

A VOYAGER-1 ŰRSZONDA KILÉPETT A SZUPERSZONIKUS NAPSZÉLBUBORÉKBÓL

Király Péter

MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet

Az 1977-ben útjára bocsátott Voyager-1 űrszonda az emberiség legmesszebbre jutott és nagyrészt még mindig kiválóan működő küldönce. Folyamatosan méri közvetlen környezetének számos fizikai paraméterét, és csupán a NASA földi rádiótávcsöveinek leterheltségén múlik, hogy a mért adatoknak átlagosan csak mintegy felét tudjuk fogadni és további feldolgozásra előkészíteni. Jelenlegi témánk szempontjából legfontosabbak a különböző energiájú töltött részecskékre és a mágneses térre vonatkozó mérési adatok. Fontos kiemelni, hogy a szonda léptető motor segítségével körbeforduló platformot is tartalmaz, amely bizonyos energiatarományokba eső részecskék fluxusának irányeloszlását is képes mérni. E mozgó rész ilyen hosszú idő eltelte után és ilyen mostoha körülmények között is kifogástalan működése valódi műszaki bravúrként értékelhető. A Voyager szondák által mért adatok közül néhány már egy héten belül, legtöbb pedig 1–3 hónapon belül hozzáférhető a világhálón keresztül. Természetesen vannak olyan kiegészítő adatok is (pl. a különböző zavaró hatások miatt fellépő háttér), amelyekhez csak a Voyager programjaiban közreműködők férhetnek hozzá.

A Voyager-1 a Naprendszer bolygói közül csak a Jupitert és a Szaturnuszt látogatta meg, az Uránuszt és Neptunuszt a szintén 1977-ben felbocsátott Voyager-2-re hagyva. A nagybolygók környezetének igen nagy sugárterhelését mindkét szonda viszonylag jól túlélte, csupán a Voyager-1 plazmatektora hibásodott meg a Szaturnusz közelében. E meghibásodás miatt a Voyager-1 ma sem tudja közvetlenül mérni a napszél jellemzőit (pl. sűrűségét, sebességét, irányát, hőmérsékletét), csupán a nagyobb energiájú részecskék irányeloszlásából és energiaspektrumából következtethetünk e paraméterek némelyikére. A Szaturnusz gravitációs hatására a Voyager-1 az ekliptika síkjától északra fordult. Jelenleg (2005 augusztusában) 34 fokos ekliptikai szélesség mellett mintegy 96 CsE távolságban halad kifelé a Naprendszerből (1 CsE a Nap és Föld közötti középtávolság = 149,6 millió km). A Voyager-2 a Neptunusszal való találkozás után délre fordult, és jelenleg a Naptól mintegy 77 CsE távolságban, –24 fokos ekliptikai szélesség mellett halad kifelé, a Voyager-1-nél valamivel lassabban.

A napszél által kitöltött, ma helioszférának nevezett plazmatartomány határovezeteiről az űrkorszak előtt is voltak már közvetett információink, bár akkor még magának a napszélnek a létezése sem volt bizonyított. E külső övezeteken keresztül jut el ugyanis hozzánk a nagyenergiájú töltött részecskékből álló galaktikus kozmikus sugárzás, melynek intenzitásváltozásaiból már akkor tudtuk, hogy a 11 éves naptevékenységi ciklus befolyásolja e részecskék Naprendszerbe hatolását. Ezt a naptevékenységtől függő módosító hatást a kozmikus sugárzás modulációjának nevezzük. Napfoltmaximumok idején kisebb, mi-

nimumok idején nagyobb intenzitású kozmikus sugárzás érkezik hozzánk. Minél nagyobb a kozmikus részecskék energiája, annál kisebb az intenzitásváltozás.

