Facskó Gábor

A földi fejhullám előtti tartomány vizsgálata a Cluster műholdak mérései alapján

Doktori (Ph. D.) értekezés tézisei

Fizika Doktori Iskola
Doktori Iskola vezetője: Dr. Horváth Zalán akadémikus

Részecskefizika és csillagászat program
Programvezető: Dr. Csikor Ferenc egyetemi tanár

Témavezető: Dr. Kecskeméty Károly tudományos főmunkatárs
KFKI RMKI Kozmikus Fizikai Főosztály

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Budapest
2007

Bevezetés

A Föld kozmikus plazma környezetének felépítését, szerkezetét alapvetően bolygónk mágneses tere és a napszél közötti kölcsönhatás határozza meg. A napszélplazma állapotának változása kihatással van a Föld kozmikus környezetének állapotára, a magnetoszférában, a mágneses burokban, a geomágneses csóvában, a Föld fejhullámának helyzetében, a különböző részecskepopulációk összetételében, illetve az energiaeloszlásukban. Az egy pontban végzett mérésekkel lehetetlen a mért adatok időbeni változását a térbeli változásoktól megkülönböztetni, különösen akkor, hogyha egy rendkívül dinamikusan változó környezetről van szó. Ez teszi szükségessé azt, hogy egyszerre több pontban azonos műszerekkel folyjon megfigyelés, pontosan ezzel a céllal tervezték, építették és bocsátották fel a négy Cluster műholdat (Escoubet et al., 1997a,b). Feladata bolygónk mágneses terének és plazmakörnyezet részletes megismerése egyidejű mérésekkel, ezért felszerelték részecskedetektorokkal, a kozmikus plazma tulajdonságait mérő műszercsoportokkal, továbbá a magnetoszférában terjedő elektromágneses hullámokat tanulmányozó mérőberendezésekkel. A tizenegy műszer közül az FGM[1] magnetométer (Balogh et al., 1997), a CIS[2] plazmadetektor (Rème et al., 1997, 2001) és a RAPID[3] energikusrészecske detektor (Wilken et al., 1997) méréseit használtam. Ezek segítségével kiszámítottam a szupratermális ionok irányszögeloszlását, továbbá kifejlesztettem egy eljárást a mérések plazmához rögzített vonatkoztatási rendszerbe történő transzformálására a Compton-Getting effektus alapján és szoftverrel kompenzáltam a RAPID detektorfejek rendellenességei folytán fellépő eltéréseket.

Az ún. hot flow anomáliák (HFA-k, magyarul forró áramlási anomáliák) a Föld fejhullámának, pontosabban az az előtti tartománynak az átmeneti zavarai. Először az AMPTE[4] és az ISEE[5] missziók műszerei észlelték őket 1985-ben, a fejhullám előtti térrészben (Schwartz et al., 1985; Thomsen et al., 1986). Ezt az ún. upstream tartománybeli diamágneses üreget a peremén összenyomott mágneses mező jellemzi és ritka, forró plazma tölti ki, amely a napszél áramlási irányától jelentősen eltérő irányba mozog. A HFA-k jelentős mértékben képesek megzavarni a napszelet és nagy energiára gyorsított részecskéket lőnek az upstream tartomány plazmájába. A jelenséget a fejhullám közelében fedezték fel, később derült ki, hogy képes megzavarni a magnetopauzát, földfelszíni jelenségeket okozva. Eredetük, mechanizmusuk egyelőre részleteiben

[1] Fluxgate Magnetometer
[2] Cluster Ion Spectrometry experiment
[3] Research with Adaptive Particle Imaging Detectors
[4] Active Magnetospheric Particle Tracer Explorer
[5] International Sun-Earth Explorer

