörbék alapján egy rövidebb, néhány napos kvázi-periodikus fényesség-ingadozás is látható volt a V555 Ori esetében. Ez a jelenség tipikus tulajdonsága az AA Tauri típusú csillagoknak, amelyeknél az akkréciós korong egy része a csillagot periodikusan elfedi. Az összes fotometriai és

spektroszkópiai mérés erre a következtetésre vezetett [11].

A másik csillag, ami a fénygörbéje alapján EXor is lehetett volna, de részletesebb vizsgálat alapján kiderült, hogy nem az eruptív fiatal csillagok közé tartozik, a Gaia20fgx. A kifényesedés időskálája nagyjából egy év volt, amplitúdója pedig 2,5 magnitúdó körüli. Az optikai és közeli infravörös spektrumok alapján becslést végeztünk az akkréciós ráta értékére, vagyis arra, hogy egységnyi idő alatt mennyi anyag hullik a csillag körüli korongból a csillagra. Azt találtuk, hogy az akkréciós ráta nem volt olyan magas, mint az eruptív fiatal csillagoknál, hanem ahhoz hasonló, mint amit más, nagyjából ekkora tömegű T Tauri típusú fiatal csillagoknál mértek [12]. Ez arra utal, hogy lehetnek köztes típusok, amelyek akkréciós rátája nem éri el az eruptív fiatal csillagokét, de azokhoz hasonló időskálájú fényességváltozásokat mutatnak.



4. ábra: A V555 Ori (balra) és a Gaia20fgx (jobbra) fiatal csillagok optikai és infravörös fénygörbéje.

Összefoglalás

A *Gaia* Science Alerts rendszer már az eddigi eredmények alapján is sikeresnek bizonyult újabb eruptív fiatal csillagok azonosításában. A rendszer által riasztott források között több érdekes fiatal csillagot elemeztünk részletesen a fénygörbéjük és spektrumuk alapján. Eddigi eredményeink közé tartozik két FUor típusú eruptív fiatal csillag (Gaia18dvy, Gaia21elv), illetve két EXor típusú eruptív fiatal csillag (Gaia20eae, Gaia19fct) felfedezése, illetve két olyan csillagra vonatkozó eredményeket is publikáltunk, amelyek nem sorolhatók az eruptív fiatal csillagok közé (Gaia20fgx, V555 Ori).

A *Gaia* Science Alerts adatbázisba bekerülő eruptív fiatal csillagok részletes elemzésén kívül csoportunk más szempontból is vizsgálja a fiatal csillagokat. A *Gaia* 2022 júniusában közzétett harmadik adatközlése egy, a csoportunk által létrehozott katalógust is tartalmaz fiatal csillagokról [13]. A *Gaia* asztrometriai adatai alapján csoportunk egy része fiatal csillaghalmazok tulajdonságait is vizsgálja [14,15].

A *Gaia* űrtávcső még évekig szolgáltatja majd az adatokat Tejútrendszerünk csillagainak fényességéről és távolságáról, azok alapján pedig sok érdekes eredmény várható még, többek között fiatal csillagokról is.

Köszönetnyilvánítás

A csoport kutatómunkáját az ESA PRODEX 4000132054-es számú projekt (PI: Marton Gábor), illetve a European Research Council (ERC) Horizon 2020 kutatási és innovációs programja (716155 projekt, SACCRED, PI: Kóspál Ágnes) támogatja. Marton Gábor és Nagy Zsófia munkáját a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj is támogatta.

Irodalom

[1] Shu F.H. et al. (1987): Star formation in molecular clouds: observation and theory. Annual Reviews of Astronomy & Astrophysics, 25, 23

