

Válasz
Erdélyi Róbert opponens
kérdéseire

Köszönöm Erdélyi Róbert opponens hasznos észrevételeit, tanulságos kritikáit. A részletes bírálat 15 pontja közül válaszaim azokra, amelyek kérdéseket tartalmaznak, a következők:

1. A bevezetésben a 8. oldalon a kifogásolt mondat valóban helytelen, helyette a következőt lehetett volna írni: „Az elkövetkező évek egyik izgalmas feladata annak megállapítása, a helioszféra milyen tulajdonságai azok, amelyek a legutolsó napsziklus rendhagyó viselkedésének következményei”.

3. A $v_A = B/(4\pi\rho)^{1/2}$ Alfvén sebesség a Naptól való R távolsággal csökken, kezdetben $R^{\square 1}$ szerint, mert a radiális mágneses tér is és a plazmasűrűség is $R^{\square 2}$ szerint változik. Távolabb konstans értékhez közelít, mert az azimutális tér válik dominánssá, amely $R^{\square 1}$ szerint változik. Ugyanakkor a napszélsebesség közel állandó, tehát az Alfvén Mach-szám, M_A növekszik a távolsággal, majd konstans értékhez tart. A disszertáció 2.1 táblázata szerint M_A tipikus értéke a Föld-pályánál nagyságrendileg 10, tehát a plazma már bőven szuper-Alfvénikus. (Az $M_A=1$ Alfvén pont a Naphoz közel, néhány Nap-sugár távolságban található.) Hasonlóan, a plazma- β értéke sem csekély, így a külső hatások a helioszféra belsejébe MHD hullámokkal nehezen tudnak terjedni.

4. A nem saját készítésű ábrák forrásmegjelölése valóban hiányos, és a meglévő esetekben is általában csak a szövegben található a hivatkozás. Célszerűbb lett volna az ábrák feliratában egységesen megadni a hivatkozásokat, ezzel egyértelművé vált volna, hogy melyek a nem saját készítésű ábrák.

6. Az Ulysses szondával megfigyelt mágneses szektorok és a Wilcox Solar Observatory forrástér-térképeinek kvantitatív összehasonlítása az első cikkemben szerepel (korrelációs koefficiens 77% volt), a későbbiekben a számítás közlése elmaradt. Valóban érdemes lenne ezt a problémát tovább vizsgálni, például a forrástér-modellek paramétereit az Ulysses megfigyelésekkel való legjobb korreláció alapján lehetne hangolni.

7. A lassú napszélben általában minden paraméternek nagyobb a szórása, mint a gyors napszélben. Például az 1 MeV-es protonok ütközés szabad úthosszát bemutató 5.6 ábrán is látszik az értékek nagyobb szórása a lassú napszélben (kék vonalak), mint a gyors napszélben (piros vonalak). Hasonló a helyzet fluktuációk spektrális kitevőjével (5.7 ábra) és a diszkontinuitások gyakoriságával is (5.9 ábra).

A mágneses fluxus értékeinek szórása a lassú napszélben tranziens jelenségeknek lehet például a következménye. Ezeknél a lassú napszélre jellemző eseményeknél a napszél radiális áramlása sérülhet. A tranziensek közül a legnagyobb fluktuációt a koronaanyag-kilökődések okozhatnak, amelyeket mágneses felhők kísérnek. Ezekben a felhőkben a mágneses fluxus értéke nagyon eltérő lehet, attól függően, hogy a mérőszonda éppen a felhő melyik részén halad keresztül. Problémát jelenthet az is, hogy a lassú napszélben a mágneses tér azimutális komponense nagyobb. Ez elvben nem lenne zavaró mert a fluxushoz csak a radiális tér ad járulékot, de az átlagos Parker-spirális térre ráakadó hullámok miatt a nagyobb térerősség a radiális komponensben is nagyobb fluktuációt adhat. Mindezek a lehetőségek azonban nem magyarázzák azt, hogy a lassú napszélben miért nem látszik a mágneses fluxus bimodális jellege. A napszél terjedésével járó jelenségek ugyanis csak az eloszlásfüggvény kiszélesítését

okozzák. Ezért nem zárható ki annak lehetősége, hogy a lassú napszél keletkezési mechanizmusa is közrejátszik a mágneses fluxus eltérő viselkedéséhez.

