

Nemlineáris és pulzációs magnetohidrodinamikai folyamatok
vizsgálata Föld körüli térségünkben földi és műholdas mágneses
észlelések felhasználásával
OTKA (K75640) Zárójelentés

Kovács Péter (témavezető), Heilig Balázs, Facskó Gábor, Csontos András

Budapest, 2014. január

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Módszerfejlesztés	4
2.1. Csúszóablakos analízis a műholdak mozgásából adódó nemlineáris változások követésére	4
2.2. Intermittens dinamika térbeli vizsgálata	4
2.3. Wavelet analízis alkalmazása a mágneses tér hullám és turbulens jellegű változásainak szétválasztására	5
2.4. Felszíni idősorok pulzáció analízisére kidolgozott algoritmusaink továbbfejlesztése, műholdas észlelések vizsgálatára alkalmassá tétele	5
3. Pályázat során készített adatbázisok	7
3.1. Cluster adatbázis	7
3.2. OMNI	7
3.3. MM100 adatbázis	7
3.4. Foreshock adatbázis	8
3.5. Sarki tölcser (Sarki hasadék)	8
3.6. Plazmalepel	8
4. Pc3 típusú ULF hullámok felszíni megfigyelése és kutatása	10
4.1. A Pc3-as pulzációs aktivitás és a napszél paraméterek kapcsolata	10
5. Hot flow anomáliák vizsgálatára kapott legfontosabb eredmények	12
5.1. Hot flow anomáliák azonosítása	12
5.2. Hot flow anomáliák turbulens dinamikájának vizsgálata	12
6. Turbulens plazma áramlás a magnetoszférában és környezetében	15
6.1. Foreshock	15
6.2. Sarki tölcser	17
6.2.1. Spektrális elemzés	17
6.2.2. Nemlineáris statisztikai analízis	17
6.2.3. A sarki tölcser dinamikájának változása a geomágneses aktivitás függvényében	19
6.2.4. In-situ sarki tölcser és geomágneses idősorok összehasonlítása	19
6.3. Plazmalepel	21
7. Összefoglalás	24

1. fejezet

Bevezetés

OTKA pályázatunkban a Föld körüli térségünk (magnetoszféra, napszél) fizikai folyamataiban meghatározó szerepet játszó hullámjelenségek és nemlineáris magnetohidrodinamikai (MHD) folyamatok előfordulásait és kapcsolatait tanulmányoztuk. A kutatásban alapvetően a Cluster, a CHAMP, az ACE és a WIND műholdak mágneses és plazma észleléseit valamint földi obszervatóriumok mágneses regisztrátumait használtuk. Kitüntetett figyelmet fordítottunk a földi lökeshullámfront (LF) előterében előforduló turbulens folyamatok, valamint az itt keletkező, ún. upstream ULF hullámok megfigyelésére és kapcsolatára a földi észlelésekkel. Tanulmányoztuk egy speciális tranzienst, a „hot flow” anomáliák (HFA) előfordulási gyakoriságát a LF előterében a hely és a napszél paraméterek függvényében. Vizsgáltuk az anomáliák turbulens dinamikai folyamatait.

Pályázatunkhoz készített összefoglalásban az alábbiakat foglaltuk meg:

Pályázatunkban a magnetoszféra, a magnetoszféra burok és a napszél fizikai eseményeiben meghatározó szerepet játszó ULF frekvencia-tartományú, $Pc3$, $Pc4$ típusú magnetohidrodinamikai (MHD) hullámjelenségek és nemlineáris MHD turbulens folyamatok előfordulásait tanulmányozzuk a mágneses tér földi idősorai és a földkörüli térség műholdakról származó in-situ regisztrátumai alapján. Különös figyelmet fordítunk a lökeshullámfrontról visszaverődő nagy energiájú ionok expanziójával kifejlődő, plazmában haladó üregek, az ún. „hot flow” anomáliák (HFA) belsejében és környezetében kialakuló turbulens folyamatok vizsgálatára is. A témaválasztás az űridőjárás és az MHD turbulencia fizikai sajátosságainak pontosabb megismerését célozza. A földi adatokat obszervatóriumok, az in-situ adatokat pedig az interplanetáris tér két műholdjának (ACE és WIND), valamint a Föld körül keringő Cluster műholdaknak a regisztrátumai adják. Az analízisekben a HD, MHD turbulencia önhasonló és intermittens koherens szerkezeteinek (örvényeinek) tanulmányozására alkalmazott nemlineáris módszereket és modelleket használjuk elsősorban. Vizsgáljuk földkörüli térségünk nemlineáris dinamikai folyamatainak kapcsolatát az MHD hullámtevékenység előfordulásával és sajátosságaival különböző 'űridőjárás' körülmények mellett. Különös hangsúlyt fektetünk továbbá a felszíni és az in situ mérések alapján nyert eredmények közötti kapcsolat meghatározására is. Azt reméljük, hogy a kapcsolat körvonalazása révén felszíni adatainkat a korábbinál megbízhatóbban használhatjuk fel a magnetoszféra-napszél rendszer dinamikai folyamatainak megismerésére és előrejelzésére. A pályázat alkalmat teremt fiatal doktorandusz és postdoc kutatók kutatási tapasztalatainak bővítésére.

Részben a pályázat szakmai munkájának köszönhetően meghívást nyertünk a PLASMON és STORM EU FP7-es programokba. A PLASMON pályázatban az ULF pulzációs megfigyelések kiterjesztését és a plazmaszféra plazmasűrűségének monitorozását vállaltuk, a STORM pályázatban pedig a napszél plazma turbulens folyamatait vizsgáljuk nemzetközi együttműködésben. Az új programokban az OTKA pályázat során kifejlesztett módszereket és felépített adatbázisokat is hasznosítjuk. A futamidő alatt a pályázat témájában román, dél-afrikai, német, orosz partnerekkel nemzetközi kapcsolatokat kezdeményeztünk, amelyek révén több, kutatócserét támogató kétoldalú pályázatot is elnyertünk. Részt vettünk az alacsony pályán keringő SWARM műholdak regisztrátumainak tudományos célú hasznosítására kiírt ESA (European Space Agency) pályázatban, amelyen MHD hullámok és turbulens dinamika

plazmaszférán belüli tanulmányozására készített pályázatunk sikerrel szerepelt. Az időközben pályára bocsájtott műholdak adatainak elemzése a közeljövőben indul, részben szintén az OTKA során kifejlesztett eljárások segítségével.

Heilig Balázs, a pályázat kutatója a futamidő alatt elkészítette, a pályázat témájához kapcsolódó doktori dolgozatát. Facskó Gábor, a pályázat szenior kutató résztvevője 2008 második felében elhagyta eredeti munkahelyét, a KFKI Részecske- és Magfizika Kutatóintézetet, majd a Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Espace (LPC2E) / Centre National de Recherche Scientifique (CNRS, Orleansban, Franciaországban) intézetben (2008-2010), később pedig a Finnish Meteorological Institute-ban dolgozott (2010 és 2013 december között). Új munkahelyein a Cluster WHISPER elektrosztatikus plazma hullám műszerének adatfeldolgozásával, Cluster mérési adatok adatbányászati algoritmusokkal való elemzésével és globális magnetohidrodinamikai numerikus szimulációkkal foglalkozott, eredeti kutatási területe, a HFA-k és a bolygóközi mágneses tér kis skálájú fluktuációinak vizsgálata mellett. A pályázati munkában, nyári gyakorlat keretében alkalomszerűen egyetemi diákok is részt vettek az Eötvös Loránd Tudományegyetemről (4 hallgató) és a Szegedi Tudományegyetemről (1 hallgató).

A kutatásokhoz jelentős módszertani fejlesztés, valamint különféle adatbázisok építése társult. Jelentésünk első részeiben ezeket (2., 3. fejezet), a további részekben pedig a ULF pulzációkkal (4. fejezet), a „hot flow” anomáliákkal (5. fejezet), valamint a turbulens jelenségek Föld körüli megfigyelésével összefüggő kutatási eredményeket (6. fejezet) mutatjuk be.

2. fejezet

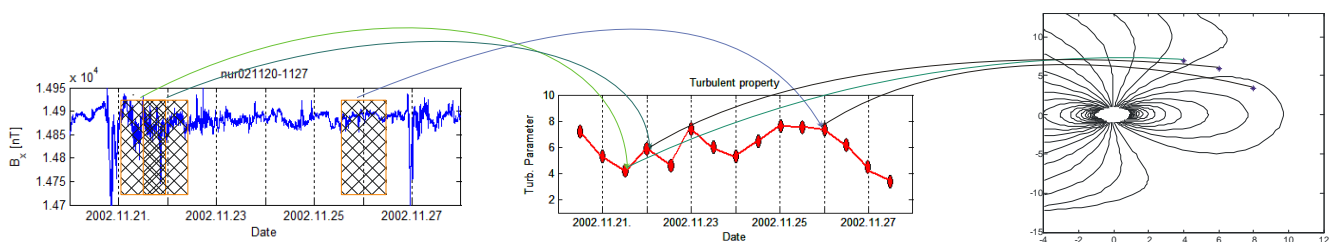
Módszerfejlesztés

2.1. Csúszóablakos analízis a műholdak mozgásából adódó nemlineáris változások követésére

A műholdak mozgásából adódóan a műholdas észlelések folyamatosan más és más térrész fizikai folyamataira vonatkoznak. Egy térrész vagy egy korlátos kiterjedésű jelenség (pl. a „hot flow” anomáliák) dinamikai folyamatai a műholdak felvételein tehát csak rövid ideig tükröződnek. Különösen a turbulencia nemlineáris folyamatainak vizsgálatához azonban minél hosszabb idősorok szükségesek. A nem stacionárius műholdas észlelések analízisére ezért több esetben csúszóablakos analízist alkalmaztunk. Ennek lényege, hogy az idősorokból, a nemlineáris analízisek számára már elegendő hosszúságú szakaszokat választunk ki, és a szakaszokat egy adott idő intervallummal folyamatosan csúsztatjuk. A szakaszokra vonatkozó, nemlineáris analízisek eredményeit időben a szakasz időbeli középpontjához, térben pedig a műhold, ehhez az időponthoz tartozó középpontjához rendeljük. Az eljárást az 2.1 ábra szemlélteti. Fontos, hogy a módszerrel a turbulens dinamikai változásokra vonatkozóan egzakt eredmények nem, de a tendenciák, illetve a térbeli változások feltérképezhetőek. Azonos térrészek (pl. foreshock, plazmalepel) különböző időpontokban való áthaladásával a térrészek nemlineáris jellemzőinek időbeli változása, külső paramétereiktől (pl. napszél jellemzők) való függése tanulmányozható. A nemlineáris analízisek közül a csúszóablakos eljárást a valószínűsítésűség- és struktúrafüggvény, valamint a spektrális analízisek esetén alkalmaztunk.

2.2. Intermittens dinamika térbeli vizsgálata

A turbulencia megfigyelésére a magnetoszféra-napszél rendszerben a legtöbb esetben csak idősorok állnak rendelkezésre, jóllehet a turbulens plazma-áramlás tér- és időbeli folyamat is egyben. A Taylor hipotézis szerint a tetszőleges X fizikai paraméter, $X(t)$ idősorából képzett $\delta X(t, \tau) = X(t + \tau) - X(t)$ (τ tetszőleges időskála) különbségi idősorok a térbeli fluktuációkat is leképezik, ha az áramló plazma sebessége a plazmabeli változások tipikus sebességénél jóval nagyobb. Ez a hipotézis (lásd pl. Horbury,



2.1. ábra: Idősorok nemlineáris csúszóablakos vizsgálatának, és az eredmények térbeli kiterjesztésének sémája

