

# A heliosféra háromdimenziós szerkezete

ERDŐS G.<sup>1,@</sup>, BALOGH A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai Intézet  
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós u. 29–33.

<sup>2</sup>The Blackett Laboratory, Imperial College of Science, Technology and Medicine  
London SW7 2BZ

@E-mail: erdos.geza@wigner.mta.hu

A napszél egy buborékot fúj ki a csillagközi térbe, amelyet helioszférának nevezünk. Ennek a buborékknak a fizikai tulajdonságait elsősorban a napszelet alkotó részecskék sűrűsége, sebessége, valamint a plazmába befagyott mágneses tér határozza meg. E tanulmányban űrszondák méréseinek elemzésével vizsgáljuk a napszél és mágneses fluxus térbeli és időbeli változékonyságát. Bemutatjuk a gyors és lassú napszél eltérő tulajdonságait. Megvizsgáljuk a napszélbe befagyott mágneses fluxus változásait a napciklussal összefüggésben, beleértve a Nap mágneses terének pólusváltását. Kitérünk a geoeffektivitás szempontjából fontos koronatómeg-kilöködésekhez és együttforgó gyors napszélnyalábokhoz kapcsolódó struktúrák kialakására.

## Erdős, G., Balogh, A.: Three-dimensional structure of the heliosphere

The solar wind blows a bubble into the interstellar space which we call heliosphere. The physical properties of this bubble are primarily determined by the density and velocity of particles forming the solar wind, as well as the magnetic field frozen into the plasma. With the analysis of measurements by space probes we investigate the spatial and temporal variations of the solar wind and magnetic flux. We demonstrate the diverse properties of the fast and slow solar wind. Investigated also is the variations of the magnetic flux frozen into the solar wind in association with the solar cycle, including the polarity reversal of the solar magnetic field. We also touch the formation of structures related to coronal mass ejections and co-rotating fast solar wind streams, which is of importance from the point of view of geoeffectivity.

*Beérkezett:* 2012. május 9.; *elfogadva:* 2012. szeptember 12.

## Bevezetés

A heliosféra egy buborékknak tekinthető, amelyet a Napból származó szupersonikus plazmaáram, a napszél fúj ki a csillagközi térbe. A helioszférát kitöltő anyag elsődleges forrása a Nap. A Nap felszínének közelében található mágneses teret a napszél magával ragadja, amely ezáltal kiterjed a helioszférába. A heliosféra Földünk legtávolabbi környezetének tekinthető, amelyet még űrszondákkal el tudunk érni. Ennek a környezetnek a megismerése gyakorlati szempontból is fontos, mert a Földet kívülről érő, a technikai berendezések működésére is hatással lévő űridőjárási jelenségek jobb megértését szolgálja. A heliosféra kutatása másik két szempontból is érdekes:

- a mágnesezett plazma tulajdonságainak méréséből visszakövetkeztethetünk a forrásnál uralkodó viszonyokra, következtetni tudunk az egyébként helyszíni mérések számára hozzáférhetetlen alsó napkoronában lejátszódó folyamatokra (napfizikai aspektusok),
- a heliosféra fizikai állapotának ismerete szükséges a galaktikus kozmikus sugárzás naprendszerbeli modulációjának megértéséhez.

A heliosféra tulajdonságainak komplexitását az adja, hogy a térbeli változások mellett rövid és hosszú időskálán egyaránt változó viszonyokkal van dolgunk. Rövid időskálájú jelenségeknél elsősorban a napkitörések hatására kell gondolnunk. Hosszú idejű változások közül kiemelkedő jelentőségű a napfoltciklus 11 éves hullámzásának hatása.

A bolygók pályasíkja közel merőleges a Nap forgástengelyére. A Nap körül keringő űrszondák pályasíkja is közel esik a Föld pályasíkjához, az ekliptikához, mert a pályára állításkor ki kell használni a Föld Nap körüli keringésének sebességét (30 km/s, míg a rakéták „végsebessége” csak 11 km/s). Egy másik ok, amiért az űrszondák nem léptek ki az ekliptikából az, hogy az érdekes égitestek, a bolygók és holdjaik szintén abban a síkban tartózkodnak. Ezért a heliosféra kutatása csak annak egy kétdimenziós szeletére, az ekliptikára korlátozódott.

