

RELEC orosz műhold célja, amelynek a felületén egy SAS-3 berendezés repül majd. Startja előzetesen a jövő évre várható. E kísérletekben relatíve kis ráfordítással nagy tudományos eredmények elérésére van lehetőség üridőjárás terén.

Az itt leírt eredmények eléréséhez az EU FP-7 263218. és 263240. számú szerződésai is hozzájárultak.

Kulcsszavak: *üridőjárás, magnetoszféra, plazmaszféra, sugárzási övek, whistlerek*

IRODALOM

- Bortnik, Jacob –Thorne, R. M. – Meredith, N. P. (2008): The Unexpected Origin of Plasmaspheric Hiss from Discrete Chorus Emissions, *Nature*. 452, 62–66, DOI:10.1038/nature06741
- Carpenter, Donald L. (1963): Whistler Evidence of a 'Knee' in the Magnetospheric Ionization Density Profile. *Journal of Geophysical Research*. 68, 6, 1675. DOI:10.1029/JZ068i006p01675
- Collier, Andrew B. – Lichtenberger J. – Clilverd, M. A. – Steinbach, P. – Rodger, C. J. (2011): Source Region for Whistlers Detected at Rothera, Antarctica. *Journal of Geophysical Research*. 116, A03219, DOI:10.1029/2010JA016197
- Ferencz Orsolya E. – Bodnár L. – Ferencz Cs. – Hamar D. – Lichtenberger J. – Steinbach P. – Korepanov, V. – Mikhaylova, G. – Mikhaylov, Yu. – Kuznetsov, V. (2009): Ducted Whistlers Propagating in Higher Order Guided Mode and Recorded on Board of Compass-2 Satellite by the Advanced Signal Analyzer and Sampler SASz. *Journal of Geophysical Research*. 114, A03213, DOI: 10.1029/2008JA013542
- Horne, Richard B. et al. (2005): Wave Acceleration of Electrons in the Van Allen Radiation Belts. *Nature*. 437, 227–230. DOI:10.1038/nature03939
- Kasaba, Yasumasa – Bougeret, J.-L. – Blomberg, L.G. – Kojima, H. – Yagitani, M. – Moncuquet, M. – Trotignon, J.-G. – Chanteur, G. – Kumamoto, A. – Kasahara, Y. – Lichtenberger, J. – Omura, Y. – Ishisaka, K. and Matsumoto, H. (2010): The Plasma Wave Investigation (PWI) Onboard the BepiColombo/MMO: First Measurement of Electric Fields,

- Electromagnetic Waves and Radio Waves around Mercury. *Planet Space Science*. 58 (BepiColombo special issue, ISS 1–2): 238–278. DOI: 10.1016/j.pss.2008.07.017
- Lichtenberger János – Ferencz Cs. – Bodnár L. – Hamar D. – Steinbach P. (2008): Automatic Whistler Detector and Analyzer (AWDA) system. Automatic Whistler Detector. *Journal of Geophysical Research*. 113, A12201, Doi: 10.1029/2008JA013467.
- Lichtenberger János (2009): A new whistler inversion model. *Journal of Geophysical Research*. 114 A07222, Doi: 10.1029/2008JA013799
- Lichtenberger János – Ferencz C. – Hamar D. – Steinbach P. – Rodger, C. J. – Clilverd, M. A. – Collier, A. B. (2010): The Automatic Whistler Detector and Analyzer (AWDA) System: Implementation of the Analyzer Algorithm. *Journal of Geophysical Research*. 115 A12214. DOI:10.1029/2010JA015931
- Novikov, Denis I. – Klimov, S. I. – Korepanov, V. E. – Marusenkov, A. A. – Ferencz Cs. – Lichtenberger J. – Bodnár L. (2009): Magnitno-volnovoj kompleks mikrospjutnika „Tsibis-M” dla izutsenia kozmitseskoj pogodi. In: Hazirova, R. R. (ed.): Missia „Tsibis-M”. IKI-RAN, Moskow, 78–89.
- Storey, L. R. O. (1953): An Investigation of Whistling Atmospherics. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series A*. 246, 113–141, doi:10.1098/rsta.1953.0011 <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/246/908/113.full.pdf>
- URL1: <http://plasmon.elte.hu>
URL2: <http://www.popdat.org>

A FÖLDMÁGNESES ÉSZLELÉSEK SZEREPE AZ ŰRKUTATÁSBAN

Heilig Balázs

Kovács Péter

MSc, tudományos munkatárs,
Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI),
Tihanyi Geofizikai Observatórium
heilig.balazs@mfgi.hu

PhD, tudományos főmunkatárs,
Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI),
Földfizika Főosztály
kovacs.peter@mfgi.hu