nem tisztázott, jelenleg úgy tűnik, hogy tangenciális diszkontinuitások hatnak kölcsön a fejhullámmal. A szakadási felület áthalad a lökéshullámon, a szakadási felületeken pedig változik a mágneses tér nagysága, ami elektromos teret kelt. Ezek a rajtuk áthaladó részecskéket felgyorsíthatják és visszaverhetik, így a részecskék nagy energiára (protonok esetében mintegy 300 keV) gyorsulhatnak fel. A gyorsítási mechanizmus energiaforrása az ion-nyaláb instabilitás. Ez a folyamat nem csak a Földre jellemző, a Mars fejhulláma közelében is találtak analóg jelenséget (Øieroset et al., 2001), vélhetően a Vénusz, a Jupiter és a Szaturnusz közelében is lehet detektálni őket, hiszen az óriásbolygók fejhulláma egy nagyobb kiterjedésű, erősebb mágneses térrel ütközve jön létre, a szakadási felületek pedig több napig utaznak a napszéllel, tehát odáig is eljutnak. A Vénusz esetében pedig a lökéshullámot ugyan az ionoszférával való kölcsönhatás váltja ki, de sok hasonlóságot mutat a Mars esetével, ezért vélhető, hogy itt is kimutathatóak a megfelelő műszerezettségű szondák mérései segítségével.

A kitűzött célok

A már meglévő irodalmi adatok alapján pontosítottam, hogy jelenséget milyen, a Cluster műholdakon egyidejűleg végzett FGM, CIS és RAPID mérések illetve ellenőrző számítások alapján lehet azonosítani. Ennek alapján feldolgoztam a műholdak pályája miatt kedvező, 2003. februárja és áprilisa közötti időszak - ekkor kerülhetnek minden évben az apogeum közelében a szondák a Föld fejhulláma elé - méréseit és közelítőleg ötven hot flow anomáliának tekinthető eseményt találtam. A 2003 kora tavaszától nyaráig végzett keresést nagyban segítette a szondák 2003-as évi nagy szeparációja. Ezután két úton indultam el: egyrészről több eseményt kiválasztottam és részletesen elemeztem, másrészről a HFA-k globális jellemzőit kerestem és tanulmányoztam. Az előbbin transzformált irányszög eloszlások kiszámítását, a napszél paraméterek meghatározását és töltöttrészecske események elemzését, az utóbbin a HFA-t kiváltó tangenciális diszkontinuitások geometriai paramétereinek meghatározását és szakadási felületek megkeresését értem. A diszkontinuitások meghatározásához felhasználtam a mintegy 1.5 millió km-re a Föld fejhulláma előtt keringő ACE[6] nevű szonda méréseit. Elvégeztem a Lin-féle hibrid szimulációk (Lin, 2002, 2003) ellenőrzését is a HFA katalógusom alapján, a hot flow anomáliák kialakulásának két új feltételét fedeztem fel az adatok elemzése folyamán, továbbá méretbecslést végeztem, amelynek eredménye egybevág a hibrid szimulációk jóslataival.

Dolgozatom utolsó fejezetének témája a planáris struktúrák keresése a Cluster mágneses tér méréseiben, amelyek megmagyarázhatják a mágneses tér turbulenciaszerű tu-

[6]Advanced Composition Explorer

lajdonságait, de szerepet játszanak a komplex mágneses struktúrák kialakulásában is. A plazmakeveredés az anyagba befagyott mágneses térben komplex mágneses térrel rendelkező tartományokat hoz létre. Ezen tartományok határait metsző űrszondák síkszerű struktúrákat észlelnek. Ezek nyomait kerestem a saját magam által kifejlesztett kóddal, majd statisztikai elemzéseket végeztem az illesztett síkok tulajdonságaival kapcsolatban.

Alkalmazott módszerek

Kutatásaim során a Cluster szondák FGM magnetométerének 22 Hz-es mintavételű, illetve 1 és 4 s-es átlagolású mágneses tér, a RAPID részecskedetektor 4 s-es átlagolt fluxus és 128 s-es jó irányfelbontású adatait, továbbá a CIS HIA[7] 4 s-es felbontású plazma méréseit használtam fel elsősorban, továbbá az ACE MAG magnetométerének és a SWEPAM plazma műszerének 16 s-es és egy órás átlagolású méréseire is támaszkodtam. A hot flow anomáliák geometriai paramétereit minimumvariancia és keresztszorzat módszerrel határoztam meg, a méretbecslésre saját módszereket fejlesztettem és a többi paraméter meghatározásához is. Nagyban támaszkodtam a *Dr. Erdős Géza, CSc.* által FORTRAN nyelven fejlesztett HEDGEHOG ábrázoló és kiértékelő programra, de a szükséges egyéb programokat inkább magam fejlesztettem IDL[8], C/C++ és JAVA nyelveken. Ezek a programok a RAPIDView, amelyet a Cluster RAPID adatok ábrázolására, feldolgozására és javítására fejlesztettem ki, továbbá a LinChecker, amelyet a hot flow anomália események átfogó vizsgálatára írtam IDL nyelven. Az előbbi programban valósítottam meg a Compton-Getting effektus kivédésére a szondarendszerről a napszélrendszerre való transzformációt is. A planáris síkok keresése és az azzal kapcsolatos vizsgálatokra adaptív korrelációszámítást alkalmaztam, amelyhez PlanarMS néven újabb, IDL nyelven implementált programot írtam. Minden használt módszer részletes leírása megtalálható a dolgozatom elméleti bevezetőjében.

