

Űr-időjárási folyamatok a magnetoszférában

LICHTENBERGER JÁNOS[@], FERENCZ CSABA

ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Űrkutató Csoport, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

[@]E-mail: lityi@sas.elte.hu

A belső magnetoszférában zajlanak azok, az űr-időjárási folyamatok, melyeknek fő szereplői a naptevékenységből származó nagyenergiájú részecskék. Az itteni „hármastársaságban” lezajló hullám–részecske kölcsönhatások révén keletkeznek és csapódnak ki a műholdakat is veszélyeztető relativisztikus energiájú töltött részecskék. A kutatások élvonalaiba tartozó űr-időjárási modellekhez és a Space Situational Awareness (SSA) programokhoz kapcsolódnak a magyar felszíni és műholdas mérések.

Lichtenberger, J., Ferencz, Cs.: Űr-időjárási folyamatok a magnetoszférában

The inner magnetosphere is the area where the physical processes driven by the energetic particles originated from the Sun interact with the waves propagated there in the wave–particle interaction. This phenomenon is called Space Weather and it plays an important role in the security of space assets. This is why these investigations are in front of research and supported by both EU FP7 and ESA SSA programs. Space Research Group of Eötvös University is involved in these investigations by ground based and satellite measurements.

Beérkezett: 2012. május 9.; *elfogadva:* 2012. szeptember 12.

1. Bevezetés

A Föld légkörének alsó tartományában, a troposzférában lezajló, elsősorban fizikai folyamatokat (földi) időjárásnak nevezzük. Az itt lezajló folyamatok fő mozgatója a kívülről, elsősorban a Naptól érkező energia, illetve annak változása. Ez az energia a Föld felső légkörén keresztül éri el az alsó légkört és a felszínt, így a földi időjárás elnevezésének analógiájára a felső légkörben lezajló folyamatokat *űr-időjárásnak* (*space weather*) nevezzük. A felső légkör határa egybeesik a földi mágneses burok, a magnetoszféra határával, így az űr-időjárás a troposzféra feletti tartományokat, elsősorban az ionoszférát és a magnetoszférát érinti. Ugyanakkor az űr-időjárási hatások nem korlátozódnak e tartományokra, hanem megjelennek a felszínen és a semleges felső légkörben is, és így közvetlenül vagy közvetve befolyásolják a bioszférában lezajló eseményeket és a társadalmi-gazdasági életet is.

Ezért az utóbbi 10–15 évben az űrfizika-űrkutatás egyik fő területévé az űr-időjárási kutatások váltak, ugyanis napjainkra civilizációnk „űrtevékenység-függővé” vált. Szinte láthatatlanul mindennapi életünk részévé váltak a műholdak

szolgáltatásai, melyekből jelenleg mintegy 3500 (!) kering a Föld körül: telekommunikáció – tv, internet, (mobil)-telefon; navigáció (GPS, GLONASS, GALILEO); távérzékelés (mezőgazdaság, környezetvédelem, természeti katasztrófák monitorozása). Annyira igaz ez, hogy nem is a szolgáltatás létét, hanem esetleges hiányát, zavarát vesszük már csak észre. Az űr-időjárás fő hajtómotorja a Nap és kisebb részben a galaktikus kozmikus sugárzás. Az űr-időjárás változásainak hatása a Föld felső légkörében főleg az ember alkotta eszközöket (műholdakat) érinti, a sugárzási övekben keletkező és onnan kicsapódó nagy (sokszor relativisztikus) energiájú töltött részecskék – ionok, elektronok – képesek a műholdakat időlegesen vagy véglegesen megbénítani és ezzel – a műhold cseréjének költségén túlmenően, ami dollár tíz- vagy százmilliókban mérhető (!) – társadalmi, gazdasági károkat okozni, esetenként emberéleteket veszélyeztetni (pl. mágneses viharok alatt mind a mágneses, mind a GPS alapú navigáció megbénulhat, ami mind a polgári, mind a katonai légi közlekedésben komoly veszélyforrást jelent).

Az űr-időjárási folyamatok azonban nemcsak az űrtevékenységre (műholdak) vannak hatással, hanem a bioszférára, az élőlényekre is: a napciklusok, mágneses viharok ha-

tással vannak az élő szervezetekre, pl. balesetek, fertőző betegségek gyakorisága. A felső légkörből a semleges légkörbe az űridőjárási folyamatokból becsatolódnak energia hatással van a földi időjárásra is. A mágneses tér változásai által keltett ionoszférikus áramok pedig zavarokat okozhatnak a villamosenergia-átviteli rendszerekben és elektrokémiai korrózió útján pedig a különböző csővezetékben is.

Ahhoz, hogy képesek legyünk ezeket az űr-időjárási hatásokat *modellezni* vagy *előre jelezni*, le kell írunk a felső légkörben végbemenő folyamatokat.