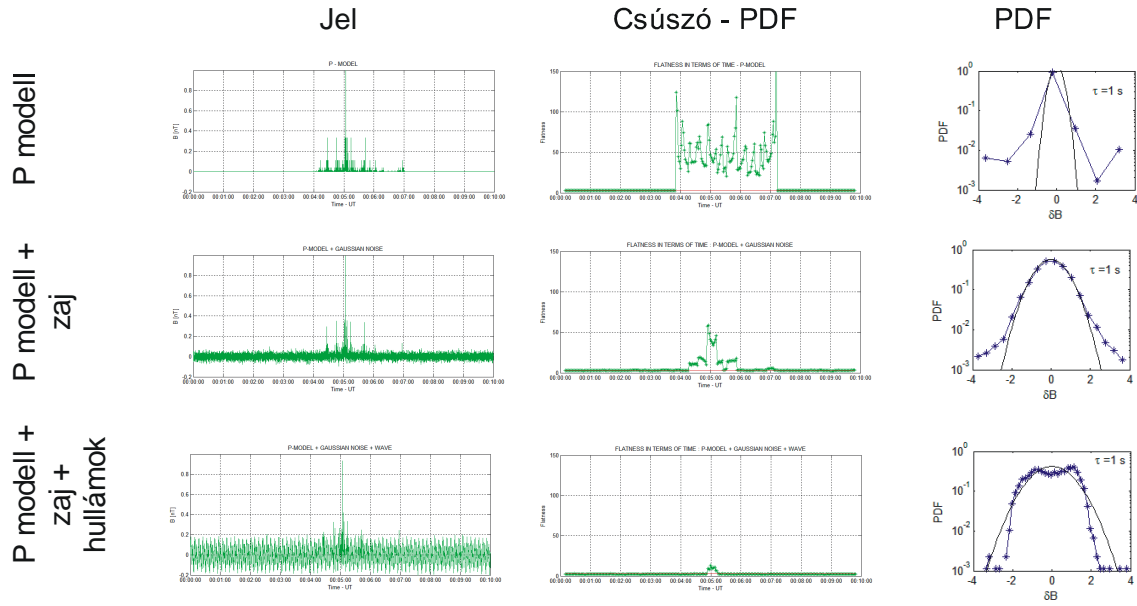
2000) a napszélben általában teljesül, de az általunk vizsgált térrészek többségében már kevésbé, vagy egyáltalán nem (magnetoszféra, HFA, foreshock bizonyos területei). Ezért a Cluster műholdak esetén kihasználtuk azt az egyedi lehetőséget, hogy a négy közeli pályán mozgó műhold adatai alapján a térbeli fluktuációkat közvetlenül is vizsgálhatjuk, a fluktuációk $\delta X(t, \mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) = X(t, \mathbf{r}_a) - X(t, \mathbf{r}_b)$ térbeli különbségeinek ($\mathbf{r}_a, \mathbf{r}_b$ két tetszőleges műhold térbeli pozícióit jelölik) képzése alapján. Az időbeli különbségek vizsgálatával ellentétben, a térbeli különbségek csak a műholdak egymás közötti távolságának megfelelő tér-skálákon vizsgálhatóak, viszont lehetőség van a fluktuációk térbeli anizotrópiájának megfigyelésére is. A térbeli különbségképzést a hagyományosan idősorok időbeli különbségeit alkalmazó nemlineáris vizsgálati módszerek (pl. valószínűsítésűség és struktúrafüggvény analízis) esetén alkalmaztuk, az időbeli különbségek térbeliekkel való helyettesítésével. A tér- és időbeli különbségekkel nyert eredmények összehasonlításával a Taylor hipotézis alkalmazhatósága is ellenőrizhető.

2.3. Wavelet analízis alkalmazása a mágneses tér hullám és turbulens jellegű változásainak szétválasztására

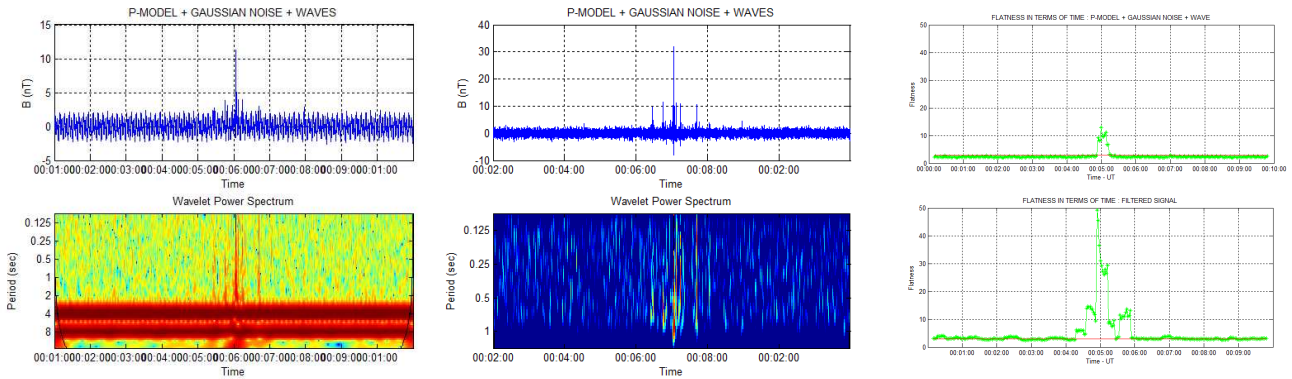
A legtöbb, általunk vizsgált fizikai térrészben (pl. foreshock, HFA) a turbulens dinamikai folyamatok erős hullám tevékenységgel párosulnak, és legtöbbször a turbulens fluktuációk jellemző amplitúdói a hullámok amplitúdóinál jelentősen alacsonyabbak. A turbulens folyamatok azonosítása és vizsgálata a különbségi idősorokat alkalmazó analízisekben gyakorlatilag lehetetlen, amit egy szintetikus adatsoron végzett kísérlettel igazoltunk. A kísérletben egy P-modell alapján képzett tízperces szintetikus turbulens jelhez első lépcsőben gaussi zajt, majd a következő lépésben két frekvencián ($f_1 = 4Hz, f_2 = 8Hz$) harmonikus jelet adtunk. A turbulens jel maximális amplitúdója 1, a zajé és a hullámoké pedig 0,2 (2.2 ábra). A három jelen csúszó-ablakos valószínűsítésűség függvény (VSF) analízist végeztünk, amelynek során a teljes idősor 30 s hosszú, fokozatosan 2 s-os intervallummal tolódó szakaszainak VSF analíziséből kapott lapultsági értékek időbeli változását ábrázoltuk (2.2 ábra középső oszlopban szereplő grafikonjai). A grafikonokon egyértelműen látszik a turbulens komponens hatásának eltűnése a zaj és a hullámok hozzáadása során. A turbulens jel újbóli előhívására a komplex jelen felüláteresztő szűrést hajtottunk végre, a jel wavelet együtthatóinak terében. A szűrés hatékonysága az eredeti és a szűrt jelen végzett megismételt csúszó-ablakos VSF analízisek eredményei közötti különbségen látható (2.3 ábra jobb oldali grafikonjai). A szűrés, és a szűrés utáni VSF analízis eredményessége a turbulencia kimutathatóságának szempontjából a turbulencia széles frekvencia tartományt átfogó dinamikájának köszönhető, amelyből a magas frekvenciás részek a szűrés után is megmaradnak. **A szűrés azonban a turbulens jelet lényegesen torzítja, ezért kvantitatív következtetések levonására a későbbiekben a jel már nem alkalmas.**

2.4. Felszíni idősorok pulzáció analízisére kidolgozott algoritmusaink továbbfejlesztése, műholdas észlelések vizsgálatára alkalmassá tétele

A projekt kezdetét megelőzően kidolgoztunk egy eljárást az ún. upstream eredetű pulzációk (UW) felszíni azonosítására, amely azon alapul, hogy ezek a pulzációk a magnetoszféra nappali oldalán mindenhol megfigyelhetők, mégpedig igen hasonló spektrális jellemzőkkel. Az eljárást módosított formában kiterjesztettük az alacsony földpályán keringő CHAMP-műhold adatainak elemzésére is. A felszíntől eltérő észlelési körülmények miatt a Fourier helyett a spektrális elemzésekben a wavelet-alapú spektrumszámításra tértünk át. A műholdon észlelt kéreganomáliák hatását megfelelő mágneses térmodell (POMME) segítségével távolítottuk el. Az eljárás – a felszíni eljáráshoz hasonlóan – a műholdon észlelt UW-k automatikus azonosítására alkalmas. A pulzációk egy másik típusát erővonalrezonanciák (FLR-ek) okozzák. Az FLR-ek földi mérési adatokból való azonosítására szolgáló, széles körben alkalmazott módszer Baransky gradiens-módszerének Waters et al. (2002) általi továbbfejlesztése. Jelen pályázat



2.2. ábra: Szintetikus turbulens jel (P modell, balra főt), turbulens jel + zaj (balra közepen) és turbulens jel + zaj + két harmonikus hullám (balra lent) keverékéből előállított jelek csúszó-ablakos VSF analizései (középső oszlop) és a jelek középső szakaszainak különbségi idősorából képzett valószínűség-sűrűség függvények (bal oldali oszlop).



2.3. ábra: A turbulens jel + zaj + két harmonikus hullám keverékéből előállított eredeti (balra főt) és szűrt jel (középen főt, lásd szöveg), illetve ezek dinamikus wavelet spektrumai (balra és középen lent). A jobb oldali grafikonok az eredeti és a szűrt jelek csúszó-ablakos valószínűség-sűrűség függvény analizéseinek eredményeit mutatják.

keretében megkezdjük egy, az FLR-eknek a CHAMP észleléseiből való azonosítására szolgáló eljárás kidolgozását is. A módszernél figyelembe kellett vennünk a CHAMP haladása miatti Doppler-hatást is, ami az UW-k esetében még elhanyagolható volt. A módszer révén sikerült az FLR-ek statisztikai alapú kimutatása; azokat a nappali pályaszakaszokon végzett észleléseket átlagolva, amikor az UW aktivitás egy meghatározott küszöb felett volt, az FLR-ek Doppler-csúszott spektrumvonalai láthatóvá váltak. Az eljárás további finomítások után alkalmas lehet arra, hogy az átlagos FLR frekvenciákból kikövetkeztethető plazmasűrűség-értékekből a plazmaszféra empirikus sűrűség-modelljét állítsuk elő.

3. fejezet

Pályázat során készített adatbázisok

3.1. Cluster adatbázis

A Cluster műholdak észlelései a Cluster Active Archive adatbázisban (<http://caa.estec.esa.int/caa/home.xml>) nyilvánosan elérhetőek. Az adatbázis a műholdak minden műszerének adatait tartalmazza, különböző időbeli felbontásban. A pályázat során leggyakrabban a misszió FGM mágneses regisztrátumait (Balogh et al., 1997) használtuk, ezért az ehhez tartozó adatokat 2001 és 2010 közötti időszakokra vonatkozóan, külön helyi adatbázisunkba letöltöttük. Ennek előnye, hogy a pályázat során végzett esettanulmányok, illetve hosszú időszakot átölelő statisztikai elemzések során az időnként hosszadalmas hálózati letöltést nem kellett esetenként elvégeznünk. Az adatok áttekintő vizsgálatához a négy másodperces, a turbulencia analízisekhez pedig az 5, illetve 22,5 Hz mintavételű adatokat töltöttük le, bináris cdf formátumban. Elkészült egy olyan cél szoftver, amely a bináris file-ok tartalmát megtekinthetővé, illetve a file lényeges elemeit - a könnyebb kezelhetőség érdekében - egy másik file-ba átmásolhatóvá tette. A 22,5 Hz-es idősorok esetén egy automatikus eljárás felhasználásával az összes adat file-t matlab formátumú adat file-lá konvertáltuk.

3.2. OMNI

A pályázati feladatok során gyakran merült fel igény arra, hogy a napszél és a földi magnetoszféra állapotáról hosszú időszakra vonatkozó áttekintő képet nyerjünk. Ehhez nyújtott segítséget az az órás időbeli felbontású adatbázis, amely az ACE és a WIND műholdak adatai alapján a magnetopauza orrára vonatkoztatott napszél paramétereiket, valamint a geomágneses aktivitást jellemző indexeket tartalmazza a Cluster műholdak felbocsátásának évétől, 2000 januárjától kezdődően. Az adatok a GSFC/SPDF OMNIWeb szolgáltatás (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) által létrehozott OMNI adatbázisból származnak. Az adatbázist kiegészítettük a Cluster műholdak folyamatos pozícióját, egymáshoz képesti távolságát és a négy hold pozíciójának optimális tetraéderes szerkezettől való eltérését jelző paraméterekkel is. Az adatbázis mellé készült egy megjelenítő program is, amely az adatbázisból tetszőlegesen kiválasztott paraméter együttes, tetszőleges időszakra vonatkozó grafikonjának kirajzolására alkalmas.

3.3. MM100 adatbázis

Az MM100 pulzációs hálózat 2001-ben jött létre 5 ország 10 mágneses obszervatóriumának közreműködésével (Heilig et al., 2010). A hálózat alapvető célja a Pc3-Pc4 típusú geomágneses pulzációk megfigyelése, és a pulzációk előfordulásának statisztikai elemzése. Pályázatunk során azonban a hálózat adatai a magnetoszféra nemlineáris/turbulens folyamatainak vizsgálatában, illetve az in-situ műholdas és földi észlelések nemlineáris sajátságainak összehasonlításában is hasznosultak. A résztvevő

obszervatóriumok másodperc felbontású, három komponensre vonatkozó mágneses regisztrátumai folyamatosan bekerülnek az általunk fenntartott adatbázisba, ahonnan a különböző elemzések számára bármikor hozzáférhetőek. Megjegyezzük, hogy a PLASMON EU FP7-es pályázat keretében a hálózat új állomásokkal és mágneses megfigyelésekkel való bővítése jelenleg is folyamatban van.