Tézisek

1. A megoldottam a Compton-Getting effektus (Compton and Getting, 1935; Keppler, 1978) figyelembe vétele céljából az űrszondákkal együttmozgó rendszerben mért adatok napszél rendszerre való transzformálását, amelyre eredetileg a RAPID műszer adatainak feldolgozásához volt szükségem. A RAPID műszerek meghibásodásait is figyelembe vettem a feldolgozásnál pl. a teleszkópok egyik érzékelője

[7] Hot Ion Analyses

[8] Interactive Data Language

elromlott, az alapszintek eltolódtak. A műszer 128 s-ig illetve 32 s-ig integrálja az adatokat, ez túl hosszú a mágneses tér változásához képest, ezért különféle átlagoló módszerekkel való irányszögeloszlás számolási módot fejlesztettem ki, majd a RAPID adatok transzformálásának hozzá vételével a napszél rendszerre transzformált irányszög eloszlási eljárást fejlesztettem ki, amit a hot flow anomália események tanulmányozásánál fel is használtam (Facskó, 2004; Kecskeméty et al., 2006).

2. Először egyedi hot flow anomália eseményeket vizsgáltam. A hot flow anomáliákkal kapcsolatos következtetések a 2003. február 15. és április 20. közötti párhuzamos Cluster szondás észleléseken alapulnak, amikor flotta szeparációja nagy volt, 5000 és 10000 km közötti. A Cluster a hot flow anomália események többségét sorozatokban észlelte. A plazmaparaméterek változása minden eseménynél kielégítette az általam felállított kritériumokat, köztük a 10 millió K-os hőmérsékletet is a magban. Majdnem mindegyik eseményhez energikus proton események társultak, sima profillal és ezek általában előbb kezdődtek és tovább tartottak, mint maguk a hot flow anomália események. A fluxusok már a kvázi-párhuzamos fejhullám régióban elkezdtek nőni, az érintőirányú szakadási felület előtt (Kecskeméty et al., 2006).

   (a) A 2003 februárja és áprilisa közötti időszakban kb. ötven gyanús eseményt találtam. Ez önmagában értékes új eredmény, mert:

      i. Ennyi eseményt ez eddig összesen sem ismertek, vagy ha igen, nem publikálták a felfedezésüket.

      ii. Idáig úgy gondolták, hogy a hot flow anomáliák ritka jelenségek. Ezzel a véleménnyel ellentétben úgy gondolom, hogy az ilyen események meglehetősen gyakoriak, szinte folyamatosan jelennek meg, amikor a geometriai és egyéb feltételek adottak, csak eddig nem volt olyan szonda, amellyel megfigyelhették volna őket (Kecskeméty et al., 2006).

   (b) Kiválasztottam két eseményt (2003. február 16, 10:45-51 (UT) és 2003. március 7, 10:14-16 (UT)) és részletesen elemeztem őket. Azért választottam éppen ezeket az eseményeket, mert szembeszökő módon energikus energikus részecskefluxus jellemezte őket (vagy éppen a megfelelő pozícióban voltak a szondák az észlelésükhöz) és alkalmazni tudtam a bemutatott módszert transzformált irányszögeloszlások kiszámításához a 2003. február 16-ai eseménynél (Kecskeméty et al., 2006).

      i. A két részletesen elemzett esemény 2003. február 16-án (magas proton fluxusok) és március 7-ém (alacsony proton fluxusok) azt jelzi, hogy a é-

rintőirányú szakadási felület elhelyezkedése a fejhullámhoz képest hasonló volt (Kecskeméty et al., 2006).

ii. Mindkét esetben az upstream mező kvázi-párhuzamosból kvázi-merőlegessé vált a érintőirányú szakadási felületnél (Kecskeméty et al., 2006).

iii. Február 16-án a végső fejhullám keresztezés 70 és 180 perc között követte a hot flow anomália észlelést. Március 7-én azonban Cluster-1 a mágneses burokban maradt a hot flow anomália esemény után, míg a többi szonda közel volt a befelé haladó fejhullám keresztezéshez. A fejhullám februárban volt jobban összenyomva és a kifelé-befelé irányuló mozgása valószínűleg nagyobb volt. Ez lehet a felelős a februári 10-szer nagyobb 40 keV-es proton fluxusokért és a hosszabb növekedésért (Kecskeméty et al., 2006).