2. A magnetoszféra és tartományai: ahol az űr-időjárási folyamatok zajlanak

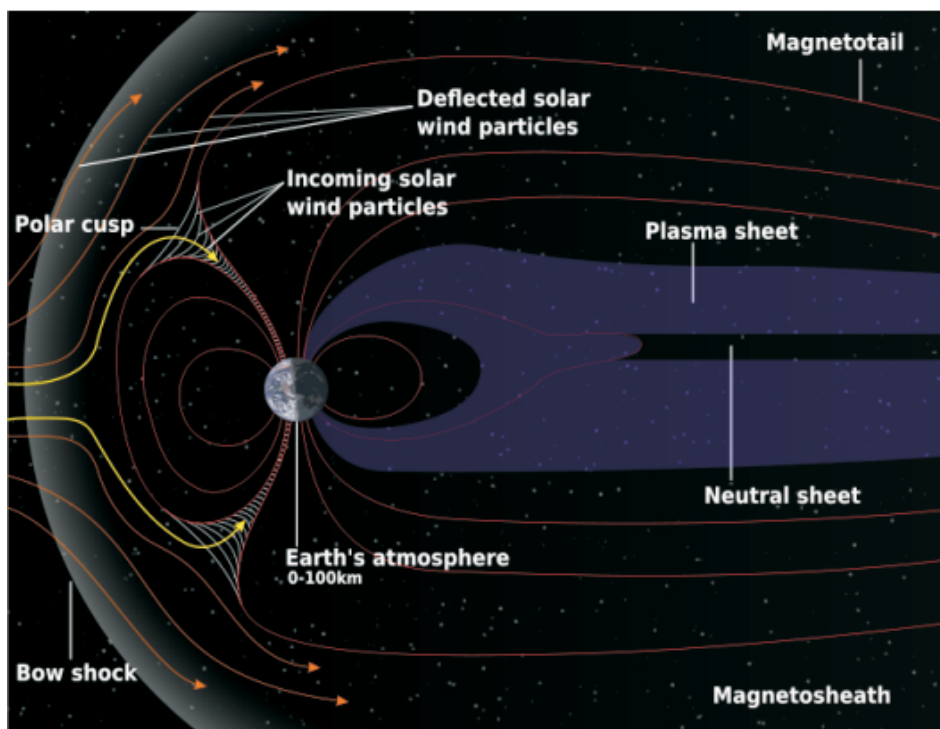
A magnetoszféra egy üreg, amelynek az alakját a napszél és a földi mágneses tér kölcsönhatása alakítja ki: a nappali oldalon egy összenyomott, körülbelül 8–10 földugár széles mágneses teret látunk, míg az éjszakai része több száz földugár távolságra is elnyúlhat. A Föld mágneses terének közel dipól jellegű alakját a napszél módosítja, a Nap felé néző oldalon a magnetoszféra belső mágneses terének nyomása tart egyensúlyt a napszéllel jövő impulzusáram dinamikus nyomásával. Ez a határvonal a magnetopauza (1. ábra). A magnetoszféra azonban nemcsak a mágneses térből áll, hanem elektromosan töltött részecskék, *plazma* népesíti be. Ebből a plazmából több fajta is jelen van ebben a tartományban. A mágneses tér jelenléte olyan részecskemozgásokat és hullámjelenségeket ír elő a plazmában, amelyek semleges anyag esetében nem léteznek. Az űr-időjárás ezért

e három „szereplő”, a mágneses tér, a töltött részecskék és az elektromágneses hullámok változásainak, kölcsönhatásainak összessége.

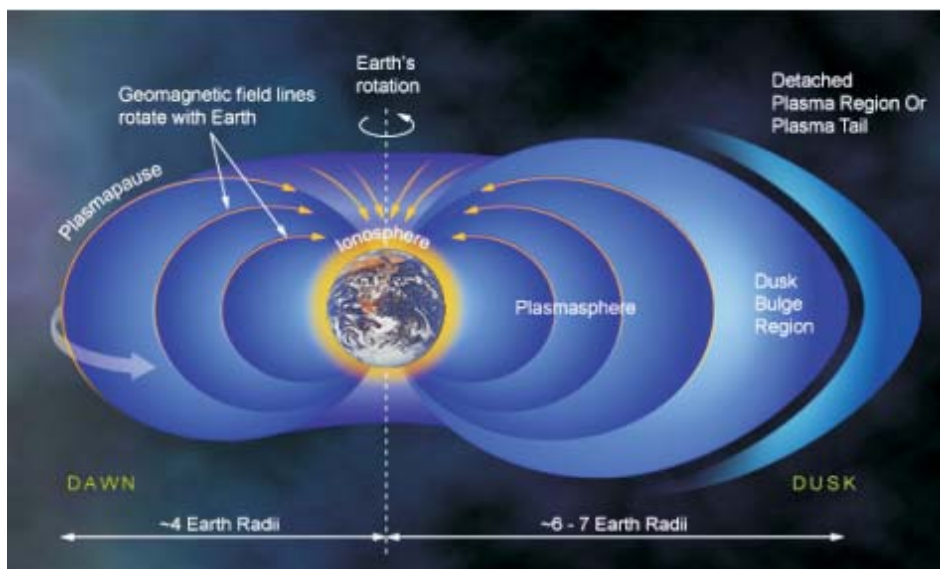
2.1. Társbérletek a magnetoszférában: I. a plazmaszféra és a whistlerek

A plazmaszféra a magnetoszféra belső, tórusz alakú tartománya, amelyet hideg, kis energiájú – 1 eV – de relatíve nagy sűrűségű, $100\text{--}10000/\text{cm}^3$ – plazma tölt ki. Ez a plazma főleg egyszerűen ionizált gázokat (úm. H, He N, O) tartalmaz. Alsó határa az ionoszféra teteje (~ 1000 km), felső határa nyugodt mágneses időszakokban 4–5 földugár távolságban helyezkedik el (2. ábra). A plazmaszféra részecskéinek fő forrása az ionoszféra, amellyel a plazmaszféra dinamikus egyensúlyban van. A csatolási fluxusok az ionoszférikus hideg plazmát főleg a mágneses erővonalak mentén továbbítják a plazmaszférába (töltődés), illetve a plazmaszférából az ionoszférába (kisülés). Ezek a fluxuscsovek együtt forognak a Földdel. A plazmaszféra határát az határozza meg, hogy a napszél által keltett konvektív elektromos tér hol válik nagyobbá, mint a forgási elektromos tér. Ez a tartomány a *plazmapauza*, melynek helye és alakja dinamikus változik. A plazmaszférában lévő anyag együtt forog a Földdel. E határfelület pillanatnyi helyzete különös fontossággal bír az űr-időjárási folyamatokban.

