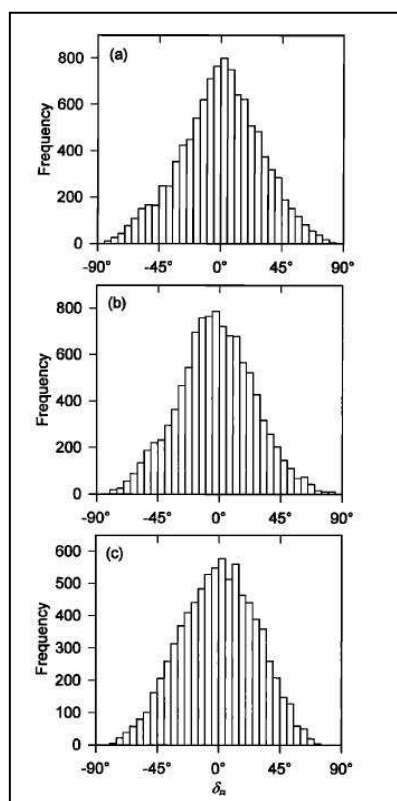


Válasz
Dr. Petrovay Kristóf opponens
kérdéseire

Köszönöm Petrovay Kristóf opponens hasznos tanácsait, észrevételeit. A főnév jelzőként való használatával kapcsolatos helyesírási szabályt valóban nem jól alkalmaztam, a tanulságot levontam belőle. Hasonlóan egyetértek a megjegyzésekben felsorolt észrevételekkel is.

A konkrét kérdésekre a válaszaim a következők:

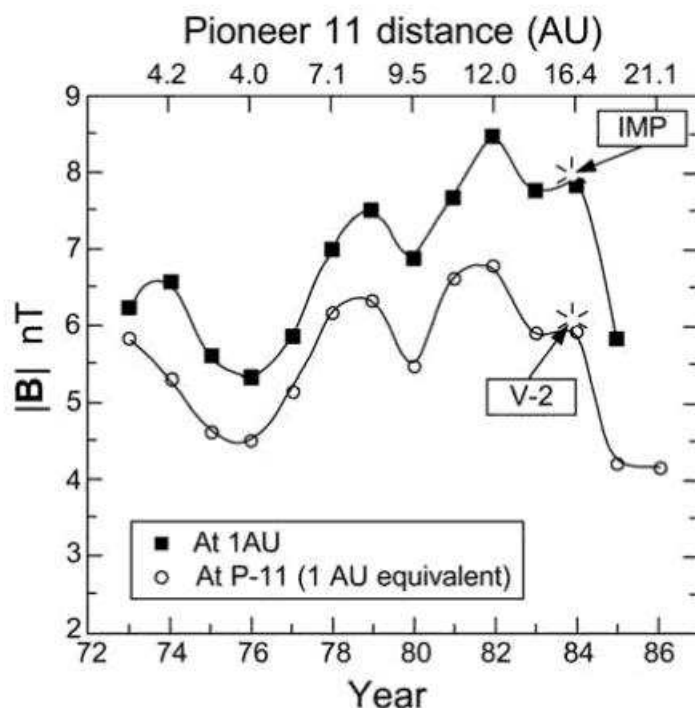
1. A mágneses fluxus 4.13 ábrán bemutatott vizsgálatakor a szonda pályamozgásából adódó nyilvánvaló hatásokra korrekciót kell végezni. Ez a disszertáció 2.14 egyenlete alapján történt, amely feltételezi, hogy a mágneses erővonalak jól egyeznek a Parker-spirálissal. A 2.14 egyenlet valóban sérülhet a napszél nem-radiális áramlása miatt a lassú napszélben, de ez a sérülés a Naphoz közeli tartományokra jellemző, mert ott a mágneses tér nyomása a domináns. Kifelé haladva azonban a plazma nyomása válik dominánssá (például 1 AU távolságban), emiatt az áramlás már közel radiálissá válik, amit általában néhány fokos pontossággal a plazmasebesség-mérések is megerősítenek. A mágneses tér méréseinek is mutatniuk kellene a napszélnek a radiális áramlástól való eltérését, ami a Parker-spirálisról való eltérésben jelentkezne. Ezzel a problémával a disszertáció is foglalkozik (5. tétel). A Forsyth et al. (1996) cikkben csak a Parker-spirálisról való azimutális eltérést tekintettem olyan munkának, amelyben a saját hozzájárulásomat jelenősnek ítélték, de a cikk foglalkozik a meridionális eltéréssel is (a cikk 7. ábrája, jelen válaszban az 1. ábra). Ha a mágneses tér radiális komponensének távolságfüggése jelentősen eltérne az $1/r^2$ törvénytől, akkor az erővonalak meridionális szögének a Parker-spirálisról való eltérése, δ_B eloszlásának is aszimmetrikusnak kellene lennie, ilyet nem tapasztaltunk.