3. Az előző események felhasználásával globális összefüggéseket és tulajdonságokat kerestem és találtam. A globális vizsgálatok oka és vezérfonala Lin (2002, 2003) hibrid hot flow anomália szimulációinak kísérleti ellenőrzése volt, egészen pontosan az általa jósolt méret-szög összefüggések ellenőrzése. Az észlelt összefüggésekre elméleti magyarázatot is adtam (Facskó et al., 2006a,b,c).

   (a) Meghatároztam a fenti hot flow anomália eseményeket kiváltó érintőirányú szakadási felületek geometriai tulajdonságait, azaz a normálisuk Nap-Föld iránnyal bezárt szögét (γ), továbbá a mágneses tér vektorának elfordulását a szakadási felületen belül ($\Delta\Phi$). Egyrészről találtam egy kb. 45° széles kúpot a Nap iránya körül, ahová nem mutat normálvektor, másrészről a tér elfordulását jellemzően nagynak találtam. Mindkét eredmény összhangban van az elmélettel (Facskó et al., 2006a,b).

   (b) Megbecsültem a hot flow anomáliák tipikus méretét ($2.3 \pm 0.9\, R_{Föld}$) a jelenséget keresztező szondák áthaladási ideje, távolsága és a jelenség becsült terjedési sebessége alapján. Ez az első, korábban el nem végzett becslés összhangban van az elméleti feltevésekkel (Facskó et al., 2006a,b).

   (c) Meghatároztam a méret-szög, továbbá a méret-sebesség függvényeket és lefutásukat a szimulációs eredményekkel egyezőnek találtam, azaz a méret-γ szög esetén találtam egy méret maximumot, a másik kettőnél pedig növekedést tapasztaltam (Facskó et al., 2006a,b,c).

   (d) A méretbecslés során felfedeztem, hogy a hot flow anomália események idején a napszél sebessége tipikusan kb. 200 km/s-vel magasabb, mint a hosszú idejű átlag. Ehhez az ACE SWEPAM napszél méréseit használtam fel. A gyors

napszél előfordulási gyakorisága napfolttevékenység függő, ezért vélhetően a hot flow anomáliák gyakorisága is az (Facskó et al., 2006a,c).

(e) Az is kiderült a ACE MAG és SWEPAM mérései alapján, hogy nemcsak a napszélsebesség értékek, hanem a gyors magnetoszonikus Mach-számok is magasak. Ez azt jelenti, hogy a külső-Naprendszerben a hot flow anomália események előfordulási gyakorisága is magasabb lehet (Facskó et al., 2006a).

4. A Cluster FGM nagy felbontású (1 Hz-es) mágneses tér méréseiben síkszerű objektumokat kerestem és mutattam ki a napszél plazmájában. Bebizonyosodott, hogy a plazma keveredése domináns szerepet játszik a napszél kis skálájú mágneses fluktuációinak kialakulásában (Németh et al., 2006).

(a) Kimutattam, hogy lamináris áramlás által kevert erővonalak képesek erős fluktuációkat kelteni, továbbá ez kimutatható a kevert mágneses teret keresztező űrszondák méréseiben. Ez megmagyarázhatja a hullámszerű és a turbulencia szerű tulajdonságokat is. A keveredés és a kétdimenziós Alfvén fluktuációk hatása a két jelenség nagyon szoros kapcsolata miatt nem különböztethető meg. A keveredés az áramló folyadék sebesség variációinak skálájánál sokkal kisebb mérettartományban képes szerkezeteket kialakítani, ebben az esetben a generált kisléptékű szerkezetek lepelszerűek, közelítőleg síkok. Egyszerű számításokkal megmutattam, hogy a keveredés hatása jelentős a kisléptékű fluktuációkra (Németh et al., 2006).

