

*Energizált ionok viselkedésének és az ion-hullám kölcsönhatásnak a vizsgálata
a földi lökéshullám előtti térségben*

OTKA PD 78674 (2009-2014, 3 év + hosszabbítás)

Zárójelentés

Készítette: Kis Árpád

Bevezetés: a téma jelentősége, a projekt célja.

A Nap-Föld kölcsönhatás első állomása a földi magnetoszféra előtt kialakuló ún. fejhullám (bow shock). A fejhullám egy olyan -a Földhöz viszonyítva- álló helyzetű lökéshullám, amely a napszél nagy sebességű plazmájának lelassulása nyomán jön létre, a napszélnek a földi mágneses térrel való „ütközése” következtében. Mivel a napszél töltött részecskékből áll, ezen plazma számára a földi mágneses tér egy áthatolhatatlan akadályt képez. A lökéshullám előtti térség számos olyan fizikai folyamat színtere, amelyek alapvetően különféle részecske-hullám kölcsönhatás következtében jönnek létre. Az egyik legjelentősebb fizikai folyamat a fejhullámnak azon tulajdonsága, hogy képes a napszél alkotó ionokat és elektronokat igen hatékonyan magas energiákra gyorsítani (a gyorsítás mértéke protonok és alfa részecskék esetében akár két nagyságrend is lehet). Jelenlegi ismereteink szerint a világegyetemben számos helyen zajlik le hasonló gyorsítási folyamat (például szupernóva-robbanásoknál, a Naprendszer határán kialakuló lökéshullám – a termination shock- helyszínén, más bolygók környezetében, de lökéshullám kialakulhat csillagok körül is, a csillagközi térrel való kölcsönhatás következtében). Ennek következtében elmondható, hogy **az ütközésmentes plazmában kialakuló lökéshullám és az általa létrehozott gyorsítási mechanizmus univerzális jelenség, ezért vizsgálata nem csak a földi környezet megismerését segíti elő, de alapvetően hozzájárul az ismert Világegyetem fizikai folyamatainak jobb megértéséhez is.**

A földi fejhullám részecskegyorsítási folyamatait közel öt évtizede kutatják. A folyamat főbb jellemzői alapvetően ismertek, ugyanakkor a részleteket még nem sikerült teljesen tisztázni. A leghatékonyabb gyorsítási mechanizmus a fejhullám kvázi-párhuzamos oldalán játszódik le, ahol a bolygóközi mágneses tér iránya közel merőleges a fejhullám felületére (vagyis közel párhuzamos a felület normálisával, innen származik a név). Ez gyorsítási folyamat az elsőrendű Fermi-gyorsítás nevet viseli (first order Fermi acceleration). Elméleti megfontolások alapján azonban ismert, hogy gyorsítási folyamat megbízható és hatékony működéséhez több feltétel együttes megvalósulása szükséges. Ezek a feltételek a következők: az injektálás, az ionok szóródása mágneses hullámok által

és az ún. szökés feltétele. **A projekt célja az elsőrendű Fermi gyorsítás, illetve a hatékony működéséhez szükséges feltételek vizsgálata.**

Az ESA Cluster műholdas misszió által szolgáltatott adatokat használtam fel a projekt kutatásaihoz. A Cluster egy négy műholdból álló, közel tetraéder alakzatban repülő, azonos műszerezettségű műhold csoport, amely az állócsillagokhoz rögzített sarki (poláris) pályán kering a Föld körül. Az Cluster műholdak által végzett egyidejű mérések először nyújtanak alkalmat arra, hogy a plazmaparaméterek térbeli változását egyértelműen megkülönböztethessük azok időbeni fejlődésétől. A térbeli változásnak az időbeli változástól való megkülönböztetése alapvető fontosságú egy olyan turbulens, hullámok és részecskék által uralt térségben, mint a földi fejhullám előtti terület. (Megjegyzés: a projekt kezdete óta eltelt időszakban más, hasonló módon több műholdas űrmisszió is működési fázisba lépett, mint amilyen a THEMIS vagy az MMS. Ezen új missziók azonban elsősorban a földi magnetoszféra belső részeit vizsgálják, így a projekt céljaira még mindig a Cluster által nyújtott adatok a legalkalmasabbak). A vizsgálatokhoz a Cluster műholdak CIS-HIA és az FGM műszerek által nyújtott adatokat használtam elsősorban, amelyek az ion populációról (annak sűrűségéről, térbeli és energiák szerinti eloszlásáról) és a mágneses tér komponenseinek értékéről szolgáltatnak információkat nagy pontossággal. **A földi fejhullám az egyetlen olyan természetes űrplazma fizikai laboratórium, amellyel pontosan és részletesen, in-situ műholdas mérésekkel vizsgálhatók az elsőrendű Fermi gyorsítási mechanizmus alapvető feltételei és részletei.**