Csontos András

MSc, observatóriumvezető,
Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI), Tihanyi Geofizikai Observatórium
csontos.andras@mfgi.hu

Bevezető

A földi mágneses tér a magnetoszférában és ionoszférában folyó elektromos áramok, illetve a földmagban zajló dinamikai változások hatására folyamatosan változik. A változások időskálája az évszázados változástól (földmagban zajló folyamatok), a Nap ciklusai (tizennyel éves, huszonegy napos stb.) és a Föld mozgásával (éves, napos) összefüggő változásokon át egészen a töredékmásodperces periódusú ingadozásokig (például geomágneses pulzációk) terjednek. E variációk egy része többé-kevésbé szabályosan ismétlődik (például a napciklusokkal vagy a Föld forgásával és keringésével összefüggően), másik része viszont időszakokként figyelhető meg. Utóbbiak közül a legismertebbek a naptevékenységgel összefüggő geomágneses viharok, szubviharok.

A mágneses tér változását hagyományosan a geomágneses observatóriumokban, illetve időszakosan geomágneses hálózatokon figye-

lik. Magyarországon jelenleg a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI) Tihanyi Geofizikai Observatóriuma és az MTA nagyeceni Széchenyi István Geofizikai Observatóriuma végez folyamatos megfigyeléseket. Ezenkívül az MFGI egy közel háromszáz pontból álló országos és egy tizenkét pontból álló, ún. szekuláris mágneses hálózatot is fenntart. Előbbi célja a mágneses tér országos felvételezése ritkán kivitelezett (tizenöt évente) mérések során, utóbbi pedig – időben sűrűbb (kétévente végzett) mérésekkel – az ehhez képesti időbeli változások monitorozása.

Az utóbbi évtizedekben a földi tér megfigyelésére műholdakat is pályára állítottak, amelyek megfigyelései a felszíni mérésekkel kölcsönösen kiegészítik egymást. Míg a poláris pályán mozgó műholdakkal a mágneses tér teljes területi felmérése megvalósítható a felszíntől néhány száz kilométer magasságban, addig a felszínen végzett observatóriumi mérések egy-egy pontban észlelt időbeli

változásokról szolgáltatnak nagy pontosságú adatokat. A műholdas mágneses mérések tehát semmiképpen nem helyettesítik a felszínen végzetteteket, sőt éppen a felszíni mérések pontosságának növelésére és az obszervatóriumi hálózat sűrítésére, valamint a terepi mérések és a mérési módszerek egységesítésére, összehangolására ösztönöznek (például az összeurópai MagNetE együttműködés esetén).

A két különböző típusú megfigyelés eredményeként ötévente elkészül a Föld belső eredetű terét és annak változását leíró Nemzetközi Geomágneses Referencia Tér-modell, az IGRF, amely alapvető jelentőségű a magnetoszférában egyre nagyobb számban üzemelő űreszközök megfigyelésének értelmezésében is. Az IGRF-modellek elkészítéséhez a hazai obszervatóriumok és hálózatok is hozzájárulnak adataikkal, csakúgy, mint a globális mágneses anomália térképezéshez (WDMAM, ma már NATO-standard), valamint számos egyéb mágneses modell pontosításához.

Az obszervatóriumi mérések a földközeli mágneses környezet kutatása mellett a kezdetektől fogva lehetőséget kínáltak a tágabb tér, az űr (magnetoszféra, ionoszféra) dinamikai folyamatainak megfigyelésére, modellezésére is. Cikkünkben erre mutatunk példát az MFGI-ben jelenleg folyó kutatási témák alapján.

Földmágneses pulzációk vizsgálata

A földmágneses pulzációk (ULF-hullámok) a mágneses tér földfelszínen észlelt néhány másodperces, néhány perces periódusú, hol szabályosabb, hol szabálytalanabb fluktuációi. Mivel energiájuk végső forrása a napszélben, illetve a bolygóközi térben van, s mivel terjedésük során áthaladnak a magnetoszférán, a

plazmaszférán és az ionoszférán is, vizsgálatuk a Föld körüli térség kutatásának sok területén hasznosítható.