Később, a múlt század 70-es éveiben az is nyilvánvalóvá vált, hogy a Földünk környezetébe érkező nagyenergiájú részecskék nemcsak a galaktikus kozmikus sugárzásból és különféle napkitörésekből származnak, hanem van egy úgynevezett „anomális”, nagyrészt egyszerezen töltött ionokból álló komponensük is, amely minden bizonnyal a helioszféra határtartományaiban gyorsul fel mintegy 100–200 MeV/nukleon maximális energiákra. E komponens más elemösszetételű, és intenzitása sokkal érzékenyebben reagál a naptevékenység 11 éves változásaira, mint a nagyobb energiájú galaktikus kozmikus sugárzás. E komponens forrását kutatva kiderült, hogy az úgynevezett „felszedett” vagy pick-up ionokból származik, amelyek a csillagközi gáz helioszféránkba belépő semleges atomjainak ionizációjakor jönnek létre. A Napból kifelé fúvó, mágneses teret is magával vivő szuperszonikus napszél ezeket az ionokat magával sodorja egészen a helioszféra határvidékéig, ahol azok jelentős része nagy energiákra gyorsul fel, és részben ismét visszaáramlik a helioszféra belsejébe. Mivel már a napszélben terjedő, nagy napkitörések során létrejövő lökeshullámokban is jól megfigyelhető volt a részecskegyorsítás, kézenfekvő volt az a feltételezés, hogy az anomális komponens keletkezési helye az a hatalmas lökeshullám, amely elméleti várakozások szerint a napszél belső, szuperszonikus és külső, szubszonikus tartományát választja el (szokásos angol nevén: „termination shock”, rövidítése: TS).

Mivel a környező, részlegesen ionizált csillagközi gázhoz képest Napunk (és vele együtt az egész helioszféra) mintegy 26 km/s sebességgel mozog, a napszél és a csillagközi gáz között már a legegyszerűbb modellszámítások szerint is elég bonyolult szerkezetű kölcsönhatási tartomány alakul ki. A csillagközi gáz ionizált komponense nem keveredik könnyen a szintén ionizált napszélplazmával, ezért a napszélplazma által kitöltött helioszféra üstökös-höz hasonló alakban ágyazódik be a csillagközi szélbe. Mivel a két közeg relatív sebessége valószínűleg nagyobb a csillagközi gázban érvényes hullámterjedési sebességnél, a csillagközi gázban is lökeshullám (orrhullám) alakul ki a helioszféra előtt. E lökeshullám és a helioszféra között a csillagközi gáz ionizált komponense eltérül, és hüvelyként veszi körül a helioszférát. A helioszférán belül a Napból kifelé áramló szuperszonikus napszél uralta belső, valószínűleg közel gömb alakú „buborékot” a szubszonikus „köpeny” (vagy belső hüvely) veszi körül. Ez a forró, szubszonikus gáz a belső lökeshullámtól (TS) kifelé haladva az üstökösök kómájához hasonlóan egyre inkább oldalirányban, majd a csillagközi gáz mozgásának irányában áramlik a csóva felé. A csillagközi gáz semleges ato-

mokból álló komponense az ionizált komponestől eltérően szinte akadálytalanul hatol be a helioszférába, ahol egy részük a napszéllel való töltéscsere és a Nap UV-sugárzása hatására ionizálódik, majd a napszél által „felszedett”, kifelé sodródó ionná válik.