8. A zárt erővonalak közötti nyílt erővonalak kiterjedése a koronába valóban a legkézenfekvőbb lehetőség a lassú napszél modellezésekor. Azonban az alsó koronában még nem teljesül az erővonalak befagyása a plazmába, ezért az erővonalak diffúziója is szerepet játszhat. A helyzetet komplikálhatja az is, hogy egyes szerzők szerint a látványos napkitörések idején létrejövő, nagy térre kiterjedő erővonal-átkötődések mellett létezhetnek lényegesen kisebb, de szinte folyamatos gyakorisággal lejátszódó erővonal-átkötődések is. Továbbá, ha a lassú napszél csak a zárt erővonal-hurkok közötti nyílt erővonalakból származna, akkor esetleg problémát okozhat a napfelszín differenciális rotációja, amely a helioszféra mágneses tér adataiban nem látszik egyértelműen, illetve az áramlepel olyan mértékű torzulására is vezethetne, amely topológiai problémát is felvetne.

10. A mágneses szektorok eltűnése nem globális jelenség, hanem egy adott heliografikus szélességre vonatkozik, a szektorok eltűnését az Ulysses pályájával összefüggésben kell vizsgálnunk. A kérdéses időszakban az Ulysses déli irányban mozgott, míg az áramlepel (HCS) „hullámvölgye” északi irányban mozgott, mert a napciklus leszálló ágban a hullámosság az idővel csökken. A két ellentétes mozgás vezetett a szektorok elvesztéséhez. A szektorok fél évek korábbi eltűnése a vártnál fizikailag azt jelenti, hogy a HCS hullámossága az Ulysses mérések szerint 10° -kal kisebb volt, mint a forrástér modellben a két polaritást elválasztó semleges vonal hullámossága. Az eltérés legvalószínűbb magyarázata a napszél szuper-radiális expanziója lehet (disszertáció 60. oldal utolsó bekezdésétől az alfejezet végéig). A napfolt-minimumra jellemző nagy sarki koronalyukból származó erősebb mágneses tér az alsó koronában szétterül az egyenlítő felé, ez a szuper-radiális expanzió nagyságrendileg $10 R_s$ (Nap-sugár) távolságig várható. Az Ulysses a szétterült plazmából származó mágneses teret észleli, tehát a HCS hullámosságát kisebbnek észleli, mint amilyen a Naphoz közelebbi ($2,5 R_s$) forrástér semleges vonalának hullámossága.