A Nap felszínéről és az alsó koronáról távérzékeléssel szerzett információk segítségével megállapították, hogy a fizikai viszonyok jelentősen változhatnak a Nap egyenlítőjétől a sarkok felé távolodva. Régóta ismert a napfoltok gyakoriságának heliografikus szélesség szerinti változása, amely ráadásul a napfoltciklus szerint is változó törvényszerűsége.

rúséget mutat (Maunder 1904) (pillangódiagram). A napkorona hőmérsékletére utaló röntgen-felvételeken koronalyukak (hidegebb területek) figyelhetők meg a sarkoknál (Cranmer 2009), amelyek kiterjedése napfoltminimum idején megnő. A forrásnál mutatkozó heliografikus hosszúsággal és a napfoltciklus fázisával összefüggő jelenségek vizsgálata megkövetelte egy olyan űrmisszió létrehozását, amely segítségével a helioszféra sarki területeire is el tudunk jutni. Ezt a tervet az is motiválta, hogy a galaktikus kozmikus sugárzás modulációja várhatóan a sarkoknál minimális, mert egyenlő távolságban a Naptól, az átlagos mágneses erővonalak a sarkoknál mintegy 50-szer rövidebbek. Ez a jelentős különbség a Nap forgásából adódik, az erővonalak a sarkoknál radiálisak, míg az egyenlítőnél spirális alakúra csavarodnak fel. A moduláció eltorzítja a galaktikus kozmikus sugárzás eredeti tulajdonságait. A kutatók régóta szerettek volna már egy olyan missziót létrehozni, melynek révén a sugárzásnak az eredetihez közeli (naprendszeren kívüli) állapota figyelhető meg.

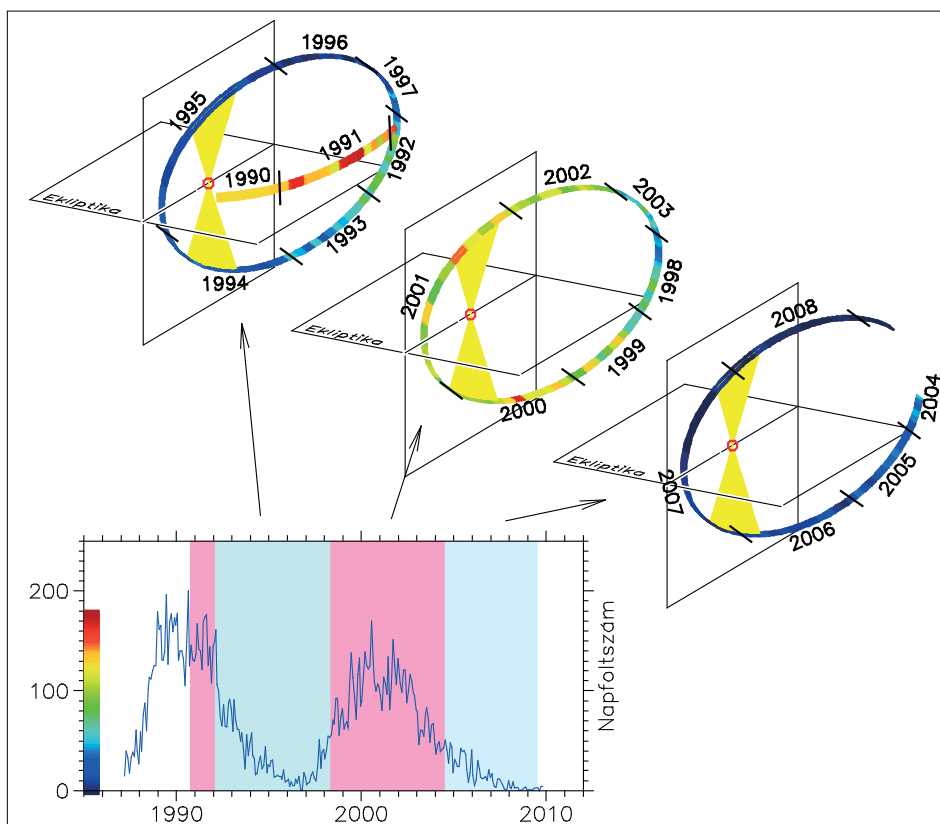
Cikkünkben az Ulysses űrszondával készült mérések néhány eredményéről számolunk be. Ez a szonda az első és eddig egyetlen űreszköz, amely nagy heliografikus szélességekre jutott el. A cikkben arra a kérdésekre is válasz kívánunk adni, hogy

- Érdemes volt-e kilépni az ekliptikából, vannak-e heliografikus szélességtől függő tulajdonságok?
- Van-e a napciklussal összefüggő időbeli változás a helioszférában?

