

Magyar Űrkutatósi Fórum 2019

VÁLOGATOTT KÖZLEMÉNYEI

Sopron, 2019. április 24-26.



ISBN 978-963-7367-22-9

Szerkesztette:

Bacsárdi László, Szűcs Eszter, Wesztergom Viktor

Programbizottság:

Almár Iván

Bacsárdi László (társelnök)

Csurgai-Horváth László

Földvály Lóránt

Hirn Attila

Horvai Ferenc

Kiss László

Lichtenberger János

Németh Zoltán

Wesztergom Viktor (társelnök)

A Programbizottság titkára: Szűcs Eszter

Helyi szervezőbizottság:

Bozóki Tamás

Bozsó István (koordinátor)

Buzás Attila

Czanik Csenge

Czirok Lili

Fodor Csilla

Rubóczki Tibor

Szabó Csongor

Szabóné André Karolina

Szántó Marcell

Szárnya Csilla

További közreműködők: Barta Veronika, Brányi Gyöngyi

Kiadja:

a Magyar Asztronautikai Társaság

1044 Budapest, Ipari park u. 10.

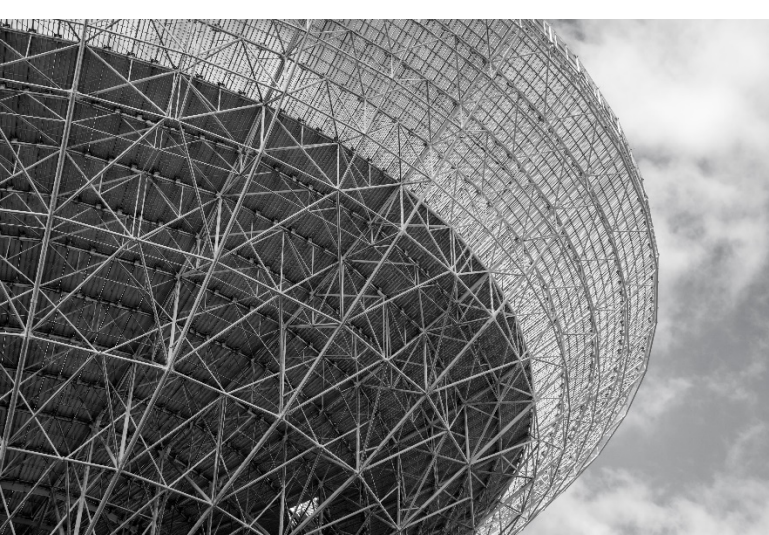
www.mant.hu

Budapest, 2019

Felelős kiadó: Hirn Attila főtítkár

Minden jog fenntartva.

A Magyar Űrkutatási Fórum 2019 konferencia közleményeinek kiadványa az elektronikus kiadványok formátumához igazodva a kéziratokat oldalszámozás nélkül, cikk számmal ellátva közli, amely az oldalszámozáshoz hasonlóan alkalmas a közlemények bibliográfiai adatbázisokban való azonosításra.



Köszöntő

A Magyar Asztronautikai Társaság (MANT) és a Geodéziai és Geofizikai Intézet (GGI) közös kezdeményezésére a legrégibb hagyományokkal rendelkező hazai űrkutatási szakmai-tudományos rendezvény a 2015-ös megújulását követően ismét Sopronba látogat. Az Ionoszféra- és Magnetoszféra-fizikai Szemináriumok 1972-ben éppen Sopronban kezdődött sorozatában ez már a 31. alkalom. 2015 óta a rendezvény új nevet visel, *Magyar Űrkutatási Fórum*. A név és a tartalom megújításának célja, hogy minél szélesebb körű bemutatkozási lehetőséget teremtsen a magyar űrkutatás és az űripár szereplői számára. A konferencia kiemelt hangsúlyt fektet a fiatalok, egyetemisták, doktoranduszok kutatómunkába való bevonására. A fórum elősegíti a véleménycserét, a meglévő szakmai kapcsolatok erősítését, új együttműködések kialakítását a hazai űrkutató-közösségen belül.

A rendezvény rangját jelzi, hogy *Ferencz Orsolya* Űrkutatásért felelős miniszteri biztos ezen a fórumon mutatja be a kidolgozásban résztvevő szakértőkkel együtt a Nemzeti Űrstratégia tervezetét a hazai az űrkutatás és űripár szereplőinek egy kerekasztal-beszélgetés keretében.

A rendezvényen meghívott előadást tart *Kiss László* akadémikus, az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont főigazgatója az űrcsillagásatról, valamint *Wesztergom Viktor* a Geodéziai és Geofizikai Intézet igazgatója a geofizika űrkutatási kapcsolódásairól. A 24 plenáris előadás és 23 poszterelőadás többek közt az űrfizika, földmegfigyelés, űridőjárás, napfizika, geofizika, légkörfizika, űrcsillagászat, planetológia, adatelemzés témáit érinti. Alkalom nyílik az űrkutatáshoz, űrtevékenységhez kapcsolódó más tudományterületeken, műszaki fejlesztésekben elért hazai eredmények bemutatására, megvitatására is.

A rendezvényen nagy hangsúlyt kap a poszterszekció, bízunk ugyanis abban, hogy a poszterelőadásokkal is biztosítani tudjuk új témák és új szereplők megjelenését. A poszterek a konferencia teljes időtartama alatt megtekinthetők, továbbá lehetőség van a poszter rövid tartalmi összefoglalójának szóbeli bemutatására, egy-egy érdekes eredmény felvillantására vagy izgalmas kérdés figyelemfelkeltő felvetésére.

A szervezést a konferencia a programbizottsága (*Almár Iván*, *Bacsárdi László*, *Csurgai-Horváth László*, *Földváry Lóránt*, *Hirn*

Attila, Horvai Ferenc, Kiss László Lichtenberger János, Németh Zoltán, Wesztergom Viktor és Szűcs Eszter titkár), másrészt a GGI doktoranduszaiból álló helyi szervezőbizottság segítette. Fáradhatatlan munkájukat ezúton is köszönjük!

Sopron, 2019. április 23.

Bacsárdi László

alelnök

Magyar Asztronautikai Társaság

Wesztergom Viktor

igazgató

MTA CSFK Geodéziai és
Geofizikai Intézet



A konferencia programja



**2019. április 24. (szerda), helyszín: MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai
Intézet Tárczy-Hornoch Antal előadó**

12:30	13:15	Regisztráció
13:15	13:30	Megnyitó Kiss László, az MTA CSFK főigazgatója Ferencz Orsolya, Úrkutatásért felelős miniszteri biztos – Külgazdasági és Külügyminisztérium Bacsárdi László, a MANT alelnöke
13:30	14:30	Nemzeti Úrstratégia kerekasztal-beszélgetés
14:30	14:50	kávészünet
14:50	16:10	Nemzeti Úrstratégia kerekasztal-beszélgetés
16:10	16:30	kávészünet
		Plenáris előadások (szekcióvezető: Bacsárdi László)
16:30	16:50	Illés Erzsébet, Almár Iván, Nuspl János: A Budapesten és Baján műholdakkal végzett felsőlégköri kutatások története és eredményei az interneten
16:50	17:10	Kálmán Béla: A 24. napciklus lefolyása és pár érdekes eseménye
		2 perces szóbeli poszter bemutatók (szekcióvezető: Bacsárdi László)
17:10	18:00	Barta Veronika, Bányai László, Molnár Csaba, Piri Dániel, Szűcs Eszter, Wesztergom Viktor: Digitális ionoszféra radar (DPS4D) a Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban: új megfigyelési és kutatási lehetőségek
		Barta Veronika, Berényi Kitti Alexandra, Kis Árpád, Satori Gabriella: Az ionoszféra kutatás legújabb eredményei az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézetében
		Bozóki Tamás, Satori Gabriella, Steinbach Péter: Magnetoszférikus folyamatok monitorozása a Schumann- rezonancia sávban
		Buzás Attila, Barta Veronika, Bór József: Légköri elektromos tér a növekvő fák árnyékában
		Domján Ádám, Hegymegi Csaba, Hegymegi László: Vektor magnetométer kalibrációs módszerek
		Erdős Géza, Hevesi László, Lemperger István, Nagy János, Németh Zoltán, Wesztergom Viktor: Mágneses Nulltér Laboratórium (ZBL) létrehozása

	Frey Sándor, Grenerczy Gyula, Farkas Péter: A Copernicus program és a Sentinel műholdak – népszerűen
	Hegymegi László, Merényi László, Szöllősy János, Hegymegi Csaba, Domján Ádám: Berendezés a földmágneses térvektor irányának automatikus abszolút mérésére
	Kis Árpád, Lemperger István, Barta Veronika, Vörös Zoltán: A diffúz ionok anomális viselkedése a földi lökéshullám környezetében
	Kiszely Márta, Hudoba György, Czanik Csenge: A MarsRengések program elindítása magyar középiskolások számára
	Kovács Péter, Navin Kumar Dwivedi, Marius Echim, Emiliya Yordanova: Turbulens dinamikai folyamatok spektrális vizsgálata a Vénusz és a Föld magnetoszféra burkában
	Kuslits Lukács, Lemperger István, Ciaran Beggan, Prácser Ernő, Bozsó István, Szalai Sándor, Wesztergom Viktor: A Földi mágneses főtér gépi tanulás segítségével előállított ekvivalens forrásmodellje
	Madár Ákos, Opitz Andrea, Erdős Géza: Tesztadatsorok készítése az ESA Solar Orbiter Magnetometer számára
	Milánkovich Dorottya, Bacsárdi László: Űrtábori tapasztalatok – Űrtevékenységgel kapcsolatos ismeretek átadása magyar fiatalok számára
	Muraközy Judit: A félgömbi napfoltciklusok kapcsolata az interplanetáris és a geomágneses terekkel
	Steinbach Péter, Ferencz Orsolya, Lichtenberger János: Mit mondanak a műholdas mérések az anizotróp plazmában ferdén terjedő jelek kétféle modelljéről?
	Strádi Andrea, Szabó Julianna, Hirn Attila: 10 éve a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén – a DOSIS projekt
	Szabóné André Karolina, Bór József, Steinbach Péter, Satori Gabriella: Schumann-rezonancia tranziensek és forrásvillámaik automatikus azonosítása a nagycenki ELF mérések és a WWLLN adatbázis alapján
	Szárnya Csilla, Pásztor Szilárd: Határréteg-áramok vizsgálata az MMS műholdak mágneses mérései alapján
	Szűcs Eszter, Bozsó István, Bányai László, Szárnya Csilla, Wesztergom Viktor: A topográfia-dinamika nagyléptékű leképezése: hazai Sentinel-1 radarinterferometriai eredmények

		Vinkó József, Pál András: Szupernóva-kutatás a TESS műhold adataiból
		Vizi Pál Gábor: Égitest- és Állomásközi Szállító "Csövek" Kisméretű Áramló Űreszköz Rajokkal
		Zábori Balázs, Hirn Attila, Gerecs András, Erdős Boglárka, Baranyai Anna, Apáthy István: TRITEL kozmikus sugárzási mérőműszer az ESEO műhold fedélzetén
18:00	19:00	Poszterbemutató (borkóstolóval egybekötve) a Kántás Károly előadásban
19:30		Vacsora a Deák étteremben

2019. április 25. (csütörtök), helyszín: MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet Tárczy-Hornoch Antal előadó

9:00	9:20	Keynote lecture – Kiss László (MTA Csillagászat és Földtudományi Kutatóközpont): Kisbolygók fotometriája: új eredmények az űrből és a Földről
		Plenáris előadások (szekcióvezető: Kiss László)
9:20	9:35	Lichtenberger János, Ferencz Csaba, Szegedi Péter, Ferencz Orsolya, Solymosi János, Hetényi Tamás, Géczy Gábor, Pálos Zoltán, Balázs András, Troznai Gábor: A Trabant űrmisszió
9:35	9:50	Heilig Balázs: ULF hullámok a felső ionoszférában
9:50	10:05	Bór József, Zelkó Zoltán, Hegedüs Tibor, Jäger Zoltán, Janusz Mlynarczyk, Martin Popek, Szabóné André Karolina, Hans-Dieter Betz: Táncoló vörös lidércek és óriásvillámok
10:05	10:20	Vitaforum
10:20	10:40	Kávészünet
		Plenáris előadások (szekcióvezető: Csurgai-Horváth László)
10:40	10:55	Timár Anikó, Németh Zoltán, Szegő Károly: Az üstököskutatás legújabb eredményei a Rosetta űrszonda mérései alapján
10:55	11:10	Németh Zoltán: Az ion-semleges kölcsönhatás és szerepe a magnetoszférák szerkezetének alakításában
11:10	11:25	Erdős Géza, Dósa Melinda: Hosszú élettartamú, visszatérő struktúrák a bolygóközi mágneses térben

11:25	11:40	Zábori Balázs, Hirn Attila, Gerecs András, Apáthy István: Komplex mérőműszer fejlesztés az Európai Űrügynökség SSA program űridőjárási műhold konstellációja számára
11:40	11:55	Vitaforum
11:55	14:30	Ebéd a Deák étteremben
Plenáris előadások (szekcióvezető: Dósa Melinda)		
14:30	14:50	Keynote lecture – Wessztergom Viktor (MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet): Űr(GEO)fizika
14:50	15:05	Frey Sándor: Hogyan szolgálja a rádiócsillagászat a Jupiter-holdak űrszondás kutatását?
15:05	15:20	Galambos Máté, Bacsárdi László, Belső Zoltán, Gerhátné Udvary Eszter, Gódor Győző, Imre Sándor, Kis Zsolt, Koller István, Kornis János, Papp Zsolt, Zsolczai Viktor: Helyzetjelentés az első magyar szabadtéri kvantumcsatorna fejlesztéséről
15:20	15:35	Csurgai-Horváth László: Csapadékszóna térbeli eloszlásának becslése passzív műholdas módszerrel
15:35	15:50	Vitaforum
15:50	16:10	Kávészünet
Plenáris előadások (szekcióvezető: Almár Iván)		
16:10	16:25	Szabó M. Gyula, Derekas Aliz, Dobos Vera, Bókon András: Exobolygók fotometriája a CHEOPS, PLATO és ARIEL űrtávcsövekkel
16:25	16:40	Kiss Csaba, Szabó Róbert, Ábrahám Péter, Kóspál Ágnes, Moór Attila, Szabó Gyula, Vida Krisztián: Magyar részvétel az ESA ARIEL missziójának tudományos programjában
16:40	16:55	Baranyi Tünde, Ludmány András: Flertevékenység előrejelzése napfolt-adatokból
16:55	17:10	Kereszturi Ákos, Kapui Zsuzsanna, Pál Bernadett, Skultéti Ágnes: Alföldi szikestől az Atacama-sivatagig: miként támogatjuk az ExoMars rover fúrásait
17:10	17:25	Vitaforum
18:30		Konferenciafogadás a Perkovátz-ház szervezésében a Kántás Károly előadóteremben

**2019. április 26. (péntek), helyszín: MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai
Intézet Tárczy-Hornoch Antal előadó**

		Plenáris előadások (szekcióvezető: Földváry Lóránt)
9:30	9:45	Muraközy Judit: Foltcsoportok bomlása nagy felbontású adatsoron
9:45	10:00	Juhász Lilla, Lichtenberger János, Yoshiharu Omura, Reinhard H. W. Friedl: A sugárzási övek forró elektronjainak forrása: a populáció vizsgálata földön detektált kórusok alkalmazásával
10:00	10:15	Vörös Zoltán, Yordanova Emiliya: Csavart erővonalú mágneses fluxuscsövek a napszélben
10:15	10:30	Koronczay Dávid, Lichtenberger János: Villám keltette whistlerek forrásterülete és átviteli tényezője
10:30	10:45	Vitaforum
10:45	11:35	Kávészünettel egybekötött poszterbemutató a Kántás Károly előadóban
		Plenáris előadások (szekcióvezető: Strádi Andrea)
11:35	11:50	Hirn Attila, Apáthy István, Strádi Andrea: A 2017. szeptemberi koronakidobódás az űrdozimetria szemszögéből
11:50	12:05	Erdős Boglárka, Hirn Attila, Zábori Balázs: Űrdozimetriai célú részecskelevezetők modellezése Monte Carlo módszerekkel
12:05	12:20	Dósa Melinda, Timár Anikó, Bebesi Zsófia, Opitz Andrea, Kecskeméty Károly: Űridőjárás vizsgálata szimultán mérésekkel a belső helioszférában
12:20	12:35	Földváry Lóránt: GRACE és GRACE-FO idősorok elemzése
12:35	12:50	Vitaforum
12:50	13:00	Zárszó - Bacsárdi László
13:00	14:00	Büfébéd az 1. emeleti előtérben

Tartalomjegyzék

Baranyi Tünde, Ludmány András, Muraközy Judit:
Flertevékenység előrejelzése napfolt-adatokból

..... MUF2019-K01

Bozóki Tamás, Satori Gabriella, Steinbach Péter:
Magnetoszférikus folyamatok monitorozása a Schumann-rezonancia sávjában

..... MUF2019-K02

Buzás Attila, Barta Veronika, Bór József: *Légköri elektromos tér a növekvő fák árnyékában*MUF2019-K03

Erdős Boglárka, Hirn Attila, Zábori Balázs: *Úrdozimetriai célú részecsketeleszkópok modellezése Monte Carlo módszerekkel*

..... MUF2019-K04

Erdős Géza, Hevesi László, Kuslits Lukács. Lemperger István, Lichtenberger János, Németh Zoltán, U. Nagy Gábor, Veres Miklós, Wesztergom Viktor: *Mágneses nulltér-laboratórium (ZBL) megvalósítása*MUF2019-K05

Kálmán Béla: *A 24. napciklus lefolyása és pár érdekes eseménye*.....

- MUF2019-K06
- Kalocsai Lilla, Madár Ákos, Opitz Andrea, Erdős Géza, Kecskeméty Károly, Szabó Klaudia, Dósa Melinda, Forczek Bianka, Földy Lajos: *Tesztadatsorok készítése az ESA Solar Orbiter magnetométer számára*..... MUF2019-K-07
- Kereszturi Ákos, Kapui Zsuzsanna, Pál Bernadett, Skultéti Ágnes: *Alföldi szikestől az Atacama-sivatagig: miként támogatjuk az ExoMars rover fúrásait*..... MUF2019-K08
- Kiss Csaba, Szabó Róbert, Ábrahám Péter, Kóspál Ágnes, Moór Attila, Szabó Gyula, Vida Krisztián, Kiss L. László: *Magyar részvétel az ESA ARIEL missziójának tudományos programjában* MUF2019-K09
- Kiszely Márta, Hudoba György, Czanik Czenge: *A Marsrengések program elindítása magyar középiskolások számára* MUF2019-K10
- Milánkovich Dorottya, Bacsárdi László: *Úrtábori tapasztalatok – Űrtevékenységgel kapcsolatos ismeretek átadása magyar fiatalok számára*.....MUF2019-K11
- Muraközy Judit: *Foltcsoportok bomlása nagy felbontású adatsoron*..... MUF2019-K12
- Németh Zoltán: *Az ion-semleges kölcsönhatás és szerepe a magnetoszférák szerkezetének alakításában*. MUF2019-K13
- Szűcs Eszter, Bozsó István, Bányai László, Szárnya Csilla, Wesztergom Viktor: *A topográfia-dinamika nagyléptékű leképezése: hazai Sentinel-1 radarinterferometriai eredmények* MUF2019-K14

Flertevékenység előrejelzése napfolt-adatokból

Baranyi Tünde¹ †, Ludmány András², Muraközy Judit¹

¹ MTA CsFK CsI

² MTA CsFK GGI

A szoláris flerek előrejelzésének jelenleg használt módszerei általában magnetogram adatokra támaszkodnak, a szoláris aktív vidékeket többnyire egészként kezelik és nem vizsgálják időbeli viselkedésüket. Ezek a módszerek napfolt-adatokkal is használhatók, de a foltcsoportok globális kezelése mellett a létező legrészletesebb debreceni napfolt-adatbázisok azt is lehetővé teszik, hogy az aktív vidékek belső struktúrájának részleteit és ezek dinamikáját is követhessük és vizsgálhassuk szerepüket a fler létrejöttében. Ez a legerősebb horizontális mágneses gradiensű centrumok azonosítását és 1.5 órás felbontású követését jelenti. A részletes adatok lehetővé teszik különböző hatóidejű előrejelzési módszerek kidolgozását néhány órára ill. néhány napra előre, valamint alacsonyabb megbízhatósággal a következő rotációra vonatkozóan is. Ezen módszerek együttesével sokoldalú előrejelző rendszer hozható létre. A jelenleg folyó projektet az ESA támogatja.

Bevezetés

2017-ben kutatási programot indítottunk az ESA támogatásával olyan fler-előrejelző módszertan kidolgozására, mely napfoltcsoport-adatok elemzésére épül. Az eljárások bemenő adatai azok a debreceni napfolt-adatbázisok, melyek üreszközök észleléseire épülnek, a SOHO/MDI és az SDO/HMI adataira [2]. Ezek az adott időszak létező legrészletesebb dokumentációi a napfolttevékenységnek. A másik bemenő adatsort a GOES-műholdak észlelései alapján készült fler-adattáblázatok szolgáltatják. Az üreszközök a mágneses tér látóirányú komponensét mérik, az itt bemutatott eljárások pedig a mágneses tér horizontális gradiensének értékét, eloszlását és dinamikáját követik flerproduktivitás szempontjából. E beszámoló a projekt jelenlegi állapotát, az eddig vizsgált három módszert ismerteti röviden.

A delta-konfigurációk módszere

H. Kunzel [7] 1960-ban vezette be a delta-konfiguráció elnevezést azokra a napfolt-elrendeződésekre, melyekben két ellentétes polaritású foltumbra egy közös penumbrában helyezkedik el. Ez nyilván erős horizontális mágneses tér gradienst jelent, és a tapasztalatok szerint növeli a flerek esélyét. A debreceni numerikus adatbázisok formátuma lehetővé teszi a konfigurációk keresését és az elsőnek vizsgált módszer első lépése az volt, hogy a 2013-as év delta-konfigurációit kiválogatva becslést adjunk a fler-produktivitásra. Szűrő feltétel az volt, hogy az adott foltegyüttes a napkorong centrumától $r_{\text{nap}} \leq 0.85$ távolságon belül legyen, a kapott minta 21.190 esetet tartalmazott. A vizsgálandó állítás az volt, hogy a delta-konfiguráció megléte esetén a következő 24 óra flerindexe: $FI \geq 10$. A flerindex definíciója a következő [1]:

$$FI = (100 \times S_X + 10 \times S_M + 1 \times S_C + 0.1 \times S_B) / \tau \quad (1)$$

ahol az S_j értékek a GOES műhold által a fler lágy röntgentartományban mért intenzitás-lefutásának különböző nagyságrendű (X -, M -, C - és B - osztályú) maximumát jelentik, tehát egy ún. $X2$ -es fler esetén $S_X = 2$ és az intenzitásmaximum értéke $I_{\text{max}} = 2 \cdot 10^{-4}$ watt/m², $M3$ -as flernél $S_M = 3$ és $I_{\text{max}} = 3 \cdot 10^{-5}$ watt/m² és í.t. Az FI tehát egy adott (itt τ -val jelölt)

időszak összesített flertevékenységeinek proxy adata, ez az időszak itt 24 óra. Az $FI \geq 10$ állítás tehát azt jelenti, hogy 24 óra alatt történik legalább egy M1-es fler. A módszer hatékonyságát a True Skill Score (TSS) eljárással lehet kiértékelni [3], ehhez az alábbi kontingenciatáblázatot kell felhasználni:

FI ≥ 10 előrejelzés	Fler észlelés			Valódi pozitív mérték: 0.807 Valódi negatív mérték: 0.833 True Skill Score: 0.641
	Igen	Nem	Total	
Igen	1.585	3.219	4.804	
Nem	378	16.105	16.483	
Total	1.963	19.324	21.287	

Az adott feltételekkel kapott TSS érték a látóirányú mágneses tér mérésekre alapozott eljárások között a fenti előrejelzésre a legjobbnak számít, ezt az eljárást továbbiakban a feltételek változtatásával lehet jobban kiismerni. A delta-konfigurációra alapozott eljárás egy többlépcsős előrejelzési metódus viszonylag gyorsan elvégezhető első fázisa lehet.

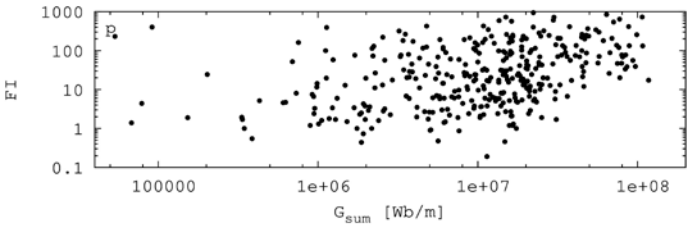
Aktív vidékek globális jellemzői

Globális jellemzők alatt itt az aktív vidék egészére kiterjedő mennyiségeket értjük. Több ilyen is definiáltunk és vizsgáltunk az eddigiek során, ezekből itt csak egyet mutatunk be. A G_S paraméter a foltcsoportban szereplő összes pozitív-negatív foltpár közötti mágneses fluxusgradiens összege:

[Wb/m]

(2)

A kifejezésben szereplő B értékek nem közvetlenül a debreceni napfolt-adatbázisból kerülnek a programba, hanem egy foltterület-mágneses tér kalibrációs formula révén [8]. (2)-höz hasonló formulát használt magnetogramokra Georgoulis [4] is, de az általunk foltokra alkalmazott változata nem adott lényegesen több információt. Az 1. ábra 34 foltcsoport napi flerindexét mutatja az előző délutáni átlag G_S értékével összehasonlítva.



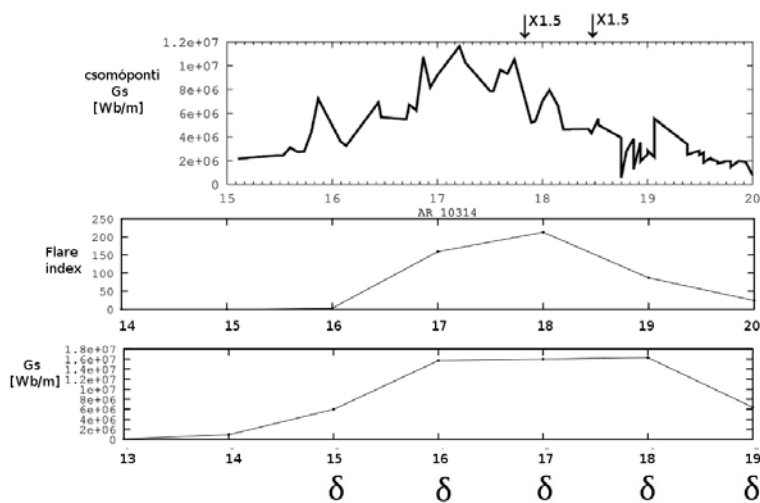
1. ábra 34 foltcsoport napi flerindexei a flerező napok előtti délutáni átlagos G_S függvényében

Az 1. ábra arról tanúskodik, hogy intenzív flerezés viszonylag alacsony G_S értékek esetén is történhet, de ha a G_S magas, akkor nagy valószínűséggel intenzív lesz a flertevékenység, nem várható, hogy gyenge legyen. Az ábrán azonban minden nap adatai szerepelnek, a továbblépéshez szükséges lesz az értékek időbeli viselkedését is figyelembe venni.

Foltcsoportok belső dinamikája

Egy korábbi cikkünkben [5] Kusano [6] azon elméleti eredményére mutattunk be szoláris példákat, hogy a mágneses rekonnekció nem akkor lép fel, amikor a mágneses gradiens értéke a legnagyobb, hanem annak bizonyos csökkenése után. Ez jó lehetőséget nyújt az előrejelzésre. Annak a cikknek a megközelítésén azonban már továbbléptünk, mert az még a foltcsoport legerősebb foltközi gradiensét követte, azonban kiderült, hogy az idő során az aktív vidék különböző helyein válhatnak foltpárok a legnagyobb gradiensűvé. Jelen kiértékelő programunk ezért azonosítja a foltcsoport mágneses gócpontjait, az ún. polaritáselválasztó vonalak környékét és ezen belül az összes ellentétes polaritású foltpár gradiensét összegezzük. Ennek a csomóponti G_S értéknek a viselkedése szintén mutatja a csökkenés utáni flerezést, de ez már realisabb.

A három megközelítés összehasonlítását a 2. ábra szemlélteti az AR NOAA 10314 foltcsoport példáján.