Mind a plazmaszférát, mind a plazmapauzát közönséges földi villámok által gerjesztett rádiójelek, *whistlerek* segítségével fedezték fel (Storey 1953, Carpenter 1963). E rövid,



1. ábra | A magnetoszféra szerkezete
Figure 1 | The magnetosphere

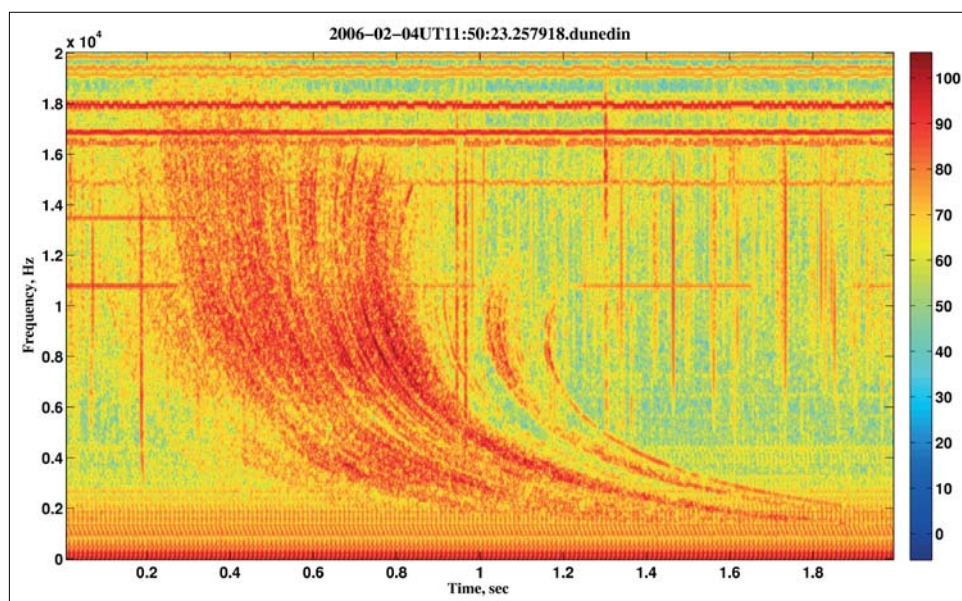


2. ábra A plazmaszféra szerkezete

Figure 2 The plasmasphere

impulzusszerű rádiójelek kijuthatnak a magnetoszférába, és ott az erővonalak mellett terjedve eljutnak a másik féltekére, ahol alakjuk már megváltozik, az impulzusból időben elnyújtott „C” alakú görbe lesz, ha spektrogrammon ábrázoljuk (3. ábra). A felszínen a villám által keltett széles sávú zajnak már csak az egészen alacsony frekvenciás (1–20 kHz) tartománya észlelhető, mivel e tartomány rezgésszáma megegyezik a hallható hangok frekvenciatartományával, a jelet egy hangszóróra kapcsolva mélyülő füttyként halljuk – ezért kapta az angol whistler (fütty) szóból a nevét a jelenség.

Egy villám jele akár több erővonal mellett is képes terjedni, az így keletkezett jelcsomagot többutas terjedésű whistlercsoportnak nevezzük. A whistlerjelnek két jellegzetes paramétere figyelhető meg a spektrogrammon: van egy frekvencia, amelyik a leggyorsabban terjed, ez a „C” orra, azaz az orrfrekvencia, illetve a „C” görbültsége, a diszperzió. Az orrfrekvenciából meghatározható, hogy melyik erővonal mellett terjedt a jel, a diszperzióból pedig kiszámítható, hogy milyen volt a plazma (az elektronok) eloszlása az erővonal mellett. (Ebből az is következik, hogy minden whistler „orrwhistler”, azonban kisebb mágneses szélessé-



3. ábra Egy nagyon szép, többutas terjedésű whistlercsoport, amelyet 2006. február 4-én észlelt az AWDANet dunedini (Új-Zéland) állomása

Figure 3 A spectacular multiple-path whistler group recorded at Dunedin, New Zealand

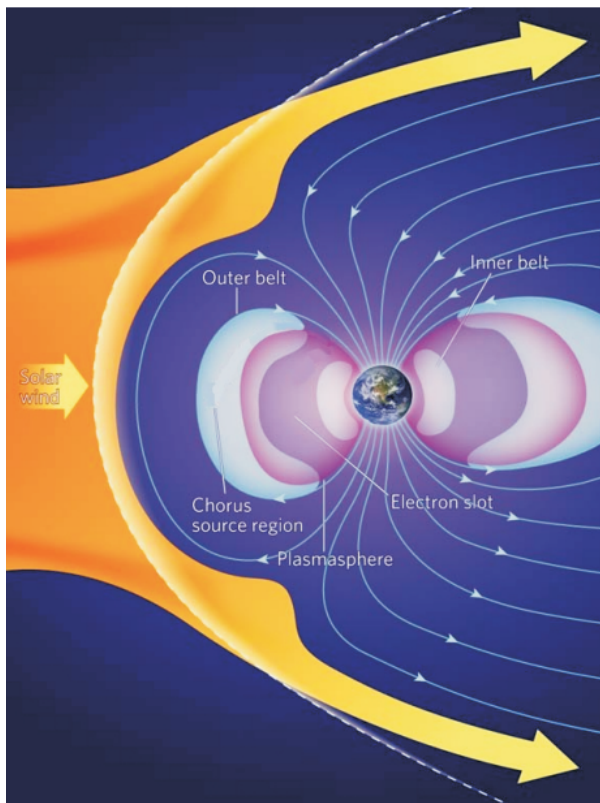
geken – ilyen Magyarország területe is – az orrfrekvencia az észlelési tartományon kívül esik, így csak az alsó, kifli alakú részt láthatjuk. Ilyenek a 3. ábrán a csoport első nyomai is.) Tehát a felszínen észlelt whistlerek elemzésével információt nyerhetünk azon tartomány – a plazmaszféra – állapotáról, amelyben ezek a jelek terjedtek, azaz egy egyszerű és olcsó *plazmaszféra-diagnosztikai* eszköz van a kezünkben. A whistlerek ugyanis igen gyakoriak, egy adott földrajzi helyen évi több tíz- vagy százezer whistler is észlelhető, de van olyan hely is (antarktiszi félsziget), ahol ez a szám elérheti a 5–10 milliót is (Lichtenberger et al. 2008, Collier et al. 2011).