- [2] André P. et al. (1993): Submillimeter Continuum Observations of rho Ophiuchi A: The Candidate Protostar VLA 1623 and Prestellar Clumps. *The Astrophysical Journal*, 406, 122
- [3] Fischer, W. J. et al. (2022): Accretion Variability as a Guide to Stellar Mass Assembly. In: *Protostars and Planets VII*. ed. Shu-ichiro Inutsuka, Yuri Aikawa, Takayuki Muto, Kengo Tomida, and Motohide Tamura
- [4] Herbig G.H. (2008): History and Spectroscopy of EXor Candidates. *The Astronomical Journal*, 135, 637
- [5] Audard M. et al. (2014): Episodic Accretion in Young Stars. In: *Protostars and Planets VI*, ed. H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, T. Henning, University of Arizona Press, Tucson, 387
- [6] Hodgkin S. T. et al. (2021): Gaia Early Data Release 3. *Gaia* photometric science alerts. *Astronomy & Astrophysics*, 652, A76
- [7] Cruz-Sáenz de Miera, F. et al. (2022): Recurrent Strong Outbursts of an EXor-like Young Eruptive Star Gaia20eae. *The Astrophysical Journal*, Volume 927, Issue 1, id.125, pp.
- [8] Ghosh, A. et al. (2022): Gaia20eae: A Newly Discovered Episodically Accreting Young Star. *The Astrophysical Journal*, Volume 926, Issue 1, id.68, pp.
- [9] Park, S. et al. (2022): Photometric and Spectroscopic Study of the EXor-like Eruptive Young Star Gaia19fct. *The Astrophysical Journal*, Volume 941, Issue 2, id.165, pp.
- [10] Szegedi-Elek E. et al. (2020): Gaia 18dvy: A New FUor in the Cygnus OB3 Association. *The Astrophysical Journal*, 899, 130
- [11] Nagy Z. et al. (2021): Dipper-like variability of the *Gaia* alerted young star V555 Ori. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 504, 185
- [12] Nagy, Z. et al. (2022): Photometric and spectroscopic study of the burst-like brightening of two *Gaia*-alerted young stellar objects. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 515, Issue 2, pp.1774-1787
- [13] Marton G. et al. (2023): *Gaia* Data Release 3 Validating the classification of variable Young Stellar Object candidates. *Astronomy & Astrophysics*, in press
- [14] Szilágyi M., Kun M., Ábrahám P. (2021): The *Gaia* view of the Cepheus flare. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 505, 5164
- [15] Szilágyi, M. et al. (2022): The *Gaia* view of the Cepheus OB2 association. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 520, 1390

Éghajlatváltozás

Szarka László

Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

Különféle földi idősorok elemzése (már a Föld ún. egyensúlyi hőmérsékletét kialakító alapvető tényezők: TSI-é, albedóé is), továbbá a legkülönbébb földfizikai jelenségekben lényegében egyidejűleg tapasztalt trendváltozások sora arra enged a következtetni, hogy a földi éghajlatváltozás a természet játéka. Napjainkban különösen izgalmas tudományos fejlemények zajlanak a lehetséges belső (geodinamikai, pl. tengerfenéki vulkanizmus) és külső (a Napból, a Naprendszerből, a kozmoszból eredő) hatóerők feltárásában. Nincs kellőképpen előtérben a három halmazállapotú földi víz éghajlati jelentősége sem, ami pedig a Nap-Föld-világűr rendszer földi tartományában szakadatlanul biztosítja a negentrópiát. Amennyiben a természeti folyamatokat nem értjük kellőképpen, addig az antropogén éghajlati hatásokat még megbecsülni sem vagyunk képesek. Be kell látnunk, hogy a természetet csupán töredékesen ismerjük; csak annyit tudhatunk, hogy a természeti törvények terén rend van. A megismerés útja a megfigyelés, többek között földi obszervatóriumi és űreszközökkel.

Motiváció

A Nap-Föld-világűr összes ismert elemét magában foglaló ún. „földrendszerben” mindenütt igen széles spektrumú tér- és időtartománybeli változások, szinte kibogozhatatlan kölcsönhatások, kényes egyensúlyok és azok körüli billegések figyelhetők meg. Bármit és bárhol mérve, minden örökösen változik, matematikailag leginkább turbulens módon. Az éghajlat – a földfelszín körüli almahéjszerű vékonyságú légkör jellemzője – esetében is ugyanez az alaphelyzet.

A tudományos megismeréshez elengedhetetlen, hogy az alapdefiníciók precízek legyenek. E követelmény már olyan fogalmak esetén sem teljesül, mint az éghajlattudomány és a klímarendszer. Az ENSZ 1992-es Éghajlatváltozási Keretegyezményében [1] ugyanis az éghajlatváltozás definíciójából kivették a természeti tényezőket. Sőt, a klímarendszer fogalmából hiányoznak a külső erők, például a Nap. (A Keretegyezmény 1. cikkelyének 2. és 3. pontja szerint „2. *“Climate change” means a change of climate which is attributed directly or indirectly to human activity that alters the composition of the global atmosphere and which is in addition to natural climate variability observed over comparable time periods.* 3. *“Climate system” means the totality of the atmosphere, hydrosphere, biosphere and geosphere and their interactions.*”) A döntéshozók hajlamosak mindenféle megfigyelt változást az általuk elfogadott definícióban szereplő tényezőknek tulajdonítani.