2. ábra A NOAA 10314 napfoltcsoport történései 2003 márciusában. Napi flerindex (középső diagram), az előző napok délutáni átlag G_S értékei (alsó diagram) és a polaritáselválasztó vonal körül gradiens-csomópont G_S értékének időbeli változása az adott napokon a két X1.5 fler időpontjával (felső diagram). A legalsó sor azt mutatja, hogy mely napokon van jelen delta-konfiguráció.

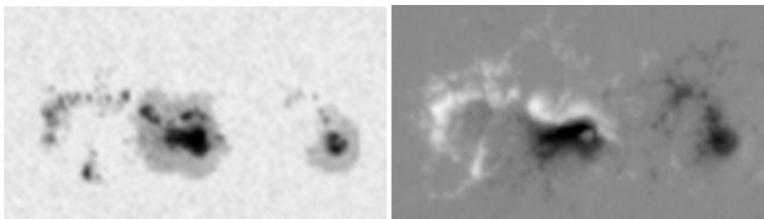
Ennél a foltcsoportnál a delta-konfigurációra épülő módszer az első deltát észlelő napon (márc. 15) még nem működik, másnap, 16-án a flerindex még csak $FI < 10$, a többi négy napon azonban már $FI > 10$. Ez tehát elég jó módszer kezdő lépésként.

A második módszerben a G_S értékek és a következő napi flerindexek időbeli lefutásának hasonlósága igazolja azt a sejtést, hogy nagy G_S értékek kiváltják a nagy flertevékenységet. Itt azonban látszik a továbblépés iránya is, ugyanis két nagyobb fler után a G_S értéke még magas marad egy darabig, ezért az előrejelzés megbízhatóságának növeléséhez fejlődési sajátosságok figyelembevételére is szükség lesz.

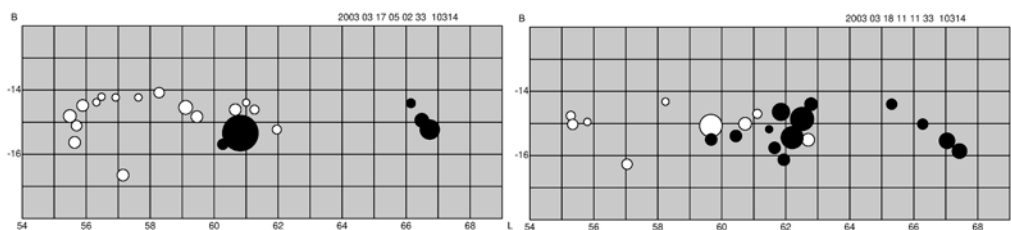
A harmadik módszer, a belső dinamika követése a legígéretesebb és legnagyobb kihívás. A 2. ábra felső diagramja részletesen mutatja a foltcsoportnak a polaritás-elválasztó vonal környéki össz-gradiens történéseit, ami kirajzolja a csökkenő gradiens szerepét. Ennek a módszernek az alkalmazása azonban egy előrejelzés során jelentősebb erőfeszítést igényel, mint a másik kettőé, minden új észlelés beérkezésénél azonnal le kell gyártani a napfolt-adatbázis frissítését, azonosítani kell a gradiens-gócpontokat, követni kell a fejlődésüket és becsléseket

kell tudni tenni a flerproduktivitásukra. Ugyanakkor ez a legfontosabb komponense a módszer-együttesnek, mert nem az egész foltcsoport, hanem e gócpontok azok a területek, amelyek a flerek forrásai.

A 3. és 4. ábrák szemléltetik a foltok eloszlását ebben a foltcsoportban.



3. ábra A NOAA 10314 foltcsoport képe fehér fényben (bal oldal) és magnetogramon (jobb oldal). A SOHO/MDI műszer észlelései, 2003 márc. 17 -én 05:02 -kor (UT).



4. ábra A NOAA 10314 foltcsoport umbráinak rajza a Carrington koordináta-rendszerben két észlelésen. A fehér/fekete korongok a pozitív/negatív mágneses polaritású umbrákat jelölik.

A 3. ábra a 10314 számú foltcsoportot mutatja abban az állapotában, amikor a mágneses polaritáselválasztó vonal környezetében lévő foltok G_S értéke maximum (ld a 2. ábra felső diagramját). A 4. ábra baloldali foltterképe ebben az állapotban mutatja az umbrákat, a jobboldali pedig a második X1.5 fler időpontjában, a fler a $L=61^\circ$, $B=-15^\circ$ Carrington koordinátáknál történt. A program a jól felismerhető gócpont 3 fok átmérőjű körzetének foltközi gradienseit összegzi, ennek menete látható a 2. ábrán.

A bemutatott példák kiragadott illusztrációi a projekt jelen állapotának. A további fejlesztések folyamatban vannak.

Köszönetnyilvánítás A munkát az ESA támogatja a GGI Flare 4000121800/17/D/MRP projekt keretében. A szerzők kegyelettel és tisztelettel emlékeznek meg arról, hogy Baranyi Tünde 2018 júliusi váratlan haláláig vezette a projektet és hatalmas munkával járult hozzá a célkitűzések megvalósításához.

Irodalom

- [1] Antalová A. (1996), Contr. Astr. Obs. Skalnaté Pleso, 26, 98.
- [2] Baranyi T., Győri L., Ludmány A. (2016), Sol. Phys. 291, 3081.
- [3] Bloomfield D. S. et al. (2012), ApJL, 747, 41.
- [4] Georgoulis M. K., Rust D. M. (2007), ApJL, 661, 109.
- [5] Korsós M. B., Baranyi T., Ludmány A. (2014), ApJ, 789, 107.
- [6] Kusano, K. et al. (2012), ApJ, 760, 31.
- [7] Kunzel H. (1960), Astr. Nachr. 285, 5, 271.
- [8] Muraközy J., Baranyi, T., Ludmány A. (2016), 291, 2941.

Magnetoszférikus folyamatok monitorozása a Schumann-rezonancia sávban

T. Bozóki ^{1,2}, G. Sători ¹, P. Steinbach ^{3,4}

¹ MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet

² Szegedi Tudományegyetem Környezettudományi Doktori Iskola

³ ELTE Úrkutató Csoport

⁴ MTA–ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport

Az elektromágneses spektrum ELF (extreme low frequency; 3-3000 Hz) és VLF (very low frequency; 3-30 kHz) tartományai a magnetoszférikus hullámjelenségek széles palettáját ölelik fel mint a kórusok, a hiss-ek, a whistlerek stb. Monitorozásuk elengedhetetlen a magnetoszférában lejátszódó hullám-részecske kölcsönhatási folyamatok megértéséhez, amire elsősorban műholdas in-situ műholdas méréseket használunk (pl. Themis, Van Allen Probes, Arase). Ugyanakkor fontos szereppel bírnak a jóval költségkímélőbb földi mérések is, melyek azonban a jelterjedés torzító hatásait (pl. ionoszférán történő áthaladás) is hordozzák.

2013-ban W. Li és társai kimutatták [1], hogy a szélessávú, strukturálatlan plazmaszférikus hiss hullámok, melyek a két sugárzási öv közötti úgynevezett slot régió kialakulásában játszanak kulcsfontosságú szerepet, a korábbi ismeretekkel ellentétben, jóval száz Hz alatt is megfigyelhetők a Van Allen Probe műholdak méréseiben. Mivel az alacsonyfrekvenciás hiss-ek (<100 Hz) whistler-módusú terjedéssel képesek lehetnek belépni a Föld és az ionoszféra alkotta üregbe, ezért a Schumann-rezonancia eddig ismeretlen – időszakosan akár jelentős mértékű – külső forrását jelenthetik. Egyúttal lehetőség nyílik ezen magnetoszférikus hullámtípus folyamatos földi észlelésével a magnetoszféra fizikai folyamatainak teljesebb körű monitorozására.

Bevezetés

Wienfried Otto Schumann 1952-ben publikálta úttörő munkáját [3], melyben elméleti úton megjósolta az ideális vezetőnek tekinthető földfelszín és a jól vezető ionoszféra között kialakuló elektromágneses (EM) rezonanciát, melyet tiszteletére Schumann-rezonancia (SR) néven ismer a tudományos közösség. A villámok által keltett EM hullámok az ELF tartomány legalsó sávjában (<100 Hz) extrém alacsony csillapítással terjednek (a csillapítás nagyságrendileg 0.1 dB/Mm), így többször is körbekerülnek a Földet mielőtt energiájuk disszipálódik. A Föld-ionoszféra üregrezonátor speciális geometriájából adódóan az EM hullámok a terjedés során újra és újra önmagukkal találkoznak kialakítva a jellegzetes állóhullám mintázatot, melynek sajátfrekvenciái ~8, ~14, ~20, ~26, ~32 stb. Hz-nél a Föld tetszőleges pontján megfigyelhetők.

Megfigyelés

A SR mérésekben időszakos kierősödési eseményeket mutattunk ki, melyek közös jellemzői:

- elsősorban az észak-déli terjedési irányban (H_{EW} komponens),
- több órán át,
- szélessávon (5 - ~200 Hz), nem csak a rezonancia-modusokban,
- több, mint kétszeres átlagos intenzitásnövekedés,
- változatlan sajátfrekvenciák,
- globálisan megfigyelhetőség.

Értelmezés

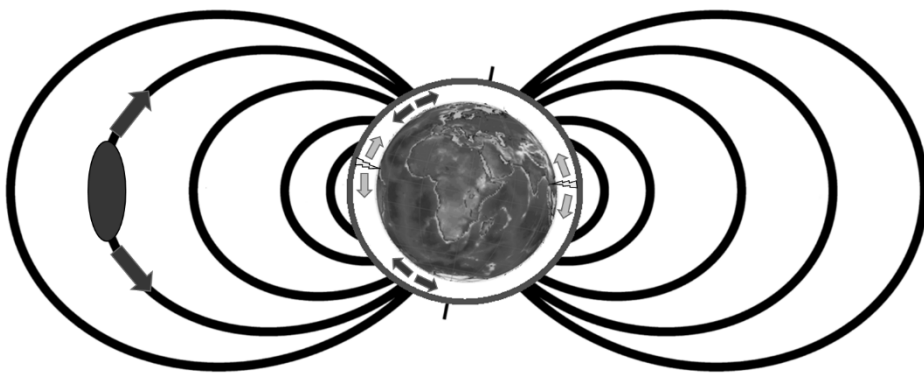
A vizsgált eseményekre független mérés (WWLLN) bizonyította, hogy a megfigyelt SR kiterjedés nem köthető megnövekedett villámtevékenységhez. Továbbá a globális detektálhatósága, több órás karakterisztikus időskálája, valamint a SR frekvenciák stabilitása valószínűtlennek tették a Föld-ionoszféra üregrezonátor geometriájában pl. részecskekiszóródás következtében bekövetkező változások hatását. Elméletünk szerint a megfigyelt jelenség magnetoszférikus eredetű hullámok Föld-ionoszféra üregrezonátorba történő belépésével magyarázható (1. ábra).

Plazmaszférikus hiss, mint a SR külső forrása?

Az űrkutatásban a hiss egy természetes módon gerjesztett, strukturálatlan elektromágneses hullám tradicionális elnevezése, amely fontos szerepet játszik a magnetoszféra energikus elektronjainak gyorsítási és veszteségi folyamataiban. A hiss hullámokat elsőként földi állomásokon detektáltak majd az űreszközök fejlődésével lehetőségessé vált in-situ (helyben történő) megfigyelésük is a magnetoszférában. A plazmaszférikus hiss ~100 Hz és 2 kHz között a plazmaszférában megfigyelt whistler-módusú hiss hullám, amely feltételezések szerint a külső és a belső sugárzási öv közötti úgynevezett slot régió kialakulásában játszik kulcsszerepet. Első leírására a 70-es évek első felében került sor.

2012-ben egyidejű műholdas és földi megfigyelésekkel igazolták, hogy a plazmaszférikus hiss 100 Hz felett a földi mérésekben is megjelenik. 2013-ban W. Li és társai kimutatták, hogy a Van Allen Probe (VAP) elektromágneses méréseiben jóval 100 Hz alatt is megfigyelhető plazmaszférikus hiss hullám [1]. A szerzők az alacsonyfrekvenciás hiss hullámok megerősödésének mechanizmusára a néhányszor 10 keV-es elektronokkal történő hullám-részecske kölcsönhatást javasolták, melyre a külső plazmaszférában kerülhet sor. Ez az újonnan felfedezett frekvenciatartománya a plazmaszférikus hiss hullámoknak már átfedésben van a Schumann-rezonancia jellemző frekvenciatartományával. A C/NOFS műhold 400-850 km-es magasságban detektált a Schumann-rezonanciára jellemző spektrális struktúrát, ami bizonyította, hogy az ionoszféra whistler-módusú terjedéssel a SR frekvenciasávban is áthatolható.

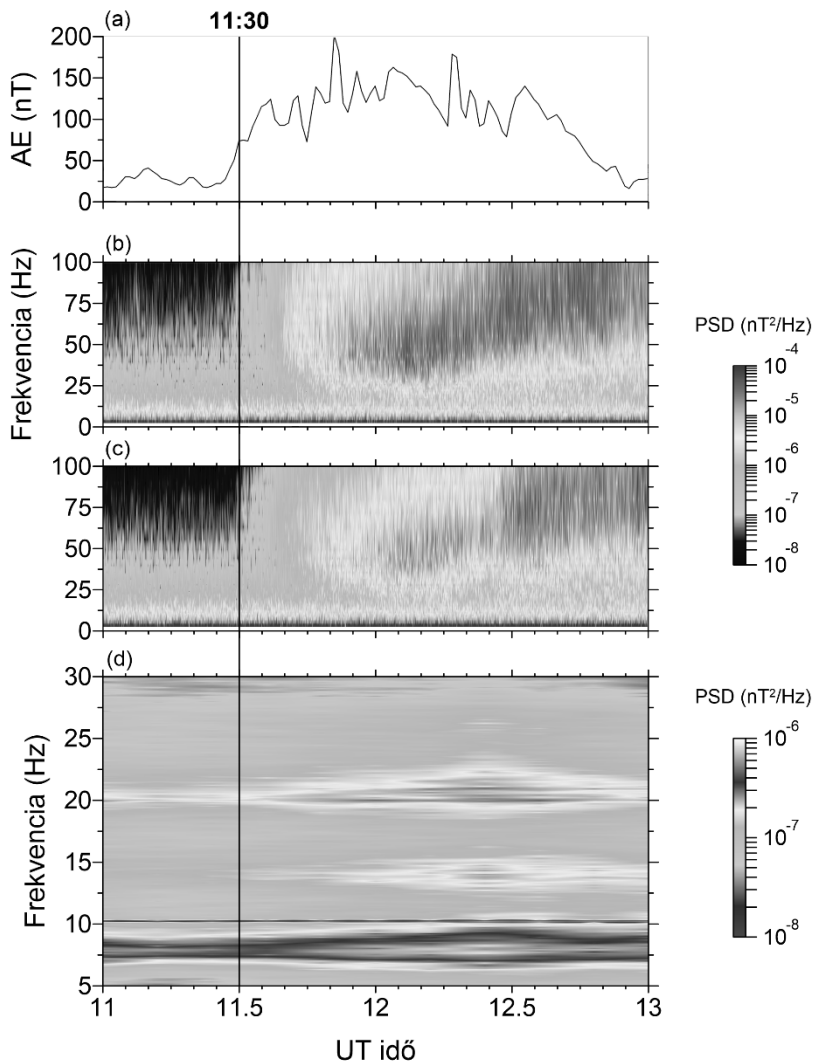
Mindezen előzmények azt sugallják, hogy az általunk kimutatott több órás, magasabb frekvenciákra is jellemző, irányfüggő SR intenzitásnövekedés plazmaszférikus hiss eredetű lehet.



1. ábra A SR külső forrásának koncepciója

Konjugált esemény

2013. január 5-én a SR intenzitásnövekedésével egyidejűleg a Van Allen Probe (VAP) műholdak hullámmérési plazmaszférikus hiss megjelenését mutatták a külső plazmaszférában.



2. ábra 2013.01.05. (a) AE index, (b) VAP-A hullámmérés, (c) VAP-B hullámmérés, (d) SR mérés Alberta, Kanada

Összegzés

A Schumann-rezonancia mérésekben nemrég jellegzetes kierősödési időszakokat figyeltünk meg. A kierősödés különböző tulajdonságaiból arra a következtetésre jutottunk, hogy a jelenség nem magyarázható a SR elsődleges forrásaként szolgáló globális zivatartevékenység anomalisztikus megváltozásával vagy az alsó ionoszférában, azaz a hullámterjedés körülményeiben bekövetkezett változásokkal. Elméletünk szerint a magnetoszférában keletkező és whistler-módusú terjedéssel a Föld-ionoszféra üregbe bejutó elektromágneses hullámok okozhatják a SR időszakos megerősödését.

Míg magasabb frekvenciatartományban az úgynevezett plazmaszférkúsi hiss hullámok a 70-es évek óta ismertek, 100 Hz alatt még csak néhány éve mutatták ki műholdas mérésekben az ilyen típusú hullámok létezését. Úgy gondoljuk, hogy ezek az ún. alacsonyfrekvenciás plazmaszférkúsi hiss hullámok jelenthetik a SR eddig ismeretlen külső forrását. Kimutattuk, hogy 2013. január 5-én a SR-ban tapasztalt kierősödés kezdete időbeli egyezést mutat alacsonyfrekvenciás hiss hullámok Van Allen Probe műholdak méréseiben történő

megjelenésével. Elméletünk új lehetőséget jelenthet ezen magnetoszférikus hullámtípus földi megfigyelésére, ami elősegítheti a magnetoszféra fizikai folyamatainak mélyebb megértését.

Kitekintés: Schupy

A Schupy egy 2019-ben létrehozott nyílt forráskódú python csomag, melynek célja modellezési háttér biztosítása SR-hoz kapcsolódó megfigyelések értelmezéséhez (Bozóki et al., 2019 – elbírálás alatt), legyen szó a globális zivatarkevényességben vagy az alsó ionoszférában bekövetkezett változások hatásáról, földrengésekkel kapcsolatba hozható anomáliákról vagy a gravitációshullám-mérésekben megjelenő SR-tranziensekről. Alapja az az idén publikált matematikai formalizmus [3], melynek segítségével tetszőleges forrás-észlelő geometriára meghatározható az elméleti SR spektrum. A programcsomag bárki számára könnyedén elérhető a pip csomagmenedzselő program segítségével.

Köszönetnyilvánítás

A munka az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-3 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programja, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal – NKFIH K115836 sz. projektje, valamint a CA15211 számú COST Akció "Atmospheric Electricity Network: coupling with the Earth System, climate and biological systems" (ELECTRONET) támogatásával készült.

Irodalom

- [1] Li, W., Thorne, R. M., Bortnik, J., et al. (2013): An unusual enhancement of low-frequency plasmaspheric hiss in the outer plasmasphere associated with substorm-injected electrons. *Geophysical Research Letters*, 40(15), 3798–3803.
- [2] Práczser, E., Bozóki, T., Sánti, G., et al. (2019): Reconstruction of global lightning activity based on Schumann resonance measurements: Model description and synthetic tests. *Radio Science*, 54.
- [3] Schumann, W. O. (1952): Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. *Zeitschrift und Naturforschung*, 7a.

Légköri elektromos tér a növekvő fák árnyékában

A. Buzás^{1,2}, V. Barta¹ és J. Bór¹

¹ MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet, Sopron

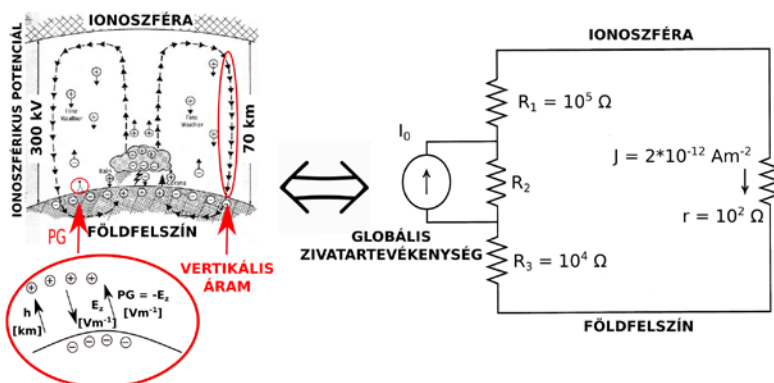
² Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Budapest

A földi semleges légkörben (a földfelszíntől kb. 70 km-es magasságig terjedő tartományban) állandóan jelen van egy elektromos áramrendszer, melyet a globális zivatar-tevékenység és villámaktivitás tart fenn. Ennek az áramrendszernek a legfontosabb kvázi egyenáramú paraméterei a légköri elektromos potenciálgradiens (PG), melyet az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézetének (GGI) nagycenki Széchenyi István Geofizikai Observatóriumában (SZIGO) immár 1962 óta folyamatosan mérnek. Ebben a világban egyedülállóan hosszú időszakra egy erőteljes csökkenő trendet azonosítottak, melyet egyes kutatók globális változásoknak, míg mások az observatórium területén található fák időfüggő, elektromos teret árnyékoló hatásának tulajdonítottak. Kutatásunk fő célkitűzése ezen csökkenés eredetének tisztázása és a fák árnyékoló hatásának számszerűsítése volt. Ennek érdekében PG méréseket folytattunk a SZIGO területén, valamint egy véges elemes numerikus modellt is felépítettünk, mellyel meghatároztuk az árnyékoló hatást a múltira is. Vizsgálataink alapján megállapítható, hogy a nagycenki PG adatokban tapasztalható szekuláris csökkenés helyi eredetű, a közelben található fák árnyékoló hatására vezethető vissza.

Bevezetés

A földi atmoszférában szép időben, villámlás hiányában is mindenütt jelen van egy kb. 130 Vm^{-1} nagyságú elektromos tér. Ezen elektromos teret a földfelszín és az alsó ionoszféra (kb. 70 km-es magasságban) közötti mintegy 250 kV-os feszültség tartja fenn, amely pedig a főként kontinentális, egyenlítői területekre korlátozódó globális zivatar-tevékenység következtében alakul ki (1. ábra) [1]. A légköri elektromosság ezen jelenségeket szintetizáló, alapvető elméletét a 20. században a Nobel-díjas C. T. R. Wilson dolgozta ki a Globális Légköri Elektromos Áramkör (GLEK, vagy GEC: Global Electric Circuit) formájában. Wilson szerint az alsó ionoszféra és a földfelszín, mint elektromosan jó vezetők, egy gömbkondenzátor fegyverzeteit alkotják, míg a köztük lévő szigetelő szerepét a véges vezetőképességgel rendelkező levegő tölti be. A gömbkondenzátor fegyverzetei közötti mintegy 300 kV-os feszültséget pedig a globális zivatar-tevékenység tartja fenn, melynek hatására töltéskiegyenlítő áramok jönnek létre az alsó ionoszféra és a földfelszín között (1. ábra) [2, 3].

A GLEK átfogó keretrendszerében több egyen- és váltóáramú elektromos paraméter is szerepel. Azonban az egyik legrégebb óta és a világ sok pontján mért kvázi egyenáramú mennyiség a légköri elektromos potenciálgradiens (PG), amely nem más, mint a vertikális elektromos térerősség ellentettje (1. ábra). Ideális esetben a PG képes a földi légköri elektromos térben lezajló globális változásokat reprezentálni, emellett mérésével fontos információhoz juthatunk a légszennyezettségről [4], különböző szennyezők légköri terjedéséről, a légköri radioaktivitásról, egyes üridőjárási eseményekről [3], de földrengés prekurzorként való alkalmazhatósága is aktívan kutatott terület [5]. A mérések interpretációját azonban sok esetben megnehezítik a különböző helyi és regionális hatások, mint például a mérések közelében található zavaró, nem zérus vezetőképességgel rendelkező objektumok (pl.: épületek, fák, kerítés etc.) elektromos teret árnyékoló hatása.



1. ábra A GLEK sematikus vázlata és egyszerűsített ekvivalens áramköre. <http://www.xearththeory.com/images/weather-fronts-clouds/global-electric-circuit-weather-image.jpg> és [3] alapján.

A mérési helyszín bemutatása és a kutatás motivációja

A nagycenki Széchenyi István Geofizikai Observatóriumot (SziGO, é. sz. 47°38', k. h. 16°43') az antropogén hatásokat minimalizálendő, a Fertő-Hanság Nemzeti Park területén alapították a Nemzetközi Geofizikai Év (1957-58) alkalmából, 1956-57-ben (2. ábra). A világon egyedülálló módon 1962 óta kvázi-folyamatosan végeznek itt PG méréseket. Kezdetben a PG-t egy helyi fejlesztésű radioaktív kollektoros műszer segítségével mérték. A mérést 2001-ben egy másik, szintén helyi fejlesztésű radioaktív berendezéssel bővítették [6]. Végül a műszerpark 2013-ban nyerte el mai formáját, amikor is két modern mérési technológiával működő BOLTEK EFM-100 ún. „field mill” (elektromos térmérő) egészült ki, amely műszerek folyamatos mérésre képesek (2 vagy 10 Hz-es mintavételi frekvencián) modern félvezető technológiát használva. Az egyik „field mill” folyamatosan monitorozza a PG-t egy rögzített ponton 2 Hz-es mintavételezési frekvenciával, míg a másik, hordozható műszert csak kampány mérések során használják (2. ábra).



2. ábra A SziGO földrajzi elhelyezkedése és az observatóriumban működő PG mérőműszerek.

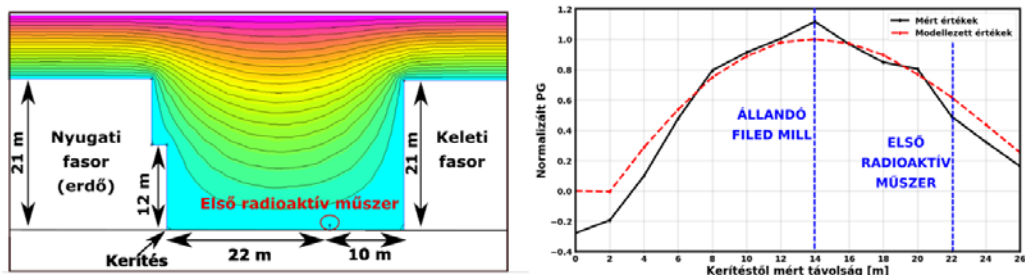
2003-ban a hosszú távú nagycenki PG idősorokban egy erőteljes csökkenő trendet mutattak ki, amelyet a szerzők globális változásoknak tulajdonítottak [7]. Viszont Williams és mtsai. [8] szerint a csökkenést teljes mértékben a PG mérések közelében található fák időfüggő elektromos teret árnyékoló hatása okozta. Williams és mtsai. az árnyékoló hatást numerikus

modellezés segítségével számszerűsítették, azonban az általuk alkalmazott modell geometriája nem alkalmazható megfelelően a nagycenki esetre. A vita és ezáltal a hosszú távú csökkenés eredetének a kérdése lezáratlan maradt.

A kutatás metodikája

A PG mérőműszertől nyugatra és keletre is találhatók fák, melyek a mérések kezdetén (1962) még olyan alacsonyak voltak, hogy nem zavarták a méréseket, azonban az idő során szignifikáns méretet értek el, ezzel leárnyékolva a környező elektromos teret. Azért, hogy számszerűsítsuk a fák árnyékoló hatását, egy véges elemes numerikus modellt építettünk fel (3. ábra). A modell bemenő paramétere a két oldalon álló fák magassága, melyet a múlta Horváth Tamás erdőmérnök, a Soproni Egyetem munkatársának segítségével határoztuk meg.

A modellt validálandó terepi kampányméréseket folytattunk egy Ny-K irányítottaságú vonal mentén a két „field mill” segítségével. Az egyik műszer a vonal közepén, a lehető legmesszebb a fáktól helyezkedett el, folyamatosan monitorozva a PG-t, míg a másik műszerrel két méterenként mértünk. A hordozható és a rögzített műszer által mért értékek hányadosát ábrázolva megállapítható, hogy hol tapasztalható térbeli árnyékoló hatás (3. ábra). A terepi mérések eredményei és a modellezett értékek jó pontossággal megegyeznek (3. ábra).