3.4. Foreshock adatbázis

A lökeshullámfront előtti tartományban lényegesen eltérő fizikai folyamatok várhatóak attól függően, hogy a napszél mágneses erővonalai a LF-ot keresztezik, illetve nem. A LF-nak azt a tartományát, amely a napszélhez mágnesesen kapcsolódik, „foreshock”-nak (FS) nevezzük. A FS-ban zajló dinamikai folyamatok rendkívül változatos képet mutatnak, amelyben hullámtevékenység, sokdimenziós turbulens jelenségek, részecskék illetve hullámok közötti kölcsönhatások egyaránt szerepet játszanak. A megfigyelhető jelenségekben azonban a FS-on belül is eltérés mutatkozik, alapvetően a napszél mágneses iránya és a LF normálisa által bezárt, ún. beesési szög (Θ_{Bn}) függvényében. A $\Theta_{Bn} < 45^\circ$ és $\Theta_{Bn} > 45^\circ$ térrészeket kvázi-párhuzamos, illetve kvázi-merőleges FS tartományoknak nevezzük. A kvázi-párhuzamos tartományban a LF-ről visszaverődő részecskék az erővonalak mentén messze behatolhatnak a napszélbe, ezért a LF-től viszonylag távoli zónákban is meghatározzák a dinamikai folyamatokat. A kvázi merőleges térrészben ezzel szemben a FS a lökeshullámfront közeli tartományára korlátozódik. A pályázatban a Cluster műholdak 5 Hz időbeli felbontású mágneses regisztrátumainak felhasználásával vizsgáltuk a turbulens folyamatok intenzitását a FS-ban (6. fejezet), térben és időben is. A térbeli változást a LF-től való távolság és a beesési szög, az időbelit pedig a napszél változó paramétereinek (sebesség, dinamikai nyomás, Alfvén Mach szám, stb.) függvényében értékeltük. Ehhez a műholdak pozíciói és mágneses regisztrátumai alapján egy 4 s időbeli felbontású adatbázist készítettünk, amely a mágneses észlelések és a napszél paraméterek mellett tartalmazza a műholdak LF-től mért, erővonalmenti távolságát, illetve az erővonalak LF normálishoz képesti szögét is. Az utóbbi két, hely paraméter számolásához Farris és Russell (1994) LF modelljét használtuk fel, amelyet a Cluster műholdak regisztrátumaiban és az OMNI adatbázisban (3.2. fejezet) szereplő napszél paraméterekkel paramétereztünk, azaz a modellt minden időpontra aktuális napszél értékek alapján határoztuk meg. Az adatbázis a 2001 és 2010 közötti évek első négy-négy hónapjaira készült el. A januártól áprilisig terjedő időszak ugyanis az, amikor a Cluster holdak a napszélben a leghosszabb ideig tartózkodnak.

3.5. Sarki tölcser (Sarki hasadék)

A pályázat során a sarki tölcser nemlineáris/turbulens dinamikai folyamatait is vizsgáltuk. Az elemzett adatokat a Cluster műholdak 2001 és 2005 közötti 5 Hz felbontású FGM mágneses regisztrátumaiból választottuk ki azokra az időszakokra vonatkozóan, amikor a műholdak a külső sarki tölcseret keresztezték, az ekliptika síkjától északra vagy délre. Ehhez egy olyan szoftvert készítettünk, ami a műholdak regisztrátumából eltávolítja a Tsyganenko (Tsyganenko, 2001) által készített magnetoszféra modell, műholdak pályája mentén érvényes értékeit. A modell a sarki tölcser helyén alulbecsüli a tölcserben mérhető tényleges mágneses értéket, ezért a mért és modellezett értékek különbsége a tölcserben negatív értéket mutat (Tsyganenko és Russel, 1999). A modellt az 5 perces felbontású OMNI adatbázisban (3.2. fejezet) szereplő napszél értékekkel paramétereztük. A sarki tölcser az azok a szakaszok jelölik ki, ahol a tér értéke a modellhez képest jelentősen alacsonyabb. Összesen 379 tölcser-áthaladást választottunk ki, 198-at az ekliptika északi, 181-et pedig a déli oldalán.

3.6. Plazmalepel

A plazmalepelben zajló fizikai folyamatok, Cluster műholdak regisztrátumai alapján történő tanulmányozásához felhasználtuk az EU FP7 keretprogramja által támogatott “European Cluster Assimilation

Technology (ECLAT)” project (Témavezető: Steve Milan, University of Leicester, UK (ULEIC)) nyilvános adatbázisát, amely a Cluster holdak tartózkodási helyeit rendszerezi a magnetoszféra csóvján belül. A rendszer az alábbi tartományokat tartalmazza: (1) Északi plazma lebeny, (2) Déli plazma lebeny, (3) Északi plazmalepel határréteg, (4) Déli plazmalepel határréteg (5) Északi külső plazmalepel, (6) Déli külső plazmalepel, (7) Északi belső plazmalepel, (8) Déli belső plazmalepel, (9) Semleges réteg észak-déli keresztezése (10) Semleges réteg dél- észak keresztezése, (11) $B_x=0$ nT –val jellemzett semleges réteg. (0) Ismeretlen, vagy csóván kívüli zóna. Az adatbázisban az eredetileg betűvel jelölt tartományokat, a könnyebb kezelhetőség érdekében számokkal helyettesítettük, illetve az adatbázist kiegészítettük az egyes tartományokban való tartózkodás időtartamával, valamint az időtartam alatt érvényes, geomágneses aktivitást jelző Dst és AE indexek, Kyoto WDC-ről származó értékeivel.

4. fejezet

Pc3 típusú ULF hullámok felszíni megfigyelése és kutatása

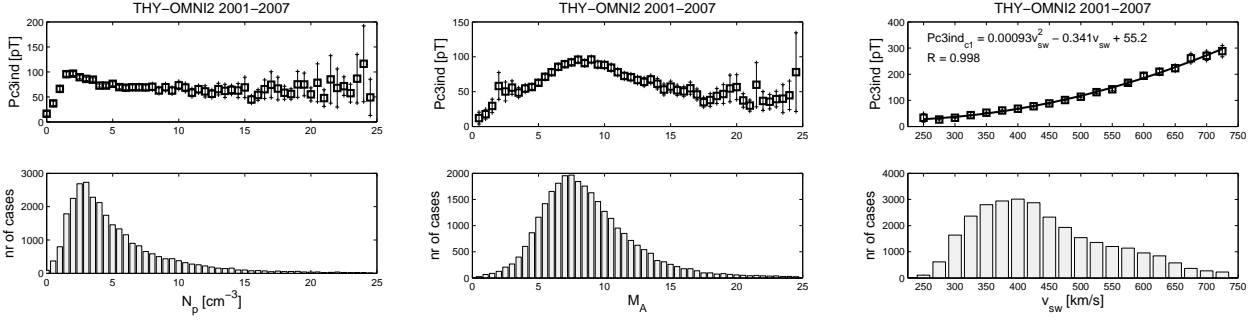
A nappali Pc3 (22-100 mHz) típusú geomágneses pulzációk a foreshock-ban (FS) megjelenő, kb. 30 s periódusú, ún. upstream hullámok felszíni megfelelői. Ezeket az ULF sávba eső hullámokat a lökés-hullámfronttól (LF) visszaverődő napszél ionok keltik hullám-részecske kölcsönhatás révén. Miután a napszél sebessége a napszélben érvényes Alfvén sebességet meghaladja, az eredetileg a Nap felé terjedő hullámok konvekció révén a LF felé haladnak, és a magnetoszférán keresztül egészen az ionoszféráig is eljuthatnak. Útközben, megfelelő feltételek teljesülése esetén gerjesztik a mágneses erővonalakat, amelyek rezonanciája a felszíni regisztrátumokban – az upstream eredetű hullámok mellett – egy újabb ULF hullámjelenségként jelentkeznek. A pályázat során vizsgáltuk az ULF hullámok felszíni előfordulásait, illetve a hullámok pulzációs aktivitásának összefüggését a napszél változó paramétereivel. A vizsgálatok alapját a Tihanyi Geofizikai Observatóriumban, korábbi pályázat révén megvalósult folyamatos pulzációs regisztrálás, illetve az obszervatórium által koordinált MM100 pulzációs hálózat (3.3. fejezet, Heilig et al., 2010) regisztrátumai szolgáltatták. Az MM100 hálózathoz egy jelenleg zajló EU FP7 pályázat (PLASMON) során új obszervatóriumok csatlakoznak, létrehozva az EMMA hálózatot. Az OTKA pályázat támogatásával elkészült egy obszervatóriumi mágneses adatgyűjtő, amelyet egy Narod típusú magnetométerrel kiegészítve Dél-Olaszországban tervezünk kitelepíteni, az Università della Calabria Egyetemmel együttműködésben. Az új állomás az EMMA pulzációs hálózat déli kiterjesztését szolgálja.

4.1. A Pc3-as pulzációs aktivitás és a napszél paraméterek kapcsolata

A pályázat résztémájának keretében azt vizsgáltuk, hogyan függ a felszíni nappali Pc3-as pulzációs aktivitás a bolygóközi mágneses tér és a napszél jellemzőitől. A kérdést korábban többen felvetették, a vizsgálatot azonban ezúttal minden korábbinál kiterjedtebb adatbázison, hét teljes év (2001-2007) és hét MM100 állomás adataival, valamint az OMNI napszél-adatbázis felhasználásával végeztük el. A pulzációs aktivitás és a napszél paraméterek kapcsolatát a klasszikus többváltozós lineáris regresszió mellett a neurális hálózatok segítségével is vizsgáltuk. Az eredményeket egy *Annales Geophysicae* folyóiratban megjelent cikkben foglaltuk össze (Heilig et al., 2010). A jelentésben ezért csak a legfontosabb megállapításokat írjuk le.

A kutatás eredményei sok vonatkozásban megerősítették mások korábbi eredményeit (pl. Yumoto et al., 1984), amennyiben a Pc3-as nappali pulzációk energiáját alapvetően a napszél sebességétől és a kúpszög nagyságától függőnek találtuk. Új eredmény volt viszont, hogy a Pc3-as pulzációk energiájának meghatározásában a napszél sűrűsége is kulcsszerepet játszik.

Extrém esetben, amikor a napszél sűrűsége $0,3 \text{ cm}^{-3}$ -nél alacsonyabb (az átlagos érték $4-5 \text{ cm}^{-3}$), egyáltalán nincsenek pulzációk a Pc3-as sávban, még akkor sem, amikor minden más körülmény egyébként



4.1. ábra: A Tihanyi Pc3 index (2001-2007) és a napszél proton sűrűsége (balra), Mach száma (középen) és sebessége (jobbra) közötti összefüggések (felső grafikonok), valamint a megfigyelt napszél paraméterek hisztogramjai (alsó grafikonok). A hiba-jelek a felső grafikonokon a 95%-os konfidencia intervallumot jelölik.

kedvező a pulzációk kialakulására. Ennek több oka is lehet; Protonok hiányában 1) az upstream hullámokat létrehozó hullám-részecske kölcsönhatás gyakorlatilag megszűnik, 2) a lökeshullámfront meggyengül, a frontról való visszaverődés hatékonysága csökken, 3) a napszél szub-Alfvénikussá válik és így a Nap irányába Alfvén sebességgel terjedő upstream hullámokat már nem képes visszacsöpörni a magnetoszféra felé, 4) a napszél dinamikai nyomásának csökkenése következtében a magnetopauza (és vele a lökeshullámfront) a Földtől igen messze kerül, akár a szokásos orrtávolság ötszörösére is. Az utóbbi ok miatt a hullámoknak a magnetoszférában hosszabb távolságot kell megtenniük, és ezáltal útközben nagyobb csillapítást szenvednek el. Az észlelt amplitúdó-csökkenés azonban nem magyarázható egy tisztán geometriai okokra (pontoszerű forrásból kiinduló gömb-hullámfrontok) visszavezethető látszólagos csillapítással.

A Pc3-as pulzációk tihanyi aktivitásának és néhány napszél paraméternek az összefüggését a 4.1 ábra grafikonjai szemléltetik. A hét év pulzációs és napszél idősoraira végzett multilineáris regresszió eredményeként a Pc3 pulzációs aktivitás napszél paraméterekre alapuló empirikus modellje az alábbi alakot ölti:

$$Pc3_{ind}[nT] = 4.064 \cdot 10^{-5} \cdot v_{sw}^{1.650} \cdot (\cos\chi + 2)^{1.946} \cdot p_{dyn}^{0.540} \cdot (\cos\Theta_{Bx} + 2)^{2.675} - 16pT$$

ahol v_{sw} a napszél sebességét, p_{dyn} a napszél dinamikai nyomását, χ a Nap zenitszögét, Θ_{Bx} pedig az interplanetáris mágneses tér kúpszögét jelentik.

Jelenleg ez az egyetlen, a napi Pc3-as aktivitás becslését lehetővé tevő modell. Jelentőségét a Pc3-as hullámok mind szélesebb körű alkalmazása adja. A Pc3-as pulzációk felhasználása a hagyományos alkalmazások (pl. magnetotellurika) mellett mind nagyobb teret nyer a plazmaszféra sűrűségének folyamatos monitorozásában, valamint a sugárzási övbeli nagyenergiájú részecskék dinamikájának vizsgálatában, előrejelzésében.