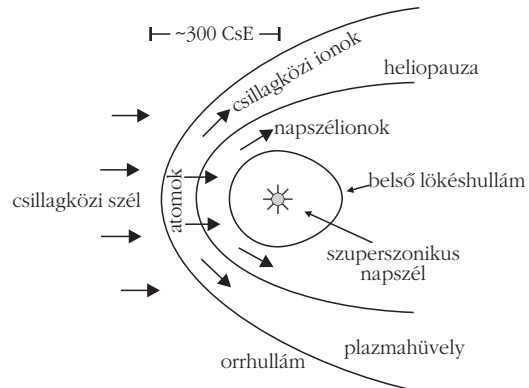
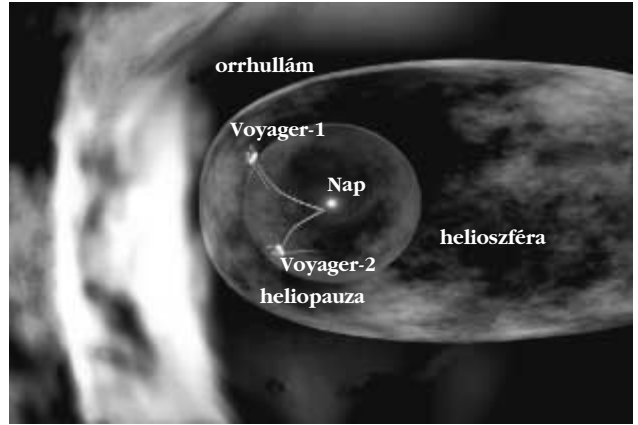
Ezt a sematikus, az 1. ábrán bemutatott képet tovább bonyolítják a különböző valószínűsíthető instabilitások, a szoláris és csillagközi eredetű mágneses terek dinamikai hatása és várható összecsatlódása, a pick-up ionok és a részecskegyorsítás visszahatásai, a kozmikus sugárzás modulációjának visszahatása. E jelenségekről a *Fizikai Szemle* egy korábbi számában már részletesebben is beszámoltam [1].

A napszélbuborék

Valóban buborék-e a napszélbuborék? Annyiban igen, hogy a szappanbuborékhoz hasonlóan itt is éles elválasztó felület van a belső és külső közeg között, és a belső tartomány méretét itt is nyomásegyensúly határozza meg. A csillagászati megfigyelések sok hasonló buborékszerű képződményt találtak aktív csillagok környezetében és korábbi robbanások maradványaiban.

A szappanbuborék-analógia azonban sántít. A belső tartományban lévő gáz itt szuperszonikus sebességgel áramlik kifelé, és a gáz nyugalmi rendszerében érvényes termikus nyomást sokszorosan meghaladja az irányított mozgással kapcsolatos dinamikai nyomás. Ez utóbbi tart egyensúlyt a lökeshullám helyén a külső nyomással. A szappanbuborék kialakulásánál lényeges felületi feszültségnek itt nincs szerepe. A „buborék” határán az áramló gáz sebessége lecsökken, de nem válik zérussá. Az anyagáramlás folytonosságának biztosítására ahányad részére csökken a sebesség, annyiszorosára nő a sűrűség. Hasonló kontinuitási egyenletek érvényesek a mágneses térre is (Rankine–Hugoniot-feltételek). Az irányított áramlással kapcsolatos kinetikus energia a határfelületnél lecsökken, és részben termikus, részben mágneses energiává alakul, sőt ebből az energiából futja részecskegyorsításra is. Az éles elválasztó felületek megjelenése itt az áramlás szuperszonikus jellegével kapcsolatos, amely miatt a gáz áramlása nem tud jó előre idomulni egy útjába kerülő akadályhoz.

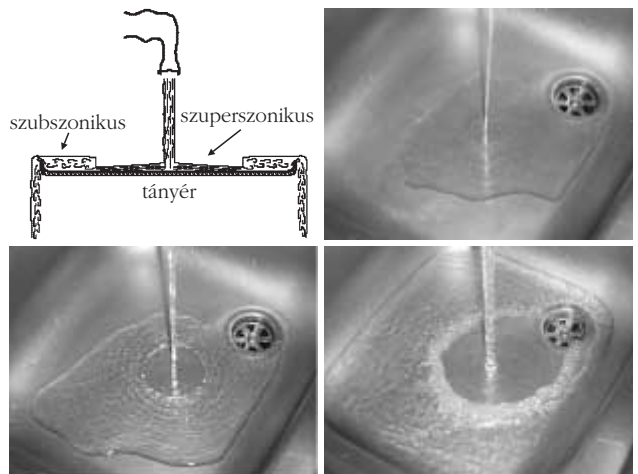
A sok szempontból félrevezető szappanbuborék-analógiánál jobb, fizikailag relevánsabb képpel szemléltette az itt végbemenő folyamatokat *Ian Axford* [2], amikor a napszél és a csillagközi gáz kölcsönhatását egy csap alá tartott tányérban megfigyelhető vízáramláshoz hasonlította. A tányérra érkező vízszög a tányér mentén radiálisan kifelé áramlik, és sebessége meghaladja a vízben és annak felszínén terjedő hullámok sebességét. A tányér pereme jelképezi a csillagközi gáz nyomását (ez utóbbi közeg áramlása a modell kidolgozása idején még nem volt ismeretes). A tányéron a víz sebessége és mélysége a „szuperszonikus” és „szubszonikus” tartomány határán ugrásszerűen megváltozik. A 2. ábrán Axford eredeti vázlata mellett bemutatunk néhány fényképfelvételt, amelyek tányér helyett egy konyhai lefolyóban mutatják be a csapból áramló vízszög különböző erőssége mellett létrejövő folyamatokat. Az oldalal a kifelé áramló vizet a lefolyó felé téríti, így a „buborék”