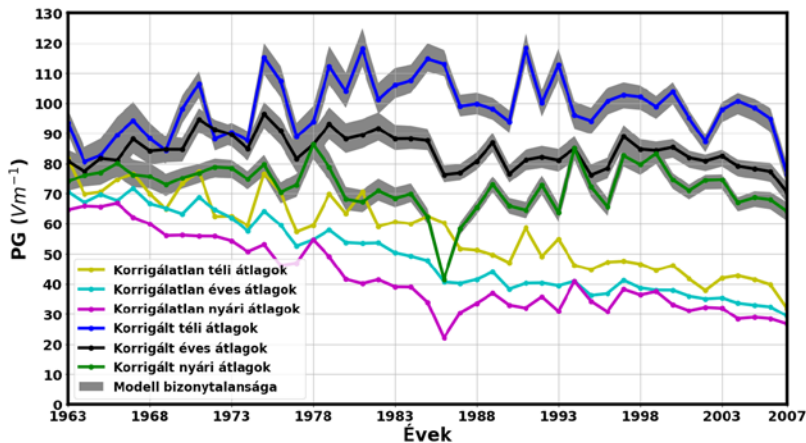
3. ábra Példa a modell geometriájára és a modell validálása párhuzamos terepi PG mérésekkel.

Eredmények és konklúziók

A fentebb ismertetett numerikus modell segítségével a fák időfüggő, elektromos teret árnyékoló hatása eltávolításra került a nagycenki PG idősorokból. Az így kapott, korrigált PG értékek már jóval magasabbak és az erőteljes csökkenő trend is eltűnt az adatokból (4. ábra). Így nagy valószínűséggel megállapítható, hogy a csökkenést főként a fák árnyékoló hatása okozta, amint azt Williams és mtsai. állították [8]. Azonban jelen tanulmány esetében a konklúzió jóval megalapozottabb, hiszen egy speciálisan a SzIGO-ra alkotott és terepi mérésekkel validált modell eredményeként adódott.

Jelen eset jól példázza, hogy milyen körültekintően kell eljárni a PG mérések értelmezésénél. A globális változásokra utaló jelek keresése előtt szükséges a helyi hatások felmérése, esetleg korrekcióba vétele.

A korrigált PG idősorokban megfigyelhető egy szezonális variáció is. A PG értéke nagyobb télen, mint nyáron. Ez a jelenség megfelel a légköri elektromosság általános elméletének. Télen a megnövekedett antropogén aeroszol kibocsátás (ld. fűtési szezon) és az alacsonyabb atmoszférikus határréteg következtében a légkör vezetőképessége csökken, ami megnöveli a PG-t [9].



4. ábra Az eredeti, korrigálatlan és a fák árnyékoló hatására korrigált PG idősorok.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programja, illetve a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K 115836-os számú OTKA pályázata támogatta.

Külön köszönet illeti meg Horváth Tamást, a Soproni Egyetem munkatársát, aki a fák magasság görbéit a rendelkezésünkre bocsájtotta, illetve a CA15211-es számú COST akciót (ELECTRONET).

Irodalom

- [1] Chalmers, J. A. (1957), Atmospheric Electricity, Pergamon Press, London, pp.1-55.
- [2] WILSON, C. T. R. (1921): Investigation on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms, *Philosophical Transaction of the Royal Society of London Series A*, pp. 73-115.
- [3] Rycroft, M. J., Israelsson, S. & Price, C. (2000), The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change, *Journal of Solar-Terrestrial Physics*, **62**:1563-1576.
- [4] Kastelis, N. & Kourtidis K. (2016), Characteristics of the atmospheric electric field and correlation with CO₂ at a rural site in southern Balkans, *Earth, Planets and Space*, **68**:3.
- [5] Silva, H. G., Bezzeghoud, M., Reis, A. H. et al. (2011), Atmospheric electrical field decrease during the M = 4.1 Sousel earthquake (Portugal), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**(3):987-991.
- [6] Márcz, F. Horváth, J. Bencze, P. et al. (2001), Simultaneous measurements of the atmospheric electric potential gradient at Nagycenk observatory by means of two individual equipments, *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, **36**(3):269-278.
- [7] Márcz, F. & Harrison, R. G. (2003), Long-term changes in atmospheric electrical parameters observed at Nagycenk (Hungary) and the UK observatories at Eskdalemuir and Kew, *Annales Geophysicae*, **21**:2193-2200.
- [8] Williams, E., Markson, R. & Heckman, S. (2005): Shielding effects of trees on the measurement of Earth's electric field: Implications for secular variations of the global electrical circuit, *Geophysical Research Letters*, **32**, L19810.
- [9] Bennett, A. J. & Harrison, R. G. (2007), Atmospheric electricity in different weather conditions, *Weather*, **62**(10):277-283.

Űrdozimetriai célú részecskelevezők modellezése Monte Carlo módszerekkel

Erdős Boglárka¹, Hirn Attila¹, Zábori Balázs¹

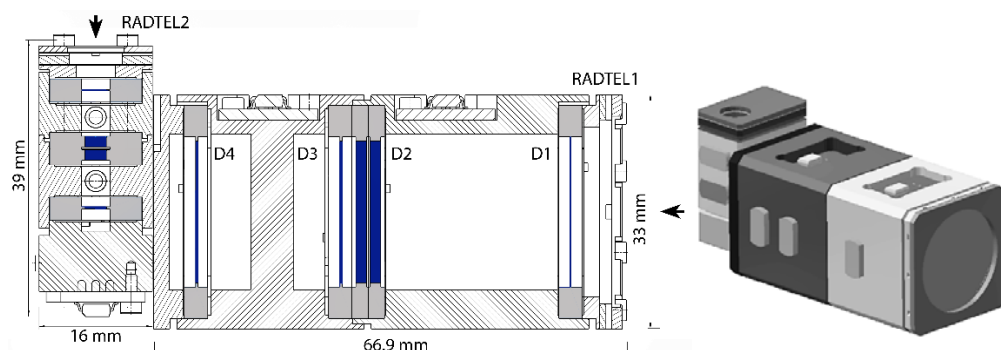
¹ MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest

Az MTA Energiatudományi Kutatóközpontban több űrdozimetriai célú detektor fejlesztése is folyik, például az űridőjárási célú RADTEL teleszkóp, amely az elektronok, protonok és nehezebb ionok spektrumának meghatározására szolgál. Az ilyen berendezéseket használat előtt kalibrálni szükséges, melyet a Földön ismert energiájú töltött részecskékkel tehetünk meg, ezek kiértékeléséhez szimulációs adatokat is felhasználhatunk. Komplex geometriák esetében a numerikus számításoknál pontosabb eredményt adnak a Monte Carlo módszerek, továbbá ezeket a szimulációkat nem csak a kalibrációnál, de a detektorfejlesztésnél – a mérési geometria, illetve a detektorok árnyékolásának optimalizálásánál – és a detektor által mért adatok kiértékelésénél is fel tudjuk használni. A munkám során az Európai Űrügynökség által fejlesztett GRAS (Geant4 Radiation Analysis for Space) Monte Carlo szimulációs eszközkészletet használtam, amely segítségével szimulálni tudtam a földi méréseket, így ezek eredményeit felhasználva, lehetőségem volt a detektor kalibrációs egyenesének felvételére.

Bevezetés

A Föld körül keringő űreszközök környezetében és belsejében is igen összetett, időben és térben inhomogén a kozmikus sugárzási tér. Az ionizáló sugárzás pedig nem csak az űrhajósokra nézve jelent kockázatot, de az űrben keringő berendezésekben is meghibásodást okozhat, a heves űridőjárás pedig akár a földi energiaelosztó hálózatokban is kárt tud tenni. Ennek fényében különösen fontos a kozmikus sugárzási tér változásainak nyomon követése helyszíni mérésekkel, melyekkel a sugárzási teret leíró modellek bizonytalanságai is csökkenthetőek, így akár megvalósíthatóvá téve egy előrejelző rendszer kiépítését is. Az MTA Energiatudományi Kutatóközpontban több ilyen célú mérőberendezés fejlesztése is folyik, így például a RADTEL részecskelevező is, amely a RADCUBE űridőjárás megfigyelő küldetés sugárzásmérő egysége [8].

RADTEL részecskelevező



1. ábra: (balról) A RADTEL részecskelevező szemléltető metszeti ábrája és (jobbról) szemléltető modellje. Nyilakkal jelölve a detektorok belépő ablakai, sötét színnel pedig a szilícium detektorok érzékeny térfogatai.

A RADTEL egy kéttengelyű félvezető szilícium detektoros teleszkóp rendszer, melynek egyik tengelye zenit irányban, másik tengelye pedig a befogott részecskék irányában fog poláris pályán a tengerszint felett körülbelül 500 km-es magasságban méréseket végezni. Ennek megfelelően a tervezett mérési tartomány elektronokra 100 keV – 8 MeV, protonokra 1 MeV – 1 GeV, nehezebb töltött részecskékre pedig 100 MeV/n – 1 GeV/n [8]. Mindkét teleszkóp több detektort is tartalmaz, melyeket így koincidencia és antikoincidencia kapcsolásban is ki tudunk értékelni, meghatározva nem csak a beérkező részecskék energiáját, de irányát is. Ahogy azt az 1. ábra is mutatja, a nagyobb teleszkóp (RADTEL1) 5 szilícium detektorból áll, a belépő ablak felől nézve 100 μm , kétszer 1,5 mm és kétszer 300 μm vastagságokkal. A közös kimenetű, két darab 1,5 mm-es detektor csak egyben kiolvasható, a többi külön is. A földi protonokkal végzett mérések során, melyet Paul Scherrer Intézet (PSI) Proton Irradiation Facility (PIF) gyorsítójában végeztek, a RADTEL első „deszkapéldányát” tesztelték, amely csak a RADTEL1 teleszkópot tartalmazta, ezért a jelenlegi elemzések csak erre a teleszkópra korlátozódnak. A kísérlet során 3 cm-es proton környalábokat hoztak létre levegőn, melyek kivezetése 5 cm távolságra volt a teleszkóp belépő ablakától. A méréseket több energián (6,5, 17, 24, 40, 51, 80,5, 151 és 230 MeV) és több mérési elrendezésben (0°, 180° és 30°-ban) végezték. Az adatok egypercenként kerültek kiolvasásra minden energián és elrendezésben legalább hat alkalommal.

Monte Carlo szimulációk

A szimulációk elkészítéséhez az Európai Űrügynökség (ESA) által fejlesztett GRAS [5] (Geant4 Radiation Analysis for Space) Monte Carlo kódját használtam. A GRAS egy moduláris felépítésű programcsomag, amely lehetővé teszi bonyolult geometriák alkalmazását, különböző fizikai modellek használatát és a sugárzás hatásait jellemző fizikai mennyiségek számítását. A RADTEL szimulációjához szükséges geometriákat GDML [2] nyelven definiáltam, melyeket CAD programmal készített STL fájlokból konvertáltam át. A sugárforrás definíciója jelen esetekben egy egyszerű monoenergiájú proton nyaláb volt, melynek kölcsönhatását a detektorral az `em_standard_opt3` [3] fizikai modell definiálta, 10^5 eseményszám mellett.

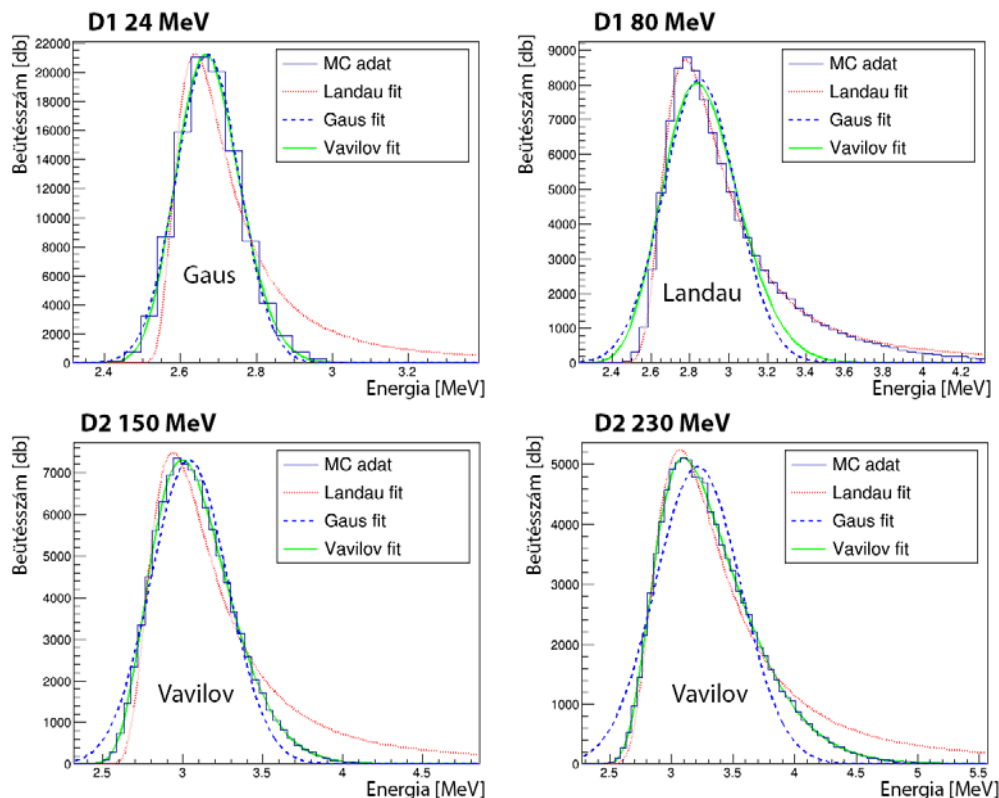
Protonok anyaggal való kölcsönhatása

Az ionizációs energiavesztés statisztikai jellege miatt nagy fluktuációkat mutat az anyaggal való kölcsönható részecske leadott energiája. Ezt a fluktuációt egy κ paraméterrel jellemezhetjük, amely arányos az átlagos energiavesztés és az ütközésben átadható maximális energia hányadosával [6]. Vastag réteg esetében ($\kappa \geq 10$) a teljes energialeadás több kisebb energiavesztés összegeként áll elő, így alkalmazható rá a centrális határeloszlás-tétel, melynek értelmében az energialeadás Gauss eloszlással közelíthető. Vékony rétegek esetében, definiálhatunk nagyon vékony rétegeket ($\kappa \leq 0.01$), melyekben az energialeadást Landau eloszlással közelíthetjük [4]. A két vastagság között, az úgynevezett közepesen vastag rétegekben ($0.01 \leq \kappa \leq 10$) történő energialeoszlás elméletét Vavilov [7] dolgozta ki Landau elmélete alapján.

Csúcsok illesztése a mért és szimulált spektrumokban

A csúcsok keresése és illesztése nincs automatizálva, minden illesztése külön kézzel történik, így a csúcsok alakjára való becslés is. A kölcsönhatások és a detektor rétegvastagságok miatt mind a három jellemző függvény felhasználásra került a csúcsok illesztésére, a Gauss, a Landau és a Vavilov függvény is. Ezek illesztése a CERN által fejlesztett ROOT [1] moduláris tudományos szoftverkészlet segítségével történt, amely biztosít minden funkciót az adatfeldolgozáshoz, a statisztikai elemzéshez és a vizualizációhoz. Az illesztések minden esetben változó csatornaszélességű hisztogramokon a ROOT által definiált függvényekkel történtek.

A 2. ábra mutatja az illesztett függvényeket a Monte Carlo szimulált esetekre, minden a három típusú függvényillesztést ábrázolva. A Gauss és Landau közötti átmeneti tartományra jó illesztést ad a Vavilov függvény és a Gaus-szal leírható tartományokon is kellően pontos tud maradni. A Vavilov függvény definíciójából adódik, hogy míg a Gauss tartomány felé finom átmenetben, azt a tartományt is lefedve megy át, addig a kisebb κ értékek felé haladva nincs finom átmenet, a Landau tartományt nem tudja jellemezni [7].

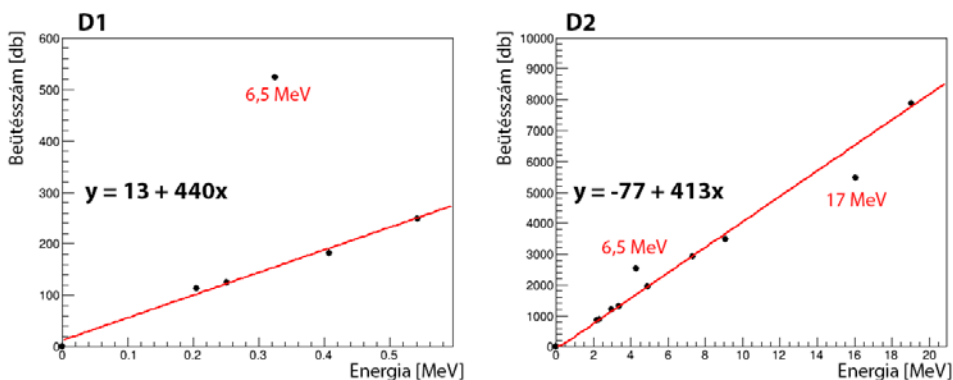


2. ábra: Különböző energiájú nyalábok melletti energiaspektrumok mindhárom energialeadási függvénnyel illesztve. A nyaláb energiája és a detektortérfogat az ábrák fölött bal oldalt látható.

Az illesztések minden ábrán ugyanolyan színnel és vonaltípussal lettek jelölve, a legjobb illesztés típusa pedig a függvény alatt található.

Kalibrációs egyenesek

A cikk terjedelmi korlátai miatt a 3. ábra csak az első két detektorra (továbbiakban D1 és D2) mutatja a felvett kalibrációs egyeneseket, egyelőre csak a 0° és 180° -ban történt mérési adatok alapján. A mért adatok közül nem minden eset volt felhasználható a kalibrációhoz. Egyes esetekben a mérés során jelenlévő, eddig ismeretlen forrásból származó folyamatosan növekvő, így nehezen kivonható háttér, torzította a csúcsalakat, illetve alacsony energiák esetén a mért csúcsok jobban elmosódtak a szimulált esetekhez képest, melyet valószínűleg szórt nyaláb okozott. Ezek a pontok a 3. ábrán jelölve vannak az energiák megnevezésével, ám nem lettek felhasználva a kalibrációs egyenes illesztésénél (kiszóró pontok). A D1 detektornál látható kevesebb esetszám pedig abból adódik, hogy a nagy energiájú nyalábok esetén nem történt mérhető, a detektor zajánál nagyobb energialeadás a detektor térfogatában.



3. ábra: Kalibrációs egyenesek a D1 és D2 detektorokra. A kiszóró pontok nem lettek felhasználva a kalibrációs egyenes illesztésénél, az ábrán a nyaláb energiával pirossal jelölve szerepelnek.

Tervek

A kalibráció teljességéhez hibaszámítás elvégzésére is szükség van, amely tartalmazza mind a számításból és illesztésből fakadó hibákat, mind a detektor elektronikájából adódókat. Ezen kívül szükség van a 30°-ban történt mérések elemzésére és adatpontjainak felvitelére a kalibrációs egyenesre, illetve még a D3 és D4 detektorok teljes kiértékelésére is. A kiszóró pontok elemzését is szeretném elvégezni, melyek magyarázatát a szimulációk segítségével is alá tudom támasztani.

Irodalom

- [1] Antchevaa I., M. Ballintijn et al. (2009), Computer Physics Communications; Anniversary Issue; Volume 180, Issue 12, Pages 2499-2512.
- [2] Chytracsek R., McCormick J. et al. (2006), IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 53, Issue: 5, Part 2, 2892-2896
- [3] Folger G. (2018.04.17), Physics Lists EM constructors in Geant4 10.4
<https://geant4.web.cern.ch/node/1731>
- [4] Landau L. (1944), J. Phys. U.S.S.R., 8, p. 201
- [5] Santin G., Ivanchenko V. et al. (2005), IEEE Trans. Nucl. Sci. 52, Issue 6, pp 2294-2299
- [6] Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics, szerk. Gordon W. F. Drake (2006), Springer-Verlag, New York
- [7] Vavilov P. V. (1957), Zh. Exper. Teor. Fiz. 32, pp. 920-923
- [8] Zábóri B., Hirn A. et al. (2018), 69th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, IAC-18-A1.5.2

Mágneses nulltér-laboratórium (ZBL) megvalósítása

Erdős G.,^{1,2}, Hevesi L.², Kuslits L.¹, Lemperger I.¹, Lichtenberger J.¹,
Németh Z.²,
U. Nagy G.¹, Veres M.², Wesztergom V.¹

¹ MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet, Sopron, ² MTA Wigner Fizikai
Kutatóközpont, Budapest

Az MTA Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet és a Wigner Fizikai Kutatóközpont közös kezdeményezésére a földi mágneses tér többlépcsős kompenzációjával és az elektromágneses zavarok árnyékolásával a bolygóközi térre jellemző elektromágneses környezet kerül kialakításra. A kísérleti tér számos olyan űrfizikai, anyagtudományi kísérletnek, űreszköz-fejlesztésnek fog laboratóriumi körülményeket biztosítani, amiket korábban a Földön nem lehetett elvégezni.

A laboratórium kísérleti térből, az azt befogadó és egyben az aktív kompenzáló rendszer csévetestét hordozó befogadó-épületből, a közeli meglévő épületben kialakítandó kiszolgáló helyiségekből, valamint a két épületet összekötő szervíz folyosóból áll. Az átlagosan 48000 nT abszolút értékű geomágneses tér nagy része a kísérleti tér köré épített tekercsekkel a lehető legnagyobb mértékben kompenzálásra kerül. Ennek vezérlését az obszervatórium abszolút-mérésekkel korrigált ULF tartományú geomágneses mérőrendszere szolgáltatja. A maradék tér további csökkentése céljából, 3-4 nagyságrendnyi passzív árnyékolás kerül a kísérleti teret képező 2,5 méter élhosszúságú kamra formájában. Ezt a többrétegű, permalloy és alumínium lemezekből kialakított falak biztosítják.

A mágnesség az Univerzum alapvető tulajdonsága, mágneses teret gerjesztenek a csillagok, a bolygók, a csillagokból kiáramló plazmába befagyott mágneses tér erővonalai pedig átszövik a köztük lévő óriási térrészt. A mi Napunk is egy mágnesesen vezérelt csillag, mágneses terének eredete és szabályos ciklikusságának oka azonban pontosan nem ismert. A Nap mágneses terének rendezett alapállapota egy közelítőleg dipóltér. A fotoszférában a mágneses tér erőssége 50-100T. Ez a dipóltér a napciklus során multipól szerkezetűvé válik, a napfoltokkal egybeeső, rendkívül erős (5000-10000 T)

mágneses térrel rendelkező tartományok az egyenlítő irányába vándorolnak, majd ellentétes polaritású dipólus épül fel. A naptevékenységi ciklus 11, a mágneses közel 22 év. A mágneses tér nem csak az égitestek környezetében van jelen, hanem a csaknem „üres” csillagközi és a bolygóközi térben is ugyanis a csillagokból kiáramló plazma a csillag mágneses erővonalait magával hurcolja. Ez a mágnes tér a véges sebességgel (100-1000 km/s) plazmába fagyva felcsavarodik, az ekliptika síkjában pedig szögtartományonként változó polaritású szektorszerkezetet mutat. Nap-Föld távolságban a Napból eredő interplanetáris mágnes tér (IMF) erőssége 1-20 nT. Az IMF és a földi mágneses tér közötti erővonal-összekapcsolódás a napszél és a Föld közötti energiaátadás legfőbb mechanizmusa.

A kellően nagy szögsebességgel forgó, belsejében folyékony halmazállapotú, nagy fajlagos vezetőképességű anyagot tartalmazó bolygók ugyancsak gerjesztenek saját mágneses teret az ún. dinamóhatás révén. A geomágneses tér szimmetrikus összetevője adja a teljes tér minegy 90%-át. Ez a dipóltér egy 8×10^{22} Am²-es mágneses dipóllal helyettesíthető, amelynek tengelye kb. 11.5°-os szöget zár be a Föld forgástengelyével. Ehhez járulnak a nondipól összetevők, a litoszférában a Curie-pont alatti hőmérsékletű, ferromágneses anyagokat tartalmazó kőzetek remanens mágnesezettsége, valamint Nap-Föld kölcsönhatásból eredő külső térösszetevő. A térerősség az Egyenlítőnél megközelítőleg 24000 nT, a mágneses pólusoknál 66000 nT.

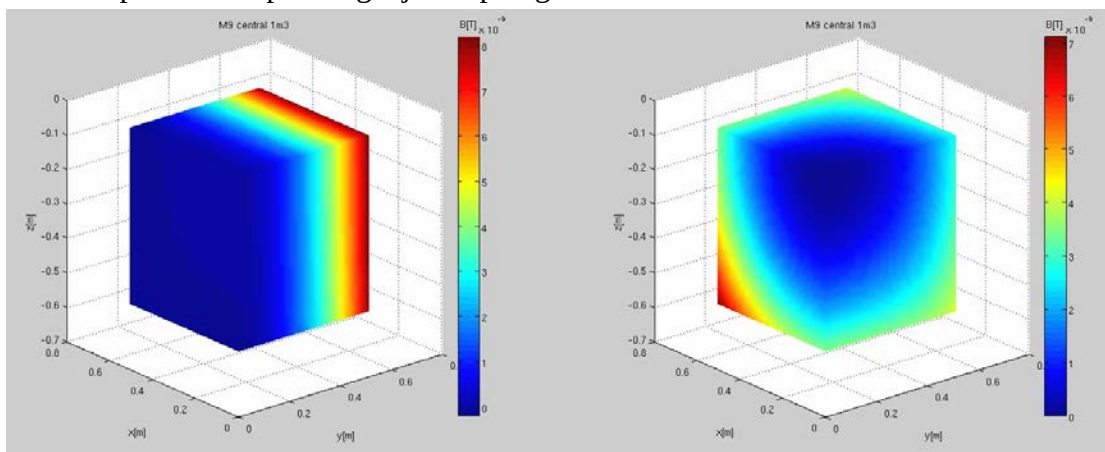
Laboratóriumi méretben az interplanetáris térre jellemző néhány nT, vagy annál kisebb térerősség a Földön igen nehezen valósítható meg az erős főtér, a tér időbeli változásai és a kőzetek eltérő mértékű remanens mágnesezettségéből adódó nagy térgradiens miatt.

A geomágneses tér hatékony csillapítása csak olyan környezetben valósítható meg, ahol a nagy áthatoló képességű ULF tér valós időben ismert, a tértorzulások, térgradiensek pedig a labor méretének dimenziójában elhanyagolhatók. Ennek alapján ideális helyszínnek adódott az MTA Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium. Az antropogén zajok szempontjából igen kedvező, hogy itt a Soproni-hegység kristályos kőzetei már közel 1.5 km mélyen vannak, a felettük levő fiatal üledék elektromágneses tulajdonságai (elhanyagolható remanens mágnesezettsége, nagy vezetőképessége 0,1-1 S/m) az elektromágneses zavarokkal szemben kellő védeltséget nyújtanak. 1957-ben kezdődött el a telluráramok, 1960-ban a mágneses tér, majd néhány év múlva az ionosféra és a légköri elektromos jelenségek megfigyelése. Az obszervatórium a nemzetközi geomágneses

obszervatóriumi hálózat minősített tagja (IAGA-kódja: NCK). A valós időben hozzáférhető geomágneses adatokat egy rádiófrekvenciás vektor-protonmagnetométer, két triaxiális fluxgate rendszer és 3 indukciós tekercs szolgáltatja 0.05 nT felbontással, rendszeres heti abszolút kontroll és az INTERMAGNET minősítési protokollja mellett. A geomágneses mérések mellett az obszervatóriumban az indukált elektromos tér, a Schumann-rezonancia, a légköri potenciálgradiens megfigyelése és az ionoszféra 4D leképezése (DPS4D radar) is folyamatos, és nemzetközi együttműködésekbe integrált.

Az aktív kompenzálást biztosító tekercsrendszerrel szembeni elvárás, hogy a lehető legnagyobb mértékű csillapítást biztosítson, méghozzá úgy, hogy a maradék tér legalább a műmetal kamra által elfoglalt térrésben homogén legyen. A kompenzáló rendszer geometriájának tervezésénél további szempont, hogy a tekercs a kamrába való bejutást nem akadályozhatja, és a tekercsek meghajtása minél kisebb Amper-menet (Am) érték mellett valósuljon meg.