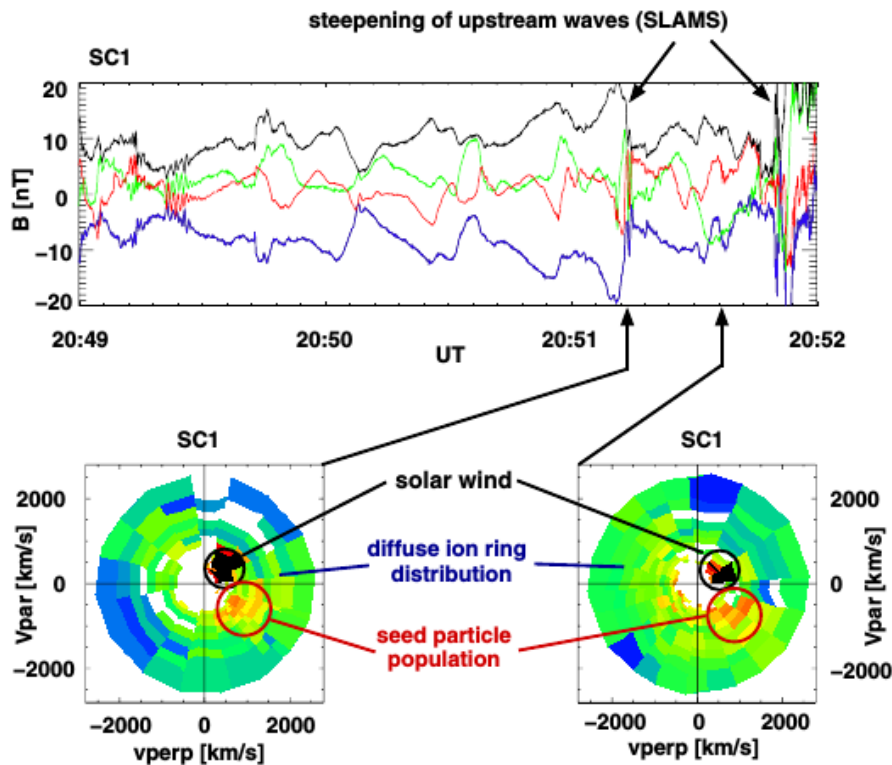
Az elsőrendű Fermi gyorsítás első feltétele: az injekció kérdése

Elméleti megfontolások szerint szükséges egy olyan ionpopuláció, az ún. mag-populáció (i. e., seed ion population) amelynek energiája egy kevéssel nagyobb, mint a napszél ionjainak az energiája. Ez azért szükséges, hogy ezek az ionok képesek legyenek áthaladva a fejhullám frontján visszafordulni a fejhullám előtti térségbe. A fejhullám frontján ugyanis egy potenciálgát található, amelyet csak olyan ion tud áttörni, amelyik a napszél ionjainál nagyobb energiával rendelkezik. A szükséges energiatöbblet valójában nem jelentős, mindössze 1-2 keV többletet igényel. Ez az első és az egyik legalapvetőbb feltétel. **Más szavakkal: ahhoz, hogy egyáltalán elkezdődjön az elsőrendű Fermi gyorsítás, eleve szükséges egy előgyorsítási mechanizmus, amelyik létrehozza az ún. mag populációt (seed population). Ez a folyamat az injekció (injection).**

Noha többféle mechanizmust is javasoltak elméleti megfontolások alapján, eddig még egyetlen olyan folyamatot sem sikerült megfigyelni, amelyik megnyugtató módon magyarázza az injekciós folyamatot, illetve bizonyítja a gyakorlatban is a létezését. Az egyik ismert (és sokak által

vitatott) elméleti eredmény Kuramitsu és Krasnoselkikh munkája, az ún. gyro-surfing acceleration (giro-szörfös gyorsítás). Ennek a gyorsítási folyamatnak a működését numerikus szimulációval bizonyították. A folyamat lényege a következő: egy Alfvén típusú hullám csapdázni tud olyan ionokat, amelyek rezonancia frekvenciája azonos (vagy közel azonos) az adott transzverzális hullám frekvenciájával. Ez még önmagában nem eredményez energianövekedést. Azonban ha egy külső erő jelenlétének hatására a csapdázott ionok megtarthatók abban a helyzetben, amelyben a hullám elektromos tere folytonosan gyorsítja az ionokat a transzverzális irányban, az eredmény a régóta keresett mag-ion populáció. Hasonlít a folyamat ahhoz, amikor egy szörfös folyamatosan egyensúlyozva a hullám egyik oldalán marad, és képes felgyorsítani magát egy bizonyos sebességre (innen ered a név is). Eredetileg az elméletben a külső erő, amelyik optimális pozícióban tartja a gyorsítandó ionokat, egy elektromos tér volt. **Vizsgálatunkban ezt a külső elektromos erőt helyettesítettük egy mágneses térrel, amelyik tulajdonképpen képes ugyanazt a feladatot ellátni, mint a feltételezett elektromos tér (vagyis az ún. „magnetic mirror force”).**

Vizsgálatunkban tehát olyan eseteket kerestünk a műholdas adatok rendszerében, amelynél egyszerre észlelhető a transzverzális hullám (amelyik képes csapdázni az ionokat) és van jelen egy szignifikáns nagyságú mágneses tér is. A több műholdas egyidejű mérések tették lehetővé azt, hogy a hullám és a mágneses struktúra kölcsönhatásának időbeli lefolyását is meg tudtuk figyelni. Ugyanakkor vizsgáltuk természetesen az ionok populációját és annak időbeli fejlődését is. Számtalan esetet vizsgáltunk meg, amíg rábukkantunk egy olyan esetre, amelyiknél egyértelműen kimutatható az, hogy a hullám és a mágneses struktúra kölcsönhatása valóban képes gyorsítani ionokat és létrehozni a mag populációt. Immár a jelenséget megfigyelve, a konkrét megfigyelésekből (plazma paraméterek értékeiből) kiindulva elméleti számításokat is végeztünk, vagyis validáltuk, igazoltuk az elméletet. Arra a meglepő következtetésre jutottunk, hogy ezen mechanizmus képes a napszél populációból származó ionok közvetlen gyorsítására, és ezáltal folyamatosan és zavartalanul képes létrehozni a további gyorsításhoz szükséges mag populációt. **Vizsgálatunk eredményeképpen elsőként bizonyítottuk és konkrét megfigyelésekkel támasztottuk alá egy olyan előgyorsítási mechanizmus létezését, amely biztosítja az elsőrendű Fermi gyorsítás számára a működéshez szükséges első és alapvető feltételt. Eredményeinket a nagy tekintélyű *Astrophysical Journal*-ban publikáltuk.**