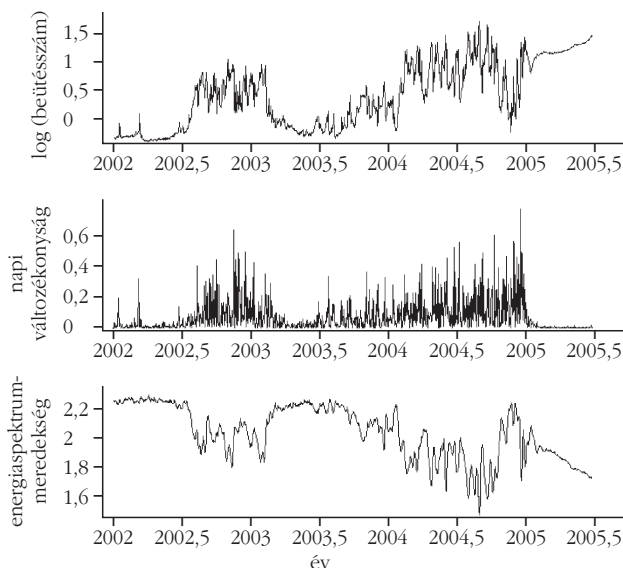


1. ábra. A helioszféra szerkezetének NASA-dokumentumokban gyakran szereplő fantáziaképe és sematikus, a fontosabb elválasztó felületeket feltüntető és a különböző eredetű komponensek áramlását bemutató metszete.

áramló közegben jön létre, ami alakját – különösen a leg-erősebb vízszög esetén – némileg módosítja. Látható, hogy a vízszög erősségét növelve a kétféle áramlást elválasztó zóna is kiszélesedik, és különböző instabilitásokra utaló jeleket mutat. Ezek okozója természetesen nemcsak a „szuperszonikus” zóna változó áramlási sebessége, hanem részben a beeső vízszög turbulenciájának változása is lehet. Az okok alaposabb vizsgálatához sokkal gondosabb,

2. ábra. Csapból tányérra folyó víz mint a helioszféra belső lökeshullámának Ian Axford által javasolt analogonja. A konyhai lefolyóban ehhez hasonló, de áramló vízben létrejövő lökeshullámot látunk. A csapot egyre jobban megnyitva egyre bonyolultabb szerkezetű áramlási kép alakul ki. (Király Tamás felvételei)





3. ábra. A 0,5 MeV-nél nagyobb energiájú ionok logaritmikus beütésszáma (fent), napi változékonysága (középen), és a 40 keV-től 4 MeV-ig terjedő energiaspektrum mereksége (lent). Részleteket lásd a szövegben.

kontrollált körülmények között végzett kísérletekre lenne szükség. Mindenesetre ez az egyszerű modellkísérlet is mutatja, hogy még ebben a napszél áramlásához képest rendkívüli mértékben leegyszerűsített esetben is sok előre nem látható bonyodalom lép fel.