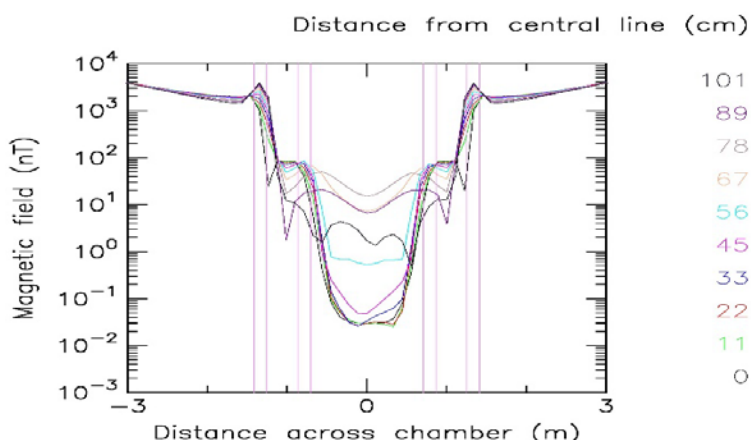
A műmetal kamra nélkül végzett numerikus számítások alapján a 9m-es Merritt elrendezés bizonyult az optimális megoldásnak. A földi teret kompenzálni képes meghajtásra pedig 100 Am körüli érték adódott.



1. ábra. A 9 méteres Merritt és Ruben elrendezések összehasonlítás a központi 1m²-es térrészben

A műmetal kamra a maradék teret a 10^5 nagyságrendű relatív mágneses permeabilitása miatt igen jelentősen befolyásolja, ezért a kamra jelenlétében kialakuló térre numerikus szimuláció készült. Ez esetben az első Maxwell

egyenlet (Ampère törvény) magnetosztatikus esetre vonatkozó alakját kell megoldani úgy, hogy a mágneses indukció és a térerősség kapcsolatát leíró anyagi egyenletben a relatív mágneses permeabilitás helyfüggő. A feladat számos egyszerűsítés mellett is igen nagy számításigényű. A közelítő megoldásból az adódik, hogy a kamra legbelső részén, ± 30 cm térrészben a térerősség 30 pT. A tervezett 0,5 nT tér a központi 1 m³-es térrészben bőven teljesül (lásd az 1. táblázatot). A mumetal kamra külső falában a térerősség 1000 nT nagyságrendű, a belsőben 100 nT (a mumetal lemezek felületét függőleges vonalak jelzik).



2. ábra. Az ábrán a mágneses térerősség nagysága látható a kamra tengelyében (0), valamint azzal párhuzamosan, különböző távolságban.

Külső tekercs Amper-menet	Közbülső tekercs Amper-menet	Belső tekercs Amper-menet	Átlagos tér (pT) ± 50 cm	Átlagos tér (pT) ± 30 cm
114.3	85.7	75.6	78	30
400	35.1	0	437	44
200	0	100	76	30
0	100	200	76	30

1. táblázat. A kompenzáló tekercsek árama és a belső mágneses tér: a három tekercs árama, és a ± 30 cm-es, valamint a ± 50 cm-es kockában lévő mágneses térerősség átlaga.

A **laboratóriumi épület** lényegében egy doboz, nemcsak formáját, hanem azonos szerkezetű határoló fenék-, oldal-, és tetőelemeit tekintve is. A

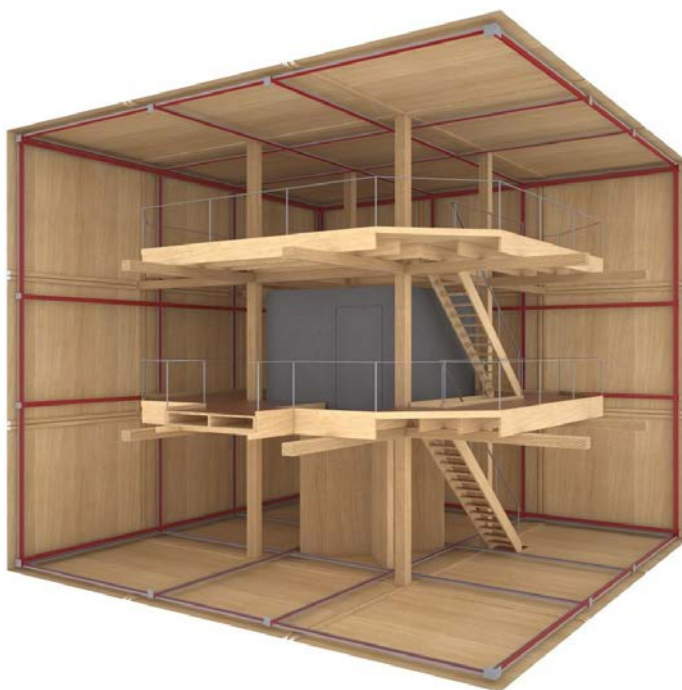
„dobozt” egy keményfa gerendarácson keresztül helyezzük az alapozásra. Az aljzatra ugyanúgy kiterjednek az előzőekben írt speciális követelmények, sőt még kiegészülnek az agyagos altalaj nedvesség hatására lejátszódó térfogatváltozás problémájával. Az építmény területét jelentősen meghaladva átlag 3 m mélységig talajcserét végzünk, helyén bevizsgált zúzottkő ágyazat készül, rajta aszfaltlemez teherelosztó alapozással.

Maga az épület egy összefüggő szabályos $9,69 \times 9,69 \times 9,69$ méteres belső laboratóriumi teret foglal magába, aminek szerkezetét oldalanként 9 db, összesen 54 db panel, és tartó-merevítő kettős kereszt belső térrács alkotja. A panelek, jellemzőn két réteg ellenirányú bordavázzal, keretbordával, két oldalon merevítő rétegtlemez, ill. faforgácslemez borítással, üveggyapot hőszigeteléssel, (hőhíd megszakító betétezéssel) előregyártva készülnek. A fal- és tetőpanelek külső felükön légréteget tartalmaznak, és ezek a zónák az összeszerelt épület egészében összefüggő légréssé válnak.

A belső gerendázat-térrács szerepe kettős, része a kockaház merevítésének, és hordozója a laboratóriumi üzemi járda-szinteknek. Rácsozat vízszintes rúdelemei átmenő, teljes belméret hosszúságúak (fél csappal egymásba eresztettek), míg az oszlophelyzetűek közötti harmadrész hosszúságúak. A rács rúdjai egymáshoz, valamint a négyes panelcsomópontokhoz összehúzó-feszítő csavarozással „sarok-mereven” kapcsolódnak.



3. ábra. A tervezett laboratóriumi és előkészítő épület modellje.



4. ábra. A laboratóriumi épület belsejében a gerendázat-térrács, valamint a csévetest látható

A 24. napciklus lefolyása és pár érdekes eseménye

Kálmán Béla

MTA CsFKI Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Kutatóintézete, Budapest

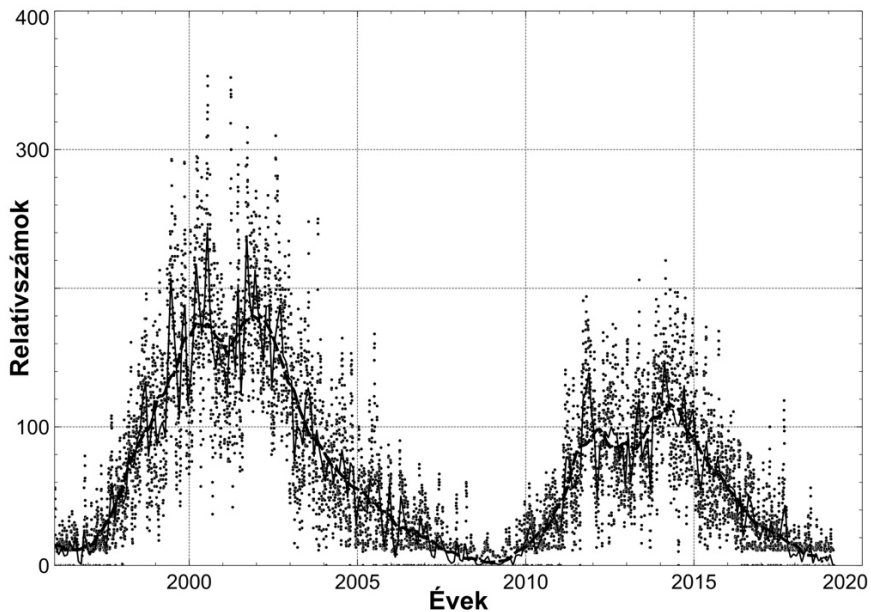
A 24. napciklus végefelé járva összefoglaljuk a szokatlannak tűnő, de nem példátlan napciklus lefolyását, elhelyezve a naptevékenység eddigi maximumai között. Ismertetjük a legnagyobb flereket okozó napfoltcsoportokat (NOAA 11748, 12192 és 12673), és dinamikájukat. Említést teszünk a nemrégiben felfedezett i.sz. 660 körüli, a legnagyobbak közé tartozó szoláris részecske-eseményről.

Bevezetés

A naptevékenységi ciklus kiismerésének nagy gyakorlati jelentősége van, földi hatásai miatt. A XX. sz. második felében eléggé szabályos maximumok sora után azonban a 24. napfolt-ciklus figyelmeztetett arra, hogy a naptevékenységben jelen van egy erős véletlenszerű elem is. Befejeződése alkalmából már áttekinthető a ciklus és legfontosabb eseményei. A napfolt-relatív-szám többszáz éves adatsora időközben revízió alá került bizonyos statisztikailag kimutatható inkonzisztenciák miatt [1], az ábrákban az új, 2.0 adatsor [2] van felhasználva.

A 24. napciklus

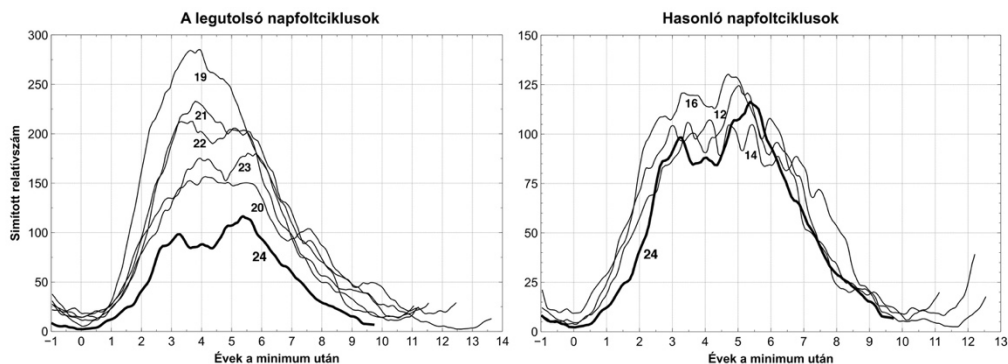
A pillanatnyilag zajló 24. napciklus a végefelé tart, egyre több a napfolt nélküli nap, és magasabb szélességeken már megjelentek az új ciklus fordított mágneses dipóljai. Magát a mini-



1.ábra A 23. és 24. napciklus napi, havi és havi simított relatív számai (2.0 adatsor)

mumot majd csak bekövetkezte után kb. egy évvel lehet megmondani, előreláthatólag 2019 második felében várható. A simított relatív szám-görbe bár ellaposodni látszik (1. ábra), de nem

annyira, mint az előző ciklus végén, így nem várható annyira elhúzódnó minimum, mint 2008-9-ben. Az új, 25. ciklushoz tartozó dipólokban a mágneses tér még nem erős, apró pórusokat tartalmaznak, többnyire egyet-kettőt, NOAA számozást még egyikük sem kapott március végéig.



2.ábra A 24. ciklust megelőző, és a hozzá leginkább hasonló naptevékenységi ciklusok

Most már teljes biztonsággal látni lehet, hogy a 24. ciklus, bár alacsonyabb a megelőző néhány ciklusnál, de nem rendkívüli, az eddigi naptevékenységi ciklusok közül több hasonló is volt már. Jellemzően elhúzódnó, kettős csúcsú maximum, amelynél a második csúcs a magasabb, mint a 12. és a 16. ciklusok, de hasonlóan kettős szerkezetet mutat a megelőző, magasabb 22. és 23. ciklus is (2.ábra). Az első maximumot rendszerint a sok apró foltot tartalmazó csoportok okozzák, míg a másodikat a ciklus második felében gyakrabban jelentkező bonyolultabb, komplexebb csoportok. Ebben a ciklusban is a leszálló ágban, 2017. szeptemberében jelentkezett a legnagyobb aktivitást mutató napfoltcsoport (NOAA 12673, l. később).

Mint mindig ilyentájt, a szakirodalomban elszaporodtak a következő, 25. napciklusra vonatkozó jóslatok. Hasonlóan a 24. ciklus előrejelzéseéhez, most is elég nagy a szórás, a Grand Minimumtól (és a hozzátartozó jégkorszaktól) a kb. 100-as maximumon át az egészen magas értékekig. Érdekes módon, az alacsony értékeket többnyire olyan helyeken lehet találni, amelyek szkeptikusan viszonyulnak a klímaváltozáshoz, és a naptevékenység hatásának tartják. Használatos módszerük többnyire a szigorú matematikai ciklusok, vagy a bolygók árapálykeltő hatásán alapul (l. pl. [3]), ami a folyamatok fizikáját kevésbé magyarázza. Jobb beválási valószínűsége van a dinamelméleten alapuló, annak egyes megfigyelhető jelenségeit, pl. a Nap sarki sapkáinak mágneses polaritásváltását felhasználó módszereknek, ezek a 25. ciklust hasonlóan várják az elmúlt 24-hez, talán kissé magasabbra. Mindenesetre az előrejelzést megnehezíti a napciklusban bizonyítottan jelenlévő véletlen komponens, és a mágneses tér oda-vissza alakulása, saját magával való kölcsönhatása. Részemről a 100-130 körüli maximumot tartom valószínűbbnek egy új Maunder-minimumnál.

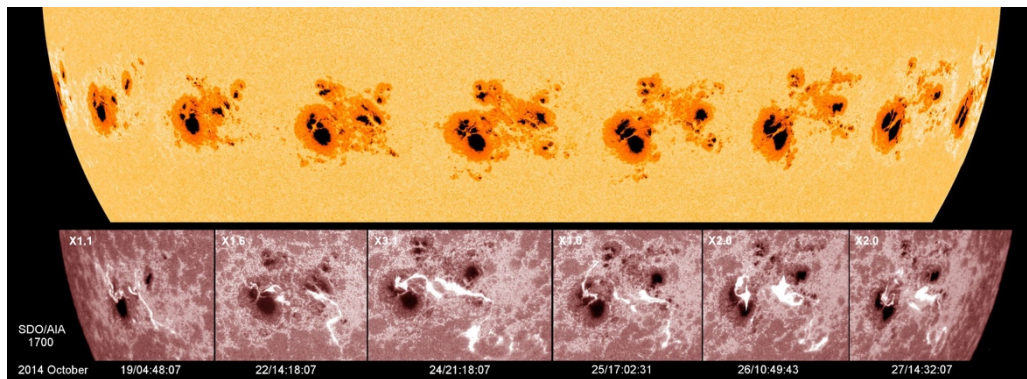
A 24. ciklus legaktívabb napfoltcsoportjai

Bár a most lezáródó ciklus nem volt nagyon aktív, azért előfordultak benne jelentős események, alább a legtöbb X röntgenosztályú flert produkáló 3 napfoltcsoportot ismertetem.

NOAA 11748 Ez a napfoltcsoport elég jelentéktelennek látszott, amikor a napkorong keleti peremén befordult 2013 máj. 13-án. Maximális területe 500 m.s.h (a felénk forduló félgömb milliomodrésze) volt, 16-án. Bár látszatra egy szétszórt, szabályos foltcsoportnak tűnt, a mágneses polaritások eléggé össze voltak kavarodva benne, a vezető foltban lévő két umbra pl. különböző és fordított polaritású volt, a fő polaritáselválasztó vonal (Polarity Inversion Line, PIL) pedig nagyjából párhuzamos volt az egyenlítővel, ami szintén az aktívabb foltcsoportok sajátja. Így közvetlenül a befordulás után 4 X osztályú fler történt 3 nap alatt a napkorong keleti oldalán,

nagyságuk X 1.2 és X 3.2 közt változott. Ezekután a foltcsoport a lassú szétesés stádiumába jutott, és kifordulásakor, máj. 25-én már gyakorlatilag csak egy fáklyamező jelezte helyét.

NOAA 12192 (2014. okt. 17-30) Ez egy valóban óriási napfoltcsoport, az utolsó két napciklus legnagyobbja, kis híján nem került be a valaha is mért legnagyobb területek első tíz darabja közé (>4500 m.s.h. okt. 23-án, 3.ábra). Átvonulása során 6 X osztályú fler történt benne,



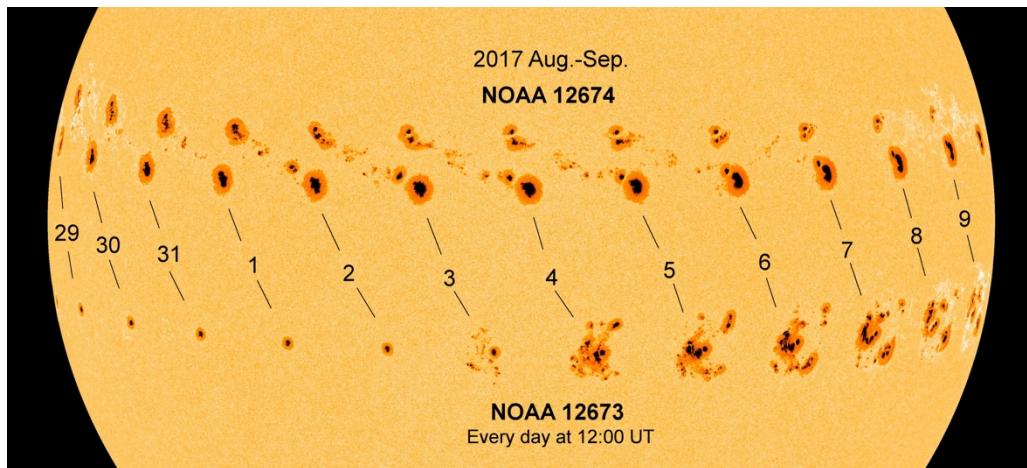
3.ábra A NOAA 12192 foltcsoport a SDO 36 óránkénti felvételein, és a hat nagy fler maximuma

X1.0 és X3.1 közt, időben eléggé egyenletesen eloszolva. A nagy aktivitást a foltcsoport szerkezete és fejlődése magyarázza. A Solar Dynamics Observatory (SDO) sokoldalú megfigyelési adatbázisából látható, hogy a befordulásakor még elég egyszerű, bipoláris szerkezetű a foltcsoport, bár a nagyon jelentős nagyságú követő umbra már szokatlan, foltcsoportokban általában a vezető foltok a legjelentősebbek és legstabilabbak. Ebben az egyébként is abnormálisan nagy hajlásszögű dipólban bukkan fel keresztben egy új, gyorsan fejlődő, széttartó kisebb foltcsoport mágneses fluxusa, amelynek vezető foltjához tartozó gyűrűáramlás (moat flow) a továbbiak során elsodorja és megsemmisíti a kezdeti dipól vezető foltját. A nagyobb flerek az új vezető mágneses polaritás és a régi, nagy követő mágneses polaritású töredezett umbra közti PIL két oldalán jelentkeztek, a nyíró mozgások következtében. Kifordulásakor a foltcsoport ismét bipoláris lett, csak fejet cserélt, a közepén felbukkant új foltcsoport vezető umbrája vette át a vezető szerepét, a régi vezető és az új követő polaritású foltok eltűntek.

NOAA 12673 és 12674 (2017. aug. 29 – szept.10) Két, viszonylag nagy napfoltcsoport, amelyek közül a kisebbik produkálta a 24. ciklus legnagyobb flerjét (X9.3, 2017. szept. 6, 12:00). A kicsivel később beforduló NOAA 12674 az egyszerűbb eset, teljesen szabályos, nagy (kb. 1000 m.s.h.), nyílt bipoláris csoport, jól fejlett vezető folttal, szokásosan kissé szétszórtabb követő résszel. A foltcsoport közepén megfigyelhető volt kevés új mágneses fluxus felbukkanása apró foltok formájában, ezek széttartó mozgásuk során a megfelelő vezető vagy követő részbe soroltak be. Ahogy a foltcsoport haladt a kifordulás felé, közepe kiürült, és a két végen található fő foltok is a bomlás jeleit kezdték mutatni. A NOAA adatai szerint ebben az aktív vidékben egész átvonulása alatt mindössze 13 C osztályú, azaz (majdnem) legkisebb fler volt.

Egészen más a helyzet a NOAA 12673 esetében. Ez az első héten egy teljesen stabil, nyugodt, magányos, vezető polaritású folt volt, változatlan, 100 m.s.h. körüli területtel. A változás szept. 2-án 12:00 UT után kezdődik, amikor új foltocskák jelennek meg a régi stabil folttól keletre, érdekes módon ugyanekkor, ugyanezen a szélességen, de kb. 45 fokkal nyugatabbra egy új, kis aktív vidék (NOAA 12676) is kezd kifejlődni. A következő napon több új mágneses dipól bukkan fel keletre és északkeletre a stabil öreg folttól, így szept. 4-e elejére kialakul az alapstruktúra: egy „lehorgonyzott” öreg vezető folt, amelytől keletre jelentős új dipólok, új mágneses fluxus bukkan fel, és törekszik nyugat felé mozogni, amely mozgásnak ellenáll a rögzítettnek látszó öreg folt. Ezért az új és régi vezető polaritás összeütközik, egy parabolikus, lökéshullám-szerű alakzat keletkezik, és a (szokatlanul) szintén nyugat felé törekvő követő

polaritás feltorlódik, nekinyomódik az előtte megakadt vezető polaritásnak, ezáltal megnövelve a mágneses gradienst. Egyes megfigyelések szerint [4] a mágneses tér felbukkanása ebben a csoportban a leggyorsabb volt, amit valaha is mértek. Nem csoda hát, hogy 16 órán belül három X osztályú fler is lezajlott ezen a helyen, amelyek közül a középső (X9.3) a legnagyobb volt az egész 24. napfoltciklusban.



4.ábra A NOAA 12673/4 napfoltcsoportok a SDO naponkénti felvételein

A továbbiakban az új aktivitás foltjai körülfolyták a régi folt által képzett akadályt, mögötte egy összetartó hullámsodort képezve, amelyben az összeütköző mágneses polaritások közrejátszhattak a ciklus második legnagyobb (X8.2) flerjében, közvetlenül a napkorong nyugati peremén. Ez a fler tengersizinten érzékelhető kozmikus sugárzásnövekedést (GLE) is okozott, a másodikat ebben a ciklusban, az első 2012. máj. 17-én volt, egy M5.1 flerrel kapcsolatban. A 2017 szeptemberi üridőjárás-részecskeeseményekről megjelent egy kiváló összefoglaló [5].

Még egy régi részecskeesemény

A naptevékenység földi hatásainak figyelembevételénél fontos annak megállapítása, hogy mekkora lehet az elképzelhető legnagyobb, flerrel kapcsolatos részecskeesemény, amely a Földet érheti. Ehhez felhasználják a földi nagy jégtakarók (Antarktisz, Grönland) évgyűrűiből kinyert kozmogén izotópokat (^{10}Be , ^{14}C , ^{36}Cl), miután kiderült, hogy a nitrát-tartalom nem jó nyomjelző ebből a célból. A nemrégiben publikált i.sz. 774/775 és i.sz. 993/994 események után ez év elején jelent meg egy publikáció [6], amely szerint i.e. 660 körül is látható egy kiugrás a kozmogén izotópok gyakoriságában, amely egy nagyon kemény spektrumú részecskeeseménynek tulajdonítható, amely hasonló nagyságú lehetett, mint az eddig ismert legnagyobb, az i.sz. 774/775-ös.

Irodalom

- [1] Clette,F.,Cliver,E.W.,Lefèvre,L. & al. (2016) Sol.Phys,DOI: 10.1007/s11207-016-1017-8
- [2] <http://sidc.oma.be/silso/datafiles>
- [3] N-A. Mörner (2015) Natural Sci., DOI: 10.4236/ns.2015.711052
- [4] Sun, X & Norton, A. A. (2017) Res. Notes AAS 1:24
- [5] Jiggins,P., Clavie,C., Evans,H. & al. (2018) Space Weather, DOI: 10.1029/2018SW001936
- [6] O'Hare,P., Mekhaldi,F., Adolphi,F. & al. (2019) PNAS, DOI: 10.1073/pnas.1815725116

Tesztadatsorok készítése az ESA Solar Orbiter Magnetométer számára

**Kalocsai Lilla¹, Madár Ákos^{1,2}, Opitz Andrea¹, Erdős Géza¹,
Kecskeméty Károly¹, Szabó Klaudia², Dósa Melinda¹, Forczek Bianka¹,
Földy Lajos¹**

¹ MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

² Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

Az űridőjárás megértéséhez, előrejelzéséhez elengedhetetlen a napszél keletkezésének, illetve dinamikájának vizsgálata. Ezeket a célokat tűzte ki az ESA is a Solar Orbiter misszió létrehozásával. A várhatóan 2020-ban felbocsátott űrszonda heliocentrikus pályára állva fogja kutatni a napszél eredetét, gyorsítási mechanizmusát, minden eddiginél nagyobb időbeli felbontással. A napszonda pályája különleges, hiszen olyan helioszférikus pozíciókban fog méréseket végezni, ahol eddig nem járt űrszonda: a Naptól 0,28–1 AU radiális távolságra, $\pm 34^\circ$ heliografikus szélességek között. Munkánk során az űrszonda fedélzeti MAG magnetométerének feldolgozó és vizualizációs programjához készítettünk tesztadatsorokat, melyekkel becslést adtunk a Solar Orbiter által bejárando, Napközeli térrészben uralkodó napszél-paraméterek nagyságáról. A tesztadatsorok előállításához űrszondás méréseket és ballisztikus propagációs módszert alkalmaztunk. Az ekliptikában a Venus Express, Helios-A és -B, az L1-ben elhelyezett napszondák, valamint a MESSENGER űrszonda méréseit használtuk, az ekliptikán kívül az Ulysses űrszonda adatait extrapoláltuk a Solar Orbiter számára releváns pozíciókba. Külön adatsorokat készítettünk az átlagos- és minimum napszél paraméterekre, illetve a tranziens CIR és CME eseményekre. Az űrszondák hosszabb időszakokban vizsgált mérési adatain statisztikai elemzéseket végeztünk az interplanetáris mágneses térre vonatkozóan.

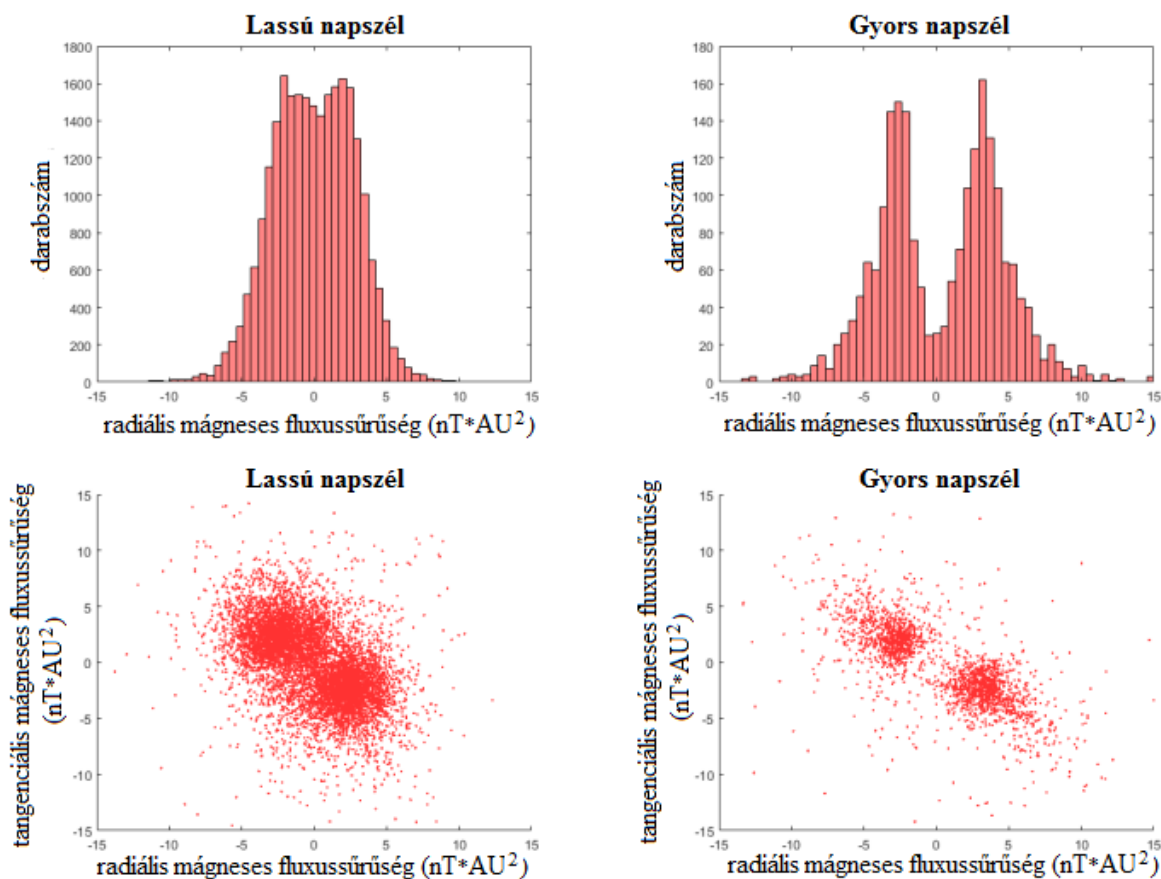
Bevezetés

A Solar Orbiter az ESA űrszondája, melyet várhatóan 2020 februárjában fognak felbocsátani. Az űreszköz feladata a Nap vizsgálata lesz. Pályája különleges, hiszen olyan radiális távolságnál és olyan heliografikus szélességeken ($\pm 34^\circ$ heliografikus szélességek között, perihéliumban mindössze 0,28 AU távolságra a Naptól) fog méréseket végezni, ahol eddig nem járt űrszonda. Méréseinek tudományos célja, hogy jobban megismerhessük a Nap mágneses dinamójának a működését, valamint a tranziens jelenségek koronában és a belső helioszférában való terjedését, a napszélgyorsítás mechanizmusát. Ezen tudományos célok teljesítése érdekében a szondán in situ (pl.: MAG magnetométer, SWA plazma-analizátor) és távérzékelő műszerek is helyet fognak foglalni.

