

Zárójelentés a T037844 sz. OTKA témapályázatról

A Föld plazmakörnyezetének háromdimenziós vizsgálata

Témavezető: Tátrallyay Mariella

A kutatási program tudományos technikai háttere

A Föld belső mágneses tere és a Napból származó töltött részecskeáram kölcsönhatásának eredménye a különböző plazmatartományokból álló földi magnetoszféra. Az egyes plazmarégiókat jellegzetes, helyenként éles határfelületek választják el egymástól. Ilyen határfelület pl. a Nap felőli oldalon a magnetopauza, amely mentén a földi mágneses tér nyomása egyensúlyt tart a napszél plazma időben változó nyomásával. A magnetopauza ideális esetben tangenciális diszkontinuitás, amely elválasztja a külső, közvetlenül a Napból áramló töltött részecskéket a belső, magnetoszférikus részecskéktől. A magnetoszféra nyugodt időszakban is nyitott a sarki kürtöknél és a Nappal ellentétes oldalon, a csóvában. A magnetopauza előtt a bolygóközi térben kialakuló lökéshullámnál (fejhullám) a szuperszónikus napszél szubszónikus lassul.

A különböző tartományokra jellemző plazmafizikai paraméterek (ionok, elektronok sűrűsége, hőmérséklete, sebessége) a Napból eredő lassú vagy hirtelen változások hatására jelentős időbeli változásokat mutatnak. Ugyancsak állandóan változik a plazmarégiókat elválasztó határfelületek helyzete, szerkezete. Egyetlen műholdon végzett mérések alapján az időbeli és térbeli változások nem választhatók szét. Az Európai Űrkutatási Ügynökség (ESA) Cluster missziója az űrkutatás történetében először tette lehetővé, hogy a földkörüli térség kisléptékű plazmafizikai struktúráit időbeli folyamatokban és három dimenzióban lehessen tanulmányozni négy, azonos műszerekkel ellátott, egymástól kis távolságban mozgó műhold mérései alapján.

A jelenleg is működő négy Cluster műhold 2000 nyarán került poláris földkörüli pályára, amelynek apogeuma 20, perigeuma 4 földesugár. 2001. február 1-én megkezdődött a rutin párhuzamos mérési időszak: eleinte korlátozott telemetria kapacitással, majd 2002. június 4. óta a négy szonda folyamatosan gyűjti az adatokat a pályák közel 100%-áról. A program támogatását az ESA 2009 végéig tervezi. A 4x11 berendezésből 41 működik, némelyek korlátozott mértékben. A szondák egymástól való távolságának 6 hónaponkénti változtatása (100 km és >10000 km között) különböző léptékű folyamatok tanulmányozását teszi lehetővé.

A KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet működteti (nem OTKA támogatással) a Magyar Adatközpontot, amely a pálya és egyéb kiegészítő adatokat szolgáltatja a Cluster Tudományos Adatrendszerbe és adatokat cserél a többi nemzeti adatközponttal, amelyek a tudományos berendezések adataiból plazmafizikai paramétereket számolnak. A Magyar Adatközpontban tárolt 4 másodperces adatsorokat a regisztrált társkutatókon kívül más magyar kutatók is használják a Cluster berendezések vezető kutatóinak engedélye alapján. Az adatok korlátozás nélküli használatát teszi majd lehetővé a program befejezése után a jelenleg közös fejlesztés alatt álló Cluster Aktív Archívum.

A Cluster szondák fedélzeti műszeregyüttese elektromos és mágneses terek, plazmahullámok és különböző energiájú töltött részecskék mérésére szolgál. A pályázatban résztvevő kutatók közül hárman tagjai a Cluster két tudományos kutatócsoportjának. Ők és velük együtt dolgozó kollégáik hozzájutottak a RAPID közepes energiájú töltött részecske spektrométer és az FGM magnetométer teljes időfelbontású adatsoraihoz is. Ezen kívül a CIS ionspektrométer adataiból a Magyar Adatközpontban tárolt 4 másodperces paramétereket használtuk kutatásainkhoz.