Az MFGI 2001 óta koordinálja az egyetlen európai meridionális magnetométer-hálózatot, az MM100-at (Heilig et al., 2010). A hálózat első állomásait még az USGS-szel, és az MTA GGKI-val együttműködésben telepítettük 1996-tól kezdődően. Az MM100 név arra utal, hogy a hálózatba bevont finn, észt, lengyel, szlovák és magyar állomások hozzávetőlegesen a 110. mágneses meridián mentén helyezkednek el. Az állomáshálózat nemzetközi kampányok résztvevője volt (például Nemzetközi Heliofizikai Év), adatai a Föld körül alacsony pályán keringő (CHAMP) és a bolygóközi térben megfigyelést végző műholdakkal (WIND, ACE, CLUSTER) kombinálva hasznosultak igazán. 2011-től egy EU által támogatott program (PLASMON, 2011–2014) keretében lehetőség nyílt az MM100-állomások korszerűsítésére, a hálózat besűrítésére új állomások telepítésével, valamint az MM100-nak az olasz–osztrák SEGMA-hálózattal való egyesítésére. Az új, egyesített hálózat neve EMMA lett (European quasi-Meridional Magnetic Array).

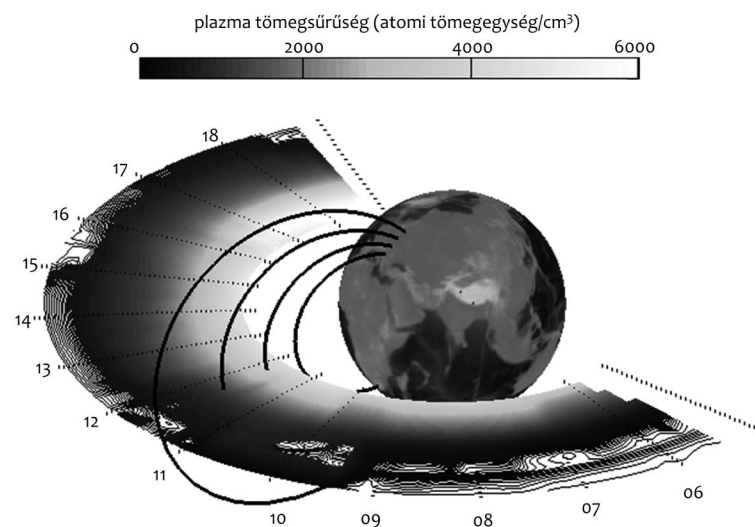
A nappali pulzációk egyik legismertebb csoportja az ún. erővonal-rezonanciáké. Ezek a földmágneses erővonalak (és a velük rezgő plazmarészecskék) sajátrezgése. Frekvenciájuk, miként egy zengő húr, erősen függ a rezgő erővonal (húr) hosszától. Ez a rezonáns frekvencia szélességfüggésében jelenik meg, a pólusokhoz közeledve, ahogy az erővonalak hossza nő, a rezonáns frekvencia csökken. Ha egyetlen erővonalt figyelünk meg, annak frekvenciája már elsősorban az erővonal menti részecskesűrűségtől függ, miként a húr annak vastagságától. S ahogy a húr is elhangolható feszítettségének megváltoztatásával,

a mágneses „húr” frekvenciáját is befolyásolja a mágneses feszültség, végső soron a mágneses tér nagysága. Az erővonal-rezonanciák az űrkutatás számára azzal váltak különösen értékesek, hogy frekvenciájukból, a mágneses tér ismeretében, kiszámítható az erővonal menti plazmasűrűség. Azaz viszonylag olcsó földi mérésekkel a plazmaszféra sűrűségének folyamatos megfigyelése valósítható meg.

Az EMMA fő feladata éppen ez, az erővonal-rezonanciák megfigyelése, s ezen keresztül a plazmaszféra plazmasűrűségének folyamatos, közel valós idejű monitorozása a teljes hálózat mentén (lásd például 1. ábra). A Tihanyban és Nagycenken észlelt adatok 2001-ig visszamenőleg világszinten is a leg hosszabb csaknem folyamatos plazmasűrűség-adatsorok közé tartoznak. A pulzációkból származtatott plazma-tömegsűrűségek, a

VLF-*whistlerek* inverziójából számolt elektronsűrűség-adatokkal (erről és a PLASMON-projekt további részleteiről lásd Lichtenberger János és Ferencz Csaba erről szóló cikkét az 1426. oldalon) együttesen, az átlagos iontömeg becsülésére, végül az ionösszetétel becsülésére is lehetőséget teremtenek.