2.2. Társbérletek a magnetoszférában: II. a sugárzási övek és a hullám-részecske kölcsönhatás

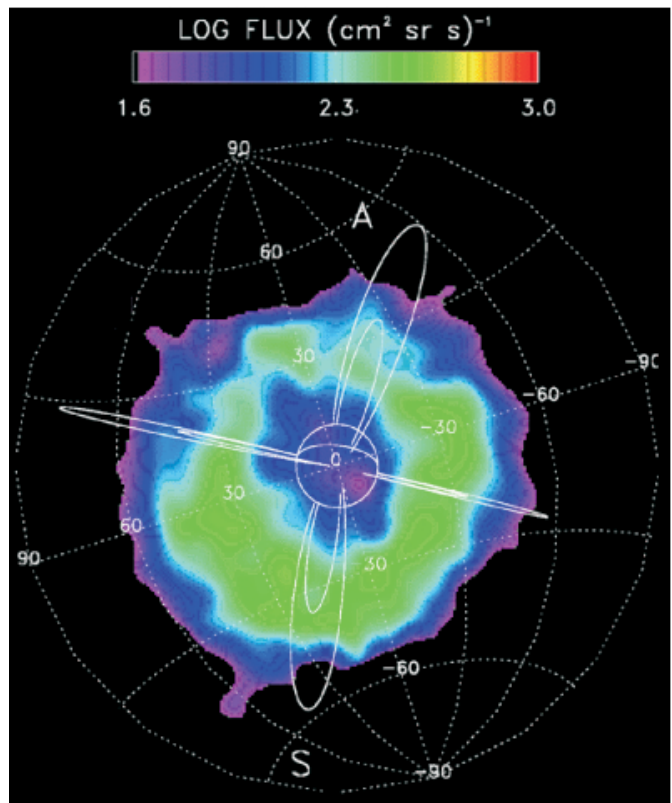
A sugárzási vagy Van Allen-öveket a magnetoszféra erővonalai által csapdába ejtett energikus részecskék alkotják (4. ábra). Két, tórusz alakú tartományból állnak, a belső öv 1,2–3 földugár távolságban helyezkedik el, az itt lévő elektronok energiája néhány 100 keV, a protonoké akár 100 MeV is lehet. A külső sugárzási öv 3–10 földugár távolságban helyezkedik el, a legnagyobb részecskefluxus a 4–5 földugár tartományban van, azaz épp egybeesik a plazmapauzával – ezért fontos ismerni a plazmapauza helyzetét. A külső övet nagyenergiájú elektronok (1–10 MeV) alkotják.

Ezek a gyakran relativisztikus energiájú elektronok azok a részecskék, amelyek képesek a műholdak elektronikai beépítéseit a felvezetők állapotát időlegesen vagy véglegesen megváltoztatva megrongálni.

A sugárzási övek részecskéinek forrása elsősorban a napszél, a koronakitörések alkalmával a Napból kilökődő nagyenergiájú részecskék a földi magnetoszférával találkozáskor a Nappal ellentétes oldalon, a mágneses uszályon – ha úgy tetszik, a „hátsó ajtón” – keresztül jutnak vissza a Föld közeli tartományokba, ahol a mágneses tér csapdába ejti azokat, a Lorentz-erő arra kényszeríti a részecskéket, hogy a mágneses erővonalak körül spirálmozgást végezzenek, a mágneses tér pedig a sarkok felé sűrűsödő erővonalak miatt azokat csapdában tartja. Ekkor a részecskék energiája nagy, de még nem relativisztikus. Nemrégiben derült fény arra, hogyan is jutnak többletenergiahoz ezek a részecskék: a legújabb kutatások szerint a nagy (relativisztikus) energiájú részecskék hullám-részecske kölcsönhatások során keletkeznek és csapódnak ki a sugárzási övekben (pl. Horne et al. 2005, Bortnik et al. 2008). A műholdak szempontjából különösen fontos a kicsapódás a mágneses csapdából, ugyanis a relativisztikus energiájú részecskék így jutnak el az alsóbb tartományokba is, ahol az alacsonypályás műholdak sokasága kering. A magaspályás és a geoszinkron műholdak esetében pedig már a részecskék keletkezése is „életveszélyes” folyamat, hiszen ez abban a tartományban történik, ahol ezek a holdak keringenek.