A kutatási program eredményei

A Cluster műholdak a magnetoszféra sok érdekes tartományán haladnak keresztül. A pályázat résztvevői korábbi tudományos tapasztalataik alapján a magnetopauzán kívüli, nappali oldali jelenségeket tanulmányozták a Cluster szondák, valamint az 1977-87 között hasonló földkörüli pályán adatokat gyűjtő ISEE-1/2 szondák mérései alapján. A szerződésben megadott kutatási tervben szerepelt a korábbi vizsgálatokban már használt, nagy időfelbontású mágneses tér adatokat megjelenítő és analizáló interaktív programrendszerünk fejlesztése. Ezenkívül a földkörüli plazmafizikai jelenségek tanulmányozása céljából elméleti vizsgálatokat is végeztünk.

1. Mágneses tér és töltött részecske adatok párhuzamos vizsgálata saját fejlesztésű interaktív szoftverrel

Jelentős mértékben fejlesztettük a korábban már használt (l. a T 020371. sz. OTKA téma zárójelentését), több szondán mért mágneses tér adatok párhuzamos megjelenítésére és vizsgálatára (minimum variancia analízis, frekvencia spektrum) alkalmas interaktív programrendszerünket. A fejlesztés eredményeként különböző szondák által mért különböző paraméterek (a mágneses téren kívül részecske fluxus, plazma sebesség, sűrűség, hőmérséklet, stb.) szabadon választható módon tölthetők be az egyszerre megnyitható maximálisan négy idősor ablakba. Az adatsorok egyidejűleg tanulmányozhatók és elcsúsztathatók egymáshoz képest, a korreláció, ill. fáziseltolódás vizsgálata céljából. A programrendszer elektronikusan dokumentált, amelyet a fejlesztéssel együtt frissítünk.

Többek közt a következő újabb funkciókkal bővítettük a programot: 1. a vektor komponensek (mágneses és elektromos tér, sebesség) különböző koordináta-rendszerekben ábrázolhatók, pl. a fejhullám és magnetopauza alakjához illő parabolikus rendszerben is; 2. háromdimenziós mágneses struktúrák sebessége számítható a négy Cluster szonda méréseiből; 3. CDF formájú adatfájlok (pl. Cluster műszerek, vagy más szondák adatközpontokból származó adatsorai) közvetlenül beilleszthetők a program adatkezelő rendszerébe; 4. lehetséges az interplanetáris referencia mágneses tér változások és a fejhullámon belüli lassabb napszélben végzett Cluster mérések közötti korreláció meghatározása az időskála változtatásával; 5. időfüggő dinamikus spektrum számítása és ábrázolása; 6. az adatbázisban levő adatokból további paraméterek (pl. konvekciós elektromos tér $E=v \times B$) számítása és ábrázolása; stb.

2. Vizsgálatok a bolygóközi térben: nagyenergiájú töltött részecskék terjedése, komplex mágneses strukturák

A bolygóközi mágneses tér jelentősen befolyásolja a nagyenergiájú töltött részecskék terjedését. Az erővonalakra merőleges terjedésben meghatározó szerepet játszik a kezdetben közeli erővonalak széttartásának mértéke. Kidolgoztunk egy olyan modellt a részecske terjedés leírására, amely az erővonal szeparációs modellektől függetlenül képes megjósolni a részecske mozgás bizonyos paramétereit. Vizsgálatunk eredménye szerint bármilyen kis mértékű olyan jelenség, amely a részecskék erővonalról szomszédos erővonalra történő mozgását eredményezi, képes elmosni a szeparációs modellek eltérő hatásait. Ilyen esetekben a teljes mozgás szükségszerűen diffúzió jellegű, függetlenül az erővonal szeparációs modell részleteitől. Meghatároztuk a részecske transzport diffúziós állandóját különböző szeparációs modellek alkalmazása esetén, és nagyon hasonló értékeket kaptunk. Ez az elméleti munka a Cluster szondákon mért mágneses tér és töltött részecske adatok értelmezéséhez kapcsolódik. (1 poszter, 1 referált cikk)

Elméleti vizsgálataink azt mutatták, hogy a napszél keveredése a plazmaáramlásba befagyott bolygóközi mágneses térben megmagyarázhat turbulencia- és hullám-jellegű tulajdonságokat egyaránt. Bizonyos régen ismert hullámszerű fluktuációk (az ún. 2D mágneses fluktuációk) közeli rokonságot mutatnak a keveredési strukturákkal. Számításaink szerint a keveredés jóval kisebb skálájú szerkezeteket is létrehoz, mint amilyen a keveredő mozgás skálája, ezek a szerkezetek ilyenkor jellemzően egymásra simuló síkok. A Cluster szondák egymástól távoli négy pontban végzett mágneses méréseit használtuk ezen strukturák vizsgálatára. Eredményeink valószínűsítik, hogy a plazma keveredés fontos szerepet játszik a mágneses tér fluktuációinak létrehozásában, ugyanis a véletlenszerűen kiválasztott mérési ablakok több, mint felében a mágneses tér az elméleti prognózisnak megfelelően egymásra simuló síkokból álló szerkezeteket alkotott. (1 poszter, 1 referált cikk)