Az általunk végzett munka célja az volt, hogy a szondára felszerelt MAG fluxgate magnetométerhez készített feldolgozó és vizualizációs programok számára elérhetővé tegyünk olyan elméleti úton meghatározott adatsorokat, melyeket valódi mérési adatokból számítottunk és melyek a Solar Orbiter által elért, de a régi szondák által eddig nem látogatott térrészben hivatottak leírni bizonyos jellemző jelenségeket, tranzienseket, nyugodtabb időszakokat, nagyságrendi becslést adva az ott, a misszió során mérhető mennyiségekre. Munkánk során korábbi űrmissziók mérési adatait használtuk, melyeken előzetes statisztikai vizsgálatokat végeztünk és melyekből a tesztadatsorokat származtattuk.

Statisztikai módszerek kvalitatív elemzésekre

A vizsgált térrészben uralkodó napszél-paraméterek előzetes kvalitatív elemzésére statisztikai módszereket alkalmaztunk. Az adatsorok előállításához szükséges adatokat olyan korábbi űrszondák méréseiből vettük, amelyek vagy a Nap megfigyelésére készültek (L1-pontban tartózkodó OMNI szondák, Helios-A és -B, Ulysses) vagy pályájuk bizonyos szakaszaiban időről-időre zavartalanul tudták mérni a napszelet (Venus Express, MESSENGER). Feladatunk volt az interplanetáris mágneses tér abszolútértékének nagyobb időtartamra vett átlagainak kiszámítása az ekliptikában, az egyes értékek előfordulási gyakoriságának meghatározása, valamint jellegzetes és extrém eseményekhez (CME, CIR) tartozó idősorok keresése az űrszondák mérési adatain. Példaként, az 1-es ábrákon a lassú- és gyors napszél mágneses fluxussűrűség-eloszlása látható az OMNI szondák 6 órás átlagolt mérési adatai alapján, a Naptól 1 AU távolságban.



1-es ábra: radiális mágneses fluxussűrűség-eloszlás (felső sor), a radiális és tangenciális mágneses fluxussűrűség együttes gyakorisági eloszlása (alsó sor) lassú (bal oldal) és gyors (jobb oldal) napszél esetén az ekliptikában, 1 AU-nál.

Az 1-es ábrákon látható, hogy a mágneses szektorok sokkal jobban elkülöníthetők gyors napszél esetében, mint lassú napszélénél, melynek oka, hogy a lassú napszéllel nagyobb Parker-szög járul, ezért könnyen összemosódnak a különböző szektorokat jelző csúcsok [1].

A csúcsok elkülönítése nehezedik a Naptól mért távolság növekedésével is. Ennek oka a radiális mágneses tér és a mágneses fluktuációk távolsággal való csökkenésének különböző mértéke: a radiális mágneses tér $1/r^2$ szerint, míg a fluktuációk átlagosan csak $1/r^{1.3}$ szerint csökkennek a távolsággal. Ez azt eredményezi, hogy a Naptól távolodva a fluktuációk relatíve nőnek az átlagos radiális mágneses térhez képest.

Tesztadatsorok létrehozása

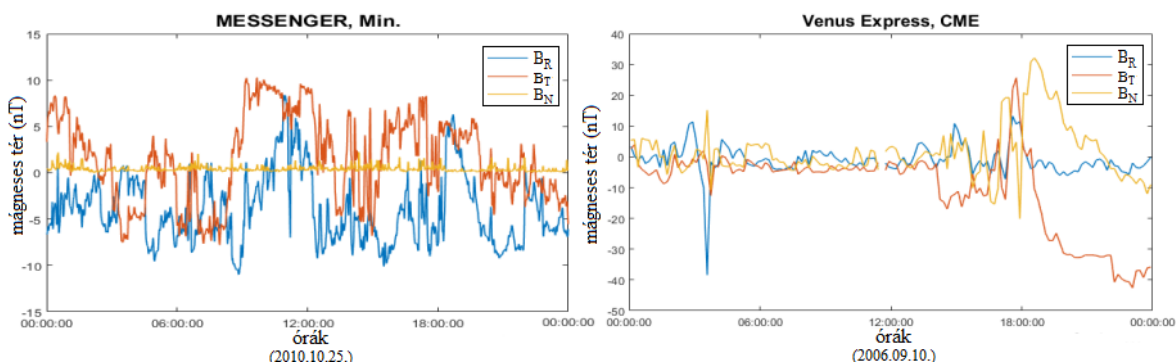
Tesztadatsorok készítése során célunk volt a $\pm 35^\circ$ naprajzi szélességek között, a Naptól 0,3—1 AU távolságokra megjósolni a napszél paramétereinek (a mágneses tér radiális-, tangenciális- és normál komponensének, a protonszűrűségnek és a napszélsebességének) különböző várható értékeit (átlagértéket, minimumot, CIR- és CME események alatt felvett értékeket), RTN koordináta-rendszerben. [RTN (Radiális - Tangenciális - Normál) koordináta-rendszer: *radiális komponens*: a Nap középpontjától mutat a tárgy felé, *tangenciális komponens*: a Nap forgástengelyének a radiális komponenssel vett keresztszorzata, a *normál komponens* kiegészíti a derékszögű, jobbsodrású rendszert.]

Az ekliptikai (illetve ekliptika közeli) tesztadatsorokat a Venus Express, Helios-A és -B, az L1-ben elhelyezett OMNI- és a MESSENGER űrszondák méréseiből származtattuk ballisztikus propagációs módszerrel.

A ballisztikus propagációs módszer [2] alkalmazása során egy mérési adatsort időben eltolunk, állandó, a radiális távolságtól független napszélsebességet feltételezve. Ekkor a mérési pont és az új pont (ahova extrapolálunk) mérési ideje között a következő összefüggés adódik:

$$t_{új} = t_{mért} - \Delta t + t_r$$

ahol $\Delta t = \Delta s / v_{mért}$ a radiális távolságkülönbségből adódó időkülönbség, $t_r = a / \omega$ pedig a Nap forgásából adódó longitudinális különbség. Mivel a plazmasebességen kívül más mennyiséget nem tekinthetünk állandónak, a mágneses térre és a plazmára vonatkozó adatokat korrigáltuk a távolsággal: a protonszűrűséget és a mágneses tér radiális komponensét $1/r^2$ -el arányosnak, míg a mágneses tér azimutális- és tangenciális komponensét $1/r$ -rel arányosnak vettük.



2.ábra, bal oldal: Mágneses komponensek nyugodt időszakban az ekliptikában 0.4 U-nál (MESSENGER mérés), jobb oldal: Mágneses komponensek CME esemény alatt az ekliptikában 0.7 AU-nál (VEX mérés).

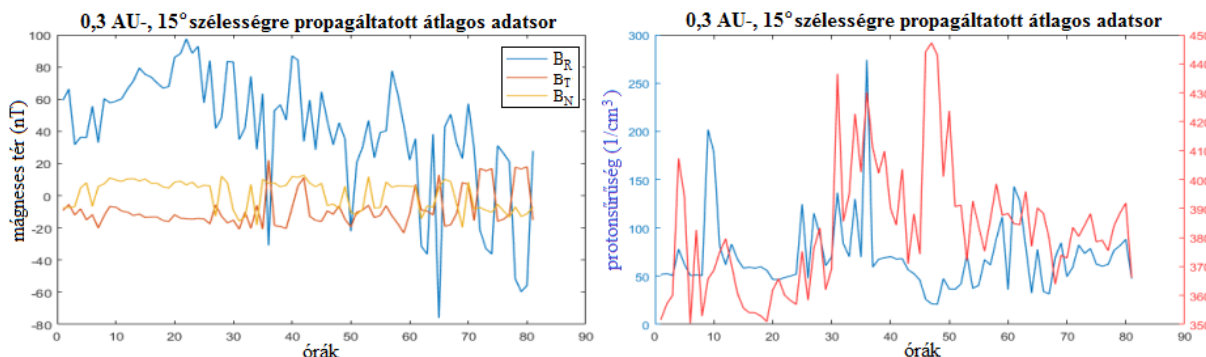
Ekliptikán kívüli tesztadatsorokat az Ulysses űrszonda mérési adatainak segítségével készítettünk. Az Ulysses $\pm 35^\circ$ naprajzi szélességek között történt óránkénti átlagméréseit - állandó napszélsebességet feltételezve - visszavetítettük a Naptól 0,3—1 AU távolságokba. A mért mágneses tér adatokat és a protonszűrűséget a fent leírt módon korrigáltuk a távolsággal.

Az átlagos- és minimum napszél adatokhoz az Ulysses azon méréseit használtuk, melyek a Naptól számított 2,5 AU-n belül voltak.

Az átlagos napszél-értékekhez a keresett szélességeken azokat a méréseket propagáltattuk vissza a keresett távolságokba, ahol a napszél sebessége 350—450 km/s, a mágneses tér legnagyobb komponensének abszolút értéke pedig 1—5 nT közötti volt.

A napszélminimum értékeihez azokat a mérési adatokat használtuk, ahol a mágneses tér legnagyobb komponensének abszolút értéke 1 nT alatt volt.

CIR és CME eseményekhez tartozó paramétereket az események mérési távolságától függetlenül, az események időpontjaiban mért adatok alapján számítottunk. A 3. ábrán példaként a 15°-os heliografikus szélességhez tartozó, 0,3 AU Naptól vett távolságra propagáltatott adatsorunk látható.



3. ábra: Ulysses mérésből propagáltatott adatsor 15° heliografikus szélességnél, 0,3 AU-nál. Mágneses komponensek átlagos időszakban (bal), protonszűrűség és radiális plazmasebesség (jobb).

A számított adatsorok text fájlokban találhatóak a <https://hdc.rmki.kfki.hu/SOMAG/> weboldalon, adott R radiális távolságokhoz (0,3—1 AU, 0,1 AU-s lépésközzel) és adott naprajzi szélességekhez (-35°— +35°, 5°-os lépésközzel), ahol például a 30°-hoz tartozó adathalmazban a $30^\circ \pm 2,5^\circ$ szélességekhez tartozó adatok találhatóak.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a Helios, Venus Express, Ulysses, MESSENGER, OMNI, valamint a CDPD AMDA adatbázisok csapatainak. A munka az ESA-val kötött 4000120190/17/NL/SC szerződés részeként valósult meg.

Irodalom

- [1] G. Erdős, A. Balogh (2012): Magnetic Flux Density measured in fast and slow solar wind streams, The Astrophysical Journal 753(2):130, DOI: 10.1088/0004-637X/753/2/130
- [2] Opitz et al. (2009): Temporal evolution of the solar wind bulk velocity at solar minimum by correlating the STEREO A and B PLASTIC measurements, Solar Physics 256(1-2):365-377, DOI: 10.1007/s11207-008-9304-7

Alföldi szikestől az Atacama-sivatagig: miként támogatjuk az ExoMars rover fúrásait

Á. Kereszturi¹, Zs. Kapui², B. Pál¹, Á. Skultéti³

¹ MTA CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, ² MTA CSFK Földtani és Geokémiai Intézet, ³ MTA CSFK Földrajztudományi Intézet. E-mail: kereszturi.akos@csfk.mta.hu

Az ExoMars rover fúrásainak tervezése, végrehajtása és értelmezése támogatására egy terepi műszer kifejlesztése, alkalmazása és laboratóriumi mintaelemzés zajlott az űrtevékenység földi szegmense részeként. Az eredmények segítenek a marsi munka tervezésében és végrehajtásában.

Bevezetés

Az ExoMars 2020 rover nevű küldetés a tervek alapján első alkalommal fog 2 méter mélyre lefúrni a Marson, majd az onnan kiemelt mintát laboratóriumában elemezni. Az ESA kutatóprogramjában közreműködve a CSFK, a BME, az MBFSZ munkatársai kifejlesztettek egy ún. terepi furatlyuk-fal scannert [1], amelynek segítségével különböző terepi furatok falai elemezhetők, majd a kiemelt mintát laboratóriumban optikai, infravörös és Raman módszerrel vizsgálva a célkőzet további jellemzői tanulmányozhatók.

A kutatómunka keretében 14 különböző helyszínen, közöttük Magyarországon, a Szaharában [2] és az Atacama-sivatagban [3], valamint az ExoMars rover terepi tesztpéldányával együtt 2018-as spanyolországi Tabernas-sivatagban segítette a rover fúrásainak értelmezését földi viszonyok között. A vizsgált üledékes és vulkanikus kőzetek elemzése, mint esettanulmányok általános jellemzőket és várható megfigyelés típusokat jeleznek előre, ami segíti a rover munkájának tervezését.

Munkamódszerek

A terepi tesztelés során szűrőbottal és terepi kézi fúróval készültek a furatlyukak, amelyek belső felületét a BHWI nevű műszer rögzítette [1]. A kiemelt mintákat egy NICON Eclipse E600 POL mikroszkóppal, egy FTIR Vertex 70 infravörös spektrométerrel (4000-400 cm^{-1} lefedett tartomány, 6 cm^{-1} felbontás), és a Morphologi 3GI szemcseelemzővel, valamint a hozzá kapcsolt Kaiser Optical Systems Raman Rxn1TM Raman spektrométerrel (785 nm hullámhosszú lézerrel, 150- 1850 cm^{-1} tartományban) vizsgáltuk.

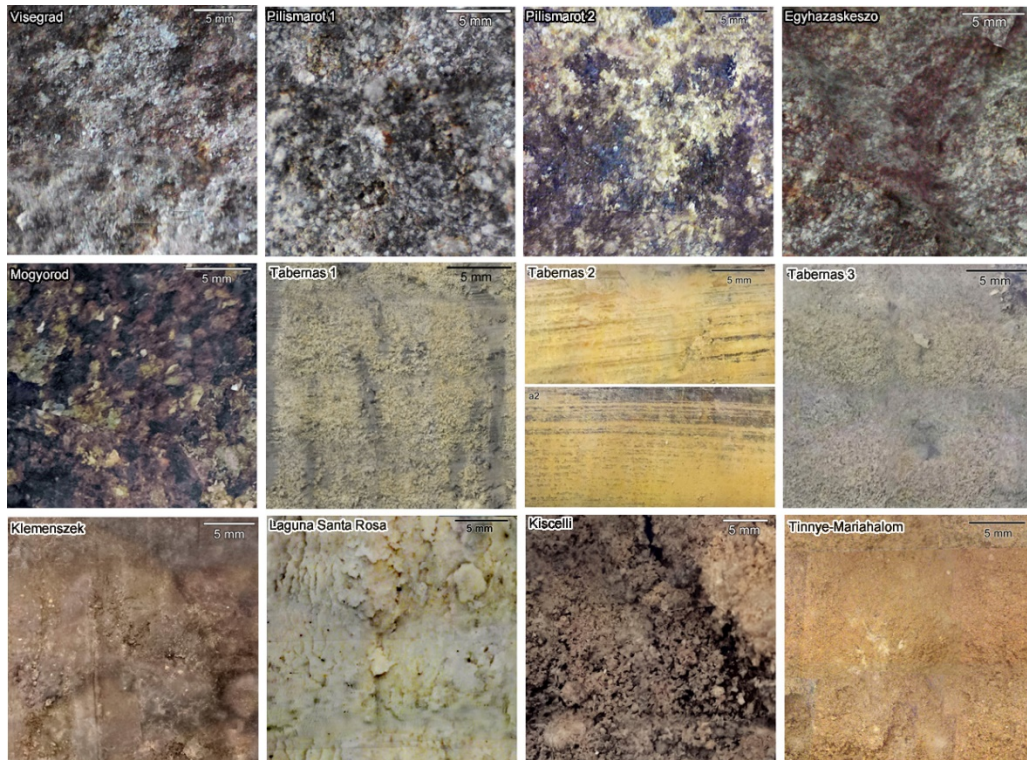
Eredmények

A furatlyuk falakon változatos alakzatok mutatkoztak, amelyek részben a kőzetképződés viszonyaihoz kapcsolódnak, de megjelentek rajtuk a fúrás mesterséges képződményei is. Általában igen heterogének voltak a furatlyuk-falak, főleg a finomszemcsés üledékekben – miközben a kinyert és porított minta sokkal homogénebbnek mutatkozott. Jellegzetes volt a puhább ásványok deformációja, az aggregátumok képződése, a kihullott vagy korábban kioldott elegyrészek után visszamaradt üregek előfordulása. Ugyanakkor rétegzés csak ritkán jelentkezett



1. ábra. A BHWI furatlyuk-fal képfelvevő a rover terepi példányá mellett a Tabernas-sivatagban.

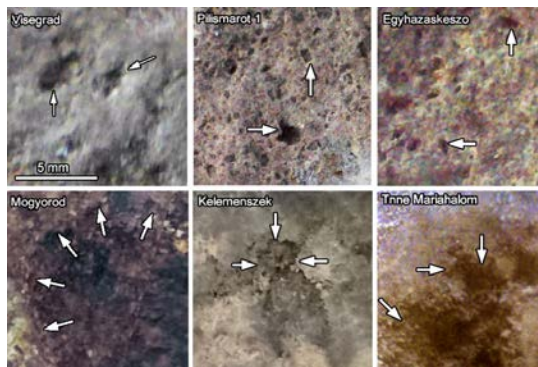
a furatlyuk falán, noha esetenként a közeli, azonos rétegtani helyzetű, szabadfelszíni kibukkanásoknál látszott ilyen, de ezeknél az erózió kihangsúlyozta az egyes rétegeket, eltérő keménységük miatt.



2. ábra. Példa az egyes furatlyuk falak eltérő kinézetére 1x1 cm-es részleteken.

A képek alapján könnyű volt a vulkanikus és üledékes típusú területek elkülönítése, ellentétben a minta elemzésekkel, amelyekben hasonló, általánosan előforduló ásványok mutatkoztak. Néhány esetben volt csak akkor a dominanciája a filloszilikátoknak, vagy a gipsznek, hogy az összetétel egymagában üledékes eredetre utalva. A furatlyukak falának kinézetét a laborvizsgálatokkal a deformálódó ásványok előfordulása révén sikerült összekapcsolni.

Az EXM roveren nincs lehetőség a kiemelt furatmag megfelelő részének kiválasztására. Azonban ennek fontosságára azok a terepi minták mutattak rá, amelyekben a szerkezeti információk fontosak pl. a lerakódási viszonyok (folyóvíz/tavi) változás miatt, avagy kis térfogatban megjelenő ásványi előfordulások (pl. mállott repedéskitöltő anyag, beszáradozó töfenék üledékek) koncentrációja révén, amely a teljes mintát elemmezve igen alacsony, esetleg kimutatási határ alatti.



3. ábra. Példa a kihullott és kioldott részekre a furatlyuk falak 1x1 cm-es részletein.

A terepi munka során fontos a furatlyuk-falak egyes részeinek kihullása, amely a cementáció különbségeire, erősebbek aggregált egységek létre utalt. A kihullott részek mérete és alakja az adott litológiára jellemző volt, az üledékes területeken mutatkozott repedések mentén illetve aprószemcsék formájában – ellenben a vulkanikus kőzeteknél, ahol egy-egy nagyobb szemcse kipattanása mutatkozott.

Az optikai és az EXM roveren tervezet infravörös furatlyuk-fal elemzés, valamint az ezek nélküli laboratóriumi mintaelemzés révén kinyerhető ismeretek összehasonlítása az 1. táblázatban olvasható. Ezek alapján a kinyerhető ismeretek elkülönülő csoportja van ahol a furatlyuk-fal elemzés a lerakódás fizikai viszonyaira ad jellemzőket, ilyeneket a kiemelt minta „klasszikus” laborvizsgálatai nem képesek nyújtani.

1. Táblázat. Optikai és IR furatlyuk-fal elemzés, és csak a kinyert minta laboratóriumi elemzése alapján kinyerhető ismeretek, ahol 0 az ismeret hiányát, 2 a biztos azonosíthatóságát jelenti.

jellemző	optikai	infravörös	csak labor
szemcsék elkülönítése	2	1	0
szemcseméret megállapítása	2	1	1
szemcsék irányultsága	2	1	0
szállítási mód becslése	2	1	1
aggregátumok azonosítása	1	0	0
szemcsék közötti kötőanyag azonosítása	2	1	1
függőleges trend	2	1	0
rétegeesség	2	1	0
ásványtípus megállapítása	0	2	2
hidratált ásványok azonosítása	0	2	2
agyagfrakció azonosítása	1	2	2
mállástermékek azonosítása	1	2	2
eróziós és száradási nyomok azonosítása	2	1	0

Véggöveketkeztetések

A furatlyuk-fal mozaikok alapján az üledékes szerkezetek, az aggregátumok, repedések és kihullott elemek jól azonosíthatóak, és összefüggést mutatnak a terület közettani adottságaival. A szemcseméret becslésében nincs nagy különbség a falban és a kiemelt mintában végzett mérések között, a fal deformációs formái pedig utalnak a kőzetanyag szilárdságára. Míg a furatlyuk-fal kinézetéből becsült deformálhatóság, és az ásványtani összetétel között van szerény kapcsolat, rétegtani megfigyelésekre kevésbé nyílt lehetőség, mint az a szabad felszíni kőzetkibukkanások alapján várható. A furatlyuk-fal megfigyelések segítenek a minta kontextusba helyezéséhez – utóbbi információ a kiemelt és összetört mintából nem nyerhető ki. Mindezek szerint kiválaszthatók olyan földtani környezet típusok, amilyenek a Marson is léteznek, és megbecsülve az ideális mérések típusát, egyes várható jellemzőket, hatékonyabbá tehető a rover munkája.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát a COOP_NN_116927 projekt (NKFIH), a spanyolországi részvételt a rover terepi tesztelésén az ESA EXODRILTECH, a számítástechnikai segítséget a megvalósításhoz pedig a GINOP-2.3.2-15-2016-00003 (NKFIH) Koszmikus Kockázatok projekt támogatta.

Irodalom

[1] Kereszturi A. et al. 2019. Open Astronomy 28, 1-13. [2] Kapui Zs. et al. 2018. Planetary and Space Science 163, 56–76. [3] Kereszturi Á. 2018. EPSC2018-216.

Magyar részvétel az ESA ARIEL missziójának tudományos programjában

Kiss Csaba¹, Szabó Róbert^{1,2}, Ábrahám Péter¹, Kóspál Ágnes¹, Moór Attila¹, Szabó Gyula^{3,4}, Vida Krisztián¹, Kiss L. László¹

¹ MTA CSFK Csillagászati Intézet, Budapest

² MTA CSFK Lendület Near-field Cosmology Research Group

³ ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium, Szombathely

⁴ ELTE-MTA Exobolygó Kutatócsoport, Szombathely

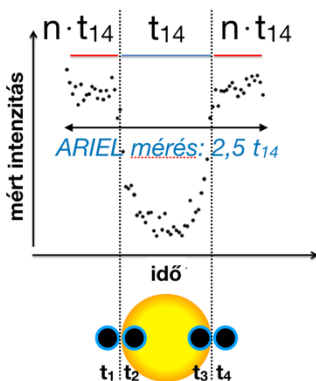
Az ARIEL-űrtávcső az Európai Űrügynökség (ESA) következő M-osztályú (közepes) űrtávcsöve lesz, amelyet 2018-ban választottak ki megvalósításra, és várhatóan 2028-ban kerül majd felbocsátásra. Az ARIEL legfontosabb célja már ismert exobolygók, elsősorban a csillagjukhoz nagyon közel keringő gázóriások és úgynevezett szuper-Földek légkörkémiájának vizsgálata átvonulási spektroszkópiával, azaz olyankor megfigyelve a színeképüket, amikor éppen a csillaguk előtt vagy mögött haladnak el. Az ARIEL mérési időpontjait az észlelhető exobolygó-átvonulások előre meghatározott időpontjai szabják meg. Ezek között összességében évi több ezer óra mérési idő marad. Az általunk kidolgozandó koncepció szerint ezt a mérési időt egyéb, tudományos szempontból fontos célpontok mérésére optimálisan fel lehet használni. Ezek olyan objektumok, amelyek esetében az infravörös spektroszkópiának nagy a jelentősége: barna törpék, aktív csillagok, illetve fiatal csillagok, protoplanetáris korongok és extrém portartalmú törmelékkekorongok színeképének változékonysága.

Az ARIEL-misszió

Az ARIEL-űrtávcső (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey) az Európai Űrügynökség (ESA) következő M-osztályú (közepes) űrtávcsöve lesz, amelyet 2018-ban választottak ki megvalósításra, és várhatóan 2028-ban kerül felbocsátásra. Bár ma már több ezer exobolygót ismerünk, nagyon keveset tudunk arról, hogy milyen lehet ezeknek a bolygóknak a kémiai összetétele, és ez hogyan függ össze központi csillaguk fejlődésével és a bolygók csillag körüli keletkezési környezetével. Az ARIEL legfontosabb célja már ismert exobolygók, elsősorban a csillagjukhoz nagyon közel keringő gázóriások és úgynevezett szuper-Földek légköri kémiájának vizsgálata átvonulási spektroszkópiával, azaz olyankor megfigyelve a színeképüket, amikor ezek a bolygók éppen a csillaguk előtt, illetve mögött haladnak el [7]. Az ARIEL teljes, négyéves tervezett élettartama alatt mintegy 1000 exobolygóról kaphatunk színeképet a 1,25–7,8 μm hullámhossztartományban, sok esetben megfigyelve a légkörben bekövetkező esetleges változásokat, pl. felhőrendszerek képződését is.

A légkör kémiai összetételét a bolygó keletkezéskori elemgyakorisága és a légkör besugárzástól és a bolygó belsejéből származó fűtéstől függő hőmérséklete határozza meg. Az exobolygólégkörök legfontosabb összetevői – hőmérséklettől függően – a Naprendszer bolygoin is megtalálható egyszerű molekulák (H_2O , CO , CO_2 , NH_3 , CH_4), illetve forróbb atmoszférákban a TiO és a VO . Ezeknek a molekuláknak mind a közeli- és középínfravörös hullámhosszakon vannak mérhető színeképvonalai. Az ARIEL által tanulmányozandó közeli- és középínfravörös tartományban az exobolygó légkörök középső tartományáról kapunk információt ($\sim 0.1\text{-}10^{-5}$ bar), és az itt található semleges atomok és molekulák gyakoriságát, valamint a környezet fizikai jellemzőit (pl. nyomás, hőmérséklet) határozhatjuk meg; a légkör felső, (részben) ionizált rétegét

az ultraibolya tartományban figyelhetnénk meg [8]. Az ARIEL fedélzetén három fotométer (VisPhot, FGS-1, FGS-2) fog működni a 0,50-0,55, 0,8-1,0, illetve az 1,05-1,20 μm hullámhossztartományban, és három kis felbontású spektrométer: a NIRSpec (R = 20-25 spektrális felbontás az 1,25-1,95 μm közötti tartományban), az AIRS-Ch0 (R = 102-180, 1,95-3,9 μm) és az AIRS-Ch1 (R = 30-64, 3,9-7,8 μm), amelyek a közeli- és középínfravörös tartományt fedik le. Az ARIEL-en minden műszer szimultán fog mérni. Hasonlóan a 2000-es évek nagy űrtávcsöveihez (Herschel, Planck, Gaia, James Webb) az ARIEL is a Nap-Föld rendszer L2 Lagrange-pontja körüli pályára fog állni, mintegy 1,5 millió kilométerre a Földtől, és a napsugárzástól való védelem miatt az ekliptikai pólusok környezete lesz folyamatosan észlelhető, míg az ekliptika egy adott pontja az év kevesebb, mint felében lesz megfigyelhető.