Erővonal-rezonanciák nem jönnek létre, ha nem lenne olyan forrás, amely a gerjesztésükhöz szükséges energiát biztosítja. Az egyik legfontosabb ilyen energiaforrás, legalábbis a mi földrajzi szélességünkön, a közvetlenül a magnetoszféra előtt keletkező ún. *upstream* hullámtevékenység. Az *upstream* hullámokat a szuperszonikus napszélben a magnetoszféra előtt kialakuló fejhullámról visszavert ionok keltik, hullám-részecske kölcsönhatás révén. E hullámokat bolygóközi térben, a fejhullám előtti térrészben rendsze-



1. ábra • A plazmaszféra egyenlítői sűrűségterképe 2003. április 30-án hat (finn, lengyel, magyar) MM100-állomás erővonalrezonancia-megfigyelései alapján. A déli meridián síkjában felrajzolt mágnesesindukció-vonalak a 45°, 50°, 55°, 60° mágneses szélességen érik el a felszínt. Az egyenlítői síkban a pontozott vonalak a helyi időt jelzik órában. A mérések a plazmaszféra fokozatos, de nem egyenletes feltöltődéséről tanúskodnak.

resen észlelik az itt megforduló kutató műholdak (például a négy CLUSTER-műhold, 2000-től). Észlelt periódusuk 30 s körül van, a bolygóközi mágneses térrel fordítottan arányos. Erre az egyik máig is idézett bizonyítékot éppen magyar kutatók szolgáltatták (Verő – Holló, 1978). Az upstream hullámokat a napszél, minthogy sebessége a napszéllel szemben terjedő hullámok fázissebességét meghaladja, a magnetoszféra felé sodorja. Az upstream hullámok a magnetoszférába belépve egészen a földfelszínig eljutnak, ahol mint pulzációk észlelhetők.

A geomágneses pulzációk kutatásának éppen az upstream eredet miatt fontos területe a napszéllel és a bolygóközi térjellemzőkkel való sokrétű kapcsolat vizsgálata. A közelmúltban elsőként igazoltuk e bolygóközi eredetű ún. upstream pulzációk jelenlétét az ionoszféra felsőbb rétegében (kb. 400 km magasságban) a német CHAMP-műhold (2000–2011) méréseinek feldolgozása alapján. Ugyancsak elsőként sikerült ugyanebben a magasságtartományban és a felszínen is fel térképezniünk a nappali, upstream eredetű energia globális eloszlását (Heilig et al., 2007) is. Az észleléseket az Orosz Tudományos Akadémia űrfizikai kutatócsoportjával együttműködésben a legújabb magneto-hidrodinamikai modellel összevetve nagyfokú egyezést találtunk (Pilipenko et al., 2008, 2011). Korábban, éppen modellekre alapozva, általában kétségbe vonták, hogy az upstream eredetű hullámok bármilyen formában eljuthassanak a felszínig, sőt mérvadó kutatócsoportok (UCLA) az utóbbi évtizedekben már azt is kétségbe vonták, hogy e hullámok egyáltalán szerepet játszhatnak a felszíni pulzációs aktivitás kialakításában. Újabb erős érvelést szolgáltatott az upstream hullámok létrejöttére és jelentőségére a felszíni pulzációs aktivitás és a napszél

sűrűsége között talált kapcsolat (Heilig et al., 2010). Ezeknek az eredményeknek is köszönhetően az újabban publikált áttekintésekben ismét helyet kapott az upstream hullámtevékenység és a felszíni pulzációk közötti kapcsolat bemutatása (például Sutcliffe et al., 2011; Menk, 2012).

A magnetoszféra nemlineáris dinamikájának vizsgálata

A pulzációs hullámok vagy az ebben a cikksorozatban szintén tárgyalt whistler módusú hullámok a mágnesezett plazma magnetohidrodinamikai (MHD) egyenleteiből levezethetők. Az MHD egyenletei azonban alapvetően nemlineárisak, ezért az önálló hullámmódusoknál jóval összetettebb dinamikai változásokat is leírhatnak. Ilyenek a plazma térben és időben szabálytalan változásai, a turbulens fluktuációk.

A mágnesezett plazma áramlásának jellegét minőségileg alapvetően az MHD-egyenletek nemlineáris és disszipációs tagjainak aránya, a dimenzió nélküli, ún. mágneses Reynolds-szám határozza meg. Alacsony Reynolds-szám mellett a plazma áramlása szabályos (lamináris), $Re \sim 4000$ értéket elérve viszont már turbulens. A kétféle mozgás közötti átmenet a kaotikus rendszereknél ismert bifurkációs folyamat (Hopf-bifurkáció) révén megy végbe; Re növelésével a lamináris áramlás először hullámmozgásba vált át, majd újabb és újabb, egyre kisebb méretű hullámok jelennek meg, mindegyik új szabadsági fokot engedve a rendszerbe. Végeredményként egy végtelen szabadsági fokú rendszer épül fel, amelyet determinisztikus egyenletek vezérelnek, a fejlődése mégis bizonyult, kaotikus és megjósolhatatlan. Noha a részletek nem is, statisztikailag bizonyos szabályszerűségek a turbulenciában is felis-

merhetők. Az MHD-egyenletek szabályos áramlás esetén érvényes szimmetriái ugyanis a turbulens áramlásban statisztikus értelemben maradnak fenn. Ezek közül az egyik leglényegesebb a skálázási szimmetria, ami a turbulens rendszerek statisztikailag önhasonló, fraktál tulajdonságait alakítja ki.