δ_B

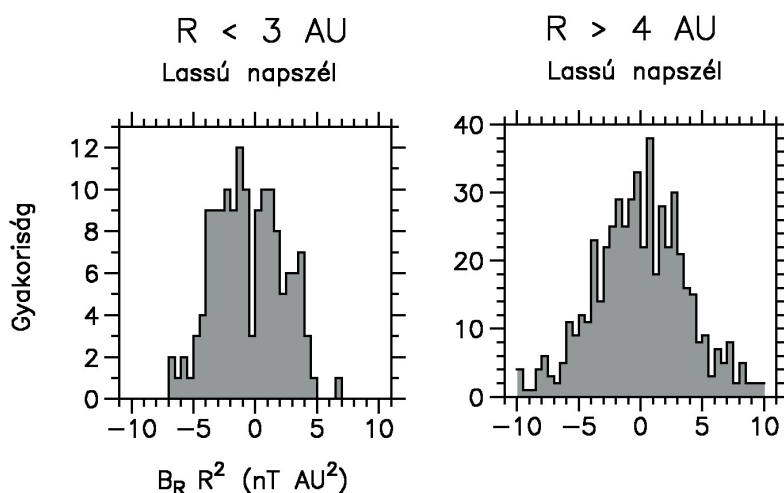
Figure 7. Histograms of the deviation in meridional angle, δ_B , from the Parker model magnetic field direction binned into 5° intervals for (a) the in-ecliptic cruise phase of the Ulysses mission, (b) the out-of-ecliptic phase for heliographic latitudes between 6°S and 30°S , and (c) latitudes between 30°S and 60°S .

A mágneses tér nyomása azonban nem hagyható figyelmen kívül, kismértékű hatásával számolni kell. A mágneses fluxus eltérése a 2.14 egyenlettől régóta kutatott téma. A Nap közelében a sisakforgókra jellemző szubradiális áramlás helyett azonban a helioszférában az ekliptikában inkább a szuperradiális áramlást tartják valószínűnek. Ennek oka az, hogy mivel az ekliptikában nagyobb a térerősség mint magasabb szélességeken, a nagyobb mágneses nyomás miatt az áramlás kissé szétterül, ami mágneses fluxus-deficitet okozhat. Távoli szondák mágneses mérési adatainak összehasonlítása Föld körül keringő szondákéval arra a megállapítására vezetett (Winterhalter et al., JGR 95, 1, 1990), hogy a mágneses fluxus-deficit kb. 1%/AU (2. ábra). Ez az Ulysses periheliuma és apheliuma között kb. 5%-os mágneses fluxusváltozást eredményezne. Összehasonlításként az $1/r^2$ -es törvény az Ulysses esetében a perihelium és aphelium között egy közel 10-szeres (!) szorzótényezőt jelent.



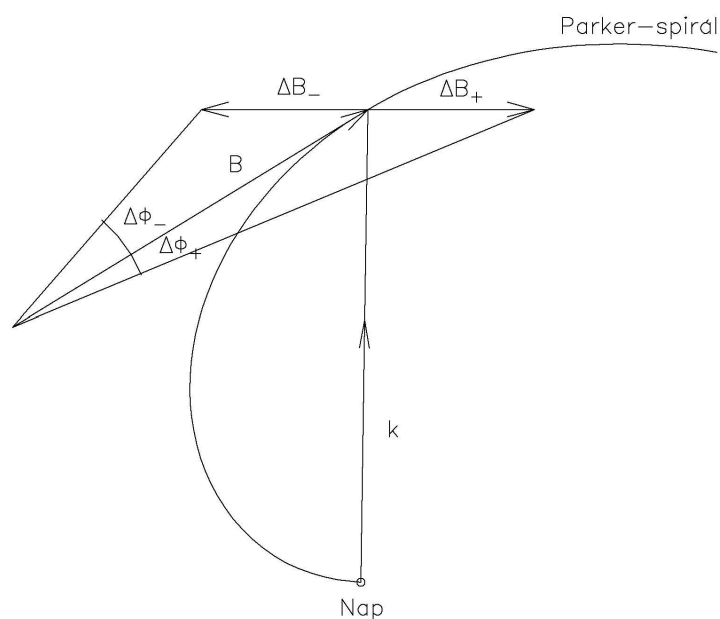
2. ábra. A Pioneer-11 szonda által mért mágneses térerősségnek éves átlagai, 1 AU távolságra konvertálva a Parker-modell szerint (nyílt körök), és a Föld körül keringő IMP szonda hasonló adatai (négyzetek).