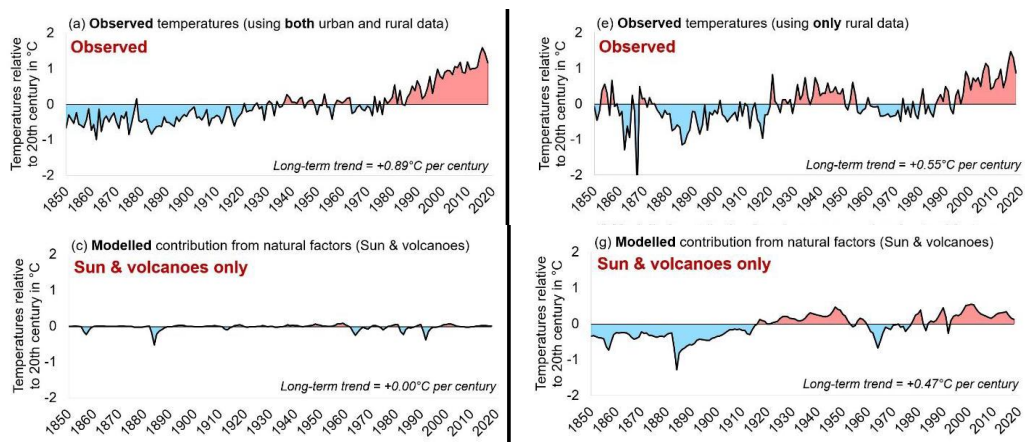
Az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet elektromágneses tudományos iskolájának kutatójaként, egyetemi oktatóként, majd tudományszervezőként mindig érdekelték a tágabb összefüggések. Nyugdíjba menetelem óta igyekszem intenzíven és szisztematikusan utána járni a jelenkori éghajlatváltozás kérdéseinek [2], [3], és tisztázni alapvető félreértéseket. Az áttekintés mellett friss eredményekbe is bepillantunk.

TSI, albedó

A Stefan-Boltzmann törvény szerint a Föld ún. egyensúlyi (légkör nélküli) hőmérsékletét a TSI (Total Solar Irradiance, teljes napbesugárzás) és az albedó egymással egyenrangúan befolyásolja.

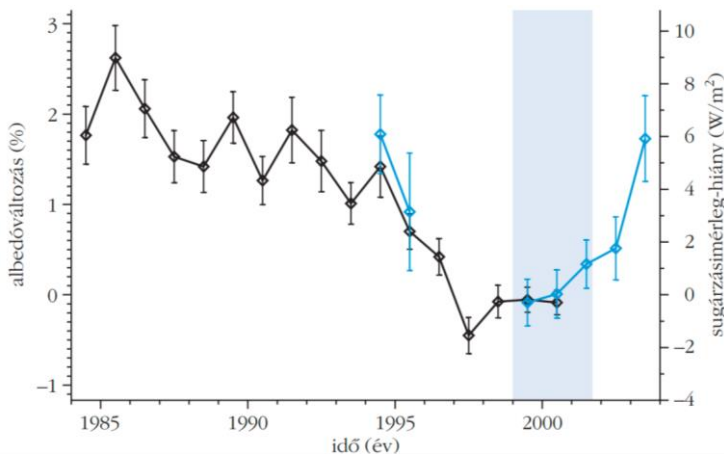
Egy 2021-es tanulmányban [4] kimutattuk, hogy a műholdas TSI mérésekből nagyon