### Az Ulysses szonda pályája és a napciklus

Az Ulysses 1990 októberében lőtték fel a Jupiter irányába. Az óriásbolygó mellett 1992 februárjában haladt el, amelynek gravitációs tere a szonda pályasíkját 80 fokkal elfordította, ezzel a szonda Nap körüli poláris pályára állt. A pálya periódusideje 6,2 év, a Naptól mért legkisebb, ill. legnagyobb távolság 1,34, ill. 5,4 CsE. A szonda követését 2009 júniusában fejezték be, ezalatt majdnem három teljes Nap körüli forduló során végzett méréseket. A hosszú élettartam abból a szempontból is érdekes, hogy a megfigyelések majdnem két napciklust fednek le.

Az 1. ábra az Ulysses szonda pályáját mutatja háromdimenziós ábrázolásban. Az ekliptika a vízszintes síkban van, a Napot piros köröcske jelzi. A bal felső ábra mutatja a szonda pályáját az ekliptikában a Földtől a Jupiterig 1990-ben és 1991-ben, majd az első ekliptikára közel merőleges keríngést a Nap körül (1992-től 1998-ig). A szonda pólusátmeneteit a 70 fokosnál nagyobb szélességű (egyaránt déli és északi) pályaszakaszokkal definiálták, ezek a szakaszok sárga színű területekkel vannak kiemelve. A szonda pályájának másik figyelemre méltó szakasza a déli és északi legnagyobb heliografikus szélesség (80° S és 80° N) közötti pályaszakasz, amelyen a szonda gyorsan, egy év alatt haladt keresztül (mivel a szonda ekkor napközélben volt). Ezt a pályaszakaszt gyors szélességi pásztázásnak nevezték el. Jobbra haladva a másik két ábrán a második és harmadik



**1. ábra** | Az Ulysses szonda három Nap körüli keringése a napfoltciklussal összefüggésben. A pálya színkódja a Nap aktivitását jellemzi  
**Figure 1** | Three orbits of Ulysses around the Sun, in association with the sunspot cycle. Color code of the orbit marks solar activity

Nap körüli keringés látható hasonló formában. A bal alsó panel a napfoltszámot mutatja, amely alapján az Ulysses pályáját színekkel láttuk el, a meleg szín napfoltmaximumot, a hideg minimumot jelöl. Ezek szerint a szonda Jupiterig tartó pályája, valamint a második keringés napfoltmaximumra esett. Figyelemre méltó, hogy a második keringéshez tartozó gyors szélességi pásztázás a napfoltciklus legaktívabb idejére esett, és mint ahogy később megmutatjuk, a Nap mágneses terének pólusváltása erre az időre esett. Az első és harmadik keringés napfoltminimum idején történt.

## Gyors és lassú napszél

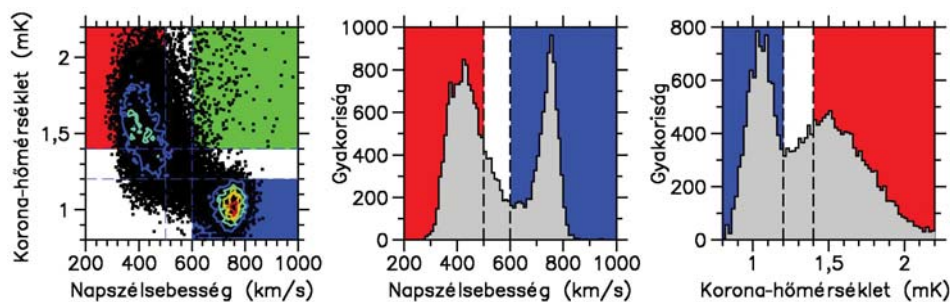
Parker (1958) elméletileg megjósolta, és az első interplanetáris térbe kijutó szondák – Mariner–2 (Neugebauer, Snyder 1962) és Luna–1, Gringauz nem publikált eredménye – kísérletileg megerősítették, hogy a Naphoz közel radiális irányban egy szuperszonikus sebességű plazmaáramlás indul ki. Az áramlás sebessége időben változó, értéke nagyjából a 300–1000 km/s sebességtartományt fedi le. Később a Nap felszínéről röntgen-tartományban végzett felvételeken sötét foltokat fedeztek fel (koronalyukak), amelyek főleg napfoltminimum idején a sarkokon jelennek meg. Megállapították, hogy a nagy sebességű napszélnyalábok általában a koronalyukakból erednek. A koronalyukakból származó gyors napszélnyalábok hosszú ideig fennálló struktúrák, amelyek a földpályánál több napforgáson keresztül is 27 naponta visszatérhetnek. Az egyenlítői tartományban főleg koronaanyag-kilökődések (angol mozaikszóval CME-nek nevezzük) alkalmával is megjelenhetnek nagy sebességre felgyorsult plazmaáramlások. Az interplanetáris térben végzett megfigyelések statisztikai vizsgálatát megnehezíti a CME-ből származó és az egyenlítőnél viszonylag ritkább koronalyukakból származó gyors napszélnyalábok keveredése. A gyors és lassú napszél kölcsönhatásba lép egymással, a plazma sebessége a terjedés során módosul, nehéz következtetni a Naphoz közeli viszonyokra. Az Ulysses szonda azonban hosszú időt töltött a sarki koronalyukak felett, amely vizsgálatokból kiderült, hogy a kétfajta napszél, a lassú és a gyors élesen elkülönül. Ez utóbbi a koronalyukakból származik (von Steiger, Fröhlich 2005).