Ma még vitatott, hogy a bolygóközi és csillagközi mágneses tér milyen mértékben befolyásolja a szuperszonikus és szubszonikus napszél közötti lökeshullám tulajdonságait. A bolygóközi mágneses tér egyértelműen a Naptól ered. A Nap koronájában (2–3 napsugár távolságra) a Naptól kiinduló mágneses tér nagyrészt hurkokat képez, és csak az erővonalak kis része lép ki a jó elektromos vezető napszélbe fagyva a bolygóközi térbe. A Nap forgása és a kifelé áramló napszél miatt a mágneses tér arkhimédeszi spirál struktúrába rendeződik, és irányultsága (vagyis hogy az egyes spirálok mentén a Nap felé vagy attól elfelé mutat) attól függ, hogy a napkorona mely részéből indult ki az illető spirál. Naptevékenységi minimum idején a kétféle polaritást egy enyhén hullámos, a Nappal együtt forgó felület („áramlemez”) választja el, amely a naptevékenységi maximum felé haladva egyre hullámosabbá és bonyolultabb szerkezetűvé válik. A mintegy 11 évenként (legutóbb 2000–2001-ben) fellépő napfoltmaximum idején a Nap mágneses tere fokozatosan átfordul, vagyis az áramlemeztől északra és délre eső spirálok mentén a polaritás ellenkezőjére változik. A Földnél a bolygóközi mágneses tér iránya átlagosan mintegy 50–60 fokos szöveget zár be a Nap irányával, a napszél sebességétől függően. E szög a Naptól kifelé haladva egyre közelebb kerül a derékszöghöz.

Bár a mágneses tér a Naphoz közeli tartományokon túl nem fejt ki lényeges hatást magának a napszélnek az áramlására, fontos hatást gyakorol a nagy energiájú töltött részecskék terjedésére. E részecskék áramlása elsősorban a mágneses tér mentén megy végbe. A lökeshullámnál várhatóan a mágneses tér dinamikai szerepe is megnő, de valószínűleg nem annyira, hogy lényegesen befolyásolja a napszélben kialakult lökeshullámot. Befo-

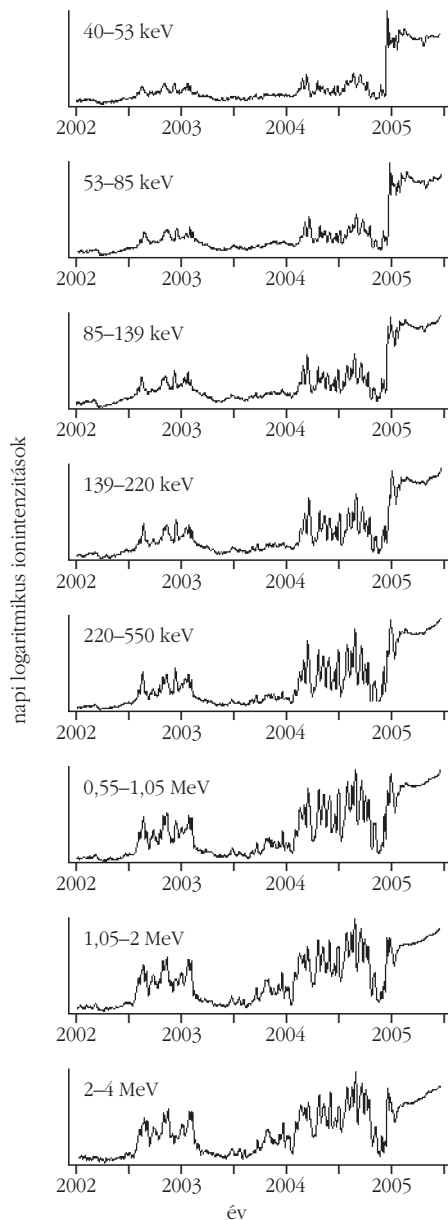
lyásolhatja viszont a nagyobb energiájú részecskék gyorsulását és terjedési viszonyait. Emellett a lökeshullámon túl, az egyre lassuló napszélben a mágneses tér szerepe megnőhet, és a nagyrészt még ismeretlen csillagközi mágneses térrel való esetleges összecsatolódája váratlan jelenségekhez vezethet.