A különböző léptékű mozgások a turbulens áramban örvényekként jelennek meg. A 2. ábra egy valós turbulens folyadékáramlást mutat be, amin egyértelműen megfigyelhető a különböző léptékű örvények hierarchiája, és az, hogy az örvények egymásból kifejlődve töltik ki az akadály mögötti teret, önhasonlást mutatva a léptékek között. Az örvények léptéktartományában a mozgást a nemlineáris MHD-tagok vezérik, a disszipáció hatása itt elhanyagolható (Re értéke nagy). Ebben az ún. inerciális (tehetetlenségi) tartományban az energia veszteség nélkül adódik át a különböző méretű koherens örvények között.

Abból kiindulva, hogy a tehetetlenségi tartományban hővesztés nem lép fel és energia sem termelődik, Andrej Kolmogorov (1941) hasonlósági alapon a turbulens időskorok $E(k) \sim k^{-\beta}$ alakú energiaspektrumát vezet-

te le, ahol k a hullámszámot jelenti. Hidrodinamikai áramlásban, ahol csak közeli léptékű örvények között adódik át energia, $\beta = 5/3$ közelítés érvényes, ez a híres Kolmogorov-spektrum. Ettől kissé eltér az MHD-áramlás, ahol a turbulens örvények Alfvén-pulzációként értelmezhetőek, amelyek haladási sebességét a nagyléptékű mágneses tér erőssége határozza meg. Ez esetben ezért a $\beta = 3/2$ exponensű spektrum közelítés érvényes (Kraichnan, 1965).

A mágnesezett plazma nemlineáris viselkedésének megfigyelésére az egyik ideális természetes környezetet a napszél nyújtja. A napszelet ezért szokás természetes laboratóriumként is emlegetni, ahol a mérőeszközöket a műholdak képviselik. A Helios űrszonda adatai alapján kimutatták, hogy a napszél mágneses terének spektruma a várt hatványfüggvény szerinti menetet követi, de nehezen dönthető el, hogy a függvény exponense inkább a Kolmogorov által javasolt 1,66-hoz, vagy a Kraichnan-féle 1,5-höz áll-e közelebb (Bruno – Carbone, 2005).

A napszélben mutatták meg azt is, hogy a turbulens plazmaáramot egyre kisebb lép-



2. ábra • Akadály körüli, turbulens folyadékáramlás (forrás: URL1)

teken figyelve egyre intenzívebb hirtelen változások, ún. intermittenciák jelentkeznek. Az intermittenciák alapvetően meghatározzák a rendszer statisztikai jellegét azáltal, hogy előfordulási valószínűségük a véletlenszerű folyamatok esetén a vártnál képest jóval nagyobb. A különböző léptékeken az intermittens fluktuációk eloszlása más és más, ami sérti a turbulens áramok korábban jószolt globális skálázási önhasonlóságát. Az új elképzelés szerint önhasonlóság ezért nem globálisan, hanem az eredeti rendszer önálló fraktál alterein valósul csak meg, egymástól más és más módon. Ez a multifraktál skálázás.

A napszél és a magnetoszféra közötti régóta ismert szoros energetikai kapcsolat alapján a 60-as évektől a magnetoszféra nemlineáris dinamikájának vizsgálata is megindult, eleinte elsősorban mágneses indexek alapján. A plazma áramlása szempontjából a két rendszer között alapvető különbséget jelent azonban, hogy a magnetoszféra kiterjedése korlátos, amelyben a plazmának általában nincs kitüntetett irányú egységes áramlása. Továbbá a magnetoszférában a részecskék ütközési frekvenciája a napszélbelinél jóval nagyobb, és a mozgás pályáját a sajátos elrendeződésű erővonalak határozzák meg. Ezért a magnetoszférát a kezdetekben a napszélétől független, autonóm rendszernek is tekintették.

A mágneses idősorokban megfigyelhető hirtelen változások a nemlineáris turbulens és kaotikus rendszerekkel mutattak analógiát. A nemlineáris jelleg egyik közvetett első igazolását paradox módon egy olyan lineáris bemenet–kimenet modell szolgáltatta, amelynek eredményessége – a linearitás feltételezésének ellentmondva – a geomágneses háborgások mértékétől jelentős függést mutatott (Bargatze et al., 1985). Később számos cikk tanulmányozta a magnetoszféra

kaotikus viselkedését, a rendszert vezérlő szabadsági fokok számának becslése által.