A napszél áramlása tranziens jelenségeknél (lökéshullámoknál, együttforgó kölcsönhatási nyaláboknál, koronaanyag-kilökődéseknél) jelentősebben eltérhet a radiálistól, ez valóban problémát okozhat. Az Ulysses adatokon próbálkoztam a CME-k kiszűrésével, de a 4.13 ábrához képest nem tapasztaltam lényeges változást. Hasonlóan, már korábban is megvizsgáltam a radiális mágneses fluxus eloszlásának Naptól mért távolságtól való függést (3. ábra), ahogy az Opponents javasolja. Az ábrán nem látszik az eloszlásfüggvény evolúciója, a 3 AU-nál kisebb (bal oldal) és a 4 AU-nál nagyobb távolságban mért eloszlások a statisztikus szóráson belül nem mutatnak lényeges eltérést, talán csak az eloszlásfüggvény kiszélesedése valószínűsíthető nagyobb távolságokon. Az, hogy a mágneses fluxus a lassú napszélben nem mutat bimodális jelleget tehát „robosztus” jelenség, amelynek az okát egyelőre nem ismerem.



3. ábra

2. A mágneses tér Parker-modellről való eltérések magyarázatánál a Napfelszín differenciális rotációja mint csak egy lehetőség szerepel a disszertációban. A 74. oldal utolsó bekezdés első két mondata: „A fenti érvek, beleértve a differenciális rotáció hatását is, nem magyarázzák a (c) eloszlásfüggvény aszimmetrikus alakját. A legvalószínűbb okot az átlagos mágneses térre ráakódó Alfvén hullámokban kell keresnünk.” Tehát a megfigyelések magyarázatára nem a differenciális rotációt és az Alfvén-hullámok kombinációját, hanem csak az utóbbit javaslom. Abban az esetben a legvalószínűbb spirálszög egyezése a Parker-moddal nem véletlen egybeesés, hanem természetes következmény. A 4. ábra mutatja a geometriai viszonyokat. Tegyük fel, hogy a napszélben (a Naphoz közel) radiális irányban (az ábrán k hullámvektorral) transzverzális Alfvén hullámok terjednek. Ezért az elméleti (Parker-spirális irányú) B mágneses térerősségvektorra a hullámok miatt ΔB vektor rakódik. ΔB eloszlása szimmetrikus a k vektorra merőleges síkban (az ábrán $\Delta B_+ = \Delta B_-$), ΔB legvalószínűbb értéke és várható értéke egyaránt nulla. Az ábráról világosan látszik, hogy a Parker-spirál és a megfigyelt mágneses tér közötti szög legvalószínűbb értéke továbbra is nulla lesz, de $\Delta\Phi$ eloszlása nem lesz szimmetrikus a nullára ($\Delta\Phi_- > \Delta\Phi_+$). Ezért $\Delta\Phi$ várható értéke nem lesz nulla, az eltérés az erővonalak lazább csavarodásának irányában lesz (a megfigyeléssel összhangban).



4. ábra.

3. A napszél adiabatikusnál lassúbb hűlése kísérletileg is és elméletileg is régóta kutatott téma. A turbulencia miatt fellépő disszipáció csak az egyik lehetséges magyarázat a napszél fűtésére, különösen a távoli helioszférában az interstelláris semleges atomok ionizációja (pick up jelenség) jelentősen hozzájárul a fűtéshez. A turbulencia során fellépő disszipáció egyik lehetséges módja a napszél-ionok rezonanciája az elektromágneses hullámokkal, ebben az esetben a keresztelicitás valóban fontos szerepet kap (a rezonancia feltétele miatt). Sajnos, a kísérleti igazolás nehézségekbe ütközik, mert a hullámok amplitúdójának becsléséhez szükség van a napszélsebesség fluktuációjának nagy időfelbontású (másodperc nagyságrendű) adataira, ez a nagy időfelbontás általában nem hozzáférhető. A turbulencia disszipációjára a napszél-ionok rezonáns szóródása mellett más más modellek is lehetségesek, van aki kis térskálán lejátszódó erővonal-átkötődésekről beszél, mások az elektronok szerepét is hangsúlyozzák.

Goldreich and Sridhar (1995) modellje nem alkalmazható a napszélre, mert egymással ellentétes irányban terjedő hullámokat feltételez, míg a napszélben a kifelé terjedő hullámok dominánsak. Van azonban számos modell, amelyet a napszélben lejátszódó disszipációra javasolnak. Egyik viszonylag friss eredmény Mariano et al. (Heating the solar wind by a magnetohydrodynamic turbulent energy cascade, *Astrophys. J.* 677, L71-74, 2008) munkája. A cikkben a disszipáció módját ugyan nem határozzák meg, de az inerciális tartományon keresztülfolyó energiára becslést adnak, ennek az átfolyó energiának nyilván meg kell egyeznie a disszipált energiával. Modellük ellenőrzéséhez Ulysses mágneses tér és napszél adatokat használnak a gyors napszélben. Az inerciális tartományon átáramló energiát az Elsässer-változók harmadrendű struktúrafüggvényéből számolják, az eredményeket a napszél hőmérsékletének mért gradiensével hasonlítják össze. Megállapították, hogy a turbulens fűtés időben változó mértékű, a napszél lassú hűlésének magyarázatához szükséges fűtés 5-100%-át adják. Tehát a turbulens fűtés jelentős mértékű a napszélben, de nem minden esetben elégséges a napszél lassú hűlésének magyarázatára.

Budapest, 2010. december 7.

Erdős Géza