5. fejezet

Hot flow anomáliák vizsgálatára kapott legfontosabb eredmények

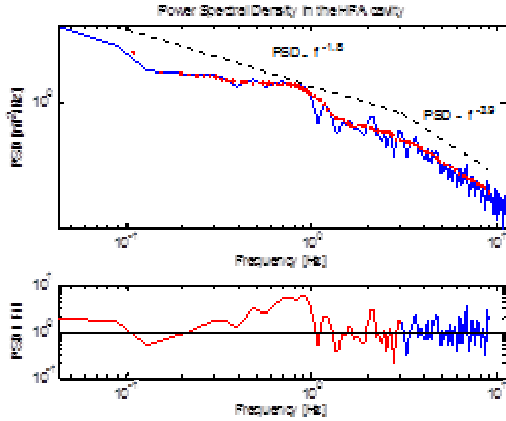
A „hot flow” anomália (HFA) a bolygók lökeshullámfrontján (LF) visszaverődő felgyorsult ionok és a napszélből származó részecskék ütközésmentes kölcsönhatásából kialakuló, nagy hőmérsékletű plazma buborék, amely a lökeshullámfront közvetlen előterében, a napszélbe ágyazott tangenciális szakadási felületekkel párhuzamosan (Schwartz et al., 1985) alakul ki. A HFA-k keletkezésének fizikai oka, hogy a LF-on felgyorsult részecskékre a diszkontinuitási felület két oldalán ellentétes konvekciós elektromos ($\mathbf{E} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$) tér hat, ami a felület felé fókuszálja, és a LF-hoz visszavezeti őket. A részecskék egy része jelentős energiára tesz szert, és a LF kvázi-párhuzamos részének elérésekor kiszabaduló nyaláb a napszél részecskéivel kölcsönhatva magas hőmérsékletre hevül. A HFA üregén belül ezáltal a nyomás is jelentősen megnő, és a buborék kitágul. Ha a folyamat kellően gyorsan játszódik le, a HFA-k peremén újabb lökeshullám felületek alakulhatnak ki.

5.1. Hot flow anomáliák azonosítása

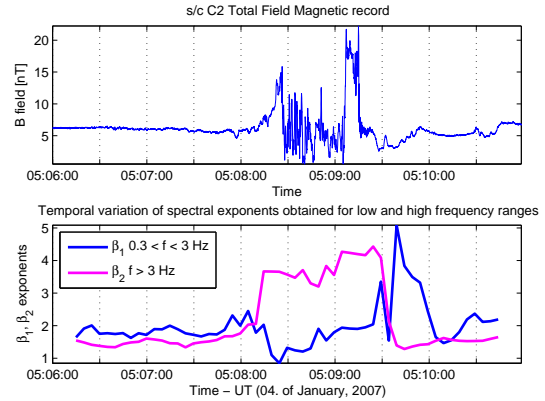
A HFA-kat jellemző fizikai változások alapján (mágneses tér, plazma sebesség, részecske sűrűség jelentős csökkenése, hőmérséklet növekedése) a Cluster műholdak méréseiből azonosítottunk összesen 124 eseményt, amelyek idejét és alapadatait egy cikkben közöltük (Facskó et al., 2009). Az észlelt események segítségével egyértelműen és kétségbevonhatatlanul megmutattuk, hogy Lin (2002) hibridszimulációval kapott eredményei helyesek, továbbá Schwartz et al. (2000) 30 esemény alapján kapott empirikus formulája a HFA-k keletkezési kritériumára helyes. Felfedeztük továbbá azt, hogy a HFA-k kialakulásának kritériuma az átlagosnál lényegesen, 150-200km/s-al nagyobb napszélsebesség. Mindehhez meg kellett határoznunk a HFA-k és az őket kiváltó érintőirányú szakadási felületek alapvető paramétereit, mint a méret, a Nap irányával bezárt szög, a mágneses tér elfordulásának szöge, a szakadási felület és a lökeshullám metszéspontjának sebessége. Munkánk elismerésképpen review cikk írására kértek fel az *Advances in Space Research* folyóiratba (Facskó et al., 2010). Új kutatási irányt nyitottunk, a cél a diamágneses üreg (a HFA) határfelületének mozgásának tanulmányozása, továbbá a turbulens folyamatok vizsgálata az üreg belsejében, illetve az egész jelenség időbeli fejlődésének vizsgálata. A következőkben az anomáliákra jellemző turbulens dinamikai sajátságokat mutatjuk be.

5.2. Hot flow anomáliák turbulens dinamikájának vizsgálata

Több, az imént említett HFA adatbázisból (Facskó et al., 2009) származó HFA mágneses terének energia-sűrűség spektruma (PSD) egyöntetűen power-law függvény ($PSD \sim f^{-\beta}$) szerinti menetet mutatott, ami a különböző térskálák között lezajló energiaáramlás turbulens jellegének egyik jele (kaskád folyamat). A spektrumok többsége az 1 – 3Hz intervallumban törést szenved, ami a fizikai folyamatok



5.1. ábra: A 2007. január 4-én 05:08:30-05:09:06 között megfigyelt HFA mágneses idősorának energia-sűrűség spektruma (főnt) és a spektrumra illeszthető power-law függvények (szaggatott vonalak). Az alsó grafikonon az eredeti spektrum és az illesztett függvények hányadosa szerepel.



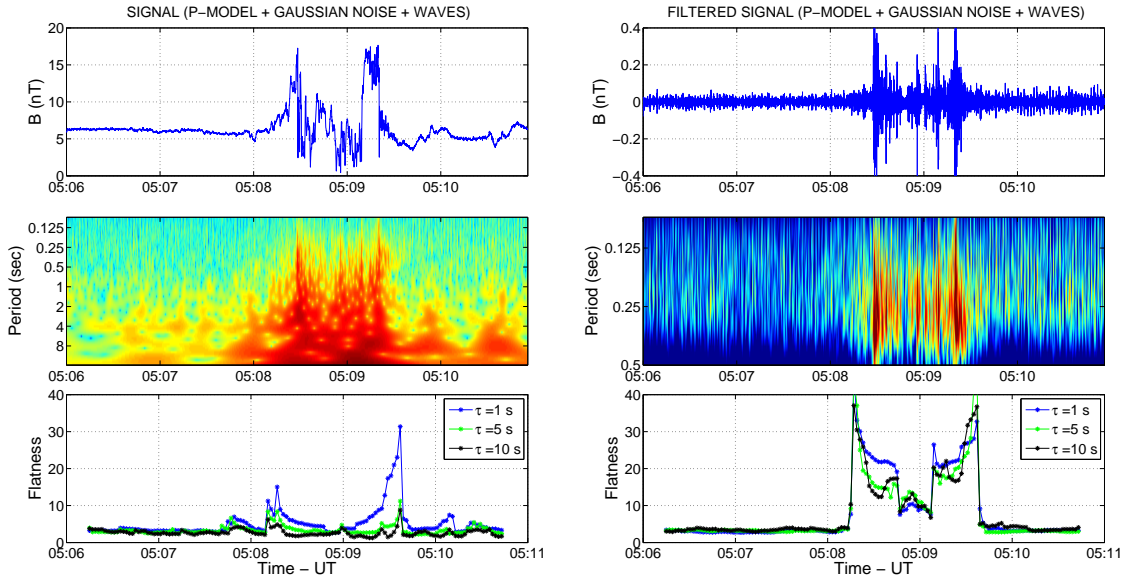
5.2. ábra: Az s/c C2 Cluster műhold mágneses regisztrátuma a 2007. január 4-én 05:08:30-05:09:06 között megfigyelt HFA környezetében (főnt), és az idősor fél perces, 10 mp.-es időtolásokkal eltoltt szakaszainak energia-sűrűség spektrumaira, két frekvencia-tartományban illesztett power-law függvények β_1 és β_2 hatvány-kitevői az idő függvényében (alsó grafikon).

megváltozásáról árulkodik a töréspontnál kisebb és nagyobb frekvencia tartományok között. Ennek egyik példáját mutatja a 2007. január 4-én megfigyelt anomália spektruma (5.1. ábra). Csúszóablakos analízissel vizsgáltuk, hogy a spektrum jellegzetes törése milyen mértékben az anomália, illetve a környezet jellemzője. Ennek során az anomália tágabb időbeli környezetének mágneses idősorából külön-külön számoltuk a fél perc hosszú, 10 másodperccel fokozatosan elcsúszó szakaszok spektrumait, illetve az ezekre, a kis ($0.3 < f < 3 \text{ Hz}$) és nagy ($f > 3 \text{ Hz}$) frekvenciákon számolható $f^{-\beta}$ függvények β hatványkitevőit. A hatványkitevők időbeli változását a 5.2. ábra grafikonján ábrázoltuk. A két frekvencia sávban számolt kitevők közeli értékei a HFA előtt és után, illetve éles elválásuk az anomália időszakában (5.2. ábra) egyértelműen a spektrum törésének HF anomália dinamikájához való köthetőségét igazolja.

A spektrum power-law jellege szükséges, de nem elégséges feltétele annak, hogy a spektrumhoz tartozó dinamika turbulens voltát a HFA-n belül igazoljuk. A turbulens dinamika megállapítására az idősorok magasabbrendű momentumaival számoló statisztikai analízisei (pl. valószínűség-sűrűség (VSF), illetve struktúra függvény (SF) analízisek) vonatkoznak.

A 5.1. ábrán bemutatott spektrum példája azonban azt igazolja, hogy az anomáliákon belül – több szerző tapasztalataival összhangban (lásd pl. Tjulin et al., 2008) – 0.1 és 1 Hz frekvencia tartományban jelentős a hullámok szerepe, ami a kis amplitúdójú turbulens jelek VSF és SF analízisekben való kimutatását lehetetlenné teszi (lásd 2.3. fejezet). Ezért a 2.3. fejezetben bemutatott módszer szerint a VSF analízist a wavelet térben szűrt idősorok használatával végeztük. A felüláteresztő szűrés határfrekvenciája 3 Hz volt, azaz a szűréssel gyakorlatilag a turbulens dinamika spektrum-törés (5.1. ábra) utáni frekvencia tartományát vizsgáltuk.

A 5.3. ábrán az eredeti, és a szűrt idősorok (bal és jobb oldal), ezek wavelet spektrumai, valamint a három különböző időskálával képzett különbségi idősorok csúszóablakos VSF analíziseinek eredményei látszanak. A szűrt különbségi idősorhoz tartozó lapultsági (flatness) értékek időbeli változásának grafikonja (5.3. ábra, jobb alsó grafikon) egyértelműen kijelöli az idősor HF anomáliához tartozó szakaszát ott, ahol a gaussi folyamatokra jellemző 3-as értéktől hirtelen elemelkedik. A lapultság 3-tól eltérő értéke azt jelzi, hogy az anomáliához tartozó, különböző időskálájú, mágneses fluktuációkban az extrém értékek valószínűsége egy normális eloszlású idősorban feltételezhetőhöz képest jóval nagyobb. Ez a turbulencia egyik lényeges ismérve. A lapultsági értékek alapján követett valószínűségek a különböző



5.3. ábra: Bal oldal: Az s/c C2 Cluster műhold mágneses regisztrátuma a 2007. január 4-én 05:08:30-05:09:06 között megfigyelt HFA környezetében (fönt), az idősor dinamikus wavelet spektruma (középen), és csúszó-ablakos valószínűségi sűrűség függvény analiziséből kapott lapultsági értékek (flatness) időbeli változása (lent, lásd szöveg). Jobb oldal: a bal oldali ábrákhoz hasonló dinamikus wavelet spektrum (középen) és lapultsági érték változás (lent) a szűrt mágneses idősorral számolva (fönt, lásd szöveg).

időskálákon eltérnek, ami a turbulens áramlás nem önhasználó, ún. multifraktál vagy intermittens jellegére utal. Érdekes megfigyelni, hogy az anomália előtti és utáni idősor szakaszokon a turbulens jelleg nem jelentkezik, illetve, hogy a turbulencia a szűrés nélküli idősorokban csak az anomáliát határoló lökeshullám mentén mutatkozik.

A 2.2. fejezetben leírt módon vizsgáltuk a Cluster holdak szűrt idősorai közötti térbeli változások turbulens jegyeit, a holdak közötti távolságoknak megfelelő térskálákon. A HF anomáliák a térbeli különbségek VSF analiziseinek eredményeiben is nemlineáris/turbulens jelenségekként jelentkeznek. A turbulens dinamika leghatározottabb jele a legközelebbi holdak regisztrátumainak különbségében látszik, azaz a legkisebb tanulmányozható térskálán. A szűrés nélküli idősorok esetén a turbulens dinamika ezúttal sem figyelhető meg.

Összefoglalásul elmondható, hogy a HF anomáliák üregében jelentős a hullám-tevékenység, amely olyan háttérzajhoz adódik hozzá, amelynek turbulens jellegét a hullám-komponensek eltávolítása után tehetjük egyértelművé. Az eredményeket egy, a Planetary and Space Sciences c. folyóiratban már elfogadott cikkben publikáljuk (Kovács et al., 2014).