3. Forró plazmával töltött mágneses üregek vizsgálata a fejhullám előtt

A Cluster szondák RAPID berendezése által mért közepes energiájú protonok fluxusának változását tanulmányoztuk az interplanetáris tartományban megfigyelt forró plazmával töltött mágneses üregek (Hot Flow Anomaly) környezetében, amelyek a Föld fejhulláma és a napszélben terjedő tangenciális diszkontinuitás kölcsönhatásának eredményeként jelennek meg és gyorsíthatják a töltött részecskéket. A 2002. április 2-án talált öt esemény vizsgálata alapján megállapítottuk, hogy a mágneses tér zavarokkal egyidejűleg fellépő hirtelen fluxusváltozások nem mindig hozhatók összefüggésbe a plazmaáram irányváltozásaival. (1 poszter) Közel 50 ilyen eseményt találtunk a 2003. február-április időszakban, amikor a szondák több ezer km távolságban voltak egymástól és a mágneses tér strukturák mozgása távolabbra (a fejhullámon belüli mágneses burokba is) követhető volt. Azt találtuk, hogy a felgyorsított protonok a forró mágneses üreg méreténél nagyobb térfogatot töltenek ki, különösen a fejhullám felőli oldalon. Két eseményt részletesen leírtunk (az egyikben észleltük a mágneses üreg áthaladását a fejhullámon) és meghatároztuk a tangenciális diszkontinuitás haladási irányát. (1 előadás, 1 referált cikk)

A továbbiakban a összes HFA esemény idején megvizsgáltuk az interplanetáris plazma paramétereket és megállapítottuk, hogy a napszél sebessége és a gyors magnetoszonikus hullámok sebességét jellemző Mach szám majdnem minden alkalommal nagyobb (gyakran sokkal nagyobb) volt az átlagos értéknél. Tehát a gyors plazmaáramlás előfeltétele a HFA esemény kialakulásának. További eredményeink megegyeznek a korábbi hibrid szimulációs modellszámításokkal, miszerint a HFA eseményeket kiváltó tangenciális diszkontinuitások normálisa mindig 45° -nál nagyobb szöget zár be a Nap-Föld iránnyal. (1 referált folyóirathoz benyújtott cikk, 2 poszter, 1 előadás)

4. A fejhullám és környezetének vizsgálata

Külföldi munkatársainkkal együtt új analitikus modellt fejlesztettünk ki a fejhullám helyzetének és alakjának az eddigieknél részletesebb vizsgálatára. A korábban publikált modellszámításokhoz képest előrelépés, hogy modellünk pontosabban veszi figyelembe a magnetopauza alakját, amelyet eddig csak az orrál mért görbületi sugárral jellemeztek. Számításokat végeztünk hengersizmetrikustól eltérő, különböző formájú felületekre, miközben a napszél áramlás legjellemzőbb paramétereit változtattuk. Eredményeinket más modellszámítások eredményeivel is összehasonlítottuk. A Cluster szondák adataival való összehasonlításra csak ezen pályázat lezárása után fog sor kerülni, amikor a pálya változása során a magnetopauza és a fejhullám orrához közel (kis zenitszögnél) is lesznek mérések, így mindkét határfelület helyzete nagyobb térbeli lefedettséggel határozható meg. (1 referált cikk)

Alacsonyfrekvenciájú (ULF) magnetohidrodinamikai hullámok tulajdonságait tanulmányoztuk egy, a Cluster szondákon többször áthaladó fejhullámfront előtti és mögötti tartományban miközben a bolygóközi mágneses tér iránya két alkalommal jelentősen megváltozott 2001. ápr. 3-án. A hullámok sebességét a mágneses tér adatokból határoztuk meg a négy szondán észlelt időkülönbségek alapján. Vizsgáltuk, hogy a ULF hullámok lökéshullámmá alakulhatnak-e. Megállapítottuk, hogy a legnagyobb hullámaktivitás idején a RAPID berendezés által mért közepes energiájú ionok fluxusa jelentősen megnőtt. (1 előadás).