A 2. ábra középső paneljén a napszélsebesség 6 órás átlagának eloszlásfüggvénye látható az Ulysses misszió teljes időtartamára (Erdős, Balogh 2012). A grafikonon jól látszik a kétféle sebességű napszél-populáció éles elkülönülése. Az Ulysses szondán helyet foglalt a SWICS nevű plazmadetektor, amely alkalmas volt a napszélben kisebbségben levő ionok töltésállapotának a meghatározására. A hatszorosan és hétszeresen ionizált oxigén fluxusának arányából meghatározható a korona hőmérséklete a Naptól mért néhány napsugár ( $R_s$ ) távolságban, ahol az oxigénionok ütközése már elhanyagolhatóvá válik. Érdekes ez a kísérleti technika, mert az oxigénionok mint fossziliák szállítják hozzánk a koronahőmérséklet-adatokat több CsE távolságra. A 2. ábra jobb oldali paneljén a korona hőmérsékletének eloszlásfüggvénye látható. Megállapíthatjuk, hogy a korona-hőmérséklet eloszlásában is két populáció van jelen, a hidegebb populáció legvalószínűbb hőmérséklete 1 millió fok, a melegebbé 1,5 millió fok. A hidegebb a gyors napszélnyalábhoz tartozik, a melegebb a lassúhoz. Ez az ábra bal oldalán található szórásdiagramból állapítható meg, amelyen feltüntetjük a hőmérséklet- és sebességtérre vonatkozó kétdimenziós eloszlásfüggvény kontúrvonalait is. Megfigyelhető, hogy csekély számban vannak gyors napszélnyalábok is, amelyek hőmérséklete magas, ezek a szórásdiagrammon elszórtan vannak jelen (az ábrán zöld színnel megjelölt tartományban). Habár ezeknek az eseményeknek egyedi elemzését nem végeztük el, valószínűsíthető hogy koronaanyag-kilökődésekről van szó.

Az Ulysses szonda megfigyelései rámutattak arra, hogy a sarki koronalyukakból származó gyors napszél és az inkább egyenlítői tartományra jellemző lassú napszél fizikai tulajdonságai élesen különböznek, így a keletkezési mechanizmusuk megértéséhez is elkülönülő modelleket kell alkotni. Ennek a feladatnak a megoldása a napfizikusok számára jelenleg is kihívást jelent.