6. fejezet

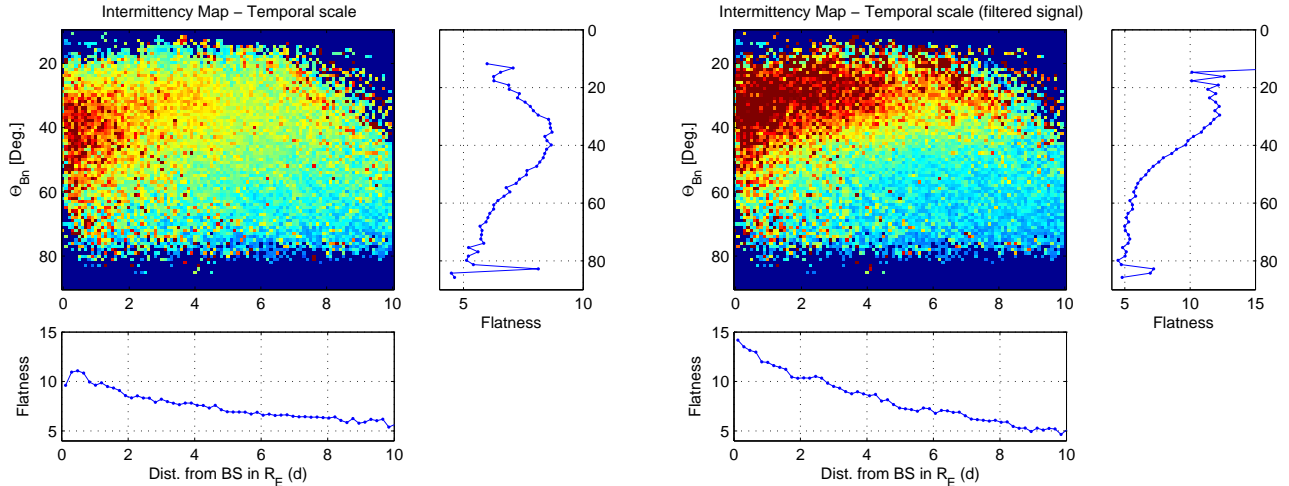
Turbulens plazma áramlás a magnetoszférában és környezetében

6.1. Foreshock

A Cluster műholdak FGM mágneses regisztrátumaiból felépített foreshock adatbázis (3.4. fejezet) alapján tanulmányoztuk az intermittens turbulens dinamika erősségének változását a lökeshullámfronttól való távolság és az interplanetáris mágneses tér (IMF) LF normálisától mért beesési szögének függvényében (lásd 3.4. fejezet). Az intermittencia erősségét a négy műhold, $B^{s/c}(t)$ mágneses idősoraiból (s/c a műhold jele) képzett, $\tau = 1 \text{ sec.}$ időskálához tartozó $\delta B^{s/c}(t, \tau) = B^{s/c}(t + \tau) - B^{s/c}(t)$ különbségi idősorainak negyedik statisztikai momentumával, azaz valószínűség-sűrűség függvényeinek (VSF), F lapultsági értékeivel mértük. A lapultság 3-as értéke a mágneses idősor véletlenszerű változását jelenti, az ennél nagyobb értékek viszont a turbulens dinamikában jellemző hirtelen, ún. intermittens mágneses fluktuációk jelenlétére utalnak. Csúszóablakos VSF analízis (2.1 fejezet) segítségével az idősorok 20 perc hosszú időablakaira kapott lapultsági értékeket egy-egy térbeli pontra vonatkoztattuk, a LF-től való távolság és az IMF beesési szögének függvényében. A lapultsági értékek térbeli változását a Cluster műholdak 10 év (2001-2010) FGM mágneses regisztrátumainak átlagában a 6.1. ábra bal oldali térképe mutatja. A várakozásnak megfelelően a LF-től távolodva az intermittencia erőssége gyengül, a LF-ről visszavert részecskék számának és energiájának csökkenésének köszönhetően. A beesési szög függvényében 35-40° környékén tapasztalható maximum, ami gyakorlatilag a kvázi párhuzamos FS-on belül az elektron FS tartományt (lásd pl. Treumann és Scholer, 2001) jelenti. Lényeges, hogy ebben a tér-tartományban az ionok által keltett ún. upstream hullámok nem számottevőek.

Hasonló eredményt kapunk, ha a különbségi idősorok helyett a VSF analízist a műholdak közötti térbeli fluktuációk idősoraival végezzük (lásd 2.2. fejezet), ami közvetve a Taylor hipotézis alkalmazhatóságának lehetőségét igazolja a foreshock tartományban. Ilyenkor a vizsgálható, λ térbeli időskálákat a műholdak közötti, időben változó távolságok határozzák meg. A térbeli fluktuációk idősoraiba vonatkozó átlagos lapultsági értékek a térskála (műholdak távolsága) logaritmusának függvényében monoton csökkenést mutatnak (6.2. ábra), hasonlóan a turbulens különbségi idősorok lapultságainak időskála függvényében való menetéhez. A normális eloszláshoz tartozó hármask lapultsági értéket az $F(\lambda)$ függvény $\lambda \sim 16 - 20000 \text{ km}$ értéknél éri el, ami azt jelenti, hogy az ezt meghaladó távolságoknál a mágneses tér nemlineáris térbeli fluktuáció egymástól függetlenek.

Érdekes eredményre vezet, ha a VSF analízist a szűrt mágneses idősorokkal végezzük el (2.3. fejezet), és az eredményül kapott átlagos lapultsági értékeket szintén a LF-től való távolság és az IMF beesési szögének függvényében ábrázoljuk (6.1. jobb oldali ábra). Az intermittens dinamika intenzitása a LF-től való távolság függvényében továbbra is csökken, de lényeges változás a korábbi eredményhez képest, hogy a beesési szög függvényében az intermittencia maximuma kisebb szögek ($\Theta_{Bn} \leq 20^\circ$) esetén, tehát alapvetően már az ion FS tartományban jelentkezik. A változás valószínű oka, hogy az ion foreshock-ban a hullám-részecske kölcsönhatás révén keletkező upstream hullámok (4. fejezet)



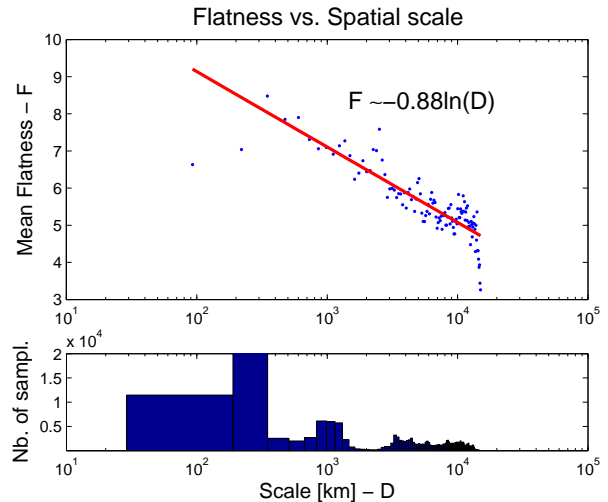
6.1. ábra: Az intermittens turbulencia erősségének átlagos értéke (10 év átlaga) a lökéshullámfront (LF) előtti foreshock (FS) tartományban a LF-től való távolság és a mágneses tér front normálisával alkotott szögének függvényében. A számolás a Cluster műholdak idősorainak időablakos valószínűség-sűrűség függvény (VSF) analízise alapján készült. A grafikonok a távolság és a beesési szög függvényében külön-külön mutatják az intermittens dinamika erősségének változását.

energiája domináns a kis amplitúdójú, de széles frekvencia tartományban jelentkező turbulens zajhoz képest. A felülatéresztő szűrés a hullámok energiájának csökkentésével lehetőséget teremt a turbulens háttér kimutatásához is.

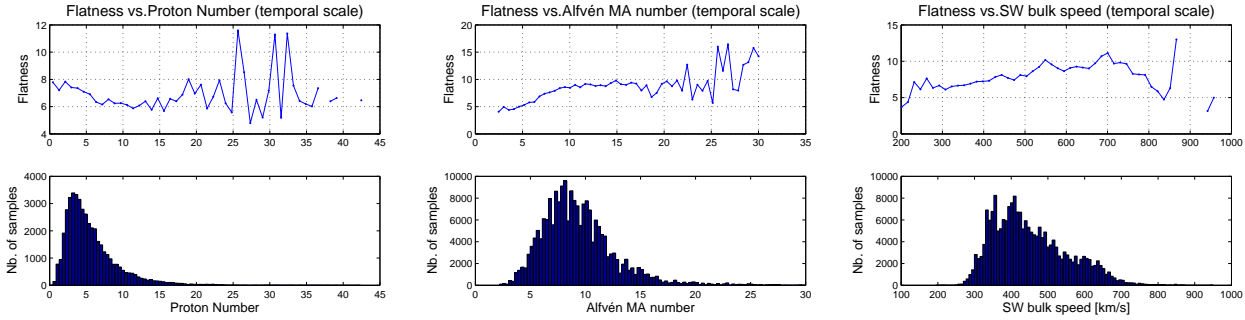
A kapott eredmények összegzéseként elmondható tehát, hogy az intermittenciával együtt járó turbulens dinamika az egész kvázi-párhuzamos FS tartományt jellemzi, de az ion-foreshock tartományban jelenlévő upstream hullámok miatt a hagyományos nemlineáris analízisekkel ez csak nehezen mutatható ki.

Az intermittens dinamika térbeli változása mellett vizsgáltuk az intermittencia erősségének változását a napszél paraméterek függvényében. Eredményünk szerint a turbulens dinamika erősségére leginkább a napszél sebessége és Alfvén Mach száma van befolyással (6.3. ábra). Meglepő módon, gyengébb illetve alig észlelhető a kapcsolat az intermittencia erőssége, valamint a napszél proton sűrűsége és dinamikai nyomása között. A Pc3-as pulzációk kapcsán hasonló eredményre jutottunk, de akkor kiderült, hogy ha nem is közvetlenül, de pl. a hullám-részecske kölcsönhatás gyengülésén keresztül, a részecske sűrűség közvetve mégis befolyásolja a felszínen tapasztalt pulzációs aktivitást.

A pályázatban célul tűztük ki a felszínen megfigyelhető Pc3-as pulzációs aktivitás és a FS turbulens folyamatai közötti kapcsolat vizsgálatát. A Cluster műholdak FS-beli regisztrátumainak nemlineáris sajátságai és a felszíni pulzációk aktivitásának esettanulmány jellegű összehasonlítása révén konkrét összefüggést az azonos térrészből származó, de eltérő fizikai jelenségek között nem találtunk. Az imént említett statisztikai vizsgálat azonban azt mutatja, hogy a pulzációs aktivitás és az intermittens



6.2. ábra: A mágneses tér műholdak közötti fluktuációinak csúzóablakos VSF analíziseiből nyert átlagos (10 év) lapultsági értékek a műholdak közötti távolság függvényében (fent), valamint a műholdak közötti távolságok hisztogramja (lent).



6.3. ábra: A foreshock intermittens dinamikáját jellemző átlagos flatness értékek a napszél proton-sűrűségének (balra), Alfvén Mach számának (középen), és sebességének (jobbra) függvényében (felső grafikonok), valamint a számolásokhoz használt időszakokban megfigyelt napszél paraméterek hisztogramjai (alsó grafikonok).

turbulencia sajátosságai statisztikai értelemben a napszél paramétereitől nagyon hasonló módon függenek (vö. 4.1. és 6.3. ábrák). A kapcsolat kvantitatív igazolására az intermittens turbulencia erősségére vonatkozó empirikus modell felállítását tervezzük a Cluster észleléseket és számolási eredményeket tartalmazó adatbázisunk alapján.

6.2. Sarki tölcser

A Cluster műholdak 2001 és 2005 közötti 5 Hz mintavételű FGM mágneses idősorai alapján kiválasztottunk 379 pályaszakaszt, amiből a holdak 198 alkalommal az északi, 181 alkalommal pedig a déli külső sarki tölcseret keresték (lásd 3.5 fejezet). A regisztrátumok spektrális és valószínűség-sűrűség függvény analíziseiből vizsgáltuk a sarki tölcser dinamikáját, illetve statisztikai összehasonlítást végeztünk a földi mágneses idősorok nemlineáris statisztikai jellemzőivel.

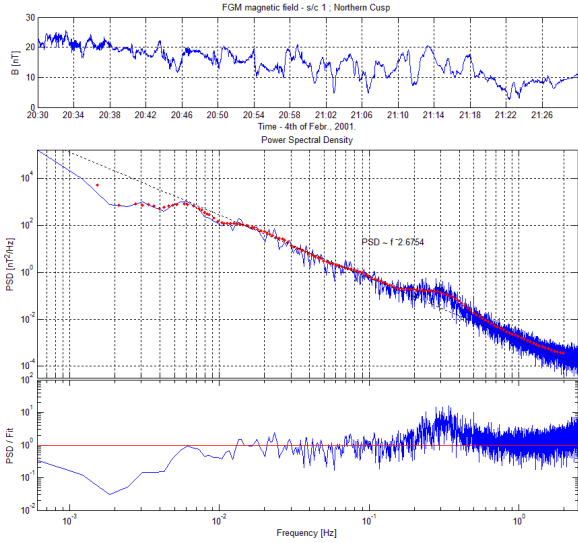
6.2.1. Spektrális elemzés

A sarki tölcser áthaladások során regisztrált mágneses adatsorok spektrumai széles frekvencia tartományon $PSD \sim f^{-b}$ hatvány menetet mutatnak (pl. 6.4. ábra). A protonok tölcserben érvényes girofrekvenciája ($f_c \sim 0.22 \text{ Hz}$) környékén a jelek energiája látványosan megemelkedik. A girofrekvenciánál nagyobb frekvenciákon a spektrumot közelítő függvény b hatványkitevője jellemzően nagyobb értékkel rendelkezik, mint a kisebb frekvenciákon. A turbulencia klasszikus értelmezése szerint az $f < f_c$ tartomány a különböző térskálák közötti kaskád típusú energia-átmenetre, míg az $f > f_c$ tartomány az energia disszipációjára utalhat. Újabb elképzelések szerint a girofrekvencia fölött újabb turbulens energia-folyam veszi kezdetét (Hall turbulencia, vagy girokinetika, lásd pl. Leamon et al., 1998, Howes, 2008).