Az MFGI részéről a 90-es évek második felétől obszervatóriumi $B(t)$ mágneses idősorok spektrumait és multifraktál szimmetriára utaló jegyeit vizsgáltuk (Kovács et al., 2001). A spektrumokból az esetlegesen turbulens skálázási időtartományokra következtethetünk. A multifraktál jegyeket az idősorokból képzett $B(t+\tau) - B(t)$ (τ a vizsgált időlépték) különbségi idősorok τ függvényében vett statisztikai eloszlása (valószínűsűrűségfüggvény), illetve a különbségek magasabb rendű momentumainak τ függvényében vett viselkedése (struktúrafüggvény-analízis) alapján tanulmányozzuk. A tapasztalt multifraktál jelleg a vizsgált obszervatóriumok pólustávolságától és a vizsgált időszakban jelentkező mágneses háborgás mértékétől jelentős függést mutat. Példaként egy mágneses szempontból aktív hónap X komponensű tihanyi regisztrátumának spektrumát mutatjuk be (3. ábra). A spektrumon két skálázási tartomány jelentkezik, amelyek közötti határ $3 \cdot 10^{-4}$ Hz ($3300 \text{ s} \sim 1 \text{ óra}$) körül van. A spektrum kismagyas tartománya a Kolmogorov-féle spektrumhoz áll közel, a nagyfrekvenciás rész azonban ennél meredekebb. Miután a nagyfrekvenciás skálázási tartomány nyugodt hónapokban nem jelentkezik, a spektrumon ezt a részét a mágneses háborgások, azon belül is elsősorban a szubviharok (időlépték $< 1 \text{ óra}$) hatásának tulajdonítjuk. A skálázás tehát itt mindenképpen a magnetoszféra belső dinamikájának köszönhető. A két tartományhoz tartozó egy-egy időléptéken ($\tau = 0,5 \text{ óra}$; $\tau = 12 \text{ óra}$) bemutatjuk a különbségi idősorok valószínűsűrűségfüggvényét (VSF) is. A Gauss-eloszláshoz képest gyakoribb erős fluktuációk a félórás időléptéknél és a nagy skálázási frekvencia-

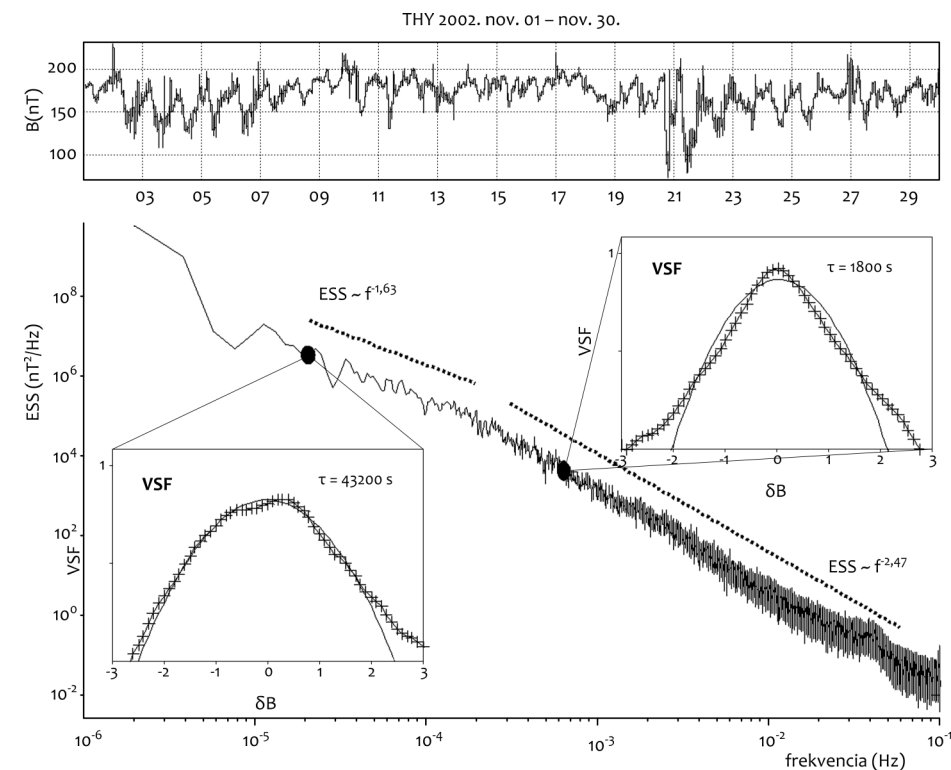
tartomány egészen jelentkeznek. Ez alapján itt a mágneses változások intermittensek és multifraktál szimmetriával jellemezhetőek. A nagyobb léptéken (tizenkét óra, kismagyas skálázási tartomány) a VSF a Gauss-eloszláshoz simul, ami ebben a tartományban vagy véletlenszerű, vagy önhasonló turbulens folyamatokra utal.