sokféle idősor-kompozit állítható össze. Ha egy nagy változékonyságú TSI-idősort fogadnánk el (szemben az IPCC által egyedül lehetségesnek tartott kis változékonyságú TSI-időssorral), valamint, ha az északi félteke hőmérsékleti adataiból kivennénk az elvárosiasodott meteorológiai állomások adatait, akkor a jelenkori globális felmelegedés nagyobbik része megmagyarázható lenne TSI-változások által (1. ábra). A Nap jelenkori éghajlatot változtató hatására levonható következtetés tehát attól függ, hogy az egyformán lehetséges (ACRIM és PMOD) adatsorokból ki melyiket fogadja el [5]. Egy közelmúltbeli előadás [6] rejtélyes ellentmondásokra hívja fel a figyelmet. Kalevi Mursula 2023. május 3-án megjelent tanulmánya pedig – úgy tűnik – konkrét magyarázatot ad a hosszú távú naptevékenység, a napmágnesség, a dinamó, a napszél és a Nap-Föld térség nagy időléptékű változásaira [7].



1. ábra: Mért hőmérsékleti (fent), és modellezett hőmérsékletre átszámított TSI-adatok az 1850–2020 évekre. Balra az IPCC, jobbra a Connolly et al.-féle feltételezésekkel. Forrás: [4]

Bolygónk albedója műholdak segítségével és a Holdról visszaverődő ún. földfény földi obszervatóriumi mérésével is meghatározható. A két módszer között az első meggyőző egyezést egy 1997 folyamán tapasztalt albedó-trendváltozásnak köszönhetően lehetett kimutatni. A néhány tizedszázalékos albedóváltozás a sugárzásimérleg-egyensúlyban 1 W/m^2 -nyi eltolódást jelent [8, 9].

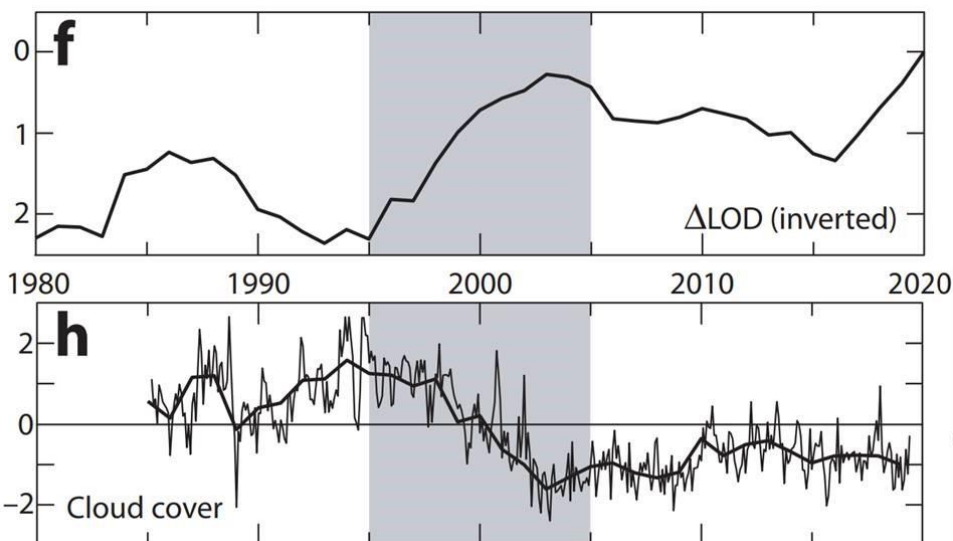


2. ábra: Rekonstruált (fekete) és földfényméréssel meghatározott (kék) éves albedóváltozások (1994–1995 és 1999–2003). Forrás: [8]

Egyidejű változások sokasága

Észak-Amerika kontinentális talapzatán három évtizede méri a tengerfenéki hőhullámok idő- és térbeli eloszlását [10]. Amint az eredeti cikk 5. ábráján látható, az egyik csomósodás 1997-1998-ban volt megfigyelhető (Kalifornia, Alaszka partjainál, majd a Bering-tengerben, gyorsan egymás után), egy második csomósodás pedig 2015-2016-ra tehető. Egy friss tanulmányban a világ óceánjai fenékdomborzatában radarműholdakkal mintegy 19 ezer tengeri vulkánt mutattak ki [11]. Amennyiben nem csak a selfeken, hanem a Csendes-óceán kiterjedt medencéjében mindenütt ismernénk a hasonló vulkánkitörési csomósodásokat, feltehetően közelebb jutnánk az El Niño-jelenség megértéséhez [12].