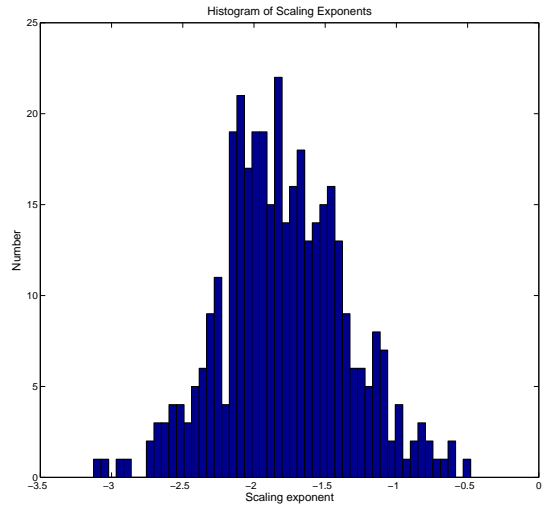
Teljesen kifejlődött HD, illetve MHD kaskád turbulenciára jellemző spektrális hatványexponensek értékei $-5/3$, illetve $-3/2$. A $[0.02 \text{ Hz} - 0.2 \text{ Hz}]$ frekvencia tartományban hatvány menetet feltételezve, automatikus illesztéssel vizsgáltuk a kigyűjtött 379 sarki tölcser áthaladás mágneses regisztrátumának spektrumát közelítő hatvány menetek kitevőit. A kapott kitevőkből képzett hisztogram (6.5. ábra) csúcsa $-2,1$ és $-1,4$ közé esik, tehát egyértelműen a teljesen kifejlődött HD és MHD turbulenciára jellemző értékek köré.

6.2.2. Nemlineáris statisztikai analízis

A pályázati során kidolgozott automatikus csúszóablakos VSF algoritmus (2.1. fejezet) alkalmazásával monitoroztuk a mágneses tér különbségi idősorainak Gauss eloszlástól való eltérését a lapultsági paraméter (F) meghatározásával. Az eljárás hasonló volt, mint amit a HFA-k, illetve a foreshock esetén



6.4. ábra: A mágneses tér változása egy sarki tölcser áthaladás során (felső grafikon), valamint ugyanennek az idősnak a Fourier spektruma (középső grafikon). Az alsó grafikon az eredeti spektrum és az illesztett power-law spektrum hányadosát mutatja. A proton girofrekvencia környékén (lásd szöveg) jól látszik az mágneses regisztrátum energiájának növekedése.

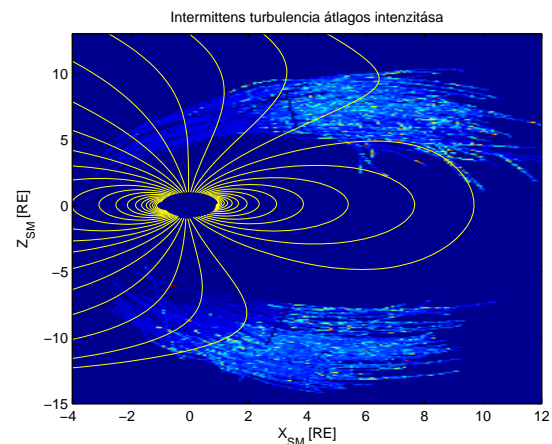


6.5. ábra: 379 sarki tölcser áthaladás mágneses tér spektrumára [0,02 Hz, 0,2 Hz] között illesztett $P(f) \sim f^{-b}$ függvény b exponenseinek hisztogramja.

alkalmaztunk. Az intermittens turbulencia erősségét ezúttal is a lapultsági érték 3-tól való eltéréseinek nagyságával jellemeztük a mérések idejének és helyének függvényében. Az eredményt térben SM (solar-magnetic) rendszerben ábrázolva egyértelműen megmutattuk az intermittens turbulencia erősödését a tölcser, és a tölcserhez csatlakozó magnetoszfera burok területén (6.6. ábra).

Vizsgáltuk a lapultság átlagos értékének változását a különbségi idősorokban alkalmazott τ időlépték függvényében. Várakozásunknak megfelelően az átlagos lapultság τ növelésével meredeken csökken, ami az intermittens multifraktál jellegű turbulencia további isméréve. F és τ közötti kapcsolatot az $F(\tau) \sim -m \cdot \ln(\tau)$ függvény írja le. Az $F = 3$ gaussi értéket az $F(\tau)$ függvény $\tau \sim 80 \text{ sec}$. időléptéknél éri el, ami azt jelenti, hogy ennél nagyobb időléptékek esetén a mágneses fluktuációk egymástól teljesen függetlenekké válnak.

Ezúttal is elvégeztük az analízist a mágneses tér, műholdak közötti térbeli különbségeinek idősorával is (2.2. fejezet). A 2001 és 2005 közötti időszakban a négy Cluster hold közötti távolság legkisebb és legnagyobb értéke 50 és 17000 km volt. A különbségi idősorok VSF-einek átlagos lapultsági értékei a λ távolság lépték függvényében az $F(\tau)$ függvényhez hasonló $F(\lambda) \sim -k \cdot \ln(\lambda)$ menetet mutatnak. A függvény a teljesen független fluktuációra jellemző gaussi értéket $\lambda \sim 4000 \text{ km}$ lépték mellett éri el. A Taylor hipotézis figyelembevétele mellett ez a térbeli lépték feleltethető meg



6.6. ábra: Az intermittens turbulencia erősödése az SM rendszer X-Z síkjában a sarki tölcserék területén a valószínűsűrűség függvények lapultsági értékeinek, műhold pályája menti változása alapján. Az erővonalak a Tsyganenko modellből származnak.

az idő-eltolással nyert különbségi idősorok alapján kapott $\tau \sim 80$ s időléptéknek. Emlékeztetőül, a foreshock-ban a teljesen független térbeli fluktuációk léptékeként $\lambda \sim 16 - 20000$ km értéket mértünk.

6.2.3. A sarki tölcser dinamikájának változása a geomágneses aktivitás függvényében

Vizsgáltuk az $F(\lambda) \sim -k \cdot \ln(\lambda)$ összefüggés érvényességét a geomágneses aktivitást jellemző *Dst* index függvényében, valamint az interplanetáris mágneses tér *z* komponensének, geomágneses aktivitást meghatározó pozitív illetve negatív értékei mellett (6.8. ábra). Egyértelműen kiderült, hogy $F(\lambda)$ hatvány-függvénnyel való közelítésének illesztési pontossága jelentősen javul a napszél *z* komponensű mágneses terének negatív értékei, illetve a negatív *Dst* indexek esetén. Ez a sarki tölcser dinamikájának kevésbé determinisztikus voltára utal nyugodt geomágneses időszakban, illetve az intermittens turbulencia erősödésére a magnetopauza felnyílása és geomágneses háborgások kialakulásának időszakában.

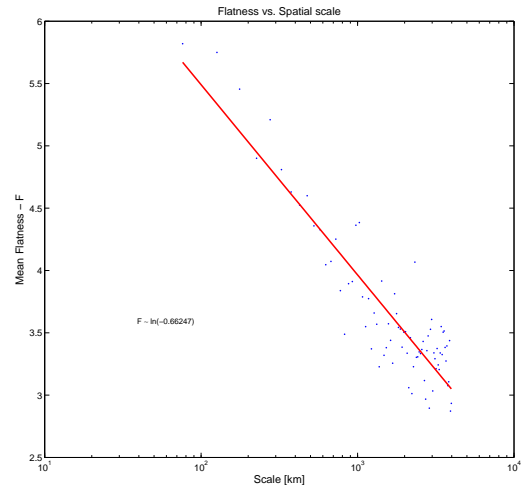
Alacsonydimenziós kaotikus dinamika vizsgálatára alkalmazott beágyazási dimenzió módszer, szinguláris érték dekonvolúció és helyettesítő adat teszt (Ott et al., 1993) megerősítik a fenti elképzelést. A rendszert leíró dimenziók száma a sarki tölcserben a magnetopauza nyitott időszakában (mágneses vihar) ugyanis jóval nagyobb, mint a nyugodt geomágneses időszakban. A dimenziók számának növekedése azzal áll összefüggésben, hogy a turbulens dinamika esetén a rendszer szabadsági fokainak száma – a véletlenszerű folyamatokhoz hasonlóan – a végtelenhez közelít.

Némiképp ellentmondó eredményt kaptunk a $\tau = 8$ s időskálához tartozó, sarki tölcserben regisztrált mágneses különbségi idősorok negyedik statisztikai momentumainak (lapultság) és a – geomágneses háborgást az aurorális elektrojet-ek erőssége alapján mérő – AE index összehasonlításakor. Ebben az esetben kisebb viharok esetén ($AE < 400$ nT) az eredmények a sarki tölcserben az intermittens turbulens változások gyengülését, nagyobb viharok esetén azonban – egy rövidebb stagnálást követően ($400 < AE < 600$ nT) – az újbóli erősödését jelzik (6.9 ábra).

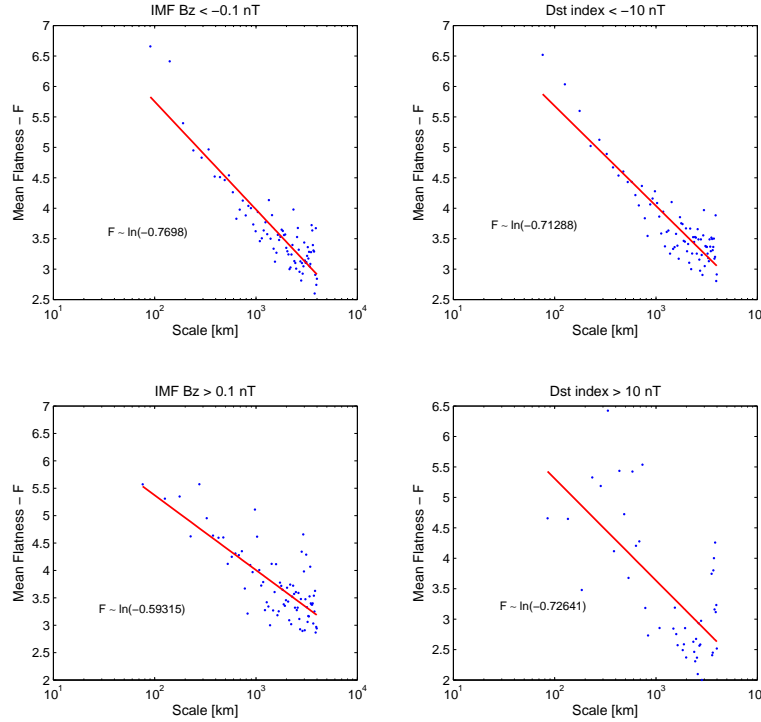
6.2.4. In-situ sarki tölcser és geomágneses idősorok összehasonlítása

A geomágneses tér elemzésében négy MM100 obszervatórium (Kilpisjärvi (KIL, $L = 6.00$); Sodankylä (SOD, $L = 5.25$); Hankasalmi (HAN, $L=3.76$); és Nurmijärvi (NUR, $L=3.36$)) 2002 és 2005 között, januártól áprilisig (Cluster holdak sarki tölcserben való tartózkodásának időszaka) terjedő időszakban regisztrált *H* komponensű idősorait használtuk.

A különbségi idősorok negyedik statisztikai momentumainak (lapultság) és a τ időléptékek közötti kapcsolatot a négy obszervatórium, négy (2002-2005) vizsgált évének 4-4 hónapos idősoraira vonatkoztatott átlagok alapján a 6.10. ábrán mutatjuk be. Ebből egyértelműen látszik a lapultsági értékek kb. 10 és 3000 s időskálák közötti, átlagban intermittens fluktuációkra utaló $F(\tau) \sim -m \cdot \ln(\tau)$ függvény szerinti változása. A nem véletlenszerű változást jelző, háromnál nagyobb lapultsági értékek felső időskála határa (~ 3000 s) a sarki régió geomágneses viszonyait meghatározó, szubviharok jellemző időskálájával egyezik meg. A Cluster holdak által mért, in-situ sarki tölcser mágneses regisztrátumokban



6.7. ábra: Az intermittens turbulens dinamikát jellemző átlagos lapultsági értékek változása a műholdak közötti térskála függvényében, a sarki tölcserben.



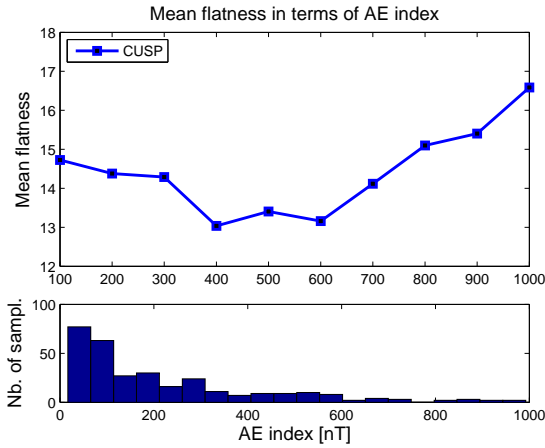
6.8. ábra: Az 6.7 ábrán bemutatott átlagos lapultsági értékek a térskála függvényében különböző B_z interplanetáris mágneses tér és Dst geomágneses aktivitási indexek mellett. A geomágnesesen aktív időszakokra (negatív B_z és nagy negatív Dst index) vonatkozó lapultság-műhold távolság kapcsolatot a felső grafikonok mutatják.

a geomágneses térhez hasonló függést figyelhattunk meg, amelynél azonban a nemlineáris fluktuációk felső időléptéke 80 s volt (6.2.2. fejezet). A különbség azt jelzi, hogy a földmágneses idősorokban, a sarki tölcserhez való viszonylagos közelség ellenére is, a magnetoszféra egészének dinamikai változásai jelentkeznek.