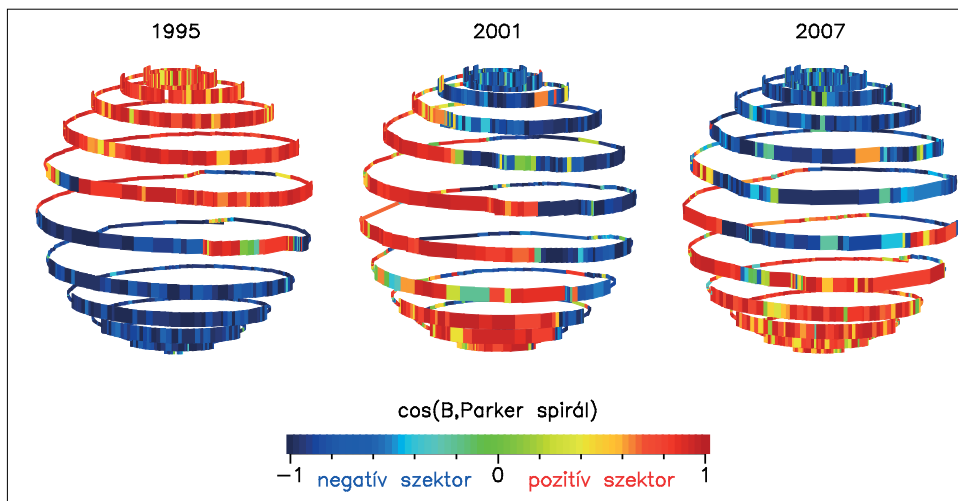
## Mágneses pólusváltás

Néhány napsugár ( $R_s$ ) távolságban a korona már olyan híg, hogy a plazmarészecskék ütközésének elmaradása miatt a közeg jó vezetővé válik. Ezzel a mágneses tér befagyásának



**2. ábra** A napszél sebessége és a korona hőmérséklete az Ulysses misszió teljes időtartamára (1990–2008) a SWICS műszer méréseinek 6 órás átlagaiból számolva

**Figure 2** Velocity of solar wind and coronal temperature during the whole duration (1990–2008) of Ulysses mission, calculated from the 6 hour averages of the measurements by SWICS instrument



**3. ábra** A Nap forrásterének mágneses polaritása az Ulysses három gyors szélességi pásztázása alkalmával 1995-ben, 2001-ben és 2007-ben. A csavart vonalak az Ulysses pályáját mutatják a Nappal együtt forgó koordináta-rendszerben. A színkód a megfigyelt mágneses térerősség vektor és a Parker-spirális közötti szög koszinusza

**Figure 3** Magnetic polarity of the source surface field of the Sun observed by Ulysses during the three fast latitude scans in 1995, 2001, and 2007. Spiral lines show the trajectory of Ulysses in the frame co-rotating with the Sun. Color code is the cosine of the angle between of the observed magnetic field vector and the Parker spiral

feltétele teljesül, ezért a kifelé áramló napszél magával ragadja a mágneses erővonalakat. A Nap középpontjában elhelyezett néhány  $R_s$  sugarú gömb mágneses terét a napszél forrásterének hívják, amelynek ismeretében a mágneses tér kiterjedése a gömbön kívüli tartományokba a mágneses fluxus befagyása miatt már könnyen meghatározható. Radiális és egyenletes napszélsebességet feltételezve a mágneses erővonalak az ekliptikában arkhimédészi spirál alakot alkotnak (Parker 1958). Nagyobb heliografikus szélességeken is hasonló a helyzet, csak az erővonalak sík helyett egy kúpra csavarodnak fel.

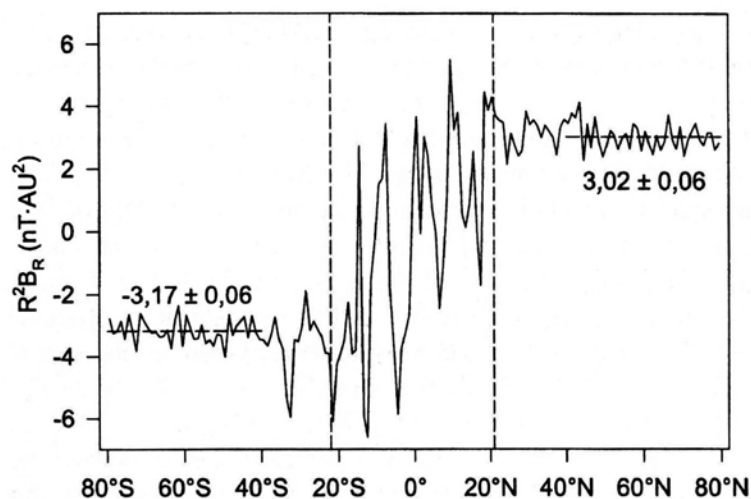
A helioszférában végzett mágneses tér mérésekből viszsza-következtethetünk a forrásfelület mágneses terére abban a pontban, amelynek heliografikus szélessége és hosszúsága megegyezik az Ulysses heliografikus szélességével és hosszúságával, figyelembe véve azt a néhány napos időeltolódást, amely idő alatt a napszél a forrástól a szondáig áramlott. A helioszférában mért mágneses tér legjellegzetesebb tulajdonsága az előjele, vagyis az, hogy az erővonal kifelé vagy befelé mutat-e a Naptól. A kétféle polaritást elválasztó felület, amelyet áramlepelnek hívnak, hullámos alakú. Napfoltminimum idején az áramlepel a Nap egyenlítői síkjához közel helyezkedik el, de kis mértékben akörül hullámszik. A napfoltok számának növekedésével a hullámszás amplitúdója megnő, és az áramlepel inklinációja is megnő az egyenlítői síkhoz képest. Napfoltmaximumban történik a Nap mágneses terének pólusváltása. Az Ulysses misszió előtt kétféle elképzelés létezett: a pólusváltás az áramlepel átfordulásával következik be, vagy a forrásfelületen a sarkok közelében a domináns polaritással ellentétes szigetek képződnek, amelyek területe felnő, és kiszorítják az eredeti polaritást.