1. ábra: Az ARIEL koncepció szerint az exobolygókat előre jelzett átvonulások időpontjában mérik. A mérés az átvonulás előtt-után adott idővel kezdődik, illetve ér véget. Az ábrán jelzett időpontok közül a t_1 a bolygó-csillag fedés „első kontaktus” időpontja, azaz amikor a bolygó és a csillag korongja először érinti egymást; t_4 pedig, hasonlóan, az „utolsó kontaktus”. Az ARIEL misszióban alapértelmezésben a t_{14} , azaz t_4 és t_1 különbségének 2,5-szeresét fordítják egy átvonulás mérésére (azaz $n=0,75$).

Várakozási idők az ARIEL mérések időbeosztásában

Az ARIEL mérési időbeosztását a jelenleg ismert exobolygó minta alapján mesterséges intelligenciát felhasználó módszerekkel készítették el [4]. A szimulációkban figyelembe vettek „kemény” kényszereket, mint az űrtávcső pályájából adódó, és az adott égterület láthatóságával kapcsolatos feltételek, az átvonulás időpontja és időtartama (minimum $2,5 t_{14}$), a célpont méréseinek teljessége (a mérés csak akkor hasznos, ha 100%-ban elérte az előírt jel/zaj arányt, ezután ezt a célpontot nem mérjük többé), a pozícióra állás sebessége (maximum 4,5 fok/perc), illetve az átfedési kényszerek (bizonyos technikai folyamatokat nem lehet párhuzamosan végrehajtani). Emellett figyelembe vettek „puha” kényszereket is, mint a teljes tudományos célpont mérési hatékonyság (>85% a követelmények szerint), és a befejezett méréssel rendelkező célpontok számának maximalizálása.

A mérések időbeosztásának szimulációja alapján a teljes idő 19%, 21%, 23%, és 27%-a volt „várakozási idő” a 0.5-1.0, 0.5-2.0, 0.5-3.0, és 0.5-4.0-éves periódusokban, a felbocsátástól számolva. A várakozási idők olyan „rések” az időbeosztásban, ahová nem lehetett exobolygó mérést beilleszteni. Extra hosszú mérések esetén, ahol a szimulációkban $2,5 t_{14}$ helyett $3.5 t_{14}$ -et használtak (1. ábra), tehát a mérés korábban kezdődik és később ér véget az átmenet idejéhez képest, a várakozási idő 17%-ra csökken a 0,5-4-éves periódusban, ami még mindig egy nagyon jelentős ~5200 óra teljes várakozási időtartamot jelent. Ezeknek a réseknek a jelentős része rövid, 40%-uk rövidebb, mint 30 perc a hosszú mérések esetében, de 45%-uk hosszabb, mint 1 óra (összesen 2350 óra a misszió teljes ideje alatt) és 20%-uk hosszabb, mint 2 óra, ez teljes egészében mintegy 1000 órát jelent. A $2.5 t_{14}$ -et használó szimulációkban az arányok magasabbak, 60% illetve 40% az 1, illetve 2 óránál hosszabb résekre. A jelenleg ismert exobolygó minta alapján az átvonulások mérési idői túlnyomórészt 5 és 10 óra közé esnek (az átlag ~7 óra), és csak szinte elhanyagolhatóan kevés esetben vannak 3 óra alatt. Ez azt jelenti, hogy a tipikusan

1-2 órás várakozási idők nem használhatók jól az elsődleges tudományra, ezek egyszerűen túl rövidek átvonulási mérésekhez, és ez így maradna akkor is, ha jelentősen több exobolygó rendszert ismernénk. Ezért kiegészítő megfigyelésekre, az elsődleges mérések közötti rések kitöltésére, olyan célpontokat kell találni, amelyek mérései nem időpont-kritikusak (bármilyen véletlen időpontban történő mérés ugyanolyan értékes tudományos szempontból), és lehetőleg gyorsan (<1-2 óra) elvégezhető. Emellett, természetesen, olyan célpontokat keresünk, amelyek, összhangban az ARIEL technológiai követelményeivel, az űrtávcső spektrométereivel a közeli- és középínfravörös tartományban végzett mérések tudományosan érdekes eredményeket szolgáltatnak.

Javaulatunk szerint a kiegészítő tudományos mérések a következő kérdéseket vizsgálnák: (1) fiatal csillagok közeli- és középínfravörös spektruma; (2) fiatal csillagok színképi változékonysága, (3) a mágneses tér hatása és csillagaktivitás fősorozati csillagokban és (4) barna törpékben; valamint (5) extrém törmelékkorongok vizsgálata. A javasolt program célja a megfelelő célpontok kiválasztása és az észlelések megvalósíthatóságának demonstrálása.

Molekulák és jegek, a bolygók építőkövei: A fősorozat előtti csillagok körüli protoplanetáris korongok nagyrészt gázból állnak, mintegy 1%-nyi port tartalmaznak, ami a csillagkeletkezési folyamatokban jelentősen átalakul. A korong fősíkjában az alacsony hőmérsékletnek és nagy sűrűségnek köszönhetően jégkéreg képződik a por szilikát szemcséin. A szemcsék felszínén komplex kémiai folyamatok is zajlanak, ezáltal bonyolultabb molekulák is létrejöhetnek, amelyek kiváló nyomjelzői az itt érvényes fizikai állapotnak és lényegesek a bolygókeletkezés kezdeti feltételeinek megértéséhez. Ezek a molekulák az ARIEL által lefedett középínfravörös tartományban figyelhetők meg, hasonló méréseket fiatal csillagokról pl. az ISO-űrtávcső PHT-S spektrográfiával végeztek [2].

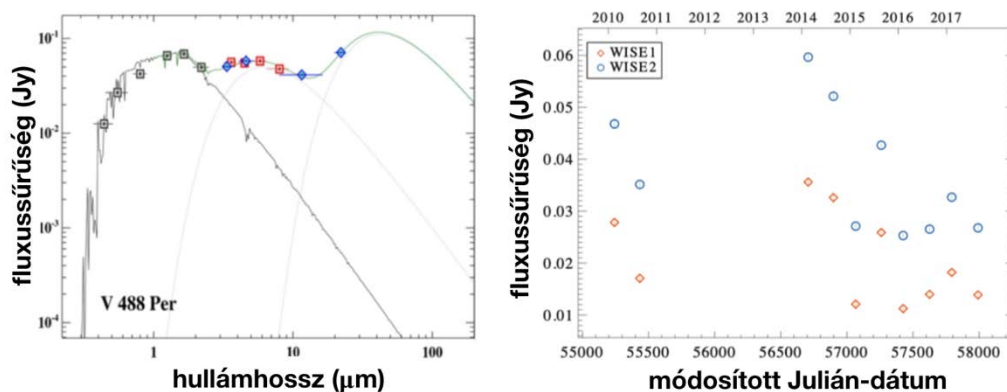
A fiatal csillagszerű objektumok változékonyságának hatása a csillagkeletkezésre: A fősorozat előtti időszakban a fiatal csillagszerű objektumok (young stellar objects, YSOs) nagyon változékonnyak. A látható tartományban ez a változékonyság már régóta ismert volt, de az utóbbi évtizedek infravörös mérései megmutatták, hogy ez az infravörös hullámhosszakon is így történik [2]. Míg a látható tartománybeli változásokat a forró/hideg csillagfoltok vagy a látóirányú fényelnyelés változása okozza, a középínfravörösben a csillagkörüli korong hőmérsékleti sugárzásának módosulása miatt következik be, amelyet a központi csillag sugárzásában beálló változás indukál. A középínfravörösben az ilyen mérések jelenleg nagyon ritkák, bár a jelentős fényváltozásokat mutató, eruptív (FU Orionis illetve EX Lupi típusú) csillagok megértéséhez ez nagyon fontos lenne [1].

Mágneses tér és csillagaktivitás: A mágneses aktivitás a fiatal csillagok fontos jellemzője, többek között az ebből származó ultraibolya sugárzás módosíthatja, ionizálhatja az exobolygók légkörét, pl. a víz és az ózon fotodisszociációján keresztül. A csillagokon előforduló flerek (kitörések) is jelentős hatással lehetnek a bolygólégkörökre, de ezek hosszú távú hatása még nem kielégítően tanulmányozott [6]. Az ARIEL méréseivel lehetőség nyílik a kiválasztott aktív csillag minta esetében a flerek alatt bekövetkező gyors változások monitorozására, mikroflerek detektálására, illetve a flerek energiájának becslésére is.

Barna törpék: Néhány esetben – szemben a korábbi általános vélekedéssel, miszerint ezek a csillagok nem mágnesesek – H α -emissziót, valamint röntgen- és rádiósugárzást mértek barna törpékről, ami mágneses aktivitás jelenlétére utal [4,5]. Az ilyen barna törpék ARIEL általi középínfravörös monitorozásával megtalálhatóak lennének az aktivitásra utaló jelek, és kiterjeszthető lenne a jelen pillanatban a fősorozati csillagokra érvényes, leginkább a Nap megfigyeléseire alapuló mágnesesség modell a legkisebb tömegű csillagokra és barna törpékre is.

Extrém törmelékkorongok: A fősorozati csillagok körül nem csak bolygókat, hanem kisebb égitesteket, kisbolygókat és üstökösöket is találunk. Az ezek között bekövetkező ütközések jelentős mennyiségű port termelnek. A legtöbb esetben ez a keletkező törmelék több tíz csillagászati egység (CsE) távolságra található a csillagtól (hasonlóan Naprendszerünk

Kuiper-övéhez). Az ún. extrém törmelékkorongok esetén azonban kirívóan nagy mennyiségű meleg por figyelhető meg a csillagtól néhány CsE távolságon belül. A magasabb hőmérséklet miatt ezeknél a korongoknál a por termális sugárzása a középínfravörös hullámhosszakon észlelhető. Ezeket a ritka rendszereket két nagyméretű bolygókezdemény közelmúltbeli ütközésével magyarázzák, hasonló események a Naprendszer múltjában is történhettek [9]. Jelenleg csak néhány ilyen extrém törmelékkorongot ismerünk, az ARIEL kiváló eszköz lesz a jelölt rendszerek vizsgálatára (2. ábra).



2. ábra: A V488 Per változócsillag spektrális energiaeloszlása (bal oldal), illetve fényességének időbeli változása (jobb oldal) a WISE-űrtávcső W1 (rombuszok, $3.4\mu\text{m}$) és W2 (körök, $4.6\mu\text{m}$) sávjában. A bal oldali ábrán az első, folytonos szürke görbe a csillag fotoszférája, a második a meleg törmelékkorongból származó sugárzás, a harmadik a rendszer távoli „Kuiper-öve”. Jól látható, hogy középínfravörös hullámhosszakon a meleg törmelékkorong sugárzása a domináns.

A magyar kutatók részvétele az ARIEL misszióban nem merül ki a kiegészítő célpontok kiválasztásában. A tudományos munka előkészítésére mintegy húsz munkacsoport alakult, pl. egyéb missziókkal (pl. PLATO, JWST, földi obszervatóriumok) való szinergiáktól az adatfeldolgozás előkészítésén át különböző a tudományos területekkel foglalkozó csoportokig. Ezek közül a hazai kutatók elsősorban a nagy pontosságú, gyors fotometriával és a csillagaktivitással, illetve a fiatal csillagokkal kapcsolatos előkészítő munkákban vesznek részt.

Köszönetnyilvánítás: A cikk elkészültét támogatta az Európai Kutatási Tanács (ERC) és az Európai Unió Horizon 2020 kutatási és innovációs programja a 716155 számú (SACCRED) szerződés keretében; a MTA Lendület-programja (LP2018-7/2018) és Bolyai János-ösztöndíja (V.K.); továbbá a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (K-115709, K-125015).

Irodalom

- [1] Ábrahám, P., és mtsai, 2009, Nature, 459, 224
- [2] Kóspál, Á., és mtsai, 2012, ApJS, 201, 11
- [3] McLean, M., Berger, E., Reiners, A., 2012, ApJ, 746, 23
- [4] Morales, J.C., és mtsai, 2017, „ARIEL Long Term planning”, ARIEL-ICE-GS-TN-001 Issue 1.0, 2017.02.15.
- [5] Rutledge, R.E., és mtsai, 2000, ApJS, 131, 335
- [6] Segura, A., és mtsai, 2010, AsBio, 10, 751
- [7] Tinetti, G., és mtsai, 2018, Experimental Astronomy, 46, 135
- [8] Venot, O., és mtsai, 2018, Experimental Astronomy, 46, 101
- [9] Wyatt, M.C. & Jackson, A.P., 2016, SSRv, 205, 231

A Marsrengések program elindítása magyar középiskolások számára

M. Kiszely ¹, Gy. Hudoba ², Cs. Czanik ¹

¹ MTA CSFK GGI

² Óbudai Egyetem Alba Regia Műszaki Kar

A NASA 2018-as InSight Mars felfedezőútja során szeizmométert is telepítenek a Marsra, ami „élő” adatokat küld vissza a Földre. Az erre épülő British Geological Survey „MarsQuake” projektje során műholdképeket felhasználva a szeizmométer jelei alapján új meteor becsapódási krátereket kereshetnek az érdeklődők segítve a marskutatót. A „Marsrengések” program ennek a magyarországi diákok számára elindított párja, mely során az InSight Mars expedíció által visszaküldött valós adatokat és képeket használhatják fel. A program egy rövid tananyagot, továbbá órai feladatokat tartalmaz. A célközönség a 11-18 éves korosztály. A foglalkozások során a diákok modellezik a meteorit-becsapódásokat, és vizsgálják a becsapódások hatását. A marsrengések elemzése pedig segít abban, hogy jobban megértsük a "vörös bolygó" belső szerkezetét.

Bevezetés

A „Marsrengések” program a „Szeizmológia az iskolában” kezdeményezés részeként indult el hazánkban, mely révén igyekszünk elérni a földrengések és csillagászat iránt érdeklődő középiskolásokat. Ennek érdekében elkészült „Marsrengések – szeizmológia más bolygókon” c. ismeretterjesztő kiadvány, ami az angol nyelvű kiadvány szerkesztett fordítása [1] [2]. Több ismeretterjesztő előadást tartottunk, és cikkeket írtunk. A tudományos ismeretterjesztés egy új távlatát szeretnénk elindítani a földtudományokat érintő tantárgyakban Magyarországon.

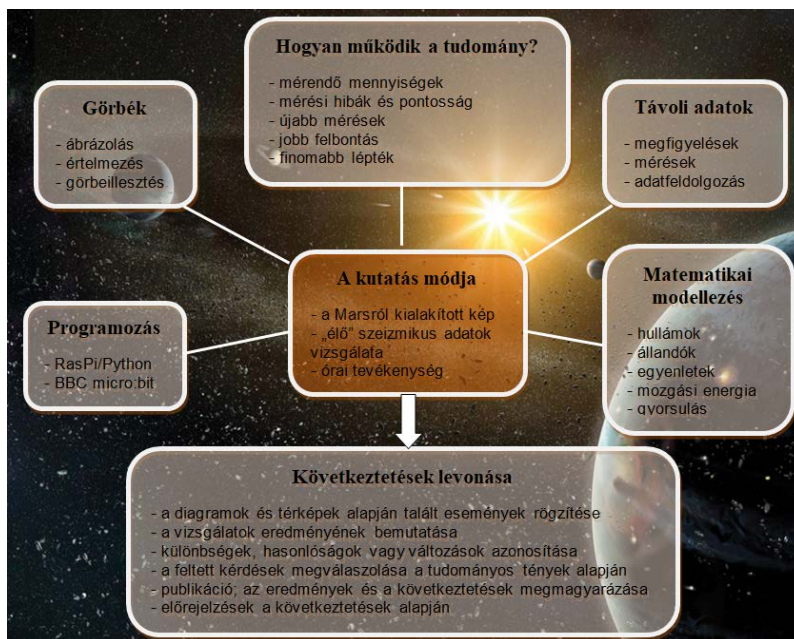
Szeizmológia az iskolában

A „Szeizmológia az iskolában” kezdeményezés 2016-ban indult el a Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium ismeretterjesztő programjaként. Európában ez az oktatási program 1995-re nyúlik vissza. Angol nyelven bőséges segédanyag érhető el a témában, ezeket pótoltuk most egy magyar nyelvű honlappal www.suliszeizmo.hu, és vásároltunk egy suliszeizmográfot. Az iskolák is beszerezhetik ezt a kimondottan nekik készített félprofesszionális műszert. Egyszerű az összeszerelése, jól látszik a működési mechanizmusa, könnyen elsajátítható a műszerhez készült kiértékelő program kezelése. A cél, hogy egyes diákokban nagyfokú érdeklődést ébresszünk a szeizmológia iránt, és kezelni tudják az iskola saját műszerét. Egy saját iskolai műszerrel egy természeti jelenség valós idejű műszeres megfigyelésének élményét nyújtja a diákoknak, és megismerkedhetnek a természettudományos kutatómunka folyamatával az elméleti modellektől a műszeres mérésen át az adatelemzésig és a következtetések levonásáig (1. ábra).

Az InSight misszió és a SEIS műszer

A NASA InSight (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport) kutatási programjának az a küldetése, hogy egy olyan geofizikai leszállóegységet helyezzen el a Marsra, ami a bolygó belsejét tanulmányozza. A cél meg tudni,

hogyan keletkeznek és formálódnak a kőzetbolygók, valamint a Mars belső szerkezetének és belső folyamatainak a felderítése. A Mars belsejének titkait megfejteni hatalmas erejű marsrendésekkel lehetne, amit meteorit becsapódásoktól várunk. A Földön a rendések túlnyomó többsége a lemeztektonikához kapcsolódik. Lemeztekttonika azonban nincs a Marson, ezért arra számíthatunk, hogy a bolygó szeizmikus aktivitása körülbelül 100-szor kisebb lesz, mint a Földé. Azaz a marsrendések kisebbek lesznek és a számuk is sokkal kevesebb lesz, mint a földrengéseké, és zömüket meteor-becsapódások okozzák majd.



1. ábra. A tudományos kutatás receptje [2]

Az InSight küldetés a NASA Discovery programjának része, mellyel vele párhuzamosan meghirdették a népszerűsítő, középiskolásokat megcélzó „Marsquake” programot.

A SEIS (Seismic Experiment for Interior Structure) a Mars felszínének apró rezdüléseit méri. A műszer valójában 6 szeizmométerből áll, amelyek két különböző típusú egységet tartalmaznak: három szélessávú szeizmométert, amelyek 0,005 Hz és 1 Hz közötti frekvenciákon érzékenyek és három rövidperiódusú műszert, amelyek a 0,05 és 40 Hz közötti frekvenciákon mérnek. A szeizmométerek ingáit három különböző irányban helyezik el, hogy minden térsíkban mérjenek (fel-le, balra-jobbra és előre-hátra). A cél, hogy a 3 szeizmométer jelei alapján meg tudjuk határozni a rengéshullám beérkezési irányát.

A Marsrendések program elindítása

A program összetett. Egyrészt ismerni kell a Mars nagyfelbontású képeit kezelő programot (HiView) és az InSight SEIS műszere által regisztrált jeleket megjelenítő és feldolgozó programot (jAmaSeis). A nagyfelbontású marsi képeken fogjuk a friss becsapódási kráterek nyomát keresni, ha találunk a SEIS adatain marsrendésre utaló jeleket. A szeizmikus hullámok fajtáit fel kell ismerni, és sok-sok egyéb csillagászati és szeizmológiai témában kell tájékozódni.

A „Marsrendések” programmal a következő fő fórumon jelentünk meg:

1. Weboldalak:
 - a. MTA CSFK GGI: <http://marskutatas.suliszeizmo.hu>

- b. Terkán Lajos Bemutató Csillagvizsgáló: <http://telapo.datatrans.hu/mars>
2. Kiadvány: A „MARSRENGÉSEK - Szeizmológia más bolygókon”, letölthető a fenti weboldalakról. Ebben a kiadványban bemutatjuk a diákoknak, hogyan kell a szeizmikus adatokat egyszerű táblázatokkal, félig szakmai elemző szoftverekkel és egyszerű számítógépes programokkal elemezni, illetve a rezgéseket saját maguk által írt programmal megjeleníteni.
3. Népszerűsítő előadások:
 - a. Galileo Webcast - élő közvetítés: Hudoba György: Célkeresztben a Mars! (http://www.galileowebcast.hu/live/live_20181015.html)
 - b. Szkeptikusok XXIV. Országos Konferenciája (<https://www.youtube.com/watch?v=sV19m8okRV8&list=PLeNxi-TyRAB6ifbR10F9-IAQRhgTnaZkH&index=3>)
 - c. Részvétel tudománynépszerűsítő rendezvényeken
 - Földtudományos Forgató a Magyar Természettudományi Múzeumban
 - Budapest a Tudomány fővárosa 2018
4. Egy Facebook-csoport is megalakult „Marsrengések - kiből lesz marskutató?” amely folyamatosan frissül az InSight híreivel.

A Marsrengések programra eddig mintegy 25 jelentkezés érkezett, köztük egy csillagászsakkör. Lakóhelytől függetlenül bárki csatlakozhat a programhoz. Jelenleg az alábbi településekről vannak jelentkezők: Balatonfüred, Budapest, Dombóvár, Érsekújvár, Gödöllő, Gyál, Kerepes, Mátészalka, Sásd, Sopron, Szeged, Székesfehérvár és Szigetszentmiklós.

A Marsrengések program tevékenysége és tapasztalatok

A programra jelentkezőknek nagy elszántságról kellett tanúbizonyságot tenniük, hiszen két programot is telepíteniük kellett a számítógépükre, amik menüpontjai angol nyelven voltak. Ezek a nagyfelbontású Mars képeket kezelő HiView és a suliszeizmométerek adatait feldolgozó jAmaSeis programok. Emellett meg kellett ismerkedniük a friss földrengések paramétereit közlő weboldalakkal. A jelentkezők életkori sajátosságai miatt, a facebook csoportunkon keresztül lehet a legkönnyebben tartani egymással a kapcsolatot. Akik jelentkeztek a csoportba, itt a legfrissebb InSight programmal kapcsolatos twitteren közzétett híreket és képeket magyarul megtalálják (<https://twitter.com/NASAINsight>), és látják a többiek kérdéseit, eredményeit. A friss marskutatók cselekvési kedvét, nehézségeit megismerni, és felkészíteni őket a SEIS adatainak elemzésére feladatokkal szándékoztunk elérni. Eddig két feladatot kaptak a tagok, a legfrissebb földrengések jAmamSeis program segítségével való folyamatos megfigyelése mellett:

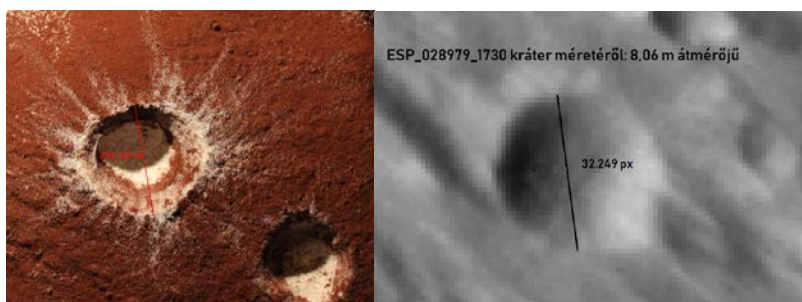
1. KRÁTER KIHÍVÁS 2018. Ez a feladat a „Marsrengések – szeizmológia más bolygókon” kiadvány mellékletében található első tanulókísérletének az elvégzését jelentette. Lisztre szórt kakaóporral kellett meteor becsapódásokat modellezni, megfigyelni a jellegzetességeit, lefotózni és a HiWiev programmal megnyitni a kráter képét, és a pixel felbontás helyességét ellenőrizni. A feladat másik része pedig a Hirise weboldalról az első tanulókísérletben megadott „új marsi kráterek listából” egy kráter kiválasztása, és annak a nagyfelbontású képének a letöltése volt. Ezután a HiWiev programmal a kráter képét megnyitva, annak a pontos méretét kellett meghatározni.
2. FELÜLETI SZEIZMIKUS HULLÁMOK A MARSON! E feladat során meg kellett tanulni a felületi hullámok jellegzetességeit, és egy számítási feladatot elvégezni.

Sajnos sokan lemorzsolódtak (kb. 50%). Valószínűleg követik az InSight eredményeit. A legsikeresebb a mátészalkai Mórincz Zsigmond Görögkatolikus Kéttannyelvű Általános Iskola csillagász szakköre volt Bardóczné Kocsis Erzsébet vezetésével és a székesfehérvári Lánczos Kornél Gimnázium fizika szakkörösei Újvári Sándor irányításával (2. ábra) és a szintén

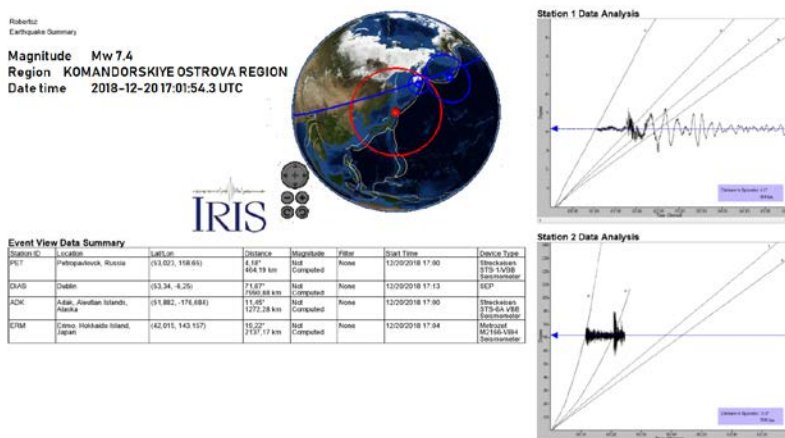
székesfehérvári Terkán Lajos Bemutató Csillagvizsgáló csillagász szakköre Hudoba György vezetésével. A KRÁTER KIHÍVÁS 2018 egyik megoldása a 3. ábrán, a 4. ábrán pedig a jAmaSeis program segítségével meghatározott földrengés eredménye látható, a P és S hullámok felismerése segítségével. Tapasztalatunk szerint a csapatban dolgozók, esetleg pedagógus irányításával lelkesen tanultak bele a programba.



2. ábra. A mátészalkai COOLSTARZ csillagász szakkörösei és a székesfehérvári csapat



3. ábra. Szabó Bence gödöllői tagunk KRÁTER KIHÍVÁS 2018 megoldása



3. ábra. Szerencsi Róbert kerepesi marskutatótársunk földrengés-epicentrum meghatározása

Irodalom

- [1] Denton, P, Stevenson, J P, és McMurray, A. (2017). MarsQuakes – Seismology on another planet. Nottingham: British Geological Survey: ISBN 978-0-85272-866-6
- [2] Kiszely M. (ford.) (2018). Marsrengések – Szeizmológia más bolygókon, MTA CSFK GGI: ISBN 978-963-8381-39-2, 73 o.
- [3] Kiszely M. (2017). A Vörös Bolygó megfúrása – Meteorbecsapódások marsrengésekkel, Élet és Tudomány, 73, 22 678-680.

Űrtábori tapasztalatok – Űrtevékenységgel kapcsolatos ismeretek átadása magyar fiatalok számára

D. Milánkovich, L. Bacsárdi

Magyar Asztronautikai Társaság, Budapest

1994-ben a Magyar Asztronautikai Társaság (MANT) elindította az űrtábort, ahol a magyar ifjúság egy egyhetes nyári tábor során nyerhet bepillantást az űrhöz kapcsolódó hazai projektekbe és szerezhethet űrrel kapcsolatos ismereteket. A program szervezője az 1956-ban alapított legrégebbi magyar nonprofit űrtevékenységgel foglalkozó szervezet, amelynek alapvető célja az űrkutatás és űrtevékenység valamennyi területéhez kapcsolódó szakszerű tudományos ismeretterjesztés. Jelen cikkben a szerzők – akik egyben a 2018-ban rendezett tábor vezetői voltak – célja az űrtáborban megszerzett tapasztalatok megosztása, a szervezeti felépítés, valamint a résztvevő diákok és előadók kiválasztási folyamatának ismertetése, továbbá a szervezés során tapasztalt kihívások és tanulságok bemutatása.