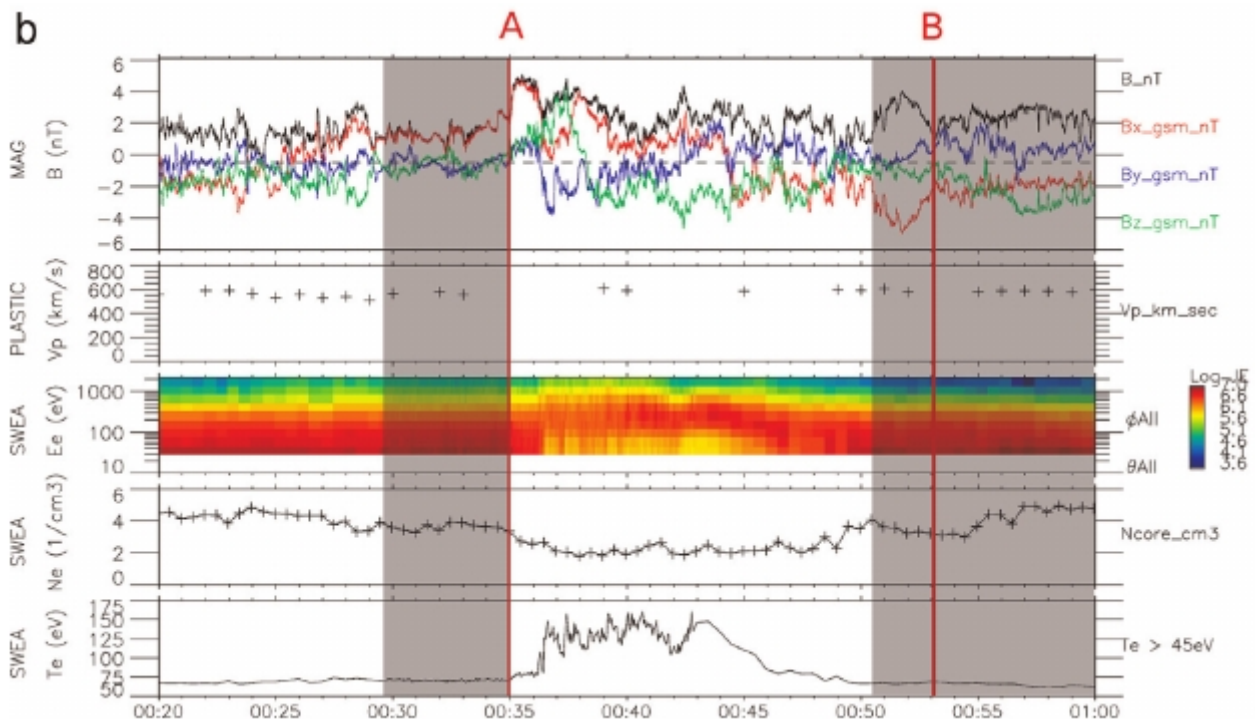
1. ábra: a képen a mágneses tér komponenseinek időbeli változása látható (fent) és a műhold által észlelt ioneloszlás (alsó panel). Jól látható, hogy azon a helyen, ahol a mágneses hullám kicsúcsosodik (SLAMS), megjelenik egy olyan koncentrált ionpopuláció (seed particle population), amelynek iránya ellentétes a napszél (solar wind) ionokkal, és sebessége kevéssel nagyobb, mint a napszél ionoké. Összevetve a fenti adatokat a többi műholdról származó adatokkal, levonható a következtetés, hogy bizonyos hullámok csapdázhatják a napszél ionokat, és ha ez egy SLAMS közelében történik, akkor az eredmény egy olyan koncentrált ionpopuláció megjelenése, amelyik már rendelkezik annyi energiával, hogy képes legyen áthaladni a lökéshullám frontján a napszél irányával ellentétes irányban. **Ezáltal ez az enyhén gyorsított ioncsoport minden tulajdonsággal rendelkezik ahhoz, hogy az injekció folyamatában vegyen részt, ami az elsőrendű Fermi gyorsítás első feltétele.**

A gyorsítási folyamatot befolyásoló mágneses struktúrák stabilitásának vizsgálata