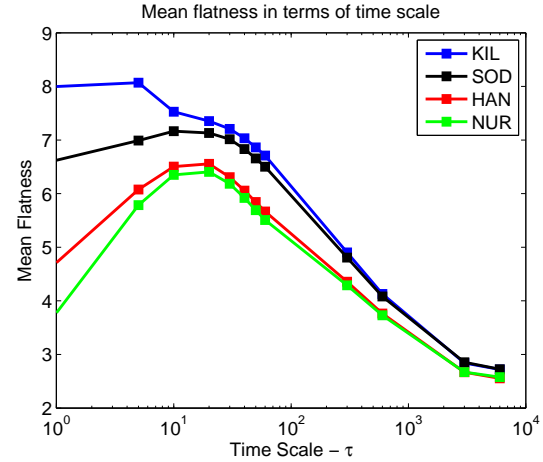
Jól kivehető különbség látszik továbbá a geomágneses különbségi idősorok $F(\tau)$ görbéinek mágneses szélességgel való változásában is. Eszerint a sarki régióhoz közelebbi obszervatóriumok (KIL, SOD) mágneses fluktuációinak intermittens jellege érezhetően erősebb a délebbre fekvő obszervatóriumokéhoz képest (HAN, NUR).

Megvizsgáltuk a lapultságok tipikus értékeit a geomágneses aktivitás erősségére jellemző AE aurorális indexek függvényében (6.11. ábra). A léptékek különbségétől eltekintve a kapott $F(AE)$ görbék minden obszervatórium esetén hasonló menetet követnek; kb. $AE \sim 250 \text{ nT}$ értékig enyhe emelkedés, majd $AE \sim 200 - 550 \text{ nT}$ között stagnálás, e fölött pedig erőteljesebb emelkedés mutatkozik. A nemlineáris intermittens fluktuációk erősségének geomágneses aktivitással való jelentős emelkedése tehát elsősorban a nagy mágneses aktivitás esetén jellemző. A geomágneses szélességgel azonban ezúttal is mutatkozik változás, miszerint az északi obszervatóriumokban (KIL, SOD) a nemlineáris dinamika erősödése a geomágneses aktivitással jóval egyértelműbben mutatkozik, mint a sarki zónától kissé délebbre fekvő HAN és NUR obszervatóriumok esetén. Megjegyezzük, hogy az $F(AE)$ görbe menete kb. $AE \sim 400 \text{ nT}$ után hasonlatos a sarki tölcser in-situ regisztrátumai alapján kapott változáshoz (vö. 6.9. és 6.11. ábrák).

Mindezek után vizsgáltuk az in-situ sarki tölcser mágneses észlelései és az azonos időben a felszínen regisztrált földmágneses idősorok nemlineáris jellemzői közötti kapcsolatot. Az azonos idejű földi regisztrátumok különbségi idősorainak VSF analiziseiből kapott $F(\tau)$ görbék maximumait ábráztuk a sarki tölcserre vonatkozó hasonló értékek függvényében (6.11. ábra). A földi és a műholdas regisztrátumok közötti korreláció a legnagyobb szélességű, Kilpisjarvi obszervatórium esetén egyértelmű, de



6.9. ábra: A sarki tölcserben regisztrált in-situ mágneses tér különböző időskálákon képzett VSF analízisei alapján kapott átlagos lapultsági értékek a geomágneses aktivitásra jellemző AE indexek függvényében (felső grafikon), valamint a vizsgált időszakokban regisztrált AE indexek hisztogramja (alsó grafikon)



6.10. ábra: A négy MM100 obszervatórium 2002-2005 közötti H komponensű földmágneses idősorainak csúszóablakos eljárással végzett VSF analízise (ablak hossza: 10800 s, csúsztatás: 3600 s) alapján számolt, teljes idősorra vett átlagos $F(\tau)$ görbék.

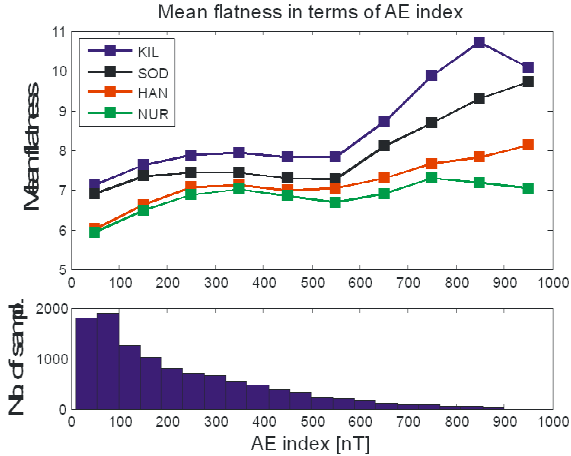
kissé gyengébb kapcsolat a többi obszervatórium esetén is megfigyelhető.

Összefoglalásul elmondható, hogy az északi geomágneses és az in-situ sarki tölcser mágneses fluktuációk nemlineáris jellegében kimutatható összefüggés, de néhány részletben inkább a különbségek dominálnak. Ilyen például az intermittens fluktuációk időskálájának felső határában mutatkozó eltérés (geomágneses idősoroknál 3000 s, a sarki tölcserben 80 s), valamint az intermittens fluktuációk erőssége és az AE indexek közötti kapcsolat eltérő jellege a tölcserben és a felszíni idősorokban kis AE indexek esetén. A különbségek azt igazolják, hogy a geomágneses idősorok fluktuációinak nemlineáris jellegében – a sarki tölcserével ellentétben – az egész magnetoszféra dinamikai változásainak hatásai tükröződnek, miközben mindkét rendszer mágneses változásaiban a napszél hatása domináns szerepet tölt be.

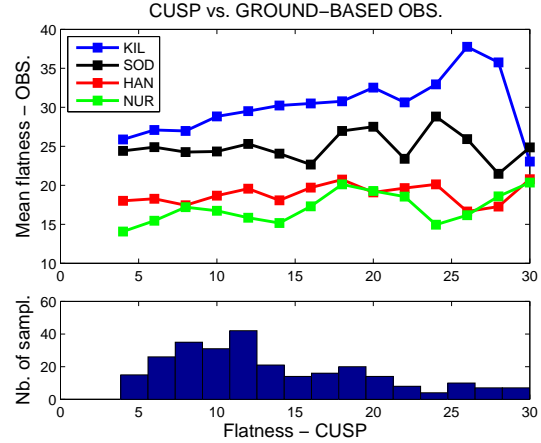
6.3. Plazmalepel

A magnetoszféra uszályban nyitott és zárt erővonalak egyaránt előfordulnak. A plazmalepel az uszály, zárt erővonalak által körülhatárolt térrészét jelenti. Forró részecskéket tartalmaz, amelyek sűrűsége jellemzően a $0.1 - 1 \text{ cm}^{-3}$ tartományba esik. A részecskék áramlási sebessége a termális sebességnél jóval kisebb. Ez elsősorban a magnetoszféra jellemző dinamikai folyamatának, az erővonalátkötődésnek köszönhető, aminek következtében az uszály külső tartományaiból, a köpenyből plazma sugár indul az erővonalak mentén a Föld irányába, majd visszaverődik, és az ellenkező irányba haladó nyalábbal találkozva mozgási energiája termális energiába alakul át. A plazmalepel ezekből a lassan áramló, de nagy termális energiájú, forró részecskékből alakul ki. A plazma összetétele a napszélből és az ionoszférából származó részecskék keverékéből áll. Nyugodt körülmények között a napszél részecskék túlsúlya a jellemző, míg az aktív időszakokban az ionoszférikus részek dominálnak.

A plazmalepel a geomágneses viharok egyik legaktívabb térrésze. A legnagyobb változás a mágneses komponensek közül a Nap-Föld tengely irányába (Nap irányába pozitív) eső X komponensben várható. A plazmalepel mágneses fluktuációinak turbulens jellegét különböző geomágneses aktivitás mellett vizsgáltuk a Cluster holdak magnetoszféra uszályon való áthaladásainak időszakában. Az uszály, műholdak által harántolt tartományait az ECLAT projekt nyilvános adatbázisa alapján követtük (3.6. fejezet).



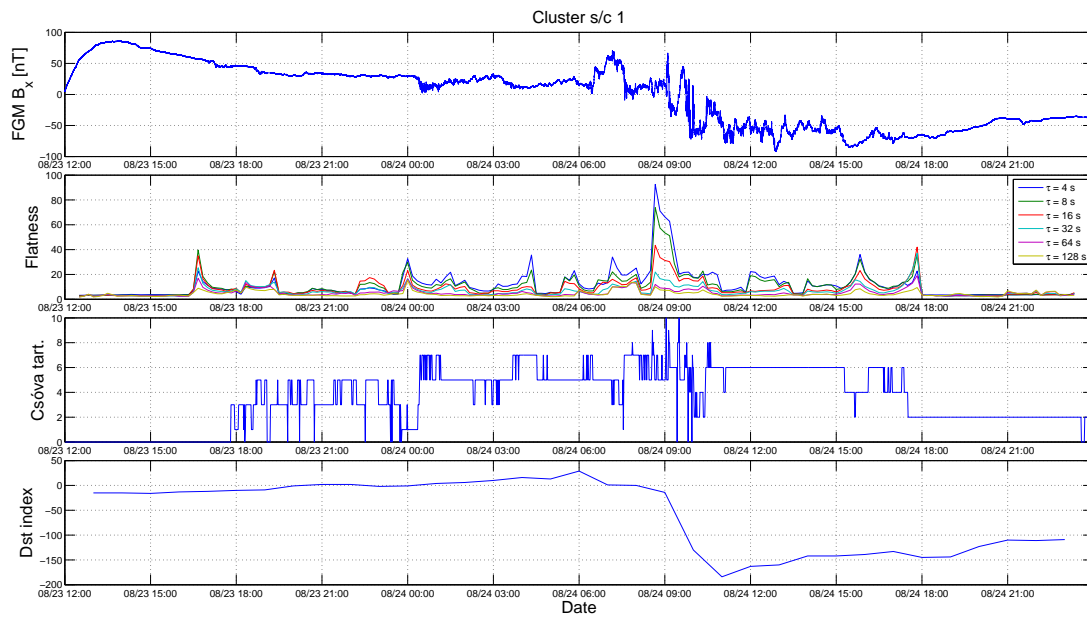
6.11. ábra: A lapultsági értékek különböző időskálákon vett maximumának átlagos értéke a geomágneses aktivitást jellemző AE index függvényében a négy vizsgált földi obszervatórium esetén (felső grafikon), valamint a vizsgált időszakban regisztrált AE indexek hisztogramja (alsó grafikon).



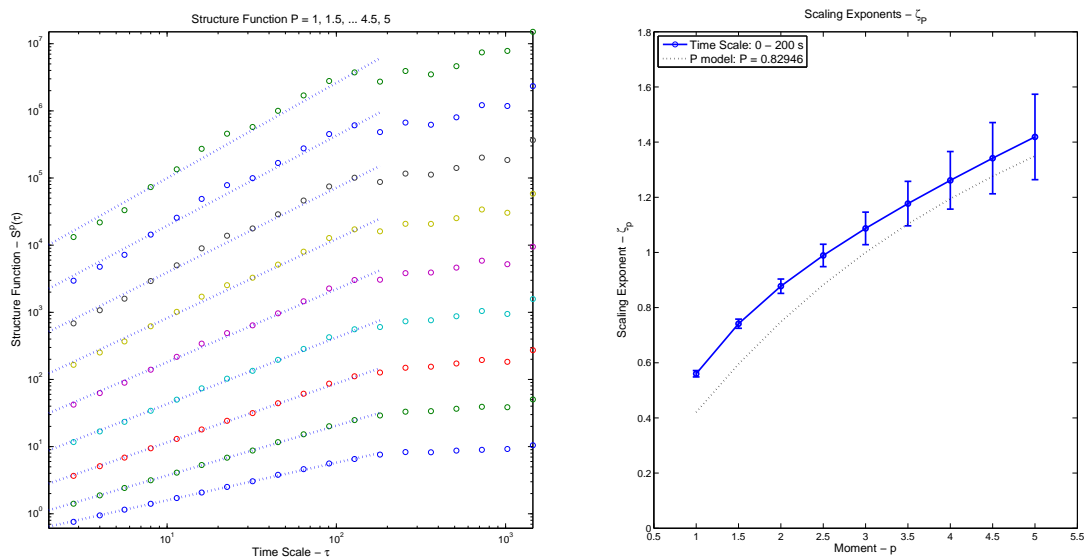
6.12. ábra: A földi obszervatóriumok különböző időskálákon végzett VSF analízisei alapján kapott maximális lapultsági értékek a Cluster műholdak in-situ mágneses észleléseiből képzett hasonló értékek függvényében (felső grafikon), valamint a tölcserben észlelt lapultsági értékek hisztogramja (alsó grafikon).