A Voyager-1 útja a lökeshullám felé és azon túl

A Voyager-1 űrszonda először 2002 nyarán, a Naptól 85 CsE távolságban találkozott a lökeshullám közelségére utaló határozott jelekkel. Bár a szonda által mért részecskefluxusok korábban is mutattak némi változékonyságot, ez általában közvetlenül kapcsolatba hozható volt a naptevékenység változásaival, elsősorban a Nap nagy kitöréseivel. A Naptól távol e kitörések csak viszonylag lassan és kis mértékben változtatták meg a nagyenergiájú részecskék intenzitását, bár magában a napszélben elég hirtelen sebességugrásokat is előidéztek. A 2002 júliusában kezdődő változások a korábbiaknál jóval gyorsabbak és nagyobbak voltak. A 3. ábra felső mezőjében bemutatjuk a 0,5 MeV-nél nagyobb energiájú ionok intenzitásváltozásait 2002. január – 2005. június között, logaritmikus léptékben. A középső mező a napi változékonyságot szemlélteti (pontosabban: az egymást követő napok átlagos logaritmikus intenzitásai különbségének abszolút értékét). Végül az alsó mező a hatványfüggvénynek tekintett energiaspektrum (negatív) spektrális kitevőjének változásait mutatja be a fenti időszakra. A spektrumot a 40 keV-től 4 MeV-ig terjedő mérési adatokból számoltuk [3], amelyet a Voyager-1 műszerei 8 energiacsatornában fednek le. A kitevő nagy értéke az energia függvényében gyorsan csökkenő intenzitásra mutat (lágy spektrum), míg a kis értékek kevésbé meredek, kemény spektrumot jelentenek. A valóságban a spektrum a megadottnál is keményebb, mivel a kisebb energiájú csatornáknál jóval nagyobb háttér származik a kozmikus sugárzásnak a szonda és a műszer anyagával való kölcsönhatásából, mint nagyobb energiák esetén; e háttér pontos értéke azonban nem ismert.

Mint a felső mezőben látható, a 2002 júniusában kezdődött intenzitásnövekedés mintegy hat hónapig tartott. Ezt követően, 2003 őszén nagy vita alakult ki arról, hogy a szonda ekkor már túljutott-e a lökeshullámon, majd hat hónap múltán a lökeshullám gyors kifelé mozgása miatt ismét visszakerült a szuperszonikus napszélbe, vagy csak érzekelte a lökeshullám hatását, de túl nem jutott rajta [4, 5]. A kérdést végül a mágneses térre vonatkozó mérések döntötték el, amelyek szerint az adatok nem mutatták a mágneses tér szubszonikus tartományra jellemző megnövekedését.

Ugyancsak a 3. ábra felső mezőjében látható az intenzitás csekély mértékű megnövekedése 2003 második felében, majd az összes korábbinál sokkal nagyobb, fluktuálva növekvő intenzitások jelentek meg 2004 elejétől kezdve. A növekedés 2004 őszéig folytatódott több lépésben, majd októberben és novemberben ismét csökkent a mért intenzitás. Érdekes, hogy a középső mezőben látható változékonyság 2003 közepe után fokozatosan növekvő csúcsokat mutat, beleértve 2004 októberét



4. ábra. Napi logaritmusos ionintenzitások 2001 januárja és 2005 júniusa között, nyolc energiaintervallumban, [3] alapján. A maximális intenzitásváltozásokat minden energián azonos függőleges skálára normáltuk. Jól látható, hogy 2004 decemberének közepén kis energiákon jelenik meg a legélesebb csúcs, és itt haladja meg leginkább a lökeshullámot követő intenzitás az azt megelőző időszakét. A lökeshullámot követő intenzitásnövekedés viszont inkább a nagyobb energiájú csatornákra jellemző.