A kvázi-párhuzamos lökéshullám előtti térség (foreshock) színtere a különféle hullám-részecske kölcsönhatásnak, mely kölcsönhatás eredményezi végső soron a részecskék gyorsítását is. Az elfogadott elmélet szerint egyrészt a gyorsított (energizált) ionok napszéllel való kölcsönhatása generálja a hullámokat, amelyek ugyanakkor a hullámokat létrehozó energizált ionok szóródását biztosítják. A két folyamat (hullámok generálása és az ionok szóródása) ennek következtében egy bonyolult, visszacsatolt rendszert képez; a kérdésnek a részletes tárgyalására egy másik publikáció ismertetése kapcsán kerül sor (lásd lentebb). Műholdas adatok alapján az is közismert, hogy nemcsak hullámok vannak jelen, hanem ún. mágneses struktúrák is. Ezen mágneses struktúrák mintegy „szigetként” vannak jelen, és a napszél konvekciója által mintegy belesodrónak a

lökéshullámba. Többféle névvel illetik ezeket a struktúrákat: LP (long pulsation), SLAMS (Short Large Amplitude Magnetic Structure), HFA (Hot Flow Anomaly), stb. Az előbbi részben tárgyaltuk a SLAMS szerepét, amely kölcsönhatása a megfelelő transzverzális hullámmal létrehozza a mag populációt; lásd fentebb. Ezen struktúrák keletkezésének mechanizmusa és időbeli-térbeli fejlődése nem képezte részét a kutatási tervnek, mert messze túlmutatna a projekt céljain. Ugyanakkor jelenlétük a lökéshullám előtti térségben számottevően befolyásolhatja a gyorsítási folyamatokat, ezért érdemesnek látszott ezt a jelenséget is érinteni.

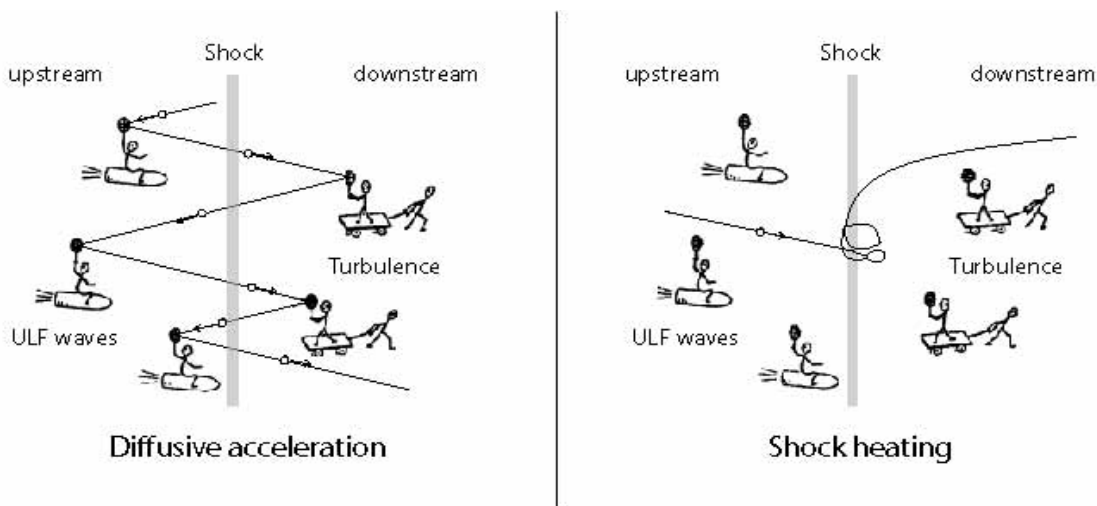
Vizsgálatunk tárgya egy HFA struktúra volt (ami tulajdonképpen egy mágneses buborék; jellemzésére most nem térünk ki), amelyet STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory) műhold észlelt, messze az éjszakai oldalon, 2007-ben. Az adatok egyértelműen egy HFA „maradékának” nyomaiként voltak értelmezhetőek. **Az eredmények azt sugallják, hogy egy HFA sokkal stabilabb struktúra, mint ahogy ezt eddig feltételezték, ugyanis 318 Re (vagyis 318 földugárnyi) távolságra a lökéshullámtól is észlelhető. Az eredményt a *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*-ben publikáltuk.**



2. ábra: A panelen a STEREO műhold által rögzített adatok láthatók, 2007 március 1., 00:35-00:50 között. Fentről lefelé sorrendben: a mágneses tér komponensei, a proton átlagsebesség, elektron energia spektrum, átlag elektron sűrűség és szupratermális elektron hőmérséklet (Opitz et al., 2010). A függőleges A és B vörös vonalak között látható a HFA „maradványa”. (JASTP cikk ábra)

Az ionok szóródásának vizsgálata és a diffúziós együttható meghatározása különböző napszél paraméterek esetén

A kutatási projekt egyik sarkalatos pontja az energizált (vagyis gyorsított) ionok szóródásának mechanizmusa a kvázi-párhuzamos lökeshullám előtti térségben. A szóródás tulajdonképpen azt jelenti ebben az esetben, hogy az energizált ionokat a mágneses hullámokkal való kölcsönhatás visszafordítja a lökeshullám felé, ezáltal képesek lesznek az elsőrendű Fermi gyorsítás által még magasabb energiákra szert tenni. Az elsőrendű Fermi gyorsítás tulajdonképpen egy nagyon egyszerű folyamat: a lökeshullám (vagyis a földi fejhullám) a határfelület egy nagy sebességű áramlási zóna (ez a napszél) és egy lelassított áramlási zóna (a lökeshullám mögött) között. Vagyis a két áramlási zóna, pontosabban az áramlási sebességek között jelentős különbség van. Egy adott ion úgy képes energiára szert tenni, hogy mindkét zóna képes a haladási irányát visszafordítani anélkül, hogy sebesség (vagyis energia) csökkenés jönne létre. A legegyszerűbben az egész folyamat úgy képzelhető el, mint egy tenisz játszma, amelyben az egyik játékos rohan a háló felé ütés közben, miközben a másik játékos hátrál, de hátrálása jóval kisebb sebességű, mint a másik játékos rohanása a háló felé. A labda szempontjából az ütközés során tökéletesen rugalmas ütközést feltételezve, a labda sebessége minden ütésváltás során növekszik, és a sebességnövekedés mértékét a két játékos egymáshoz viszonyított sebességkülönbsége adja meg. **Ez a különböző sebességű konvektív zónák közötti pingpong (vagy tenisz) játszma eredménye, az elsőrendű Fermi gyorsítás.**