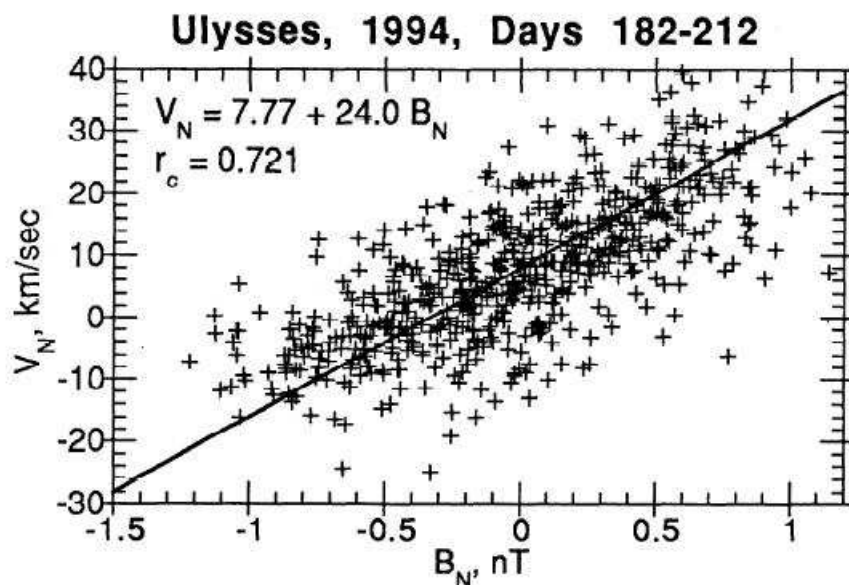
11. A 22-ik és 23-ik napciklus leszálló ágában, 1993-ban és 2005-ben megfigyelt mágneses szektorok különbsége a következő volt: a 22-ik ciklusban 2 szektor volt, amelyek az egyenlítőnél lassabban forogtak, a 23-ik ciklusban 4 szektor volt, amelyek az egyenlítővel együtt forogtak. A 22-ik ciklusban a HCS 10° -kal kevésbé volt hullámos, mint a forrástér semleges vonala (lásd az előző pontra adott válasz), a 23-ik ciklusban az egyezés megfelelő volt. Ezek a különbségek egy koherens képpé álnak össze, ha figyelembe vesszük, hogy a 23-ik ciklusban a sarki koronalyukakból származó mágneses fluxus mintegy 30%-kal kisebb volt, mint a 22-ik ciklusban. A kisebb sarki mágneses tér miatt a 23-ik ciklusban a napszél szuper-radiális expanziója nem volt jelentős, ennek tulajdonítható az Ulysses mérés jó egyezése a forrástér modellel. A 23-ik ciklusban a kisebb sarki mágneses fluxus miatt az egyenlítői koronalyukakból származó mágneses tér szerepe megnőtt a dipól-térhez képest, ezért alakulhatott ki a 4 szektoros elrendeződés, amelyek egyenlítői forgása is magyarázatot nyer, mert az a koronalyukakra jellemző forgási ráta.

Az alapvető kérdés tehát, hogy miért volt a mágneses fluxus lényegesen kisebb a 23-ik ciklusban? Erre a kérdésre a választ valóban jó lenne tudni, mert elvezethet a napciklus hosszútávú változásainak megértéséhez.

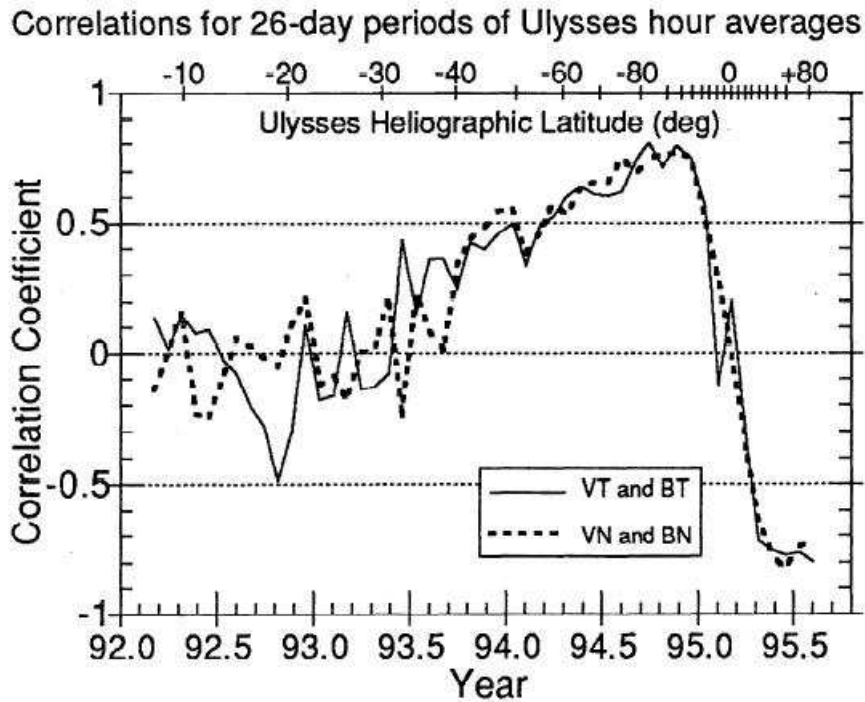
13. Az áramlepel (HCS) azonos irányú (déli) elmozdulása a két egymást követő napciklusban meglepő eredmény. Mivel az északi és déli félteke ellentétes polaritású mágneses fluxusának azonosnak kell lennie, a déli félteke kisebb térszöge miatt a déli mágneses tér átlagos