Az Ulysses-megfigyelések egyik fontos eredménye, hogy az első modell igazodott be. A második gyors szélességi pásztázás alkalmával megfigyelt pólusváltás az áramlepel

nagy inklinációja alkalmával történt, ugyanakkor nem tapasztaltunk a domináns polaritással ellentétes szigeteket. A 3. ábra a forráster mágneses polaritását mutatja 1995-ben, 2001-ben és 2007-ben (Erdős, Balogh 2005, 2010). Az 1995-ös és 2007-es megfigyelés a 22. és 23. napfoltciklus minimumában történt. Látható, hogy a várakozásoknak megfelelően az áramlepel hullámossága kicsi. Azt is megállapíthatjuk, hogy a 22. ciklusban az északi polaritás pozitív, a déli negatív volt. A következő ciklus minimumában, 2007-ben a polaritás felcserélődött. 2001-ben, napfoltmaximumban az áramlepel inklinációja közel merőleges volt az egyenlítői síkra. A 3. ábra megerősíti, hogy a Nap mágneses polaritásváltása az áramlepel átfordulásával történt.

### Mágneses fluxus

A forráster polaritása mellett foglalkozunk a mágneses tér erősségével is! A helioszférában végzett mérések esetén a mágneses tér radiális komponense jellemzi a mágneses fluxus nagyságát. A radiális komponens a Naptól mért távolság négyzetével csökken, vagyis a mágneses fluxus sűrűsége könnyen meghatározható akár a forrásfelületen, akár a földpályának megfelelő 1 CsE távolságban, ahol a legtöbb megfigyelést végzik. Az azimutális komponens már kevésbé alkalmas a fluxus meghatározására, mert a távolság mellett a napszélsebesség változásaitól is függ. Dipóltér esetén a mágneses fluxus sűrűségének a pólusok felé haladva növekednie kell. Az Ulysses szonda megfigyeléseinek egyik legnagyobb meglepetése az volt, hogy a fluxus sűrűsége nem nőtt meg a pólusok felé haladva, ez már az első pólusátmenetnél kiderült. A 4. ábra az első gyors szélességi pásztázás során mért mágneses fluxus sűrűségét mutatja a heliografikus szélesség függvényében (Forsyth et al. 1996). Megállapít-



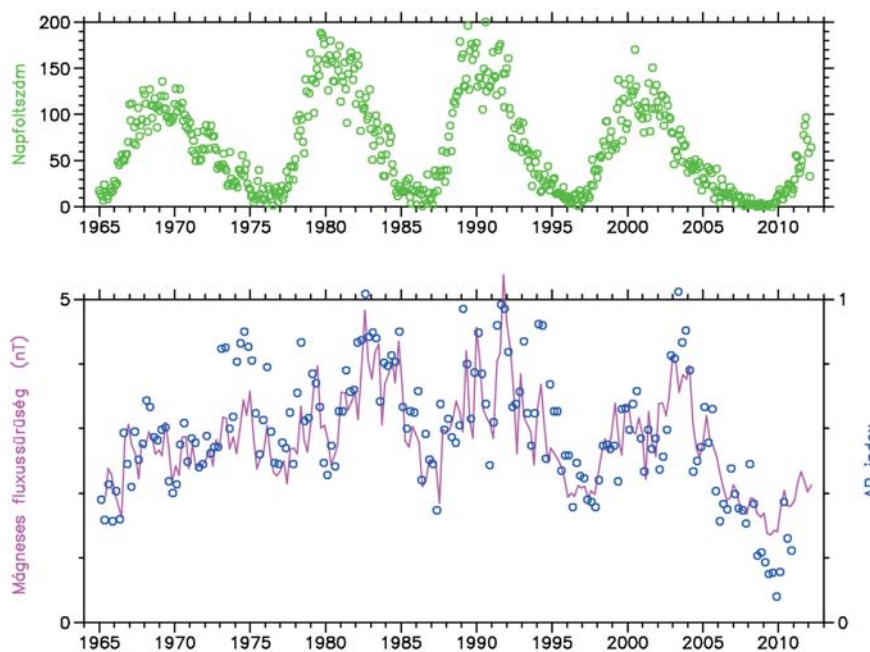
**4. ábra** Mágneses fluxus sűrűségének függése a heliografikus szélességtől. Ulysses-mérések az 1994–1995 időszakban