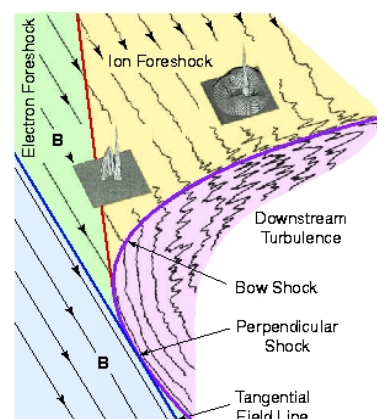
*Hoshino,
2001*

3. ábra: Az elsőrendű Fermi gyorsítási folyamat vázlatos képe: bal oldalt az egymás felé konvergáló áramlási zónák között létrejövő első rendű Fermi gyorsítás (vagy más néven: a diffúziós gyorsítási mechanizmus), a jobb oldalon a lökeshullámnál létrejövő termalizálás vagy fűtés (shock heating) jelenséget magyarázó sematikus ábra. A gyorsításhoz elengedhetetlen a szórás, vagyis az ionok visszafordítása a lökeshullám (jelen esetben: fejhullám) felé. A bal oldali ábrán jól látható, hogy a folyamat úgy kezdődik, hogy az ion visszafelé jön a lökeshullám felől, ami az előbbi részben tárgyalt injekció eredménye. **(eredeti ábra: Manfred Scholer)**

A konvekció ellenében zajló diffúziós folyamat eredménye a lökeshullám előtt a diffúzió ionok sűrűségének exponenciális profilja. Vagyis a lökeshullámtól való távolság függvényében az energizált ionok sűrűsége exponenciálisan csökken, ha a szóródás -vagyis a gyorsított ionok visszafordítása a lökeshullám felé- jól működik. Minél hatékonyabb a szóródás, annál meredekebb ez az exponenciális profil. Az exponenciális profil jellemzésére használjuk a karakterisztikus távolságot (e-folding distance). A karakterisztikus távolság az a távolság, amely alatt a gyorsított ionok sűrűsége $1/e$ -ad értékre csökken, ahol e az Euler szám, vagyis a természetes logaritmus alapja ($e=2.7182\dots$). A karakterisztikus távolságból egyszerűen számolható a diffúziós koefficiens, ami tulajdonképpen magát a diffúziós transzport folyamatot jellemző fizikai mennyiség. **Minél hatékonyabb a szóródás, annál kisebb a karakterisztikus távolság és a diffúziós koefficiens értéke, vagyis annál hatékonyabb a gyorsítás is.**

Az irodalomban megtalálható vizsgálatok javarészt statisztikai adatokra támaszkodtak a múltban. **Az első közvetlen, több műhold egyidejű adatainak a felhasználásával meghatározott karakterisztikus távolság és diffúziós koefficiens meghatározás Kis et al., 2004 cikkéhez fűződik.** Az említett cikkben kidolgozott módszerekre alapozva és azokat továbbfejlesztve, a jelen vizsgálathoz több egyedi eseményt vizsgáltam meg és hasonlítottam össze, különféle napszél paraméterek és geometriai tulajdonságok esetén. A műholdak által rögzített mérések 2003 téli időszakából valók. Ennek oka az, hogy a Cluster műholdak ekkor voltak kedvező mérési helyzetben és konfigurációban, miközben a közöttük levő távolság 1-1.5 földugár volt. Ez utóbbi feltétel alapvető fontosságú volt ahhoz, hogy az exponenciális sűrűségprofil mentén szignifikáns, az esetleges statisztikai hibát számottevően meghaladó gradiens értékeket tudjunk mérni.