Az utóbbi években műholdak (elsősorban a Cluster-misszió) mágneses idősorai alapján

a magnetoszférában közvetlenül megfigyelt, ún. *in situ* dinamikai változások nemlineáris jegeit is tanulmányozzuk.

Összefoglalás

A Tihanyi Geofizikai Obszervatóriumban 1955 óta zajlik a mágneses tér folyamatos regisztrálása, szerencsésen alacsony környezeti zajok mellett. Az észlelések a Föld belső szerkezetének kutatásában, a kéreg térképezésé-



3. ábra • Fent: Az X komponensű mágneses tér másodperc felbontású relatív változása a Tihanyi Geofizikai Obszervatóriumban, 2002 novemberében • Alul: A regisztrátum energiasűrűség-spektruma, illetve a regisztrátum $\tau = 0,5 \text{ óra}$ ($f = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ Hz}$) és $\tau = 12 \text{ óra}$ ($f = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$) időskálával képzett különbségi idősorok valószínűsűrűség-függvényei (VSF, keresztel jelölt görbék). A lefelé néző parabolák a VSF-görbék központi részéhez legjobban illeszkedő gaussi valószínűsűrűség-függvényeket jelölik. A Gauss-eloszlástól való eltérés a kis időskálán (0,5 óra) egyértelmű.

ben, helyi és globális mágneses modellek szerkesztésében, illetve az űrkutatásban hasznosulnak, a legtöbb esetben egyéb obszervatóriumok és hálózatok adataival együttesen. A cikkben az obszervatóriumi adatok űrkutatásban betöltött szerepére mutattunk példákat.

IRODALOM

- Bargatze, Lee Frost – Baker, D. N. – McPherron, R. L. – Hones, E. W. Jr. (1985): Magnetospheric Impulse Response for Many Levels of Geomagnetic Activity. *Journal of Geophysical Research*. 90, 6387–6394. DOI: 10.1029/JA090iA07p06387 • http://www.igpp.ucla.edu/public/rmcpheerr/McPherronPDFfiles/Bargatze_ManyLevels_JA090iA07p06387.pdf
- Bruno, Roberto – Carbone, V. (2005): The Solar Wind as a Turbulence Laboratory. *Living Reviews in Solar Physics*. 2, 2005, 4. <http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-4>
- Heilig B. – Lühr, H. – Rother, M. (2007): Comprehensive Study of ULF Upstream Waves Observed in the Topside Ionosphere by CHAMP and on the Ground. *Annales Geophysicae*. 25, 737–754. • <http://www.ann-geophys.net/25/737/2007/angeo-25-737-2007.pdf>
- Heilig B. – Lotz, S. J. – Verö J. – Sutcliffe, P. – Reda J. – Pajunpää, K. – Raita, T. (2010): Empirically Modelled Pc3 Activity Based on Solar Wind Parameters. *Annales Geophysicae*. 28, 1703–1722. doi:10.5194/angeo-28-1703-2010 • <http://www.ann-geophys.net/28/1703/2010/angeo-28-1703-2010.pdf>
- Kolmogorov, A. N. (1941): Local Structure of Turbulence in an Incompressible Fluid at Very Large Reynolds Numbers. *Doklady Akademii Nauk SSSR*. 30, 299–303. English translation V. Levin: • http://www.astro.puc.cl/~rparra/tools/PAPERS/kolmogorov_1951.pdf
- Kovács Péter – Carbone, V. – Vörös Z. (2001): Wavelet-based Filtering of Intermittent Events from Geomagnetic Time-series. *Planetary and Space Science*. 49, 1219–1231. • [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-0633\(01\)00063-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-0633(01)00063-0)

A kutatásokat többek között az EU-FP7/2007-2013263218 (PLASMON) projekt és a K75640 sz. OTKA pályázat támogatja.