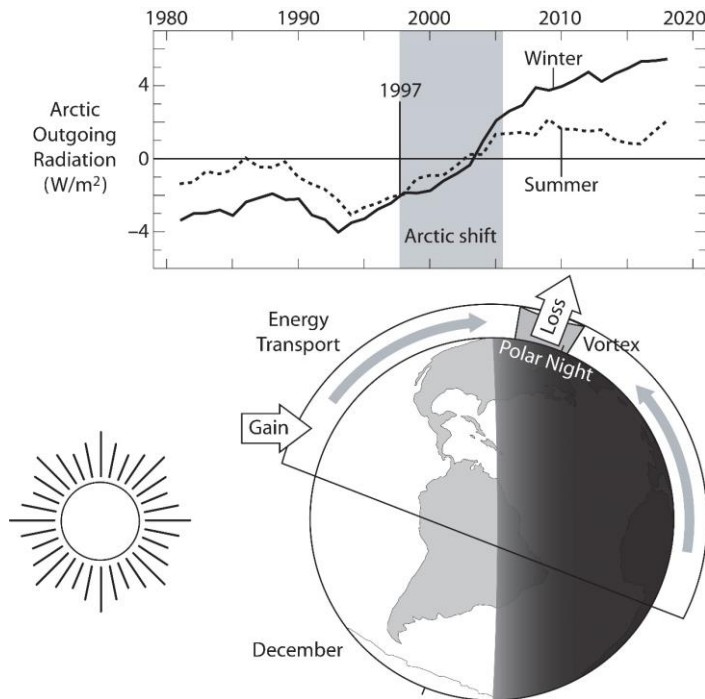
Összesen 14 földfizikai indikátor 1980-2020 közötti menetét megfigyelve [13] azt vette észre, hogy a négy évtized alatti legnagyobb változások 1995-2005 között játszódtak le. [13] 11.6. ábráján például a sztratoszférikus vízgőztartalom hirtelen, 2001-ben csökkent le. A felhőborítottság már korábban elkezdett csökkenni, miközben a Föld forgási sebessége pedig nőni kezdett (azaz a naphossz csökkent: a 86400 másodperchez képest néhány milliszekundummal). Az utóbbi két idősor látható a 3. ábrán.



3. ábra: LOD (Length of Day, naphossz, ms) és a felhőborítottság (%) változások 1980-2020 között. Forrás: [13]. Az eredeti ábra 14 különféle indikátort mutat.

A kiváltó okot (hogy például külső-e vagy belső) nem ismerjük, de az egyik következmény biztosan az [13, 14], hogy a téli (az északi sarkvidéki téli) és a nyári (a déli sarkvidéki téli) infravörös hőkisugárzás egymáshoz való viszonyában ugyanebben az időszakban (1997-től kezdődően) jelentős átrendeződés ment végbe (4. ábra). Az ábra alsó része a forgó és napsütötte Föld éghajlatának valós fizikai alapmodelljét mutatja, benne az egyenlítői energiaelnyelést és a sarkvidéki energiavesztést, valamint az egyenlítő és a sarkvidékek közötti kiegyenlítő energiaszállítást. Látható, hogy több W/m^2 -nyi teljesítménysűrűség-változásokról van szó.

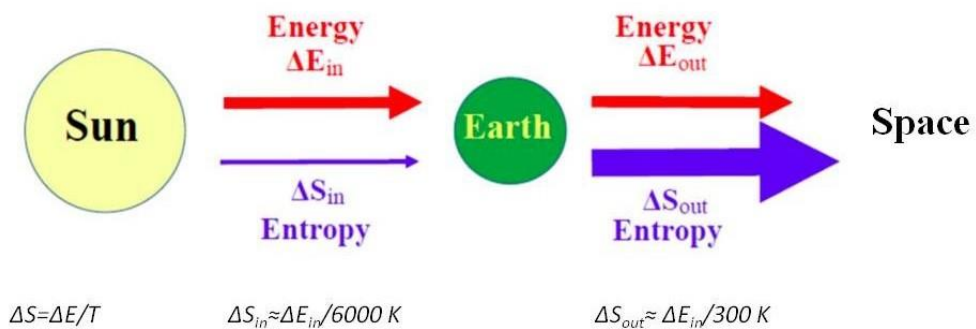
Izgalmas fejlemény az is, hogy befolyásolja-e a 11 éves naptevékenységi ciklust a bolygóegyüttállások árapályhatása. Egyes friss tanulmányok [15] szerint úgy tűnik, hogy igen, de egy másik [16] szerint ez a mintegy egy évtizede itt-ott felbukkanó feltételezés kizárható. E kérdés Barcza Szabolcsot is foglalkoztatta [17].