Bevezetés

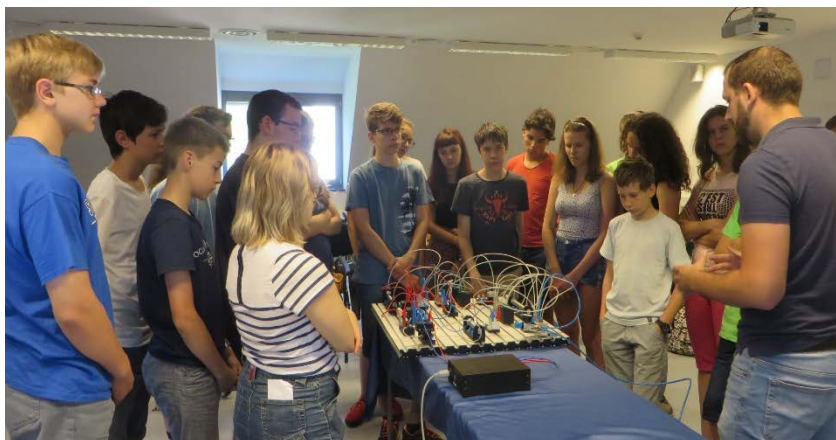
A tábor – Ifjúsági Űrtábor néven – dr. Abonyi Ivánné, a MANT akkori főtítkárhelyettese hozta létre 1993-ban azzal a szándékkal, hogy megismertesse a fiatalokat az űrkutatással. A program és a lebonyolítás évről évre egy kicsit változott, miközben számos tapasztalatot szereztünk azzal kapcsolatban, hogyan lehet hatékonyan átadni űrtevékenységgel kapcsolatos ismereteket középiskolás korosztály számára. A korai években a tábor programját nagyrészt hazai űrkutatási szakemberek által tartott előadások, vetélkedők, valamint kirándulások tették ki. A tábor 13–18 év közötti középiskolásokat szólított meg. A 2000-es évek elejétől folyamatosan bővültek az aktivitást és kreativitást igénylő programok. 2010-től a tábor időtartama hat nap, a célcsoportja továbbra is az űrkutatás és az űrtevékenységekkel kapcsolatos tudományok – fizika, biológia, matematika, egészségügy, jog, informatika, mérnöki tudományok és még nagyon sok minden más – iránt érdeklődő középiskolások. Az elmúlt űrtáborok szervezésében közreműködők lelkes munkája nyomán több száz fiatalnak tudtuk megmutatni az űrkutatás varázslatos világát. A tábor egy vándortábor, minden évben más helyszínen kerül megrendezésre. Eddigi helyszínei: Kiskunhalas (1994), Eger (1995), Veszprém (1996, 1997), Győr (1998), Kecskemét (1999), Sopron (2000), Debrecen (2001), Székesfehérvár (2002), Budapest (2003), Kiskunhalas (2004), Gyulaháza (2005), Szentlélek (2006), Hollóstató (2007), Szentlélek (2008), Gyomaendrőd (2010), Sátoraljaújhely (2011), Kecskemét (2012), Alsómocsolád (2013), Felsőtárkány (2014), Sopron (2015), Debrecen (2016), Bakonybél (2017), Zalaegerszeg (2018), Sátoraljaújhely (2019).

A program felépítése

A tábor felépítését a 2018-as táboron keresztül szeretnénk bemutatni. 2018-ban 25 magyar diák érkezett Kárpátaljáról, Erdélyből és Magyarországról a Zalaegerszegen tartott űrtáborba. A táborozók közül 8 diák vett már részt a korábbi űrtáborokban. Az előző évek hagyományai alapján a programok egy kiválasztott téma köré épültek, mint például az aszteroida bányászat (2016), vagy a játék és a sport a világűrben (2017), 2018-ban a tábor kulcstémája a Holdfalu koncepció volt. A résztvevők 5 tagú csoportokban dolgoztak a heti témához kapcsolódó egész héten átívelő projekten. A diákokat űrkutatással foglalkozó szakértők által tartott 13 előadás segítette abban, hogy új ismereteket szerezzenek és elmélyülhessenek a heti projektfeladat témájában.

A csapatmunka mellett a tábori programot kirándulások, technológiai előadások és egyéb tevékenységek színesítették, mint például az űrkvíz, sport- és más csapatépítő játékok, a mozi est és az éjszakai égbolt és a Nap megfigyelése távcsövekkel. A program további fénypontjai a különböző szakmai látogatások voltak, beleértve a kirándulást egy önvezető autók tesztelésére épített tesztpályára Zalaegerszegen vagy a műszaki (mechatronikai) témájú laborlátogatást egy közeli egyetemen (lásd. 1. ábra).

A tábort nonprofit alapon szerveztük. A résztvevőknek regisztrációs díjat kellett fizetniük, amely fedezte a programokon való részvételt, a szállást és a napi háromszori étkezést is. A regisztrációs díj összegét szándékosan alacsonyan tartjuk, kvázi önköltségi áron (szállás, étkezés), és a MANT fedezi a többletköltségeket. Strukturális szempontból a programot a táborvezető koordinálja a táborvezető-helyetessel együtt, a koordinációt emellett egy logisztikáért felelős személy segíti. Továbbá a vezetők munkáját egy vagy két további tanár támogatja a tábor során



1. ábra – Táborozók szakmai kiránduláson

Eredmények és tanulságok

1. Munkaerő utánpótlás

Sok táborozónk úgy döntött, hogy a felsőfokú oktatásban folytatja tanulmányait a STEM (tudomány, technológia, mérnöki és matematika) területen.

2. Mentor program

Az elmúlt években mentori programot dolgoztunk ki a különböző pénzügyi háttérrel rendelkező diákok támogatására. Ebben a programban a különböző vállalatok vagy egyének finanszírozzák a diákok űrtáborban való részvételét. Az első évben két olyan céggel kezdtünk, akik támogatták a nehéz anyagi helyzetű gyermekeket. 2018-ban 25 táborozó közül hetet mentorprogramunk támogatott.

3. Kapcsolat a tanárokkal

Mivel a táborunkat különböző városokban szerveztük, speciális kapcsolatokat alakítottunk ki a különböző oktatási intézmények tanáraival. Többen aktívan részt vettek a programunkban (például geocaching vagy Lego rover programozás 2015-ben), vagy segítették a diákok jelentkezését (azáltal, hogy az érdeklődő diákok figyelmébe ajánlották a tábort).

4. A természetbeni szponzorálás

Állandó támogatóink között szerepel a Magyar Űrkutatási Iroda (jelenleg KKM Űrkutatásért és

Úrtevékenységért Felelős Főosztály), az Űrvilág.hu űrkutató híroportál valamint számos hazai cég. A finanszírozás nem mindig jelent pénzt, néha más formában érkezik. 2018-ban az egyik támogatónk három előadást és két látogatást biztosított ingyenesen. Egy másik támogató által ingyenesen idegenvezetést biztosított, ingyenesen szállított, valamint kedvezményes áru belépési díjat biztosított egy helyi csúszdaparkban.

5. Partnerség a médiával

Az űrtábor előtt sajtóközleményt teszünk közzé, és részletes beszámolót jelentetünk meg az Űrtan évkönyvben. A tábor híre általában a helyi médiába is bekerül, valamint az országos média is érdeklődik a program iránt (lásd. 2. ábra).



2. ábra – A táborozók éppen vízi rakéta indítására készülnek a bakonybéli űrtáborban, az előkészületeket az M5 stábja rögzíti.

6. Az űrtábori generáció

A tábor tökéletes platformot biztosít a fiatal generációnak, aki érdeklődik az űrkutatás, a csillagászat és a mérnöki tevékenység iránt. Lehetővé teszi hasonló érdeklődésű fiatalok között akár életre szóló barátságok kialakulását, megtanítja a diákokat a csapatmunka és a más készségek fejlesztésére (pl. nyilvános beszéd a csoport előtt.).

7. Űrkutató diákpályázat

A MANT minden évben meghirdeti az űrkutató diákpályázatot, amelyen a diákok különböző területekről választhatnak, például rajzolhatnak, írhatnak, vagy létrehozhatnak egy honlapot vagy rövid videót az éves témáról, amelyek az űrtábor témájához kapcsolódtak. Lehetőség van egyénileg vagy 2-4 fős csapatokban jelentkezni a pályázatra. A legjobb munkával rendelkező

pályázók űrtábori részvételt, könyveket és ajándékokat nyerhetnek. Az űrtáborba eljutnak a legjobb diákpályázók, egyben az űrtáboron átívelő heti projektfeladat támpontot biztosít a következő évi űrkutatási diákpályázathoz.

8. *Űrtábor Alumni*

A résztvevők kapcsolattartását elősegítve, a MANT 2011-ben létrehozott egy Facebook csoportot az alumni számára. Itt az egykori táborozók könnyen kommunikálhatnak egymással és megtalálhatják a táborok során készített fotókat és videókat, valamint információkat a hazai űrtevékenységhez kapcsolódó eseményekről.

9. *Űrtáborozók kérésére született új esemény: Űrakadémia*

Az űrtábor folytatásaként 2014-től a MANT az ENSZ által alapított Space Generation Advisory Council nevű nemzetközi szervezettel közösen augusztusban szervezi meg a MANT Űrakadémiát. A többnapos nyári rendezvényen a 18 és 35 év közötti magyar egyetemi hallgatók és fiatal szakemberek dolgozhatnak egy a hazai űrtevékenységhez kapcsolódó kérdéskörön és hallgathatnak a témához kapcsolódó előadásokat a program keretén belül.



3. ábra – A 2017-es űrtábornak R2-D2 is vendége volt.

Összegzés

A Magyar Asztronautikai Társaság 1994-ben kezdte megszervezni az éves űrtábor sorozatát. Ebben a tanulmányban bemutattuk, hogy az elmúlt 25 év során szerzett tapasztalatokat. 1994 óta közel 1000 táborozónk volt, akik közül sokan úgy döntöttek, hogy az űrtevékenységgel kapcsolatos területeken tanulnak (és később dolgoznak).

Irodalom

[1] László Bacsárdi, Dorottya Milánkovich, "One Week Space – Lessons Learned from 25 Annual Hungarian Space Camps", Proc. of International, Astronautical Congress 2018, Oct 1-5, 2018, Bréma, Németország, IAC-18,E1,6,6,x45764, pp.1-5

Foltcsoportok bomlása nagy felbontású adatsoron

Muraközy J.

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóintézet
Csillagászati Intézet

A Debreceni Napfizikai Observatóriumban készített Solar and Heliospheric Observatory/Michaelson Doppler Imager - Debrecen Data (SDD) napfolt adatbázis egyedülálló lehetőséget biztosít a napfoltcsoportok fejlődésének és morfológiájának vizsgálatára. A minden eddiginél részletesebb katalógus a foltcsoportok minden egyes foltjával elszámol, megadva azok terület adatait, helyzetét, illetve mágneses terének értékeit másfél órás időbeli felbontással. Ez teszi lehetővé nemcsak az egyes aktív régiók, de azok vezető, illetve követő részeinek elkülönített vizsgálatát is. A korábbi, a foltcsoportok fejlődését tanulmányozó vizsgálatunk után most a foltcsoportok visszafejlődését vettem górcső alá. Vizsgálataimba közel 250 olyan foltcsoportot vontam be, melyek maximális területű állapotának időpontjai pontosan meghatározhatók, s így a bomlási ráta biztonsággal számítható a foltcsoportokra, illetve azok vezető és követő részeire egyaránt. A foltok területeként minden esetben a korrigált, és a napkorong milliomod részében kifejezett umbra területet alkalmaztam. A pontosság fokozása érdekében csak a centrumtól mért 65 fokon belül vettem figyelembe a foltcsoportokat. A visszafejlődési rátát a napkorongon való utolsó észlelés, illetve a maximális állapot területkülönbsége, és az ezen állapotok között eltelt idő hányadosaként számítottam ki. Vizsgálataim szerint a napfoltok visszafejlődési rátája és azok maximális területei között egyenes arányosság figyelhető meg. A vezető részek esetén kissé lassabb területváltozás mutatható ki, mint a követő részek esetén. A foltcsoportokban található foltok számának változása szintén egyenes területfüggést mutat a visszafejlődés során, csak ez esetben a változás a követő részek esetén kifejezettebb, míg a vezető részek esetén nem, vagy csak nagyon kis mértékben figyelhető meg. Az előzőekben említett vizsgált tulajdonságokra ciklusfüggés nem mutatható ki.

Bevezetés

A napfoltok életét sokan vizsgálták már, de e vizsgálatok is jórészt a fejlődési fázissal foglalkoznak. Mások a visszafejlődés szakaszával is foglalkoztak, de jobbra csak olyan adatok alapján, melyek alkalmatlanok voltak a vezető és követő részek megkülönböztetésére. Néhányan olyan adatok segítségével tanulmányozták a kérdést, melyek lehetővé tették ugyan az effajta vizsgálatokat is, de azokat saját területmeghatározással nyerték üreszközös észlelések használatával, mely a vizsgált mintaszámot nagyban korlátozta. A teljesség igénye nélkül két munkát emelnék ki. Az egyik [4] napfoltkatalógus segítségével vizsgálta a foltbomlást és arra jutott, hogy a turbulens diffúzió az, mely felelőssé tehető a foltok visszafejlődéséért. E vizsgálat viszont mindössze két évet fedett le. A másik [3] munka a Solar Dynamics Observatory HMI műszerének észlelései alapján tíz foltcsoport életét tanulmányozta, de jobbra csak a fejlődésükre koncentrált. Eredményeik szerint a vezető részek esetén nagyobb fejlődési ráta figyelhető meg, mint a követő részek esetében, a visszafejlődés alatt ennek az ellenkezője lesz igaz.

Adatok, eljárások

A vizsgálatom során alkalmazott adatok a Debreceni Napfizikai Observatóriumban készült Solar and Heliospheric Observatory/Michaelson Doppler Imager – Debrecen Data (továbbiakban SDD) [1] napfoltkatalógusból származnak. Az adatbázis különlegessége, hogy nemcsak az egyes aktív vidékekkel számol el, hanem az azokban található összes napfolt méret és pozíció adatait is tartalmazza. Ezek mellett a foltok mágneses adatait is megadja, s ezáltal lehetővé válik a foltcsoportok ellentétes polaritású részeinek vizsgálata is. A vizsgálatok minden eddiginél nagyobb időbeli felbontásban végezhetők el, köszönhetően az átlag másfél órás felbontásnak.

Vizsgálatom tárgyának azon foltcsoportokból válogattam, melyek életük látványosabb részét a látható napkorongon éltek le. Megköveteltem e foltcsoportoktól, hogy egy pontosan meghatározható növekvő fázis, illetve maximum után még a látható korongon következzen egy szintén jól definiálható csökkenő (visszafejlődő) fázis, melyre jellemző, hogy a maximális terület időpontja és az utolsó megfigyelés között általában több, mint két nap eltelik, illetve mindkét mágneses polaritás képviselteti magát a napfoltok között. Összesen 240 – a feltételeknek megfelelő – aktív régiót vizsgáltam, a foltok területeként a napkorong milliomod részében (továbbiakban: msh) megadott korrigált umbra területet használtam. A vezető és követő részek esetén azok maximális területének függvényében adtam meg a visszafejlődési rátákat.

A területcsökkenési d_u rátát a területváltozás és a közben eltelt idő hányadosaként számoltam a következő módon

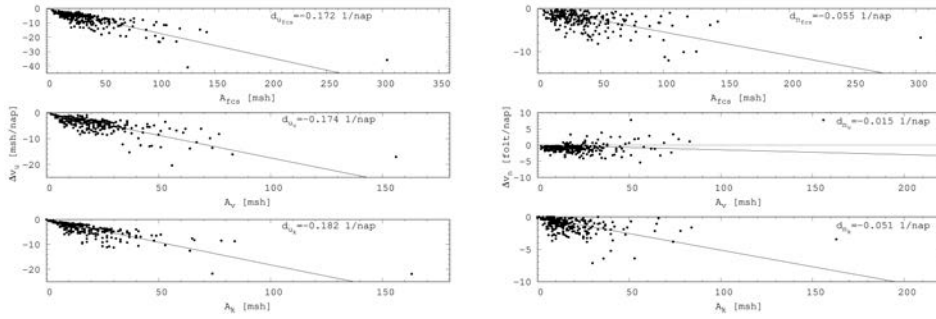
$$d_u = \frac{A_{u65} - A_{max.}}{t_{u65} - t_{max.}}, \quad (1)$$

ahol t_{u65} a centrálmeridiántól mért 65° -on belüli utolsó észlelés időpontját, míg $t_{max.}$ a maximális állapot időpontját, illetve A_{u65} és $A_{max.}$ az ezen időpontokban mért területeket jelöli. A foltszámokra vonatkoztatott d_n csökkenési rátát a d_u -val analóg módon számítottam ki. A pozíció feltételt a napkorong szélei körül előforduló bizonytalanságok kiküszöbölésére vezettem be.

Eredmények, diszkusszió

Az aktív régiók visszafejlődési rátáit a teljes foltcsoportra, illetve annak vezető és követő részére egyaránt meghatároztam (1. ábra). Az így kapott visszafejlődési ráták területfüggését vizsgálva látható, hogy az eloszlásokhoz alulról és felülről képzeletbeli burkoló egyenesek húzhatók, mely arra utal, hogy minden területhez tartozik egy viszonylag jól meghatározott alsó és felső korlát a visszafejlődési rátákra. A visszafejlődési ráták a már korábban [2] vizsgált fejlődési rátához hasonlóan szintén területfüggők, de kisebbek, mint a fejlődési fázisra kapott értékek, kivéve a vezető rész visszafejlődési rátáját. Ezen eredmények összhangban vannak a [4] cikk állításával, mely szerint a visszafejlődési ráta és a foltátmérő között egyenes arányosság van; illetve a [3] munka által leírt eredménnyel, mely azt mutatja, hogy a visszafejlődési ráta kisebb, mint a növekedési ráta mind a teljes foltcsoportra, mind pedig annak vezető és követő részeire. A területfüggés a vezető és követő részekre meghatározott területcsökkenési rátákra is kimutatható. Ez szintén hasonló a fejlődési rátákra kapott eredményhez. Megfigyelhető továbbá, hogy a vezető részek lassabb ütemben fejlődnek vissza, mint a követő részek, ez jó egyezésben van a [3] munkával, mely szintén azt írja le, hogy az aktív régiók követő részeinek visszafejlődése gyorsabb, mint a vezető részeké.

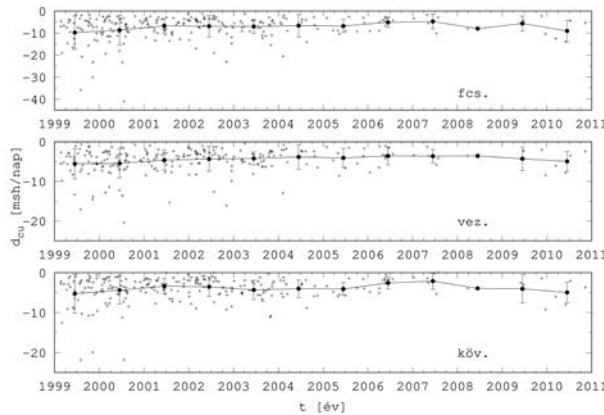
A foltszámok változása a maximális területű állapot után szintén csökkenést mutat (1. ábra, jobb panel). Ez alól csak a vezető részek képeznek kivételt. Amint az az 1. ábra jobb oldali részének középső paneljén megfigyelhető, a maximális állapotukban nagyobb területű, de



1. ábra Aktív vidékek területváltozásra vonatkozó (bal panel) és foltszámokra vonatkoztatott (jobb panel) visszafejlődési rátáinak függése a foltcsoportok maximális területétől. Felülről lefelé rendben a teljes foltcsoportra, a vezető, illetve a követő részekre.

kevesebb folttal rendelkező vezető részek foltszáma a területcsökkenés során növekedhet, míg a kisebb területű, viszont több foltot számláló követő részek foltjainak száma csökken (alsó panel).

Mivel a SOHO 1996-tól, a 23. napfoltciklus kezdetétől 2010-ig, a 24. ciklus első pár évében észlelt, több, mint egy napfoltcikluson tanulmányozhatjuk a visszafejlődés folyamatát. Ez alkalmat ad a lehetséges ciklusfüggés ellenőrzésére is.



2. ábra Aktív vidékek területváltozásra vonatkozó visszafejlődési rátái (keresztekkel) az idő

függvényében. Felülről lefelé rendben a teljes foltcsoportra, a vezető, illetve a követő részekre. Pontokkal a visszafejlődési ráták éves átlagai, illetve a számított hibasávok vannak jelölve.

A legnagyobb visszafejlődési ráták az 1999-2001-es években figyelhetők meg (2. ábra) mind a foltcsoportok, illetve azok vezető és követő részei esetében, és a ciklus minimumának környékén (2007-2009) a visszafejlődési ráta éves átlagai minimumot mutatnak. Ezt követően, a 24. ciklus felszálló ágán ismét emelkedés figyelhető meg. Ezek ellenére nem mutatható ki egyértelmű ciklusfüggés a jelenleg vizsgált 240 foltcsoport esetén, hiszen lehetséges, hogy a minimum környékén tapasztalható visszaesés az ezen évek alatt megfigyelhető kis számú minta következménye. Ez a bizonytalanság a minta bővítését, illetve további vizsgálatokat tesz szükségessé a lehetséges ciklusfüggés ellenőrzésére.

A fentebb részletezett eredmények jó egyezésben vannak a mások által találtakkal, de nagyobb statisztikai mintán lettek vizsgálva. A követő részek visszafejlődési rátája eredményeim szerint nagyobb, mint a növekedési ráta [2], ellentétben azzal, amit a [3] munka állít, bár az megfogalmazza, hogy a visszafejlődésre kapott értékek kevésbé megbízhatóak, hiszen kevesebb foltcsoporton tudták azt megvizsgálni.

Az eredményeim pontosítása és ellenőrzése a minta bővítését teszi szükségessé, ezért e vizsgálat még nem tekinthető befejezettnek.

Köszönetnyilvánítás

Jelen munka az NKFIH OTKA 129137-es számú projektjének támogatásával valósulhat meg.

Irodalom

- [1] Baranyi T., Györi L., Ludmány A. (2016), Solar Physics, 291, 3081
- [2] Muraközy J., Baranyi T., Ludmány A. (2014), Solar Physics, 289, 563
- [3] Norton A. A., et al. (2017), The Astrophysical Journal, 842, 3
- [4] Petrovay K., Van Driel-Gesztelyi L. (1997), Solar Physics, 166, 249

Az ion-semleges kölcsönhatás és szerepe a magnetoszférák szerkezetének alakításában

Németh Zoltán¹

¹ MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

Sok fontos területet ismerünk ahol gazdagon strukturált, energikus és dinamikus elektromágneses jelenségek kialakulásának hátterében végső soron híg plazma és áramló semleges gáz kölcsönhatása áll. A jelenség kiemelten fontos szerepet játszik például indukált magnetoszféráknál, ahol a mágnesezett plazma viszonylag sűrű semleges gázzal találkozik. A Naprendszer legkisebb természetes mágneses tereit az üstökösök diamágneses üregeiben találjuk, ahonnan az áramló plazma kisodorja a befelé igyekvő külső teret. Itt is az ion-semleges kölcsönhatás segít, közvetítésével egy olyan egyensúly alakul ki, amelyben a külső tér ugyan befelé kényszerítené a plazma ionjait, de a kifelé áramló semleges gáz atomjaival való sorozatos ütközések újra és újra visszatérítik őket eredeti pozíciójuk közelébe, így közvetve kiszorítva a mágneses teret az üstökösök környezetéből. Az ion-semleges kölcsönhatás három alapegyenletének analitikus és numerikus analízisével jobban megérthetjük e sok területen jelentős, mégis kevésbé feltárt jelenségek kör alapvető működését. Jelenleg a szakirodalomban a sztatikus rendszert leíró egyik egyenlet bizonyos közelítő megoldásai ismertek. Jelen munka során kiderült, hogy a teljes csatolt differenciálegyenlet-rendszernek is találhatók egzakt analitikus megoldásai, amelyek jó alapot szolgáltatnak az eddig nem vizsgált aszimptotikus esetek leírásához és a megelőző kutatások során kísérletileg megfigyelt dinamikus jelenségek megértéséhez. Az eredményeket elsősorban a Rosetta űrszonda által a közelmúltban vizsgált 67P/Csurjumov-Geraszimenko üstökös diamágneses üregével kapcsolatban alkalmaztam. Az üreg határán a mágneses tér gyors exponenciális felfutást mutat, a görbe az üregtől távol belesimul a klasszikus megoldásba. A plazmasűrűség az üreg határán megemelkedik, a sűrűségugrás alacsony üstökös-aktivitás mellett jelentősebb, azaz az üreg gyenge üstökösnél a vártnál nagyobb lehet. Táguló és összehúzódó megoldások is megjelennek, összhangban a megfigyelésekkel.

Ha mágnesezett híg plazma áramló semleges gázzal lép kölcsönhatásba, a folyamat jelentős mennyiségű energiát és impulzust visz be a plazmába, olyan erő-egyensúlyt alakítva ki, ami nélküle lehetetlen volna. A kölcsönhatási régióban nem alakul ki nyomásegyensúly, csak erő-egyensúly van, amelyhez az ún. ion-semleges „súrlódási erő” fontos járulékot ad. Az ionokra a semleges atomokkal való ütközésből származó súrlódás jellegű erő is hat a plazmafizikában egyébként szokásos erőkön kívül. Az űrfizika területén az ion-semleges kölcsönhatás elsősorban anyagforrásokkal rendelkező magnetoszférákban jelentős. Ezeknek napjainkban intenzíven kutatott példái az óriásbolygók magnetoszférái, ahol pl. a vulkanikus, illetve jégvulkánosságot mutató holdak és a gyűrűk kölcsönhatása a plazmával, vagy éppen a megfigyelt plazma oszcillációk magyarázata igényli az ion-semleges súrlódás jobb megértését; továbbá az üstökösök indukált magnetoszférája, ahol a kialakuló struktúrákat alapvetően ez a kölcsönhatás hozza létre.

Az ion-semleges kölcsönhatás kutatásának új lendületet adott az ESA Rosetta üstökös-kutató missziója, mely új, a korábbi elméletekkel nem magyarázható jelenségeket tárt fel az üstökös-magnetoszféra azon tartományában, ahol a plazma és a kiáramló semleges gáz kölcsönhatása domináns szerepet játszik. A Rosetta űrszonda a világon elsőként állt pályára egy üstökösök körűl, és követte végig az üstökös aktivitásának fejlődését annak kezdetétől a végéig. Ez lehetőséget biztosított arra, hogy részleteiben, és az időbeli fejlődést is feltárva vizsgáljuk egy üstökös magnetoszféra szerkezetét, és a szerkezetet kialakító, befolyásoló kölcsönhatásokat. A Rosetta előtt csak ún. fly-by missziók látogattak meg üstökösöket, amelyek mindössze néhány perces „pillanatfelvételt” tudtak készíteni az üstökösökhöz közeli régióról. A Rosetta egy

komplett plazma műszer-csomagot (magnetométert, ion, elektron és plazmahullám detektorokat [4]) vitt magával és nagy időbeli felbontású helyszíni méréseket szolgáltatott az üstökös környezetéről. Vizsgálatainkban egyfelől erre az egyedülálló adathalmazra támaszkodtunk, és egymással párhuzamosan elemeztük a mágneses tér, termikus plazma, energikus ion és energikus elektron méréseket. Használtuk továbbá a semleges gáz tulajdonságait vizsgáló ROSINA [2] műszer méréseit, valamint a sonda pozíciójára és orientációjára vonatkozó kiegészítő adatokat is. Mindezen adatsorok együttes vizsgálata természetesen sokkal bonyolultabb, mintha csak egy-egy műszer adataira támaszkodnánk, de így sokkal teljesebb képet kaphatunk az üstökös környezetében lezajló plazmajelenségekről. Ez tette például lehetővé, hogy felfedezzük az üstökös-mag körül az ion-semleges kölcsönhatás eredményeként kialakuló diamágneses üreg dinamikus változásait [6], és egyáltalán, hogy a mágnesesen szennyezett űrszonda méréseiből kimutassuk, hogy a Rosetta többször is járt a diamágneses üregben, és kezdeményezzük a szennyezett mágneses tér adatok újrakalibrálását.