**Figure 4** Magnetic flux density as a function of heliographic latitude. Ulysses observations in the epoch 1994–1995

hatjuk, hogy a fluxus sűrűsége a déli és északi féltekén egyaránt független a heliografikus szélességtől. Az egyenlítői síktól  $\pm 20^\circ$ -os sávban a fluxus előjele váltakozó, ez a hullámos áramleplelen történő áthaladások következménye. A mágneses fluxus heliografikus szélességtől való függetlensége a gyors napszélben látszik egyértelműen, a lassú napszélben a helyzet bonyolultabb. Megmutattuk, hogy a mágneses fluxus változásának komplexitása a Parker-spirál erővonalakhoz képest megjelenő fluktuációk következménye, amelynek hatása a lassú napszélben nagyobb és a Naptól növekvő távolsággal nő. A fluktuációk hatására korrekciót lehet végezni, az így korrigált mágneses fluxus a lassú napszélben is mutatja a heliografikus hosszúságtól való függet-

lenséget (Erdős, Balogh 2012). Más analízis is arra az eredményre vezetett (Owens et al. 2008), hogy a mágneses fluxus független a heliografikus hosszúságtól és szélességtől, a fluxus egyenletesen terül szét a helioszférában.

A mágneses fluxus egyenletes szétterülése a napszél szuperradiális expanziójával magyarázható a Naphoz közeli ( $< 10 R_s$ ) tartományban (Smith 2008). A Naphoz közel a mágneses tér nyomása meghaladja a plazma nyomását. Ezért a pólusoknál található feltételezett erősebb mágneses tér nyomása szétteríti a plazmát, amíg a nyomásegyensúly ki nem alakul. Ne tévesszen meg bennünket az a jól ismert tény, hogy a távolabbi helioszférában a plazma nyomása a domináns, aminek következménye a radiális expanzió! A



**5. ábra** Az OMNI interplanetáris mágnesestér-adatokból számolt mágneses fluxussűrűség (alsó panel, lila vonal) kapcsolata a napfoltyszámmal (felső panel) és az AP indexszel (alsó panel, körök) négy napcikluson keresztül

**Figure 5** Magnetic flux density calculated from the OMNI interplanetary magnetic field data (bottom panel, magenta line), in association with the sunspot numbers (top panel) and the AP index (bottom panel, circles) through four solar cycles

mágneses tér nyomása azonban gyorsabban csökken a távolsággal, mint a plazma nyomása, ezért a nyomásviszonyok különböznek a Naphoz közeli és távolabbi régiókban.

A mágneses nyomás egyenletes szétterülésének hasznos következménye, hogy a helioszféra bármely pontjában mérjük meg a mágneses fluxus sűrűségét, az érték jól reprezentálja a Nap mágneses fluxusát, amely a napciklus szerint változékonyságot mutat. Az 5. ábra a mágneses fluxus sűrűségét mutatja az idő függvényében négy napcikluson keresztül. A mágneses fluxussűrűség meghatározására az OMNI adatbázist használtuk, amely a Föld közelében tartózkodó szondák adataiból összeállított, az interplanetáris tér fizikai paramétereit tartalmazó hosszú idejű adatbázis. Ha összehasonlítást végzünk a felső panelen látható napfoltszámmal, megállapíthatjuk, hogy a mágneses fluxus maximuma nem esik egybe a napfoltszám maximumával, hanem az inkább a napciklus leszálló ágában figyelhető meg. Érdekesség, hogy a mágneses fluxus látható módon jobban korrelál az AP indexszel (lásd az alsó panelen a köröket). Az AP index a geomágneses viharok gyakoriságát és nagyságát jellemző szám. A jó egyezés magyarázatára két érv is felmerülhet. A mágneses fluxus szállításában a CME-k fontos szerepet játszanak, a CME-k ugyanakkor geoeffektívek, mágneses viharokat keltenek. A másik érv az, hogy a földi magnetoszférában tárolt energia forrása az interplanetáris mágneses tér. Nagyobb mágneses fluxus esetén több mágneses energia halmozódik fel a magnetoszférában, amely erőteljesebb viharokat generálhat. Ez a kérdéskör további kutatásokra vár.