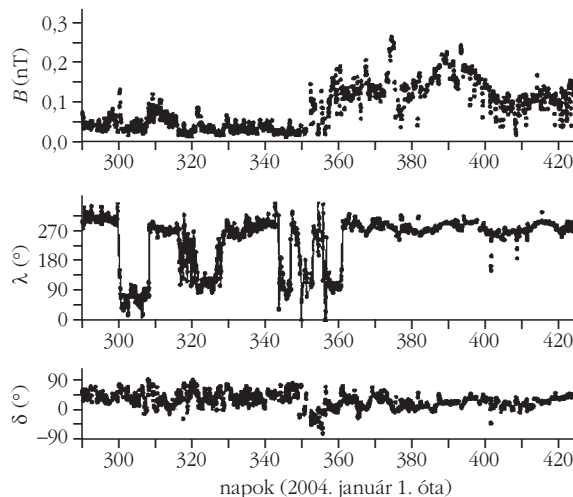
és novemberét, valamint december első felét is. December elejétől maga az intenzitás is növekedésnek indul, bár eközben erősen fluktuál. Az év vége előtt eléri maximumát, majd rövid csökkenés után a fluktuáció drasztikusan lecsökken, és az intenzitás folyamatosan nő. A változékonyság december közepe után gyorsan csökkenni kezd, majd 2005 egész vizsgált időszakában rendkívül alacsony szinten marad. Ugyanakkor az alsó mezőben látható spektrális index is folyamatosan csökken, vagyis a spektrum egyre keményebbé válik.

A 3. ábrán bemutatott adatok alapján világos, hogy a fél MeV-nél nagyobb energiájú részecskék viselkedése 2004 decemberének közepétől alapvetően megváltozott.

Még világosabb bizonyítékot kapunk a drasztikus változásra, ha a 40 keV-től 4 MeV-ig terjedő 8 csatorna mért intenzitását külön-külön vizsgáljuk. Ezt mutatjuk be a 4. ábrán. A logaritmusos fluxusok változásait itt azonos intervallumra normáltuk (Scaled Log Flux), hogy a görbék könnyebben összehasonlíthatók legyenek. E görbék már sokkal határozottabb változást mutatnak december közepén, mint a korábban tárgyalt integrális intenzitás. Különösen a legkisebb energiákon emelkedik ki a december 15-i csúcs, amely után folyamatosan a korábbi időszakoknál jóval nagyobb intenzitás észlelhető. Sajnos éppen december 16-án, amikor egybehangzó vélemény szerint a szonda áthaladt a lökeshullámon, nincs mérési adat. Egyébként a 2004 januárja óta eltelt időszakban ez az egyetlen nap, amelyről telemetriai problémák miatt nem kaptunk adatot. E szerencsétlen technikai hiba valószínűleg a lökeshullám szerkezetére vonatkozó igen fontos adatoktól fosztotta meg a kutatókat.

A kis energiákon fellépő igen éles intenzitáscsúcs, az ezt követő nagy és időben lassan változó ionintenzitás, a részecskék irányeloszlásának közel izotroppá válása (amit az erre vonatkozó adatok meglehetősen bonyolult volta miatt itt nem tárgyalunk) együttesen elég meggyőzően bizonyítja, hogy a Voyager-1 űrszonda 2004. december 16-án átlépett a szuperszonikusból a szubszonikus napszélbe, és ezzel új típusú, korábban nem vizsgált plazmatartományba jutott. A szonda részecskedetektorainak vezető kutatói e bizonyítékok dacára is több hónapig vártak, mielőtt az áthaladás tényét bejelentették. Döntő bizonyítékként a mágneses tér megnövekedését szerették volna bemutatni, hiszen 2002–2003-ban éppen a mágneses tér változásának hiánya bizonyította, hogy az átlépés akkor nem történt meg. Végül 2005. május 24-én, amikor már a gondosan ellenőrzött mágneses adatok is rendelkezésre álltak, az Amerikai Geofizikai Unió közgyűlésén megtörtént a nagy visszhangot kiváltó bejelentés. Az 5. ábrán Norman Ness, a magnetométer vezető kutatója

5. ábra. A Voyager-1 szonda mágneses adatainak órás átlagai a lökeshullámot megelőző és azt követő mintegy két-két hónapos időszakokban, [6] alapján. A felső mező a mágneses tér erősségét, a középső és alsó pedig annak irányát jellemzi a Voyager szondáknál használt speciális koordináta-rendszerben. A középső mezőben látható 180 fokos irányváltások mágnesszektor-átmeneteket jeleznek. A lökeshullámon (TS) való áthaladás 2004. december 16-án, az év 351. napján következett be.