4. ábra: Fent: 1997-es klímaváltozás során a sarkvidéki téli kimenő sugárzás (az Északi-sark vidékén) sokkal nagyobb mértékben nőtt, mint a nyári kimenő sugárzás (a déli sarkvidéken).
Lent: a földi éghajlat alapmodellje: a Nap süt, a Föld forog. Forrás: [14]

Energia- és entrópia

A földrendszer (a Nap-Föld-világűr rendszer) magától értetődő természetességgel gondoskodik a Föld entrópiájának csökkenésétől, azaz a „rendezettség” növekedéséről a Földön. Amint a 2. ábra mutatja, a Föld egy melegebb testtől (a Naptól) magasabb hőmérsékleten vesz fel energiát és egy jóval hidegebb közegnek (a világűrnek) adja le, alacsonyabb hőmérsékleten.



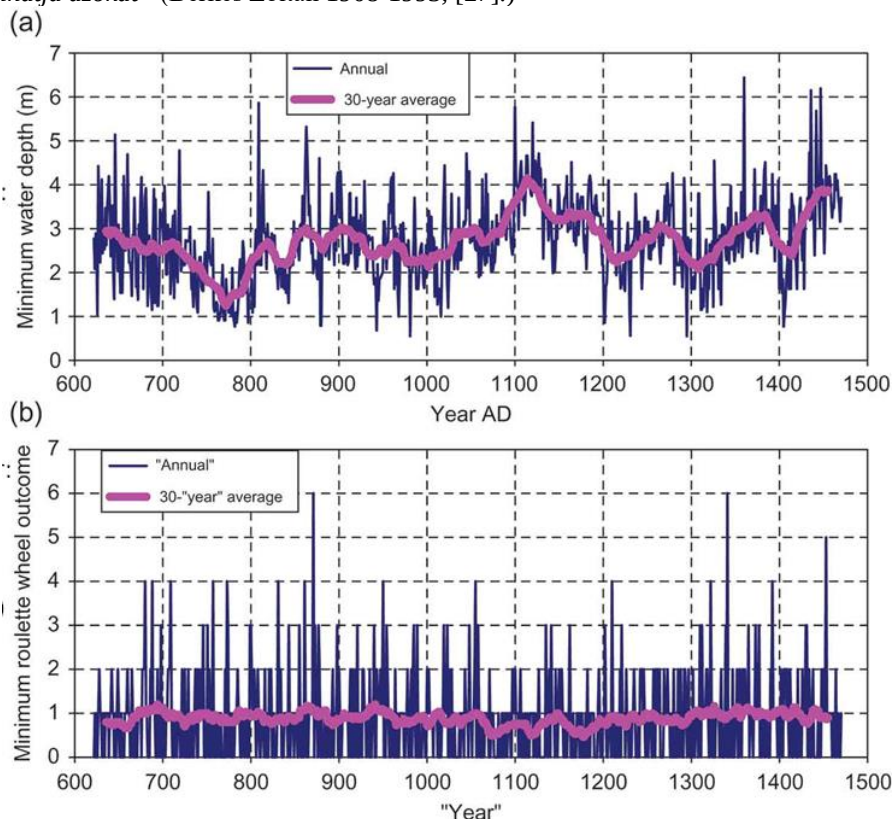
5. ábra: A Nap-Föld rendszerben a sugárzási energia-egyensúlyának a Föld entrópia-mérlege minden időpillanatban negatív. Forrás: [20]

A rendszer kritikus eleme a három halmazállapotú földi víz megléte, ami ahhoz kell, a földi hőmérséklet ne szaladhasson el. (Lényegében egy „termosztát”-ról van szó.) Röviden úgy is mondható, hogy a Földet a Nap élteti. E megközelítésben – Csernai László [18, 19] szerint – még olyan puha fogalmaknak is lehetséges egzakt fizikai jelentést adni, mint a „fenntartható fejlődés” [20], aminek forrása a természeti eredetű entrópiacsökkenés („negentrópia”).

Hadd meséljenek az adatok!