## Összefoglalás

Az Ulysses szonda kilépett az ekliptikából, ezzel lehetővé vált a helioszféra háromdimenziós szerkezetének feltárása. A szonda megfigyelései számos korábbi elképzelést megerősítettek. Ugyanakkor több esetben lehetőség adódott vitatott modellek közötti szelektálásra, a korábbi eredmények pontosítására, sőt több váratlan felfedezés is született. Ebben a cikkben néhány fontos, érdekes megfigyelésről számoltunk be, amelyek összefoglalása a következő:

- Kétféle napszélplazma létezik, amely sebességben és hőmérsékletben élesen elkülönül.
- A Nap mágneses terének legutóbbi pólusváltása az áramlepel átfordulásával történt.
- A mágneses fluxus sűrűsége független a heliografikus hosszúságtól és szélességtől.
- A mágneses fluxus sűrűsége a napciklus szerint változik és feltűnő korrelációt mutat a földi geomágneses viharokra jellemző AP indexszel.

Az Ulysses szonda eredményei hozzájárultak a Nap felszínéről és az alsó koronáról távérzékeléssel végzett megfigyelések pontosításához akár időben visszafelé is, a korábbi mérések újraértelmezésével. A rendkívül sikeres Ulysses misszió megismétlésére nincsen terv. Azonban a Solar Orbiter űrszonda várhatóan jól ki fogja egészíteni az Ulysses szonda méréseit. A 2017-ben induló szonda ugyan csak 30 fokos heliografikus szélességre fog eljutni, de a Naphoz közeli (0,3 CsE) távolságban végzett mérések új távlatokat fognak megnyitni a napfizika és a helioszféra fizikájában.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak R. von Steigernek a munkához szükséges Ulysses szonda SWICS műszerének mérési adatainak rendelkezésre bocsátásáért.

## A tanulmány szerzői

Erdős Géza, Balogh André

## Hivatkozások

- Cranmer, S. J., 2009: Coronal Holes. Living Rev. Solar Phys. 6, 3, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2009-3>
- Erdős G., Balogh A., 2005: In situ observations of magnetic field fluctuations. Adv. Space Res. 35, 625–635
- Erdős G., Balogh A., 2010: North-South asymmetry of the location of the heliospheric current sheet revisited. J. Geophys. Res. 115, A01105, doi: 10.1029/2009JA014620
- Erdős G., Balogh A., 2012: Astrophys. J. 753/2, 130, doi: 10.1088/0004-637X/753/2/130
- Forsyth R. J., Balogh A., Horbury T. S., Erdoes G., Smith E. J., Burton M. E., 1996: The heliospheric magnetic field at solar minimum: Ulysses observations from pole to pole. Astronomy and Astrophysics 316, 287–295
- Maunder E. W., 1904: Note on the Distribution of Sun-Spots in Heliographic Latitude, 1874–1902. MNRAS, 64, 747–761
- Neugebauer M., Snyder C. W., 1962: Solar Plasma Experiment. Science 138, 1095–1097
- Owens M. J., Arge C. N., Crooker N. U., Schwadron N. A., Horbury T. S., 2008: Estimating total heliospheric magnetic flux from single-point in situ measurements. J. Geophys. Res. 113, A12103, doi: 10.1029/2008JA013677
- Parker E. N., 1958: Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. Astrophysical Journal 128, 664–676
- Smith E. J., 2008: The global heliospheric magnetic field. In: The Heliosphere through the Solar Activity Cycle (Balogh, A., Lanza, L. J., Suess, S. T., szerk.), Springer, Chichester, UK
- von Steiger R., Fröhlich C., 2005: In the Solar System and Beyond: Ten Years of ISSI (Geiss, J. and Hultqvist, B., szerk.), ISSI Scientific Report Series, ESA, Noordwijk, The Netherlands, Vol. SR-003, 99–112