4. ábra | A sugárzási övek
Figure 4 | The Radiation Belts



5. ábra | A gyűrűáram
Figure 5 | The Ring Current

2.3. Társbérletek a magnetoszférában: III. a gyűrű-áram és a mágneses viharok

A napból a belső magnetoszférába bejutó részecskék az erővonalak melletti spirálmozgáson kívül a mágneses tér inhomogenitása és a gravitációs tér miatt egy másik fajta driftmozgást is végeznek, amely merőleges mind a gravitációs térre, mind az inhomogenitás gradiensére, és a mozgás iránya töltésfüggő. Ez a mozgásirány kelet–nyugati irányú, és a töltésfüggőség miatt egyfajta áramként interpretálhatjuk. Mivel körülöleli a Földet, ezért gyűrűáramnak nevezzük (5. ábra). A gyűrűáram iránya olyan, hogy az általa keltett mágneses tér gyengíti a földmágneses teret. A közismert Dst index voltaképpen a gyűrűáram által keltett mágneses tér mértéke. A mágneses viharok fő fázisában a tér gyengüléséért a gyűrűáram megerősödése a felelős, ekkor kerülnek a napszél részecskéi a belső mágneses térbe.

A gyűrűáram részecskéi közepes energiájúak, az elektronok ~ 10 keV, a protonok ~ 200 keV energiájúak, sűrűségük $10\text{--}100/\text{cm}^3$.

3. Űr-időjárási folyamatok a magnetoszférában

Az űr-időjárási események a magnetoszférában tehát a következőképpen zajlanak:

- 1) A napból érkező nagyenergiájú részecskék bejutnak a belső magnetoszférába, ahol a gyűrűáramot megerősítve a mágneses tér változásait okozzák, aminek hatására az ionoszférában és felszínén is áramok lépnek fel. Ezekkel a hatásokkal itt most nem foglalkozunk (ld. Kovács et al. cikkét ebben a füzetben).
- 2) A nagyenergiájú részecskék hullám–részecske kölcsönhatás révén többletenergiát szereznek és extrém nagy (relativisztikus) energiára tesznek szert.
- 3) A relativisztikus energiájú részecskék – szintén hullám–részecske kölcsönhatás következtében – kiszóródnak a mágneses csapdából, pályájuk során közelebb kerülnek a felszínhez, ahol elnyelődnek a sűrű atmoszférában.
- 4) A relativisztikus részecskék keletkezésük után, illetve a kiszóródás során találkozhatnak műholdakkal, amelyekben időlegesen vagy akár véglegesen is megváltoztathatják a félvezető-átmeneteket. Ha ez normál üzem közben történik, a műhold akár véglegesen is megrongálódhat vagy elveszhet.

Ahhoz, hogy meg tudjuk akadályozni a műholdvesztést vagy -rongálódást, az egyik megoldás a műhold alapállapotba (stand-by) történő kapcsolása. Nyilvánvalóan nem szeretnénk se feleslegesen, se a szükségesnél hosszabb ideig lekapcsolni a műholdat, ezért célunk az, hogy *modellezzük* az űr-időjárási folyamatokat, és ennek alapján előre jelezzük az eseményeket. Mivel a műholdakra a fő veszélyt a relativisztikus energiájú részecskék jelentik, ezek keletkezése és kicsapódása az a folyamat, amelyet modellezni kell.

A hullám–részecske kölcsönhatás több paraméterrel írható le, a hullámterjedés egyik fő paramétere a közeg töltéssűrűségének eloszlása. Ez az a pont, ahol a plazmaszféra és a whistlerek szerepet kapnak, ugyanis a hullámterjedést alapvetően a hideg, nagy sűrűségű plazma irányítja.

Az űr-időjárási kutatások fontosságát világszerte felismerték, az Európai Unió 7-es keretprogramja kiemelten támogatja a kutatásokat e területe (FP7-Space), az Európai Űrügynökség pedig – részben az FP7-Space projektekre alapozva – elindította az űrkörnyezeti figyelőprogramot (Space Situational Awareness, SSA), amelynek célja az űreszközök operatív védelme. Az SSA három pillére az űr-időjárás, az űrszemét és a Föld közeli természetes objektumok megfigyelése. Természetesen a NASA is és az Orosz Űrügynökség is végez hasonló kutatásokat.

Az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék Űrkutató Csoportja európai uniós projektekben és orosz együttműködésben földi és műholdas mérések segítségével kutatja-vizsgálja az űr-időjárási eseményeket, az alábbiakban e kutatásokról lesz szó.

3.1. Űr-időjárási vizsgálatok felszíni mérésekkel

A PLASMON FP7-Space projekt (a földi plazmaszféra új, adatasszimilációs, földi méréseken alapuló modellje – kulcsfontosságú hozzájárulás a sugárzási övek űr-időjárási modellezéséhez, ld. <http://plasmon.elte.hu>) fő célja egy új plazmaszféra-modell kidolgozása, melyhez a mérési adatokat két földi hálózat szolgáltatja, az egyik a whistlermérések hálózata (AWDANet), a másik az erővonal-rezonanciákat mérő EMMA hálózat (ez utóbbival részletesen a Kovács et al. cikk foglalkozik e számban).

A projekt négy munkacsomagból áll:

- WP1:* Az egyenlítői elektronsűrűségek és sűrűség-profilok automatikus származtatása az Automatikus Whistler-Detektor és Elemző Hálózat (AWDANet) adataiból.
- WP2:* Az egyenlítői plazmasűrűségek származtatása az Európai kvázi-Meridionális Magnetométer Hálózat (EMMA) adataiból, valamint a whistler és az FLR módszer keresztkalibrációja.
- WP3:* A földi plazmaszféra adatasszimilációs modellezése.
- WP4:* A sugárzási övekből való relativisztikus elektronkicsapódás modellezése az Antarctic–Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition – VLF Atmospheric Research Konsortia (AARDDVARK) hálózat adatai alapján.