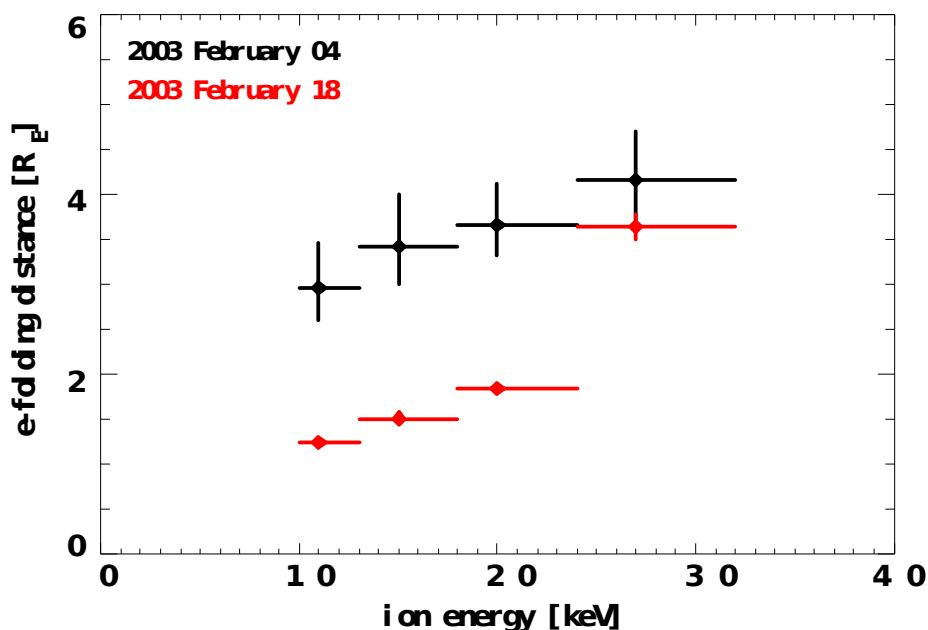
Az eredmények ismertetése előtt feltétlenül meg kell említeni egy másik ionpopulációt, amelynek forrása a fejhullám kvázi-merőleges oldalán található. Ez az ionsoport egy nyalábszerű, erősen koncentrált eloszlást mutat és ismereteink szerint olyan napszél ionokból áll, amelyek visszaverődtek a fejhullám felületéről (a szakirodalomban „specularly reflected ion-nak” említik ezen ionokat) és sebességük nagyjából kétszerese a napszél ionok sebességéhez viszonyítva. Ezen ionok a lökeshullámtól távolodva mozognak (tulajdonképpen a napszéllel szemben), a mágneses erővonalak mentén (4. ábra, piros vonallal jelölt az ionnyaláb), nevük Field Aligned Beam, röviden FAB. Ezt az ionsoportot régóta vizsgálják, de mivel ez a kvázi-merőleges oldalon keletkezik, a diffúzió ionoktól elkülönülő csoportnak tartották. Az eddig feltételezett kapcsolat az volt, hogy azt gondolták, hogy a FAB ionok valahogy eljuthatnak a fejhullámhoz és akkor (révén hogy kicsivel



4. ábra: a lökeshullám és a lökeshullám előtti térség sematikus ábrája (A. Balogh). Jól megfigyelhetők a fontos részek: fejhullám (lila), kvázi-párhuzamos rész (sárga) és a visszavert ionsugár (FAB, piros).

nagyobb az energiájuk, mint a napszél ionoké) esetleg a korábban már tárgyalt mag populációt alkothatják. Ezt a feltételezést konkrét bizonyítékokkal cáfolták. **(A FAB ionok viselkedését, időbeni fejlődését és szóródását Kis et al., 2007 tárgyalja részletesen a cikkében.)**

A megvizsgált esetek -meglepő módon- arra engedtek következtetni, hogy a diffúz ionok szóródása (és ezáltal a diffúziós koefficiens értéke) erős ingadozást mutat a különböző eseteknél. Ez azért meglepő, mert az elmélet szerint a diffúziós koefficiens értéke független a napszél sebességétől és -elvileg- mivel ugyanazt a folyamatot írja le, az elméletből az következik, hogy az értéke várhatóan ugyanaz minden esetben. Az adatok azonban mást mutattak, ezért alaposan megvizsgáltuk az eltérés lehetséges okait, úgy mint geometriai viszonyok, mágneses tér irányának változása, stb. Kiderült, hogy abban az esetben, amikor a szokásostól eltérően alacsony (vagyis az irodalmi értékeknél szignifikánsan kisebb) karakterisztikus távolságot határoztunk meg, akkor jelen volt egy, a szokásosnál erősebb FAB. A vizsgálat kiderítette, hogy ez a jelen lévő FAB hullámokat generált, és a generált hullámokat a napszél konvekciója beszállította mélyen a kvázi-párhuzamos lökéshullám elé, ahol kölcsönhatásba léptek a diffúz ionokkal, ezáltal jelentősen javítva a szóródás hatékonyságát, és ezzel javítva az elsőrendű Fermi gyorsítás hatékonyságát is. Eredményeinket publikálni akartuk a Journal of Geophysical Research folyóiratban, azonban az egyik bíráló egyszerűen nem hitte el, hogy ez a jelenség létezik (a másik bíráló publikálásra javasolta a cikket). Ezért a cikket visszavontam, és kiterjesztettem a kutatást a numerikus modellezésre. Japán kutatókkal együttműködve, sikerült a jelenséget minden kétséget kizáróan bizonyítani szimulációk által is. A szimuláció eredménye pontosan egyezik azzal, amit közvetlenül az adatok vizsgálatával kaptam. A kéziratok elkészültek, és két cikket nyújtunk be, mintegy cikksorozatként 2017. május hónapban (a japán közös cikk elkészítésére vártam eddig). A cikksorozat részletesen bemutatja a jelenséget, és tárgyalja a szimulációval kapott eredményeket összehasonlítva az adatokon alapuló eredményekkel. **A cikksorozat (mindkettőben említésre kerül a projekt támogatása) az első a világon, amelyik ismerteti a FAB által keltett hullámok hatását az elsőrendű Fermi gyorsítási folyamat hatékonyságára. A cikkeket az Astrophysical Journal-hoz nyújtjuk be.**