nagyságának nagyobbak kell lennie, mint az északinak. Kézenfekvőnek látszik a feltételezés, hogy az észak-déli aszimmetriát a dinamó aszimmetriája okozza. Ezt alátámasztani látszik az északi és déli koronalyuk méretének és hőmérsékletének megfigyelt különbsége (Zhang et al., The Sun at solar minimum: North-south asymmetry of the polar coronal holes, Geophys. Res. Lett., 29, 1236, 2002). Másik lehetőség, hogy a koronában van az aszimmetria. Wang (Nonradial coronal streamers, Astrophys. J. 456, L119-L121, 1996) cikkében nem-radiális korona-sugarak felfedezéséről ír, ami szintén hatással lehet a HCS eltolódására. A fenti lehetőségek csak spekuláció szintjén mozognak, a HCS aszimmetrikus elhelyezkedésére egyelőre nincs megnyugtató magyarázat. A lehetőségek szűkítéséhez segítséget jelentene további észak-déli aszimmetriára utaló jelenségek felfedezése.

14. A helioszférikus mágneses erővonalak spirál-szöge eloszlásának magyarázatához rendkívül kis frekvenciájú (mHz-nél kisebb) hullámokra van szükség, hiszen az eloszlásfüggvények számításakor a térerősségvektorok legalább 1 órák átlagait használtam. Másik megszorítás, hogy olyan hullámokat feltételeztem, amelyeknél a mágneses tér a radiális irányra merőleges síkban fluktuál. Ilyen hullámok, különösen a pólusok közelében, valóban létezhetnek az erővonalak talppontjának a szupergranulákkal való együttmozgása miatt (Jokipii and Kóta, The polar heliospheric magnetic field, Geophys. Res. Lett. 16, 1-4, 1989). A hullámok Alfven-hullámokkal való azonosítása a spirálszög-eloszlások magyarázata szempontjából tulajdonképpen lényegtelen. Az Alfven-hullámokra való hivatkozásra az ad alapot, hogy a kérdéses frekvenciatartományban az Alfven-hullámok dominanciáját számos megfigyelés támasztja alá. Például a disszertáció 5.1 és 5.2 ábráján „szabad szemmel” is látható a korreláció vagy antikorreláció a mágneses térerősségvektor komponensei és a napszélesség-vektor megfelelő komponensei között, ami az Alfven-hullámok sajátja. Kvantitatív analízis található Smith et al (Ulysses observations of Alfven waves in the southern and northern solar hemispheres, Geophys. Res. Lett. 22, 3381-3384, 1995) munkájában (1. és 2. ábra).



1. ábra. A mágneses tér és a napszélesség N komponenseinek szórásdiagramja.



2. ábra. A mágneses tér és napszélsebesség radiális irányra merőleges komponenseinek (T és N) korrelációs koefficiense.

15. A megfigyelések szerint a szakadási felületek gyakorisága csökken a Naptól mért távolsággal. Ez viszonylag jól érthető, mert a napszél turbulenciája miatt a szakadásokban a paraméterek gradiense idővel kisimul, a diszkontinuitások idővel elbomlanak. A szakadási felületek keletkezésének helye nem egyértelmű, de a gyakoriság távolságfüggése arra enged következtetni, hogy a Nap közelében keletkeznek. A gyors és lassú napszél-plazma szinte minden paramétere különböző, ezért nyilván a kétféle napszél keletkezési mechanizmusa is eltérő. Ha a szakadási felületek a napszéllel együtt keletkeznek, úgy érthető, hogy a gyakoriságuk is eltérő. Ennél többet azonban nem tudunk mondani. Nemcsak a napszél modellezése problematikus, hanem a szakadási felületek keletkezéséről is keveset tudunk, sőt, a típusuk azonosítása (rotációs vagy tangenciális) is vita tárgyát képezi.

Budapest, 2010. december 7.

Erdős Géza