A plazmaszféra töltéssűrűségének monitorozása whistlerekkel – az Automatikus Whistlerdetektor és Elemző Hálózat (AWDANet, (Lichtenberger et al. 2008))

A felszínen észlelhető whistlerek a mágneses erővonalakkal párhuzamosan terjednek. A közeg a mágneses térbe ágyazott hideg plazma. A hullámterjedés leírásához szükségünk van három modellre:

- 1) *Mágneses tér modell*: ez lehet a tér dipól leírása vagy az empirikus IGRF/DGRF modell, illetve a kettő kombinációja.
- 2) *A plazma (elektronok) eloszlásmodellje* a terjedési erővonal mentén. Erre régebben a fizikai megfontolásokon alapuló diffúzív egyensúlyi modellt (Angerami, Thomas 1964) használták, ez azon a megfontoláson alapul, hogy a plazma dinamikus és a részecskék hidrosztatikus nyomása egyensúlyban van az erővonal mentén. Jelenleg inkább az újabb műholdas mérések alapján felállított empirikus modelleket használjuk (pl. Denton et al. 2004).
- 3) *Hullámterjedési modell*: régebben az Appleton–Hartree diszperziós reláció egyszerűsített formáját (Helliwell 1965) használták, amely monokromatikus közelítésben írja le a jelterjedést. Nemrégiben született egy teljes hullámalak-megoldás, amely a Maxwell-egyenletek megoldását adja a whistlerekre (Ferencz et al. 2001) és amelyik tetszőleges gerjesztő jelalakra és közegösszetételre érvényes, illetve kiterjeszthető.

E három modell segítségével *invertálhatjuk* a mért jelet, azaz a jelből származtathatjuk a plazma- és terjedési paramétereket.

A whistlerinverzió régóta ismert eljárás, gyakorlati felhasználását két ok akadályozta eddig: a whistlerek kiválasztása az észlelt adatokból rendkívül időigényes és fárasztó munka, ezért folytonosan lehetetlen végezni. Ezen segít az

általunk kidolgozott automatikus detektáló eljárás (Lichtenberger et al. 2008), amelyik képes a nyers adatfolyamból kiválasztani a whistlernyomokat. Mivel a whistlerek előfordulása egy adott helyen függ a forrás, illetve a megfelelő terjedési feltételek meglététől, ami azt jelenti, hogy egy adott helyen általában egy adott évszakban (amikor az ellenkező féltekén nyár van és gyakoriak a zivatarok) és adott napszakban (többnyire az esti-éjszakai órákban) lehet whistlereket észlelni, amelyek adott mágneses erővonal-tartományban terjednek. Mivel célunk a plazmaszféra folyamatos monitorozása, ezért mindkét féltekén, több mágneses szélességen és helyi időben kell észleléseket végezni. A plazmaszféra dinamikáját figyelembe véve ehhez mintegy 24 (vagy több), a Földön egyenletesen elosztott állomásból álló hálózat szükséges, ami a gyakorlatban a szárazföldek eloszlása miatt kb. 40 állomással közelíthető. E hálózat kiépítése folyamatban van, jelenleg az AWDANet-nek jelenleg 20 működő és 20 tervezet állomása van (6. ábra).

A másik akadályozó ok a kiválasztott whistlernyomok *skalázásának*, azaz a nyomkoordinátáinak kiolvasása a megjelenített dinamikus spektrumon szintén fárasztó és időrabló munka. Ennek automatizálására kidolgoztunk egy új inverziós eljárást (Lichtenberger 2009), amely az új sűrűségeloszlási és hullámterjedési modellek mellett a plazmaszféra egyenlítői elektronsűrűségének egyszerűsített modelljét is használja. Ezekkel és egy többutas terjedésű whistlercsoport- (olyan whistlernyomok összessége, amelyeket egyetlen villám keltett, de a jelek több mágneses erővonal mellett is terjedtek) modell segítségével együttesen



6. ábra Az AWDANet európai (felső kép) és globális (alsó kép) állomásai. A pirossal írt állomások működő, a kékkel a tervezett, a zöldkel pedig a PLASMON projektben telepített állomások

Figure 6 AWDANet station in Europe (upper panel) in the world (lower panel). Names in red are operating, names in blue are planned and names in green are stations installed in PLASMON FP7-Space project

lehetővé vált az inverzió automatizálása is (Lichtenberger et al. 2010).