(b) A Cluster szondák négy pontbeli méréseinek adatsorát felhasználva vizsgáltam a bolygóközi mágneses tér fluktuációit. A minimumvariancia eljárás nem alkalmazható két dimenziós szerkezetek tanulmányozására, ezért a több szondás méréseket használtam fel, hogy tanulmányozzam a mágneses tér szerkezetét. Az új eljárással kapott eredményeknek a minimumvariancia eljárás segítségével számoltakkal való összehasonlítása független bizonyítékot kínál arra, hogy a mágneses fluktuációk „többnyire 2D – kissé slab" összetételűek. Ezenfelül mindenfelé megtaláltam a várt lepelszerű szerkezeteket a mért adatokban, bebizonyítottam továbbá azt, hogy a fluktuációk több mint fele lepelszerű struktúrákhoz kötődik (Németh et al., 2006).

Irodalomjegyzék

Balogh, A. et al., The Cluster Magnetic Field Investigation, *Space Sci. Rev.*, 79, 65, 1997

Compton, A. H. and I. A. Getting, An Apparent Effect of Galactic Rotation on the Intensity of Cosmic Rays, *Phys. Rev.*, 47, 817, 1935

Escoubet, C. P. et al., Cluster - Science and Mission Overview, *Space Sci. Rev.*, 79, 11, 1997a

Escoubet, C. P. et al., *The Cluster and PHOENIX missions*, Kluwer, Dordrecht, 1997b

Keppler, E., A note on the complications of the Compton-Getting effect for low energy charged particle measurements in interplanetary space, *Geophys. Res. Lett.*, 5, 69, 1978

Lin, Y., Global hybrid simulation of hot flow anomalies near the bow shock and in the magnetosheath, *Planet. Space Sci.*, 50, 577, 2002

Lin, Y., Global-scale simulation of foreshock structures at the quasi-parallel bow shock, *J. Geophys. Res.*, 108, 3, 2003

Øieroset, M. et al., Hot diamagnetic cavities upstream of the Martian bow shock, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 887, 2001

Rème, H. et al., The Cluster Ion Spectrometry (CIS) Experiment, *Space Sci. Rev.*, 79, 303, 1997

Rème, H. et al., First multispacecraft ion measurements in and near the Earth's magnetosphere with the identical Cluster ion spectrometry (CIS) experiment, *Ann. Geophys.*, 19, 1303, 2001

Schwartz, S. J. et al., An active current sheet in the solar wind, *Nature*, 318, 269, 1985

Thomsen, M. F. et al., Hot, diamagnetic cavities upstream from the earth's bow shock, *J. Geophys. Res.*, 91, 2961, 1986

Wilken, B. et al., RAPID - The Imaging Energetic Particle Spectrometer on Cluster, *Space Sci. Rev.*, 79, 399, 1997

A tézispontok alapjául szolgáló referált publikációk

Facskó, G., K. Kecskeméty, G. Erdős, M. Tátrallyay, P. Daly and I. Dandouras, A statistical study of hot flow anomalies using Cluster data, *Adv. in Space Res.*, submitted, 2006a

Kecskeméty, K., G. Erdős, **G. Facskó**, M. Tátrallyay, I. Dandouras, P. Daly and K. Kudela, Distributions of suprathermal ions near hot flow anomalies observed by RAPID aboard Cluster, *Adv. in Space Res.*, 38, 1587, 2006

Németh, Z., **G. Facskó**, G. Erdős and A. Balogh, Plasma mixing as a cause of solar wind magnetic field variations, *Adv. in Space Res.*, 37, 467, 2006

A dolgozat témájában megjelent további publikációk

Facskó, G., Low-Energy Particle Studies Near the Earth Using Data of Cluster RAPID Measurements, *PADEU*, 14, 25, 2004

Facskó, G., K. Kecskeméty, M. Tátrallyay and G. Erdős, Identification and Statistical Analysis of Hot Flow Anomalies Using Cluster Multi-Spacecraft Measurements, *PADEU*, 15, 93, 2005

Facskó, G., K. Kecskeméty and M. Tátrallyay, Hybrid Simulations of Hot Flow Anomalies in the Light of Cluster Measurements, *PADEU*, 17, 31, 2006b

Facskó, G., K. Kecskeméty, G. Erdős, M. Tátrallyay and I. Dandouras, Fast solar wind as the condition of forming hot flow anomalies, *AGU Fall Meeting Abstracts*, A373, 2006c