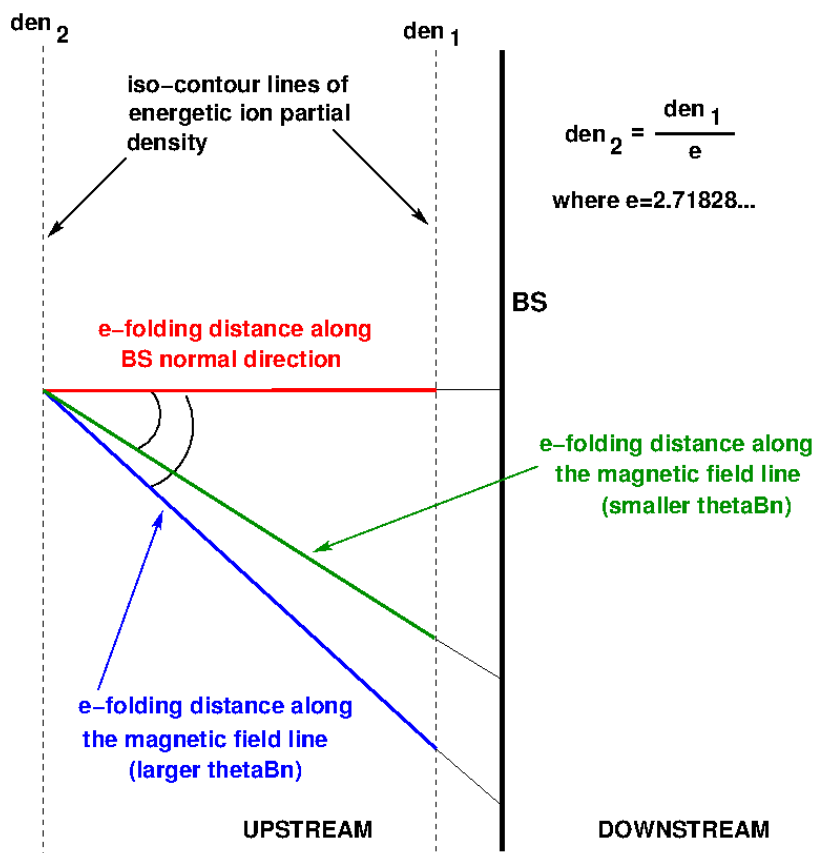
5. ábra: a grafikon a karakterisztikus távolságokat mutatja be az ion energiák függvényében két kiválasztott eseményre, a 2003 február 4.-i (fekete színnel jelölve) és a 2003 február 18.-i (vörös színnel jelölve) eseményre. Mindkét esemény alkalmából a napszél sebesség és sűrűség közel azonos, mégis szignifikáns különbség mutatkozik a karakterisztikus távolságok értékeiben. A február 18.-i esemény alkalmával azonban egy markáns FAB jelenléte volt észlelhető. Az eredmény azt bizonyítja, hogy a FAB által keltett hullámok beavatkoznak a szóródási folyamatba, és ez okozza a jelentős karakterisztikus távolság csökkenést. **(Részlet a benyújtandó cikkből)**

A szóródás tulajdonságainak vizsgálata a geometriai irányok függvényében

Az elsőrendű Fermi gyorsítási folyamat elmélete a múlt század hatvanas éveiben született, és ez elmélet a mai napig alapja a kutatásoknak, számottevő változás nem történt azóta az elméletben. Az elmélet azonban egy egyszerűsített helyzetet tárgyal, amikor a mágneses tér iránya egybeesik a fejhullám normálisának irányával. Vizsgálatomban arra kerestem a választ, hogy milyen következménye van annak, ha az előbb említett két irány nem egyezik meg. A vizsgálat aktualitását az adja, hogy a korábbi vizsgálatok szinte kizárólag a mágneses tér irányával párhuzamosan vizsgálták a diffúz ionok szóródását és határozták meg a karakterisztikus távolságot, arra alapozva, hogy mivel a hullámok közel párhuzamos irányban terjednek a mágneses térrel, ezért feltételezhető, hogy ez az irány a szóródás domináns iránya is. Ez a „hallgatólagos diszkrépancia” az elmélet és a műholdas adatok (pontosabban: a műholddal észlelhető esetek) között határozta meg az elmúlt évtizedekben a kutatási irányt. Ugyanis a fejhullám normálisa és a mágneses tér iránya a legritkább esetben mutat azonos irányba. A vizsgálatokhoz továbbra is a Cluster műholdak által

mért adatokat használtam fel, az előbbi részekben ismertetett feltételekkel. Összegyűjtöttem a kutatáshoz alkalmas eseményeket, és meghatároztam a karakterisztikus távolságokat különféle ion energiák esetén egyrészt a mágneses tér irányában, másrészt a fejhullám normálisának irányában. A vizsgálathoz szükséges volt egy olyan dinamikus fejhullám modell megalkotása, amely képes meghatározni a műhold fejhullámtól való távolságát a mágneses erővonal, illetve a fejhullám normálisának irányában is. **A kidolgozott módszer igen pontosan képes meghatározni a műhold fejhullámtól való távolságát a két irány mentén és egyedülálló a világon, egyelőre ezt a módszert senki más nem alkalmazza. A módszer részletes leírása a rövidesen megjelenő cikk részét képezi.**