3.2. Űr-időjárási vizsgálatok műholdas mérésekkel

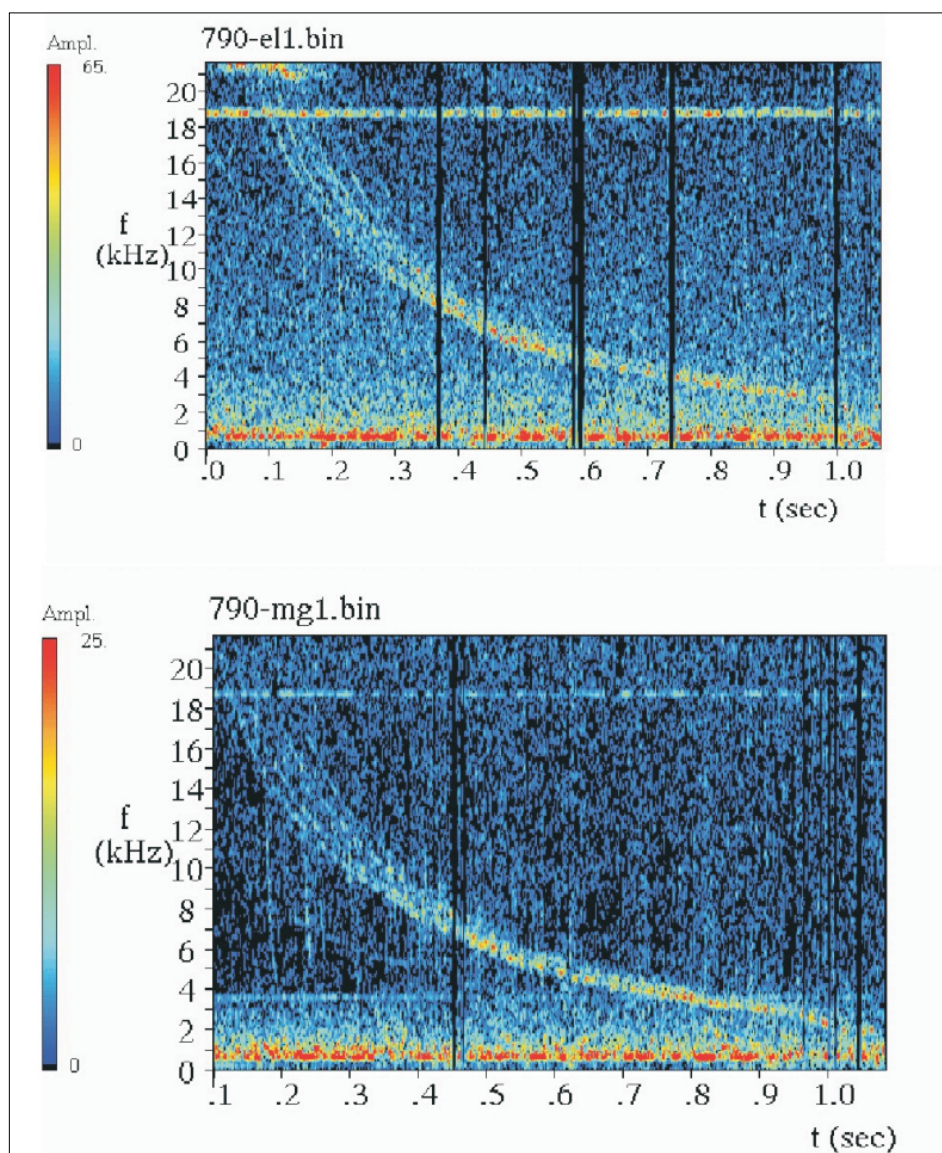
A műholdak közvetlenül tudják mérni azokat a jellemzőket, amelyekre az űr-időjárási modellekhez szükségünk van. E nagy előnyük mellett hátrányuk, hogy jóval drágábbak, mint a földi mérések, és a műholdpályák kötöttsége miatt nem ott és nem akkor mérnek, amikor és ahol esetleg szükség lenne arra. Ezért a műholdas és földi mérések együttes felhasználása adja a legjobb eredményt.

A POPDAT (Ionoszféra-kutatás adatorientált feldolgozással, <http://www.popdat.org>) FP7-Space program a már lezárult és jelenleg is folyó ionoszféra-kutató műholdas ki-

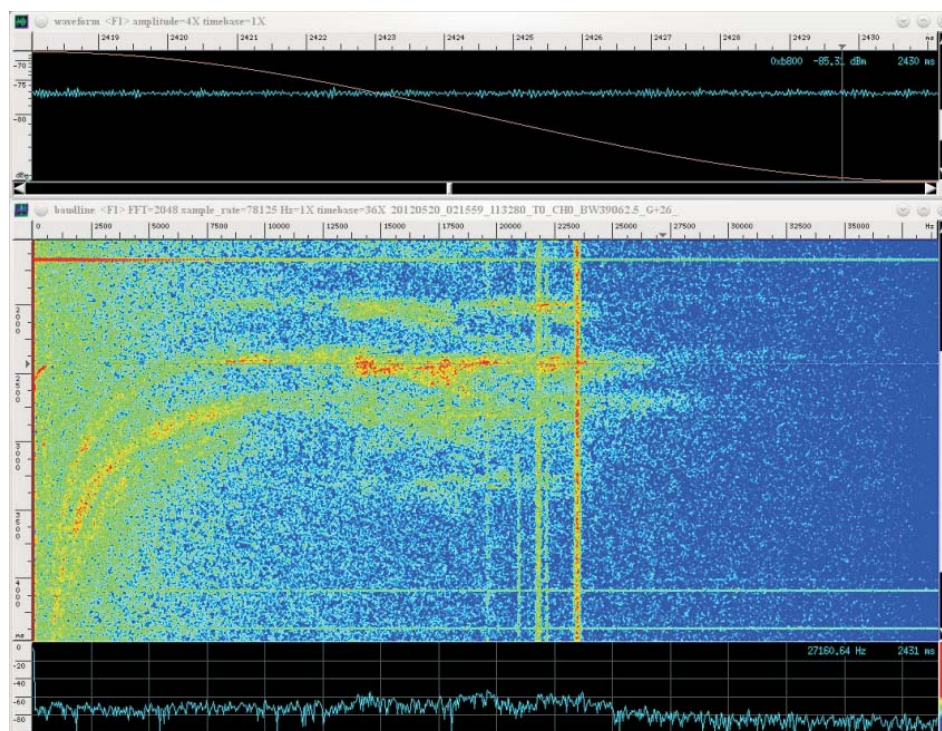
sérletek adatainak egységes szemléletű feldolgozásával, valamint az Ionospheric Wave Service adatbázis létrehozásával teremti meg a későbbi felhasználás egységes adatbázisát, melyben mi elsősorban a hullámkísérletek feldolgozási és osztályozási módszereinek kidolgozásában veszünk részt.

A COMPAS-2 orosz–magyar–ukrán műholdon repült a magyar SAS-2 hullámkísérlet, amely VLF jeleket mért és dolgozott fel. 2006-os mérései alapján sikerült először igazolni vezetett terjedést műholdas méréseken (7. ábra) (Ferencz et al. 2009).