A 6.13. ábra négy grafikonja a 2005.08.23. és 2005.08.24. között regisztrált X komponensű mágneses idősort, a különböző időskálákra ($\tau = 1 \dots 128$ s) végzett futóablakos VSF analízis eredményét, a Cluster holdak uszály-beli tartózkodási helyeinek kódjait (értékeket lásd 3.6. fejezet), valamint a mérési időszakokra vonatkozó, földi adatok alapján mért Dst indexek értékeit mutatják. A holdak belső plazmalepelben való tartózkodását az uszály tartományokat jelző kódok 7 és 10 közötti értékei jelölik. A lapultsági értékeket jelző grafikon egyértelműen jelzi, hogy a csóvában a mágneses tér nemlineáris és intermittens fluktuációi a plazmalepel határréteghez és a külső és belső plazmalepelhez kapcsolódnak, a határrétegen kívüli tartományok lapultsági értékei ugyanis minden időskálán közelítőleg 3-al egyeznek meg. A plazmalepel intermittens fluktuációi a $\tau < 128$ s időskálákon jellemzőek, az intermittencia jelentősebb erősödése pedig alapvetően a belső plazmalepelben (uszály kód ≥ 7) mutatkozik.

Az 6.13. ábrán bemutatott kvalitatív kép a legtöbb megvizsgált, magnetoszféra uszályból származó idősorra érvényes. A példa azonban mégis különleges abból a szempontból, hogy a Cluster holdak plazmalepelen való áthaladását ezúttal egy komoly geomágneses vihar kíséri, amit a Dst index értékek jelentős csökkenése mutat 08.24 09:00 órakor. A lapultsági értékek - valószínűleg ennek köszönhetően - a plazmalepelben az átlagnál jóval nagyobbak, a hirtelen változások gyakoriságának növekedése miatt. A fluktuációk nem-önhasonló, intermittens jellegét ezen a szakaszon struktúrafüggvény (SF) analízis elvégzésével is igazoltuk. Az $S^p(\tau)$ struktúrafüggvények $S^p(\tau) \sim \tau^{\zeta_p}$ függvénnyel modellezhető skálázási tartománya (6.14. ábra) azonos a VSF analízisben megfigyelt, intermittens fluktuációkat tartalmazó, $\tau < 128$ s időskála-tartománnyal (6.14. ábra). Ezen kívül a ζ_p skála-exponensek p momentum függvényében nemlineáris menete (6.14. ábra) szintén a plazmalepel mágneses fluktuációinak nem-önhasonló, intermittens jellegét írják le. A fluktuációk multifraktál jellegét igazolja, hogy a kapott ζ_p függvényre a teljesen kifejlett turbulenciát leíró magnetohidrodinamikai multifraktál P modell (Meneveau, Sreenivasan, 1987) kis hibával illeszthető (6.14. ábra).



6.13. ábra: **Felső grafikon:** A mágneses tér Cluster s/c1 műhold által regisztrált 2 napos (2001.07.26 – 07.27.) időszora. **2. Grafikon:** A mágneses regisztrátum különbségi idősorain végzett futóablakos VSF analízisei alapján kapott lapultsági görbék hat időskálán. **3. Grafikon:** A műhold, kódokkal jelölt tartózkodási helye a csóvában (értékeket lásd 3.6 fejezet). **Alsó grafikon:** A regisztrátum időszakára vonatkozó, földi obszervatóriumi adatok alapján számolt Dst index időbeli változása.



6.14. ábra: **Balra:** A plazmalepel X komponensű mágneses idősorára számolt $S^p(\tau)$ struktúrafüggvények ($p = 1, 1.5, \dots, 4.5, 5$) és a függvényekre illesztett $S^p(\tau) \sim \tau^{\zeta_p}$ függvények (pontozott egyenesek); **Jobbra:** A plazmalepel idősorra kapott ζ_p skálaexponens görbe az exponensek illesztési hibáival (folytonos görbe), és a skálaexponensekre illesztett P modell (Meneveau, Srenivasan, 1987).

7. fejezet

Összefoglalás

A pályázat célja a nemlineáris és hullám természetű magnetohidrodinamikai folyamatok tanulmányozása volt a Föld körüli térség in-situ plazma regisztrátumaiban és a felszíni geomágneses észlelésekben. Az elemzésekben elsősorban a Cluster műholdak és földi mágneses obszervatóriumok (Tihany, MM100 hálózat) regisztrátumait használtuk, kiegészítve az ACE és WIND műholdak alapján publikált OMNI adatbázissal. A nyilvános adatbázisokat kiegészítettük néhány, az analíziseink szempontjából lényeges számolt vagy egyéb adatbázisból származó adattal. A négy, párhuzamos pályán haladó műholdból álló Cluster misszió esetén kihasználtuk azt a lehetőséget, hogy a földkörüli tartományok turbulens dinamikáját nemcsak a mágneses tér időbeli, hanem térbeli fluktuációi alapján is vizsgálhatjuk. A műholdas adatok feldolgozásához és az eredmények értelmezéséhez csúszóablakos eljárást dolgoztunk ki, amellyel a nem-stacionárius idősorok nemlineáris vagy hullám folyamatait a hely és az idő függvényében tanulmányozhattuk. Eredményeinket az OTKA támogatás megjelölésével hét referált és három magyar nyelvű cikkben, valamint több nemzetközi konferencián (EGU, AGU, COSPAR, IAGA) publikáltuk. A GEM 2013 Summer Workshop-on meghívott előadást tartottunk „hot flow” anomáliák turbulens tulajdonságainak vizsgálatából. Heilig Balázs révén a pályázat futamideje alatt egy Ph.D. dolgozat is született, Pc3-as pulzációk felszíni és műholdas megfigyeléséből.

Főbb eredményeink a következő pontokban foglalhatók össze:

- A pályázat során folytattuk az Pc3-Pc4 típusú ULF pulzációk megfigyelését Tihanyban és koordináltuk az MM100 pulzációs hálózatot. Összeállítottunk egy pulzációk megfigyelésére alkalmas adatgyűjtő egységet, amelyet egy meglévő magnetométerünkkel Dél-Olaszországban telepítünk ki.
- Empirikus modellt állítottunk fel az ULF pulzációk tihanyi aktivitása és a napszél paraméterek közötti kapcsolat leírására. A modellnek fontos szerepe lehet a plazmaszféra sűrűségének folyamatos monitorozásában, valamint a sugárzási övbeli nagyenergiájú részecskék dinamikájának vizsgálatában.
- Módszert fejlesztettünk a kis amplitúdójú turbulens fluktuációk kimutatására hullámok által átjárt környezetben.
- A Cluster műholdak adatai alapján azonosítottunk 124 „Hot Flow” anomália eseményt, amelyek jellegzetességei alapján egyértelműen igazoltuk több szerző korábbi szimulációs eredményeit. A mágneses hullám jelenségek szűrése után egyértelműen igazoltuk az anomáliák dinamikájának turbulens jellegét, amely az idősorokban kis amplitúdóval jelentkezik.
- A Cluster műholdak regisztrátumai alapján kimutattuk a kis amplitúdójú, intermittens mágneses fluktuációk turbulens jellegét az elektron foreshock és az upstream hullámokkal átjárt ionforeshock tartományokban. Azonos eredményt kaptunk az idősorok és a műholdak közötti térbeli mágneses változások analízisével.

-
- Vizsgáltuk a foreshock mágneses fluktuációinak intermittens jellege és a napszél paramétereinek közötti kapcsolatot. Legerősebb összefüggést a napszél sebességével és az Alfvén Mach számmal kaptuk, míg a napszél proton-sűrűségével gyenge kapcsolat adódott. Megállapítottuk, hogy az összefüggések hasonlóak ahhoz, amit a foreshockban keletkező, felszínen észlelt Pc3-as pulzációk aktivitása esetén tapasztaltunk. Ez indirekt statisztikai kapcsolatot feltételez az azonos térrész két eltérő dinamikai folyamata között.
 - Megmutattuk a Cluster holdak mágneses regisztrátumainak turbulens jellegét a sarki tölcsérben és a plazmalepelben. A tölcsér dinamikájának turbulens jellege erősödik a magnetopauza felnyílásával és a geomágneses aktivitás fokozódásával. Kimutattuk a földi geomágneses idősorok és az in-situ sarki tölcsér mágneses idősorok turbulens jellege közötti kapcsolatot.

Irodalomjegyzék

- [1] Balogh, A., Dunlop, M.W., Cowley, S.W. H., Southwood, D. J., Thomlinson, J. G., Glassmeier, K.-H., Musmann, G., Luhr, H., Buchert, S., Acuna, M., Fairfield, D. H., Slavin, J. A., Riedler, W., Schwingenschuh, K., and Kivelson, M. G., *The Cluster magnetic field investigation*, Space Sci. Rev., 79, 65-91, 1997.
- [2] Facskó, G., Z. Németh, G. Erdős, Á. Kis, I. Dandouras, *A global study of hot flow anomalies using Cluster multi-spacecraft measurements*, Ann. Geophys., 27, 2057-2076, 2009
- [3] Facskó, G., J.G. Trotignon, I. Dandouras, E.A. Lucek, P.W. Daly, *Study of hot flow anomalies using Cluster multi-spacecraft measurements* (Review paper), Advances in Space Research, 45, 541-552, 2010
- [4] Farris, M. H. and C. T. Russell, *Determining the standoff distance of the bow shock: Mach number dependence and use of models*, J. Geophys. Res., 99, 17681-17689, 1994.
- [5] Heilig, B., S. Lotz, J., Verő, P. Sutcliffe, J. Reda, K. Pajunpää, and T. Raita, *Empirically modelled Pc3 activity based on solar wind parameters*, Ann. Geophys., 28, 1703-1722, 2010, doi:10.5194/angeo-28-1703-2010
- [6] Horbury, T.S.; *Cluster II analysis of turbulence using correlation functions*. In: Harris, R.A. (ed.) Cluster-II Workshop Multiscale/Multipoint Plasma Measurements SP-449, ESA, Noordwijk, 89., 2000
- [7] Howes, G.G., Cowley, S.C., Dorland, W, Hammett, G.W., Quataert, E., Schekochihin, A.A., *A model of turbulence in magnetized plasmas: Implications for the dissipation range in the solar wind*, Journal of Geophysical Research, 113, 1978-2012, doi:10.1029/2007JA012665, 2008.
- [8] Kovács, P., G: Facskó, I. Dandouras, *Turbulent dynamics inside the cavity of hot flow anomaly*, Planetary and Space Sciences, <http://dx.doi.org/10.1016/j.pss.2014.01.001>, in press, 2014
- [9] Leamon, R.J., Smith, C.W., Ness, N.F. and Matthaeus, W.H., *Observational constraints on the dynamics of the interplanetary magnetic field dissipation range*. J. Geophys. Res., 103, 4775-4787, 1998.
- [10] Lin, Y, *Global hybrid simulation of hot flow anomalies near the bow shock and in the magnetosheath*, Planet. Space Sci., 50, 577-591, 2002.
- [11] Meneveau, C., K.R. Srenivasan, *Simple multifractal cascade model for fully developed turbulence*, Phys. Rev. Lett., 59, 1424-1427, 1987.
- [12] Ott, E., *Chaos in dynamical systems*, Cambridge Univ. Press, New York, 1993.

- [13] Schwartz et al., *An active current sheet in the solar wind*, Nature 318, 269-271, 1985.
- [14] Schwartz, S.J., Paschmann, G., Sckopke, N., Bauer, T. M., Dunlop, M., Fazakerley, A. N., and Thomsen, M. F.: *Conditions for the formation of hot flow anomalies at Earth's bow shock*, J. Geophys. Res., 105, 12639–12650, doi:10.1029/1999JA000320, 2000.
- [15] Tjulin, A., E.A. Lucek, and I. Dandouras; *Wave activity inside hot flow anomaly cavities*, Journal of Geophysical Research, 113, A08113, doi: 10.1029/2008JA013333, 2008.
- [16] Treumann, R.A. and M. Scholer; *The magnetosphere as a plasma laboratory*, In: The Century of Space Science, Kluwer Academic, pp. 1495, 2001.
- [17] Tsyganenko, N.A., C.T. Russel, *Magnetic signatures of the distant polar cusps: Observations by Polar and quantitative modeling*, Journal of Geophys. Res., 104, pp 24,939-24,955, 1999
- [18] Tsyganenko, N.A., *A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry, 2. Parametrization and fitting to observations*, J. Geophys. Res., 107, A8, doi:10.1029/2001JA000220, 2001.
- [19] Yumoto, K., Saito, T., Tsurutani, B.T., Smith, E.J., and Akasofu, S.-I., *Relationship between the IMF magnitude and Pc3 magnetic pulsations in the magnetosphere*, J. Geophys. Res., 89, 9731-9740, 1984.
- [20] Waters, C.L., Takahashi, K., Lee, D.-H., Anderson, B.J., *Detection of ultralow-frequency cavity modes using spacecraft data*, J. Geophys. Res., 107, 1284, 2002

Budapest, 2014. január

Kovács Péter

témavezető