A különböző műszerektől származó adatsorok egyidejű vizsgálatában nagy segítségünkre volt az AMDA virtuális obszervatórium [1], amely egy online elérhető integrált űrfizikai adattár és adatfeldolgozó eszköz. Az AMDA-ban jelenleg 34 nemzetközi űrmisszió adatai hozzáférhetők, tartalmaz földfelszíni obszervatóriumokból származó adatokat, plazma szimulációkat és kiegészítő adatokat. Integrálhatók bele távoli adatbázisok, és az adatok feldolgozását intuitív, könnyen kezelhető adatbányászati és adat-vizualizációs eszközökkel segíti. Jelen kutatások során ezeket a lehetőségeket úgy használtuk, hogy a különböző Rosetta méréseket, illetve kombinációikat, valamint esetenként a szintén hozzáférhető űridőjárási jellemzőket egyszerre ábrázolva elemeztük, és ebből a megsokszorozott információhalmazból vontunk le előzetes következtetéseket, amiket azután az adatok részletes vizsgálatával támasztottunk alá.

Az így elért kísérleti eredményekből a diamágneses üregnek és az ion-semleges kölcsönhatásnak olyan tulajdonságai bontakoztak ki, melyek magyarázatára az ion-semleges kölcsönhatást leíró klasszikus elméletek nem képesek. A Rosetta mérések alapján azt találtuk, hogy a diamágneses üreg nagyobb a vártnál; nagyon dinamikus – egyetlen hosszú megmerülés helyett sok, időben rövid – jellemzően néhány perces – üreg-áthaladási esemény látszik; mind a termikus plazma, mind a szupratermális töltött részecskék szempontjából nagyon eltérőek az üregben belül és kívül megfigyelhető tulajdonságok. Ritkán még a semleges gáz tulajdonságaiban is változás látszik az üreg határfelületén való áthaladásakor.

Az ion-semleges kölcsönhatás klasszikus elméletei [3,5] a folyamatot leíró három csatolt parciális differenciál-egyenletről egyet oldanak meg gömbszimmetrikus, steady-state esetre, ebből is elhanyagolva a plazmasűrűséggel egyenesen arányos tagokat. A plazmasebességre lépcsőfüggvényt tételeznek fel (a semleges sebességgel megegyező v_n a diamágneses üregben belül, nulla azon kívül), a plazmasűrűség számításakor elhanyagolják a plazmatranszport hatását, csak a lokális keletkezési és rekombinációs rátával számolnak. Mégis, az üreg méretét és a mágneses tér térbeli változását az üreg közelében meglepően jól adják vissza. Hogy miért, az egyáltalán nem triviális, alább megmutatjuk, hogy mi ennek az oka. További probléma, hogy amikor a klasszikus megoldásokat visszahelyettesítjük a többi egyenletbe, szingularitásokra jutunk $\partial B / \partial r$ és v is szinguláris bizonyos helyeken (pl. a diamágneses üreg határán). A fenti elvi problémák és az új Rosetta megfigyelések miatt szükségessé vált az elméleti megközelítés revíziója. A problémát leíró három differenciál-egyenlet a következő:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = M(P - Ln), \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \nabla v = -\nabla \left(p + \frac{B^2}{2\mu} \right) + \frac{1}{\mu} B \nabla B - \rho v_{in}(v - v_n), \quad (2)$$

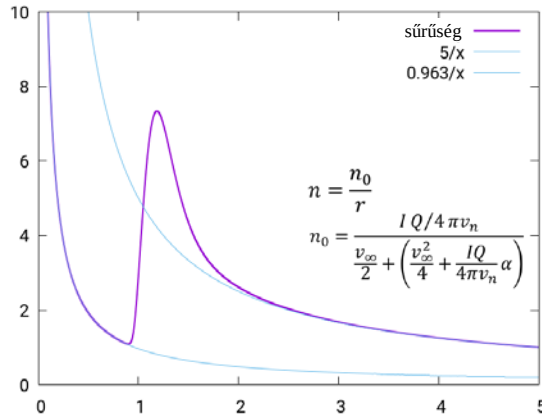
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) - \nabla \times (D_B \nabla \times B), \quad (3)$$

ahol ρ az ionsűrűséget, v az ionsebességet, M az ionok tömegét, P a keletkezési, L a rekombinációs rátájukat, v_n a semleges gáz sebességét, n pedig az ionok számsűrűségét jelenti; B a mágneses tér p a plazma nyomás, μ a mágneses permeabilitás, v_{in} pedig az ion-semleges ütközési ráta. Továbbra is a steady-state feltételezéssel élve a harmadik egyenletből megkaphatjuk az ionsebesség és a mágneses tér összefüggését:

$$v = \frac{D_B}{rB} \frac{\partial(rB)}{\partial r} + \frac{1}{rB} v_\infty, \quad (4)$$

ahol v_∞ a plazmasebesség nagy távolságokon vett határértékére jellemző állandó.

Az első egyenletben a bal oldali tagok képviselik az ionok transzportját, a jobb oldalon a lokális ionizációs és rekombinációs folyamatok járuléka látható. A klasszikus megoldások a transzport járulékát nullának veszik, és ún. fotokémiai egyensúlyt feltételeznek, ahol az ionok egyensúlyi sűrűsége úgy áll be, hogy pontosan annyi keletkezik, mint amennyi semlegesítődik. Mivel L arányos az elektronsűrűséggel, az pedig kvázineutrális plazma esetén az ionsűrűséggel, P pedig a semleges sűrűséggel együtt az üstökösmagtól mért távolság (r) négyzetével csökken, a fotokémiai egyensúly feltételezéséből azonnal következik, hogy az ionsűrűség $1/r$ szerint változik. Ha az egyenletet a transzportot is figyelembe véve megoldjuk (lásd 1. ábra), a kép árnyaltabbá válik.



1. ábra: Az ionsűrűség változása az üstökösmagtól mért távolság függvényében (sötétlila). A világoskék görbék a belső és külső $1/r$ jellegű viselkedést mutatják.

A sűrűség $1/r$ szerint csökken mind az üreg belsejében, mind az üregtől távol, míg az üreg „falában” jelentős plazmasűrűség csúcs alakul ki. A kívül és belül érvényes $1/r$ szerinti lecsengés szorzója azonban eltér, a külső sűrűség szorzó nagyobb, mint a belső, az eltérés nagy aktivitású üstökösök esetén kicsi, alacsony aktivitás mellett azonban jelentős. Ez két dologra is magyarázatot ad, egyfelől habár a Halley-nél a klasszikus modellek a fotokémiai egyensúlyból meghatározható belső értékkel számoltak, ez annál a nagy aktivitású üstökösnél nem tér el jelentősen a kölcsönhatás erősségét valójában meghatározó külső értéktől. Viszont a Rosetta mérések a vártnál nagyobb üreget találtak az alacsony aktivitású 67P üstökös körül, mivel itt a meghatározó külső érték 3-5-ször nagyobb a belsőnél.

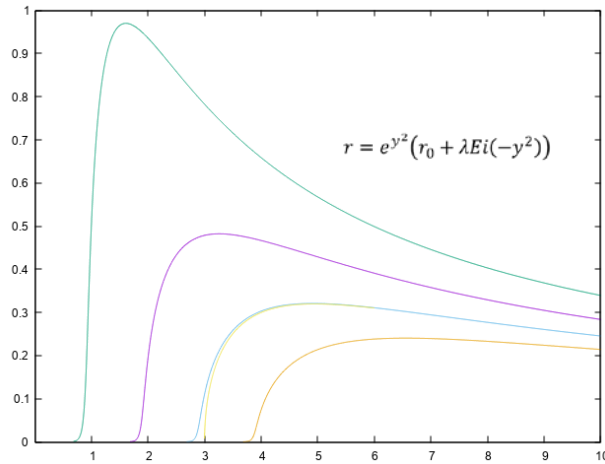
Ha a negyedik egyenletet visszahelyettesítjük a másodikba, az eredményt dimenziótlan formára hozhatjuk, és a következőképpen írhatjuk:

$$(y^2 r + \lambda) y' - y + \frac{f(v_\infty)}{v_n} = 0 \quad (5)$$

ahol $y=rB/K$, és K egy az eredeti paraméterek által meghatározott konstans. Igaz továbbá, hogy $[K]=[B][r]$. Azaz a megoldás átskálázható, amennyiben a mágneses teret ugyanazzal a skálafaktorral szorozzuk, mint amivel a távolságot osztjuk. Más szavakkal az üreg méretét az általános probléma esetén is a mágneses tér maximuma határozza meg: $r_0=K/B_0$, ami szintén

hozzájárul a klasszikus modell sikeréhez.

Az egyenletben feltűnik a $\lambda = D_B/v_n$ konvekció-diffúzió jellegű skálatávolság, amely a mágneses tér exponenciális felfutását jellemzi a diamágneses üreg határán. Az egyenlet megoldása inflációs viselkedést mutat r_0 -ig: exponenciálisan növekszik r/λ -val; nagyobb r -ekre a függés polinomiális, a klasszikus megoldáshoz közelít. Az egyenlethez analitikus megoldások találhatók $\lambda=0$ vagy $v_\infty=0$ esetére (2. ábra). A megoldás mindenhol reguláris, minden paraméterre.



2. ábra: A mágneses tér távolságfüggése különböző B_0 mágneses tér maximumértékekre. Jól látszik, hogy $B_0 r_0 = K$ állandó.

A plazmasebességnél egy fontos szabadságra derült fény, miszerint a sebesség végtelen távolságban vett határértéke (v_∞) nem kell, hogy 0 legyen. Ez a lehetőség befelé, ill. kifelé mozgó megoldások lehetőségét nyitja meg, és megadja a Rosetta által megfigyelt dinamikus viselkedés elméleti alapját. A mozgó megoldásoknál a mágneses tér felfutásának különböző a meredeksége; a befelé mozgó meredekebb. Ennek az a magyarázata, hogy ebben az esetben $v-v_n$ nagyobb, így $\partial B/\partial r$ is nagyobb. A modell mozgó megoldásokra kicsi, de nem eltűnő mágneses teret jósol az üregben belül. Mind a kifelé-befelé aszimmetriát, mind a bent nem eltűnő teret megfigyelések támasztják alá (bár utóbbi a kalibráció nehézsége miatt még nem teljesen bizonyított).

A bizonyított diamágneses üreg eseményeken túl a misszió végén a kihunyó üstökös magnetoszférájában is találtunk a fent bemutatott megoldásokhoz nagyon hasonló mágneses tér görbéket. Az ion semleges kölcsönhatás itt is nagyon jelentős hatást gyakorol a magnetoszférára; a mágneses tér erősen leesik (habár nem nullára) a határfelületen nincs nyomásegyensúly, viszont az ion-semleges kölcsönhatás járuléka helyre tudja állítani az erők egyensúlyát. Ez az eredmény arra utal, hogy az üstökös teljes aktív időszakában az ion-semleges kölcsönhatás domináns szerepet játszik a magnetosféra szerkezetének alakításában.

Köszönetnyilvánítás

A munka az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj és az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-18-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

Irodalom

- [1] AMDA science analysis system, (CDPP) <http://amda.cdpp.eu/>.
- [2] Balsiger, H., et al., (2007), Space Sci. Rev., 128 (1-4), 745-801.
- [3] Cravens T. E., (1987), Adv. Space Res., 7, 12, 147-158.
- [4] Glassmeier K.-H., et al., (2007), Space Sci. Rev., 128, 1.
- [5] Ip W.-H. and Axford W., (1987), Nature, 325, 418, doi:10.1038/325418a0.
- [6] Nemeth, Z., et al., (2016), MNRAS, 462, Suppl_1, S415–S421, doi:10.1093/mnras/stw3028

A topográfia-dinamika nagyléptékű leképezése: hazai Sentinel-1 radarinterferometriai eredmények

Szűcs E, Bozsó I, Bányai L, Szárnya Cs, Wesztergom V

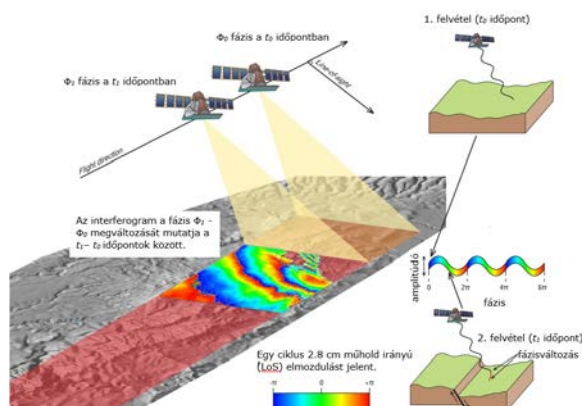
MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet

A bolygó belső folyamatainak legszembetűnőbb és közvetlenül tapasztalható megnyilvánulása a topográfia-dinamika. Az ESA Sentinel-1 földmegfigyelő programja egyedülálló lehetőséget ad a felszíni folyamatok nagy pontosságú, finom felbontású leképezésére mindezt nagy időbeli felbontással párosítva. A nagy időállandójú tektonikai folyamatok, infrastruktúra deformációk néhány mm/év nagyságrendű sebességgel jellemezhetők, ezek detektálására a módszer alkalmas, a korlátot a hullámterjedés okozta jelkésleltetés kvantitatív ismeretének hiánya jelenti, ami kiemelt jelentőséggel bír regionális léptékű folyamatok vizsgálatában.

Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben az űrgeodéziai eszközök és módszerek fejlődése a bolygófelszín dinamikai folyamatainak, a topográfia-dinamikának korábbinál jóval pontosabb megfigyelését teszi lehetővé. Napjainkban a földmegfigyelés egyik legfontosabb eszközévé az ESA Copernicus programjának Sentinel-1 űrmissziója vált, amely a felszín deformációkat nagy területre, páratlan időbeli és térbeli felbontással a következő két évtizedben szolgáltatni fogja.

A műholdradar interferometria (InSAR) a felszín mikrohullámú ($f = 5.6$ GHz) felvételeinek két időpont közötti fázisváltozását használja fel a bekövetkezett deformációk meghatározására (1. ábra). Az interferometrikus fázis nemcsak a felvételek időpontja között esetlegesen bekövetkezett deformáció okozta fázisváltozást tartalmazza, hanem a közeg, azaz döntően a troposzféra és az ionoszféra, hullámterjedési tulajdonságainak megváltozásából származó jelkésleltetést, az alkalmazott domborzatmodell hibáinak hatását valamint egyéb zaforrásokat.



1. ábra. A differenciális műholdradar interferometria elve

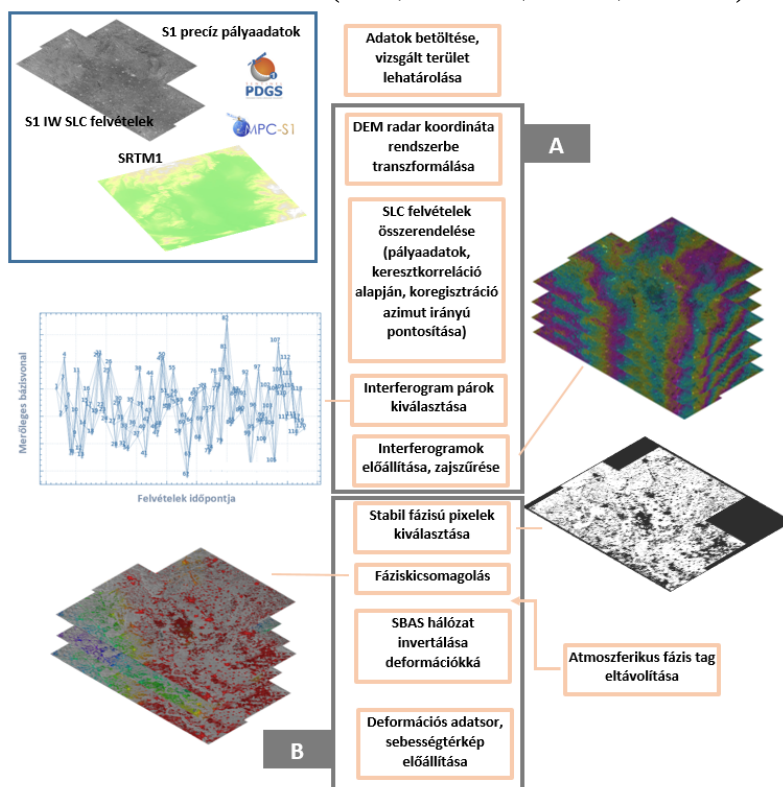
Automatizált Sentinel-1 feldolgozó eljárás

A Sentinel-1 műholdpár korábban nem látott lehetőséget ad a felszíni folyamatok dinamikájának megfigyelésében, ugyanakkor az adatmennyiség (1 felvétel $\sim 5-8$ Gb, 1 felvétel 250 km x 270 km területet fed le, a műholdpár visszatérései ideje 6 nap) igazi kihívást jelent mind az adattárolás, mind a feldolgozás szempontjából. A Sentinel-1 adatokban rejlő potenciált és lehetőségeket

felismerve számos nemzetközi kutatócsoport kezdte el a felvételek szisztematikus feldolgozását akár kiemelt földtani-földfizikai kockázatokkal érintett területeken (JPL ARIA – NASA JPL’s Advanced Rapid Imaging and Analysis center for natural hazards, SARVIEWS – SAR-based hazard information, DLR ZKI – DLR Center for satellite based crisis information) vagy regionális léptékben (COMET InSAR, insar.no, Manunta *et al.*, 2019).

Hazai viszonylatban még nem készült átfogó elemzés Sentinel-1 adatokra támaszkodva, vizsgálataink elsősorban a feldolgozási lánc összeállítására koncentráltak, melyet teszt jelleggel alkalmaztunk a keleti országgrészt lefedő S1A felvételekre (relatív pályaszám /track 102).

A Sentinel-1 felvételek szabadon hozzáférhetők akár közvetlenül az ESA (Copernicus Open Access Hub), akár tükrözéssel előállított nemzeti, regionális adatközpontokból (Australia/Austria/Belgium/Greece/France/Germany/Italy Sentinel National Mirror, Alaska Satellite Facility), a felvételi módok közül az IWS (interferometric wide swath) alkalmas a felszíni deformációk regionális léptékű meghatározására. A feldolgozás során a felvételek összerendelése (coregistration), a digitális domborzatmodell radar koordináta rendszerbe történő transzformációja során precíz Sentinel-1 pályaadatokat használtunk fel (<https://qc.sentinel1.eo.esa.int/>, Sentinel-1 Quality Control). Ez kiemelten fontos regionális léptékű feldolgozások során, ahol a vizsgált területet lefedő adatok több felvétel haladási irányú mozaikolásával állítható elő. A fenti adatok letöltése azok látenciáját figyelembe véve automatizálható. A feldolgozás során az SRTM1, 1” (megközelítőleg 30 m a meridián mentén) felbontású digitális felszínmodell (DEM) alkalmaztuk. A feldolgozási lánc lépéseit a 2. ábra foglalja össze. Az „A” jelű feldolgozási lépések végrehajtása, azaz a fókuszált SAR felvételekből (SLC) interferogramok előállítása, viszonylag rutinszerű eljárásnak tekinthető melyet számos nyílt forráskódú és kereskedelmi szoftver (ISCE, GMTSAR, S1TBX, GAMMA) támogat.



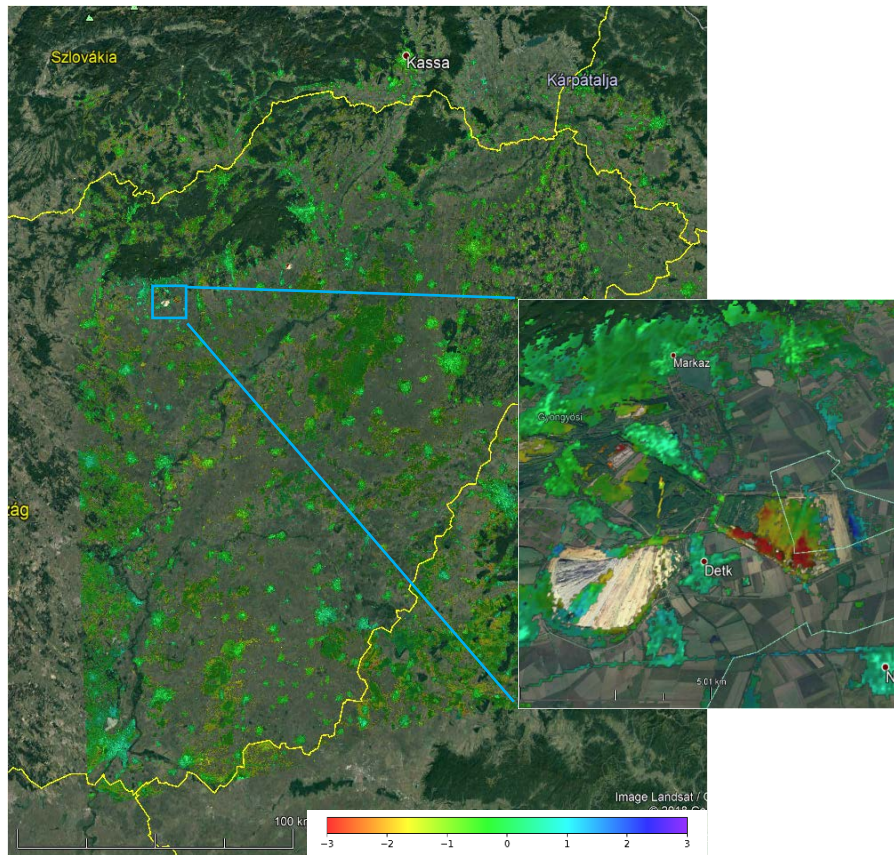
2. ábra. Sentinel-1 felszín deformációk előállításának lépései

A feldolgozás egyes lépésekről részletes összefoglalót ad például Simons and Rosen, 2007; vagy Ferretti, 2014. Megjegyezzük, hogy a Sentinel-1 felvételek feldolgozása során a legkörültekintőbb lépést a felvétel csíkok (burst) mozaikolása jelenti. A Sentinel-1 által alkalmazott TOPS leképezési eljárás, amely viszonylag nagy sáv térképezését biztosítja más missziókkal összehasonlítva, ezt az antenna haladási irányra merőleges valamint haladási irányú ciklikus forgatásával éri el. Ennek eredményeként az SLC felvétel átlagosan 3×10 burst-ból áll össze, melyeket haladási irányban legalább $1/1000$ pixel pontossággal kell illeszteni a nem kívánt fázisugrások elkerüléséhez. Az erre szolgáló ESD eljárás (Fattahi, Agram and Simons, 2017) a burst-ök átfedő részein képzett kettős interferogram különbségek alapján határozzák meg az eltolás mértékét.

Az interferogramok előállítását általában nem minden adatpont kerül feldolgozásra, hanem csak azok, melyek fázisváltozását hosszú időn keresztül a deformációs dominálja és nem pedig a fáziszaj. Különböző eljárások állnak rendelkezésre ezen pontok meghatározására, amelyről összefoglalót ad (Crosetto *et al.*, 2016) munkája. A módszerek összetettsége az egyszerű koherencia küszöbérték megválasztástól a szabadalom alatt álló eljárásokig terjed. A különböző módszerek jelentik az alapját az interferogramok idősor elemzését támogató (MT InSAR, 2. ábra B panel) nyílt forráskódú és kereskedelmi szoftvereknek (PyRate, PySAR, GiANT, StaMPS, SARscape, SARPROZ, GAMMA IPTA).

Az összeállított feldolgozási láncot egy közel 4 évet felölelő S1A adatsor alapján vizsgáltuk (2015-03-05 és 201-04-13 közötti időszak). A Sentinel-1 műholdpár ún. small-baseline misszió, ami egyrészt arra utal, hogy megközelítőleg ugyanabból a pozícióból készülnek különböző időpontban a felvételek (a bázisvonal műhold ránézési irányára merőleges műholdpozíciók közötti távolság, értéke néhány 10 m). Másrészt small-baseline-nak tekinthető abból a szempontból is, hogy a TOPS felvételi mód következtében jó minőségű interferogramokra van szükség a felvételek azimut irányú mozaikolásához, amit rövid időkülönbségű felvételek kiválasztását feltételezi. Az ún. SBAS (Small Baseline Subset, Berardino *et al.*, 2002) módszer pontosan ilyen rövid térbeli és időben közeli felvételek alapján kialakított interferogram hálózat alapján becsüli a felszín deformációkat. Tanulmányunkban több mint 120 felvétel alapján közel 470 12, 24 és 36 napos interferogramból álló hálózat hoztunk létre. Az adatok kezelhetősége érdekében az interferogramokat azimut irányban 5, arra merőlegesen 20 cellánként átlagoltuk, így közel 70×70 m² egy-egy felbontási cella. A stabil fázisú cellákat az elemzéshez az SBAS hálózatban az egy „háromszöget” alkotó, t_1 , t_2 és t_3 időponthoz tartozó interferogramokból számított $W[(\varphi_{t2} - \varphi_{t1}) + (\varphi_{t3} - \varphi_{t1}) + (\varphi_{t3} - \varphi_{t2})] = \varphi_{res}$ nem nulla maradék fázis alapján határoztuk meg, W a 2π -vel való maradékos osztást jelöli. Az elmozdulás idősorok és az azokból származtatott deformációs sebességek a kicsomagolt interferogramok hálózatának legkisebb négyzetes értelmű invertálásával állítható elő. Az interferogram hálózat redundanciája csökkenti a bázisvonal, a terepmodell, a dekorreláció okozta fázishibákat viszont a jelterjedésből származó atmoszférikus fázistag hatását nem, mivel az közvetlenül jelenik meg az interferometrikus fázisban. A deformációs és az atmoszférikus fázistag szétválasztása a két mennyiség térbeli és időbeli karakterisztikáját figyelembe szűrésekkel lehetséges. Vizsgálatainkban mi is ezt az utat választottuk, viszont ezzel kapcsolatban fontos megjegyezni, hogy így minden nagy skálájú (hosszú hullámhosszú) felszínváltozás is eltávolításra került a végleges deformációs sebességtérképből (3. ábra). Az atmoszférikus fázis külső, független forrásból történő meghatározása ezen nagymértékben javítani fog. Ilyen fejlesztés alatt álló kezdeményezés a GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR, (Yu *et al.*, 2018)), amely a közepes felbontású ECMWF időjárás előrejelző modellt kombinálja nagy felbontású felszínmodellekkel, és távlati tervei között szerepel a Nevada Geodetic Laboratory globális GPS hálózatából származó troposzférikus késleltetés adatok integrációja, amellyel a meghatározott fáziskésleltetések mind térbeli mind időbeli felbontása jelentősen meg fog növekedni.

Összefoglalás



3. ábra Múhöld irányú átlagos deformációs sebesség térkép (cm/év)

Tanulmányunkban kísérleti jelleggel regionális léptékben közel 4 év Sentinel-1A felvételét dolgoztuk fel. A jelkésletetés okozta fázislag kiküszöbölésére alkalmazott eljárás következtében elsősorban a vizsgált terület lokális deformációi figyelhetők meg, mint a 3. ábra kivágatában jelölt Mátrai Erőmű Zrt. viszontai külszíni bányáinak tevékenysége. A kidolgozott eljárás továbbfejlesztéséhez, a Sentinel-1 földmegfigyelési adatok jövőbeni nagy léptékű felhasználásához elengedhetetlen lesz az atmoszféra hatásának külső adatbázisokon alapuló adekvát modellezése.

Irodalom

- Berardino, P. *et al.* (2002) 'A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), pp. 2375–2383.
- Crosetto, M. *et al.* (2016) 'Persistent Scatterer Interferometry: A review', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS), 115, pp. 78–89.
- Fattahi, H., Agram, P. and Simons, M. (2017) 'A Network-Based Enhanced Spectral Diversity Approach for TOPS Time-Series Analysis', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(2), pp. 777–786.
- Ferretti, A. (2014) *Satellite InSAR Data*. EAGE Publications BV.
- Manunta, M. *et al.* (2019) 'The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. IEEE, PP, pp. 1–23.
- Simons, M. and Rosen, P. A. (2007) 'Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy', in *Treatise on Geophysics*. Elsevier B.V., pp. 391–446.
- Yu, C. *et al.* (2018) 'Generic Atmospheric Correction Model for Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations', *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. Wiley-Blackwell. doi: 10.1029/2017JB015305.