Kulcsszavak: *geofizika, földmágnesség, obszervatórium, Tihany, magnetohidrodinamika, nemlinearitás*

- Kraichnan, R. H. (1965): Inertial Range Spectrum in Hydromagnetic Turbulence. *Physics of Fluids*. 8, 1385–1387. DOI: 10.1063/1.1761412
- Menk, Frederic W. (2012): Magnetospheric ULF Waves. In: Liu, William – Fujimoto, Masaki (eds.): *The Dynamic Magnetosphere. (IAGA Special Sopron Book Series, Vol. 3)* Springer, 223–256, DOI: 10.1007/978-94-007-0501-2 • <http://books.google.hu/>
- Pilipenko, Viacheslav – Fedorov, E. – Heilig B. – Engebretson, M. J. (2008): Structure of ULF Pc3 Waves at Low Latitudes. *Journal of Geophysical Research*. 113, A11208, DOI:10.1029/2008JA013243
- Pilipenko, Viacheslav – Fedorov, E. – Heilig B. – Engebretson, M. J. – Sutcliffe, P. – Lühr, H. (2011): ULF Waves in the Topside Ionosphere: Satellite Observations and Modeling. In: Liu, William – Fujimoto, Masaki (eds.): *The Dynamic Magnetosphere. (IAGA Special Sopron Book Series, Vol. 3)* Springer, 257–269. DOI: 10.1007/978-94-007-0501-2 <http://books.google.hu/>
- Sutcliffe Peter R. – Ndiitwani, D. C. – Lühr H. – Heilig B. (2011): Studies of Geomagnetic Pulsations Using Magnetometer Data from the CHAMP Low-earth-orbit Satellite and Ground-based Stations: A Review. Proceedings of the XIV IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing, Changchun, 14–22 Sept. 2010. *Data Science Journal*. 10, IAGA10-18, 30 August 2011. • https://www.jstage.jst.go.jp/article/dsj/10/0/10_IAGA-03/_pdf
- Verö József – Holló Ferenc (1978): Connections between Interplanetary Magnetic Field and Geomagnetic Pulsations. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 40, 7, 857–865. • [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169\(78\)90035-1](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9169(78)90035-1)
- URL: <http://www.dlr.de/100Jahre/Portaldata/37/Resources/images/stroemung.jpg>

VILLÁMKISÜLÉSEKHEZ TÁRSULÓ TRANZIENS JELENSÉGEK

Sátori Gabriella Bór József

a földtudomány kandidátusa,
Satori.Gabriella@csfk.mta.hu

PhD,
Bor.Jozsef@csfk.mta.hu

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézete, Sopron

A villámkisülés maga is tranziens jelenség, a természetben bekövetkező áramimpulzus, amely egyben elektromágneses sugárzás forrása. A villámkisülés közben keletkező elektromágneses sugárzás spektrális összetétele az igen nagy frekvenciáktól (MHz) egészen kicsiny, néhány Hz-es frekvenciákig terjed. Ezek az elektromágneses hullámok a frekvenciájuk függvényében a villámkisülés helyétől mérve különböző távolságig észlelhetők. A Schumann-rezonanciák frekvenciatartományában (néhány Hz-től néhány száz Hz-ig) ezek a hullámok akár többször is körbeszalhatnak a Föld körül a felszín és az ionoszféra által alkotott hullámvezetőben, amely üregrezonátorként viselkedik a Föld kerületével összemérhető hullámhosszakon (Schumann, 1952). A hullámok fázis-összeadódása és -kioltása következtében rezonanciacsúcsok jelennek meg a spektrumban ~8 Hz-nél, ~14 Hz-nél, ~20 Hz-nél, ~26 Hz-nél stb. Az alamódus (8 Hz) esetében kb. 0,5 s a lecsillapodáshoz szükséges idő, így a másodpercenként átlagosan mintegy negyven-ötven alkalommal bekövetkező villámkisülés biztosítja a Föld-ionoszféra üregrezonátor állandó gerjesztését. A teljes rezonanciaspektrum a globális villámlás során kisugárzott elektromágneses

energia inkohérens szuperpozíciója révén alakul ki, és ezt háttér Schumann-rezonanciának (SR) nevezzük. A Schumann-rezonancia tranziensek egyedi, energetikus villámok keltette elektromágneses impulzusok, amelyek koherens jelek formájában szuperponálódnak a vertikális elektromos (E_z) és a két horizontális mágnesestér-komponens (H_{ED} , H_{KNy}) háttér SR-értékeire, ahogyan az 1. ábrán is látható. Hazánkban a Schumann-rezonanciák mérése az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont (CSFK) Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumában folyik 1993 óta (Sátori et al., 1996).

Az 1. ábrán a nagycentri állomás melletti kis képen a vertikális elektromos tér változásait mérő gömbantenna látható. A körök az optikai állomások észlelési tartományait határolják. Az állomások melletti képek egy-egy olyan vörös lidércet mutatnak, amelyet arról az észlelőhelyről fényképeztek; fölöttük az azokat kiváltó villámkisülések által keltett SR-tranziensek idősorai láthatók, amelyeket a nagycentri SR-állomás rendszere rögzített. A függőleges vonalak 0,1 másodperces időjelek. Alattuk látható a forrásvillámok becsült töltésmomentum-változása, amelyet az idősorok feldolgozása alapján határoztunk meg.