A földrendszer bonyolult, de – mivel a természeti törvények terén rend van – a mai szintnél jóval közelebb lehet jutni a megértéséhez. „A természet megértésének kulcsa a harmónia s a harmónia a számszerűség. A természet számokkal megérthető, és minden harmónia: A dolgok lényege a szám!” Ezt adta Püthagórasz szájába – A szférák harmóniája című, színpadra szánt tanulmányában – Kövesligethy Radó (1862-1934) [21, 22, 23]. A mai tennivaló (kvantitatív megfigyelés földi obszervatóriumi- és űreszközökkel és a mért adatok leképezése) is ebből következik. „Let the data speak!” – mondta Guus Berghout 2021-ben [24].

E szemlélet legkorábbi és máig legszebb példája a Nílus középkori vízszintváltozásának egzakt, kvantitatív megfigyelése [25, 26]. A Kairó mellett 622 és 1458 között mért éves minimumszintek és azok 30 éves átlaga (3. ábra) teli van évtizedeken át tartó perzisztens változásokkal. „Éghajlatingadozások tehát vannak, sőt néha oly mértékűek és tartalmúak, hogy akinek nincs módjában 50-100 évet áttekinteni, egyenirányú változásnak gondolhatja azokat” (Berkés Zoltán 1908-1993, [27].)



3.ábra: A Nílus éves vízszintminimumának alakulása 847 éven át a Kairó melletti Roda vízállásjelző állomás adatai alapján, (b) Véletlenszám-generátorral szimulált ruletteredmények sorozata. Forrás: [26].

Irodalom

- [1] UN FCCC (1992), <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- [2] Szarka L. (2021), Magyar Geofizika, 62, 1, 7-26
- [3] Szarka L. (2022), Fizikai Szemle 72, 8, 244-247
- [4] Connolly R. et al. (2021), Astron&Astroph, 21, 6, 131; magyarul: Geomat Közl 24, 45-127
- [5] Robson J. (2022), Looking at the Sun, climatediscussionnexus.com
- [6] Seppälä A. (2022), <https://www.issibern.ch/game-changers-space-environment/>
- [7] Mursula K. (2023), Astronomy and Astrophysics (in print)
- [8] Pallé E. et al. (2016), Geoph. Res. Letters 43, 4531–4538
- [9] Szarka L. (2021), Fizikai Szemle, 71, 11, 375-379
- [10] Amaya, D.J. et al. (2023), Nat Commun 14, 1038
- [11] Gevorgian J. et al. (2023), Earth and Space Science, 10, 4, e2022EA002331
- [12] Yim W. (2017), Imperial ENGINEER Spring 2017, 14-15
- [13] Vinós J., (2022), Climate of the Past, Present and Future. A Scientific Debate, 2nd ed., Critical Science Press, Madrid
- [14] Vinós J., May A. (2023), Magyar Demokrata, 14, 44-45
- [15] Bianchini A., Scafetta N. (2023), EGU23-4472
- [16] Cionco R. G., Kudryavtsev S. M., Soon W. (2023), Solar Physics (in print)
- [17] Szarka L. (2021), Magyar Geofizika 62, 4, 239-247
- [18] Csernai L. P. et al. (2017): Physica A 473, 363
- [19] Csernai L. P. et al. (2016), Int. J. of Central European Green Innovation 42, 39-50.
- [20] Szarka L. et al. (2023), pbk.info.hu/archiv/pbkforum/PBK_ENERGIA_2023_02_21.pdf
- [21] Kövesligethy R. (1908): A szférák harmóniája. In: Ponticulus Hungaricus 2005, 9, 1
- [22] Vargha D. (2011), In: Szabados.L. (szerk.): Kövesligethy Radó és az asztrofizika kezdetei Magyarországon. Konkoly Observatory, Monographs, 8, 6–50
- [23] Szarka L. (2023), Magyar Geofizika, 64, 1 (in print)
- [24] Berkhout G.. (2021), <https://www.youtube.com/watch?v=Msy3sFneOdA>
- [25] Hurst H. E. (1951), Transactions of the American Society of Civil Engineers 116, 1
- [26] Koutsoyiannis D. (2012), Hydrological Sciences Journal 58, 6, 1177-1197
- [27] Berkes Z (1940), Az Időjárás 44, 7–8, 149–154