Az eredmények az mutatják, hogy -igen meglepő módon- a fejhullám normálisának irányában meghatározott karakterisztikus távolság (és az ebből származtatott diffúziós együttható) teljesen érzéketlen a mágneses tér irányára, és a diffúziós folyamat leírására ez a mennyiség használható a legjobban. Az is kiderült, hogy a mágneses tér irányában meghatározott karakterisztikus távolság csupán egy, a geometriai faktor által modulált mennyiség. Más szavakkal: a fejhullám normálisának irányában meghatározott karakterisztikus távolság a legfontosabb mennyiség, és kapcsolata a mágneses tér irányában meghatározott karakterisztikus távolsággal egy egyszerű trigonometriai összefüggéssel határozható meg. A cikk vázlata elkészült, jelenleg az együttműködő német kutatók megjegyzéseire és beleegyezésére várok, terveim szerint 2017 júniusában a cikket publikálásra benyújtom. **A cikk a Journal of Geophysical Research szaklapban fog megjelenni.**



6. ábra: a sematikus ábra szemlélteti a mágneses irányban meghatározott karakterisztikus távolság relációját a fejhullám irányában meghatározott karakterisztikus távolsággal. Egyértelműen látható, hogy az reláció leírható egy egyszerű trigonometriai összefüggéssel. (részlet a 2016 AGU Fall Meeting poszter előadásból)

Az elsőrendű Fermi gyorsítás harmadik feltétele: az energizált ionok szabadulásának vizsgálata

Az iongyorsítás egyik sarkalatos kérdése az ionoknak a gyorsítási rendszerből való kiszabadulása. Amint említettem, ez magyarázza az exponenciális sűrűségprofil. Két magyarázat ismert. Az egyik alapján a gyorsított ionok egy határvonal elérésével elhagyhatják a rendszert (ez az ún, free-escape boundary). Elméleti megfontolások alapján elképzelhető egy olyan mechanizmus is, amelynek alapján a gyorsított ionok a mágneses erővonalakra merőlegesen hagyják el a rendszert (ez az ún, cross-field diffusion). Vizsgálódásaim alapján arra jutottam, hogy létezhet egy harmadik lehetőség is. Egyre nagyobb energiával rendelkező diffúz ionokat megfigyelve azt tapasztaltam, hogy egy bizonyos energiaszint felett az exponenciális sűrűségprofil kisimul, és gyakorlatilag vízszintessé válik. Ez azt jelenti, hogy azok az ionok, amelyek elérnek egy bizonyos energiaszintet, már nem szóródnak a hullámokkal való kölcsönhatás nyomán, és szabadon elhagyják a területet. **Vagyis nem egy fizikai határvonal létezik, hanem inkább egy olyan energiafilter, amely meghatározza azt a maximális energiát, amelyre a diffúz ionok gyorsíthatók. Ez egyelőre csak hipotézis, és további komoly vizsgálatot igényel, de az irányvonal nagyon ígéretesnek tűnik.**

Összefoglalás

A projekt megvalósítása lefedi mindazokat a kérdéseket, amelyek megfogalmazódtak a kutatási tervben. A kutatás eredményeit eddig két már megjelent szakcikkben ismerttettem (1 db. Astrophysical Journal és 1 db. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics cikk), továbbá három rövidesen benyújtásra kerülő cikkben fogom publikálni (2 db. Astrophysical Journal és 1 db. Journal of Geophysical Research cikk). A projekt megvalósítása tehát legalább 5 igen rangos szak-folyóiratban megjelent, illetve rövidesen megjelenő cikket eredményezett. Ugyanakkor további kutatási projektek is várhatóak (a japán kutatók már jelezték szándékukat a további együttműködésre).

Irodalomjegyzék

Balogh, A., et al. (2001), The Cluster Magnetic Field Investigation: overview of in-flight performance and initial results, **Annales Geophysicae**, 19, 1207-1217, doi: 10.5194/angeo-19-1207-2001.

G Facskó, A Opitz, B Lavraud, J G Luhmann, C T Russell, J-A Sauvaud, A Fedorov, **A Kis**, V. Wetztergom, Hot flow anomaly remnant in the far geotail?
JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS 124: pp. 39-43.2015)

Kis, A., et al. (2004), Multi-spacecraft observations of diffuse ions upstream of Earth's bow shock, **Geophys. Res. Lett.**, 31, L20801, doi:10.1029/2004GL020759.

Kis, A., M. Scholer, B. Klecker, H. Kucharek, E. A. Lucek and H. R`eme (2007), Scattering of field-aligned beam ions upstream of Earth's bow shock, **Annales Geophysicae**, 25, 785-799, doi:10.5194/angeo-25-785-2007.

Kronberg, E. A., **A. Kis**, B. Klecker, P. W. Daly, and E. A. Lucek (2009), Multipoint observations of ions in the 30-160 keV energy range upstream of the Earth's bow shock, **J. Geophys. Res.**, 114, A03211, doi:10.1029/2008JA013754.

A. Kis, O. Agapitov, V. Krasnoselskikh, Yuri V. Khotyaintsev, I. Dandouras, and E. A. Lucek Gyro-Surfing Acceleration of Ions in Front of the Earth's Quasi-Parallel Bow Shock
ASTROPHYSICAL JOURNAL (APJ), 771, 4.) doi:10.1088/0004-637X/771/1/4

Kuramitsu, Y., & Krasnoselskikh, V. 2005a, **PhRvL**, 94, 031102