2012. január 25-én emelte pályára a Nemzetközi Űrállomást elhagyó Progressz teherűrhajó a CHIBIS-M orosz–magyar–ukrán műholdat (Novikov et al. 2009), amelynek fő célja a földi villámok és az azokhoz kapcsolódó röntgen-, gamma- és VLF hullámok vizsgálata. Ez alatt a teljes üzem-



7. ábra | A SAS-2 műszer által a COMPAS-2 műholdon észlelt vezetett whistler dinamikus spektruma
Figure 7 | Dynamic spectrum of a ducted mode whistler recorded by SAS-2 on board of COMPAS-2 satellite



8. ábra A SAS-3 műszer által a CHIBIS-M műholdon észlelt whistlerek jelalakja (felső ábra), dinamikus spektruma (középső ábra) és telejsítményspektruma (alsó ábra)

Figure 8 Waveform (top panel), dynamic spectrum (middle panel) and power spectrum (bottom panel) of whistlers recorded by SAS-3 on board of CHIBIS-M satellite



9. ábra A Nemzetközi Űrállomás végleges kiépítésben, a számok a SAS-4 kísérlet egységei. Az OBSTANOVKA misszióban az 1. számú mérőpont épül ki

Figure 9 The final setup of International Space Station. The numbers are the SAS-4 measuring sites, "1" labels the one installed in OBSTANOVKA mission

be állítása óta eltelt pár hónap alatt is rendkívül érdekes jeleket sikerült mérni a SAS-3 műszerrel (8. ábra). E mérések, amellet hogy további segítséget nyújtanak az űr-időjárási vizsgálatokhoz, modellként szolgálnak a BepiColombo ESA–Japán Merkúr űrmisszió hullámkísérletéhez (PWI, Kasaba et al. 2010), amelyben mi az intelligens eseményfelismerő és triggerelő modult készítjük. Ez utóbbi űrmisszió indulása 2014-ben várható.

Az OBSTANOVKA kísérlet, amely orosz–magyar–ukrán–lengyel–svéd–angol együttműködésben készül, célja a Nemzetközi Űrállomás (ISS) plazmakörnyezetének vizsgálata. Ez év őszén indul az ISS-re. A két egységből álló berendezést az orosz szervizmodul külső falára fogják felszerelni az űrhajósok. A magyar SAS-4 hullámkísérlet első egysége is ebben kap helyet (9. ábra). A relativisztikus elektronok vizsgálata lesz a magyar részvétellel készülő RELEC orosz műhold célja, amelynek a fedélzetén egy SAS-3 berendezés repül majd. Startja előzetesen a jövő évre várható. E kísérletekben relatíve kis ráfordítással nagy tudományos eredmények elérésére van lehetőség űr-időjárási téren.

Köszönetnyilvánítás

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

Hivatkozások

Angerami J. J., Thomas J. O., 1964: Studies of planetary atmospheres. 1. the distribution of electrons and ions in the Earth's ionosphere. *J. Geophys. Res.* 69, 4537–4560
 Bortnik J., Thorne R. M., Meredith N. P., 2008: The unexpected origin of plasmaspheric hiss from discrete chorus emissions. *Nature* 452, 62–66
 Carpenter D. L., 1963: Whistler evidence of a knee in the magnetospheric ionization density profile. *J. Geophys. Res.* 68, 1676
 Collier A. B., Lichtenberger J., Clilverd M. A., Steinbach P., Rodger C. J., 2011: Source region for whistlers detected at Rothera, Antarctica. *J. Geophys. Res.* 116, A03219, doi: 10.1029/2010JA016197
 Denton R. E., Menietti J. D., Goldstein J., Young S. L., Anderson R. R., 2004: Electron density in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 109(A09215), 1386, doi: 10.1029/2003JA010254

Ferencz Cs., Ferencz O. E., Hamar D., Lichtenberger J., 2001: Whistler Phenomena, Short Impulse Propagation. *Astrophysics and Space Science Library* 262. Kluwer Academic Publisher, ISBN 0-7923-6995-5, Dordrecht, Netherlands
 Ferencz O. 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 SAS2. *J. Geophys. Res.* 114, A03213. doi: 10.1029/2008JA013542
 Helliwell R. A., 1965: Whistlers and related ionospheric phenomena. Stanford University Press, Stanford
 Horne R. B., Thorne R. M., Shprits Y. Y., Meredith N. P., Glauert S. A., Smith A. J., Kanekal Sh. G., Baker D. N., Engebretson M. J., Posch J. L., Spasojevic M., Inan U. S., Pickett J. S., Decreau P. M. E., 2005: Wave acceleration of electrons in the Van Allen radiation belts. *Nature*, 437, 227–230
 Kasaba Y., 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., 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 Sci.* 58 (BepiColombo special issue, ISS 1–2), 238–278
 Lichtenberger J., Ferencz Cs., Bodnár L., Hamar D., Steinbach P., 2008: Automatic Whistler Detector and Analyzer (AWDA) system. *Automatic Whistler Detector. J. Geophys. Res.* 113, A12201, doi: 10.1029/2008JA013467
 Lichtenberger J., 2009: A new whistler inversion model. *J. Geophys. Res.*, 114 A07222, doi: 10.1029/2008JA013799
 Lichtenberger J., 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. *J. Geophys. Res.* 115, A12214, doi: 10.1029/2010JA015931
 Novikov D. I., Klimov S. I., Korepanov V. E., Marusenkov A. A., Ferencz Cs., Lichtenberger J., Bodnár L., 2009: Magnitno-volnovoj kompleks mikrosputnika "Tsibis-M" dla izutsenia kozmitseskoj pogodi. In: *Missia "Tsibis-M"*, ed. by Hazirova, R. R., IKI-RAN, Moskva, pp. 78–89
 Storey L. R. O., 1953: An investigation of whistling atmospherics. *Phil. Trans. R. Soc., Series A* 246, 113–141