5. Mirror típusú fluktuációk vizsgálata a mágneses burookban

A szerződésben megadott terv szerint tovább tanulmányoztuk a lineáris polarizációt mutató mirror típusú mágneses tér fluktuációkat az 1977-87 időszakban a földi magnetoszférát kutató ISEE-1/2 szondák mérései alapján. Ezen fluktuációkat leggyakrabban a mágneses burookban, a magnetopauza átlagos helyzetéhez közel észleltük, de nem fordultak elő nagyobb számban az esti oldalon, így forrásuk nem hozható kapcsolatba a kvázi-merőleges fejhullámmal, amely gyakrabban alakul ki ezen az oldalon. Megállapítottuk, hogy a fluktuációk átlagos amplitudója nagyobb a magnetopauza orránál, mint a Naptól távolabbi oldalszárnyakon. Kutatásainkat később kiterjesztettük a bolygóközi mágneses tér befolyásának tanulmányozására is. Más szondák által mért interplanetáris referencia adatok alapján megállapítottuk, hogy déli irányú mágneses tér esetén a fluktuációk gyakorisági eloszlásgörbéje a Földhöz közelebb

mutat maximumot, mint északi tér esetén. Ennek oka a magnetopauza eróziója az orránál. (1 előadás, 1 poszter, 1 referált cikk)

A korábbi munka folytatásaként más szondákról származó bolygóközi mágneses tér és plazma adatok alapján modellszámítással meghatároztuk a fejhullám és a magnetopauza pillanatnyi helyzetét és a fluktuációk észlelési helyének relatív távolságát ezen felületektől. Ez a vizsgálat is megerősítette, hogy a mirror típusú fluktuációk - kevés kivételtől eltekintve - a mágneses burookban, leggyakrabban közvetlenül a magnetopauza előtt (kis zenit szögnél a burok közepéhez közelebb) észlelhetők. Korábbi vizsgálatainktól eltérően azt találtuk, hogy a kvázi-merőleges fejhullám oldalán gyakrabban fordulnak elő mirror típusú hullámok. Megállapítottuk tehát, hogy a magnetopauzánál a plazmanyomásban kialakuló anizotrópián kívül a merőleges fejhullám mögött keletkező nyomás anizotrópia is hozzájárul ezen fluktuációk keltéséhez. (1 poszter, 1 referált cikk)

A Cluster műholdak mérései alapján vizsgáltuk a mirror típusú fluktuációk fejlődését a fejhullámtól a magnetopauzáig. Kiválasztottunk két pályát 2006. január-februárban, amikor a szondák egymástól több, mint 10000 km távolságban a mágneses burok különböző tartományaiban egyidejűleg észleltek mirror típusú mágneses tér fluktuációkat. A mirror típusú hullámok a plazmával együtt terjednek, miközben amplitudójuk a lineáris elmélet szerint exponenciálisan növekszik. Modellszámítással meghatároztuk a napszél áramlási idejét a fejhullámtól az észlelési pontokig. Két egymástól távoli szondán mért fluktuációk amplitudójának és a mirror hullámok terjedési idejének összehasonlításával meghatároztuk a hullámok növekedési rátáját, és a lineáris modellek által jósolt értéknél majdnem egy nagyságrenddel kisebb növekedést kaptunk. A két vizsgált eset azt bizonyította, hogy a mirror hullámok a kvázi-merőleges fejhullám mögötti tartományban keletkeztek, de a plazmaárammal a magnetopauza felé haladva amplitudójuk nem nőtt a lineáris elméletnek megfelelő mértékben. (2 előadás, 1 publikálásra váró cikk, a pozitív bírálatok alapján javított formában ismét benyújtva.)

További megjegyzések:

Ezen OTKA program lezárása után tovább folytatjuk a Cluster adatok vizsgálatával kapcsolatos kutatásainkat más forrásból származó támogatással, valamint további OTKA támogatás reményében.

A hazai Ionoszféra- Magnetoszféra szemináriumokon tartott 5 magyar nyelvű előadást, valamint fiatal kutatók részére rendezett szemináriumokon tartott 3 előadást nem tettük fel a publikációs listára, mivel az absztraktok nyilvánosan nem érhetőek el és az érintett témák elhangzottak nemzetközi konferenciákon is.