2005 augusztusában elhangzott előadása és megjelenés alatt álló cikke alapján (az ő engedélyével) bemutatjuk a kritikus időszakra vonatkozó mágneses adatokat [6].

Mint az 5. ábrán jól látható, a mért mágneses tér erőssége a várakozásoknak megfelelően jelentősen (mintegy 3–4-es faktossal) megnőtt a lökeshullámon való áthaladás után. Érdekes a középső mező is, amely az áthaladás előtt mutat ugyan „szektorátmeneteket”, vagyis a mágneses tér irányának átfordulásait, de a lökeshullám után eltelt néhány napot követően legalább két hónapig a mágneses tér iránya lényegében változatlan marad. Külön érdekesség, hogy bár a Voyager-1 szonda az ekliptika síkjától 34 fokos északi szélességen halad kifelé, a mágneses tér iránya ebben a két hónapos időintervallumban a déli féltekére jellemző mágneses polaritást mutat.

Az energikus töltött részecskékre és a mágneses térre vonatkozó mérési adatok alapján tehát ma minden kutató egyetért abban, hogy 2004. december 16-án a Voyager-1 szonda kilépett a szuperszonikus napszélbuborékból. A mérési eredmények értelmezésének egyéb kérdéseiben viszont távolról sincs ilyen összhang. Nem világos, miért terjedtek ki ilyen hosszú időszakra a lökeshullámot megelőző intenzitásváltozások. Az anizotropiaadatok ellentmondani látszanak a lökeshullám közelítőleg gömb-szimmetriájának. A lökeshullámon felgyorsult részecskék energiája túl kicsinek látszik ahhoz képest, amit a belső helioszférában végzett mérések alapján vártunk. A lökeshullámon túl mért anizotropia túl kicsinek látszik ahhoz képest, ami az elméletileg számolt napszélsebesség alapján következne. Ezek mellett további kérdések izgatják a kutatókat, és valószínűleg még évek mérési adatai és elméleti erőfeszítései kellene a konszenzus eléréséhez és a helioszféra külső tartományának jobb megértéséhez.

Mi várható a továbbiakban?

A Voyager-1 és Voyager-2 űrszonda évente mintegy 3 CsE-et megtéve halad kifelé a Naprendszerből. Radioaktív bomláson alapuló energiaellátásuk valószínűleg legalább 2020-ig biztosítani tudja, hogy adatokat továbbítsanak a Földre, még ha az adatmennyiség egyes mérő-

műszerek végleges kikapcsolása vagy ritkább bekapcsolása miatt csökken is. A helioszféra köpenyének becsült vastagsága alapján kétséges, hogy a Voyager-1 ez idő alatt kijut-e a szubszonikus napszélből a csillagközi gázt tartalmazó külső köpenybe vagy hüvelybe. Az viszont biztosra vehető, hogy a Voyager-1 további igen értékes és részben váratlan adatokat fog hozzánk továbbítani a szubszonikus tartomány részecskefluxusairól és mágneses tereiről. A KFKI RMKI Kozmikus Fizikai Főosztályának kutatói elsősorban a belső helioszférában korábban végzett mágneses és részecskeeloszlásokra vonatkozó mérések tanulságai alapján igyekeznek megérteni az új környezetben lezajló folyamatokat.

2005 júniusa óta a Voyager-2 szonda által mért intenzitások is hasonló változékonyságot mutatnak, mint amilyeneket a Voyager-1 szonda 2002 júliusától, jóval nagyobb heliocentrikus távolságokban mért. Ez arra utal, hogy néhány éven belül a Voyager-2 is átlépheti a lökeshullámot (könnyen lehet, hogy többször is, a lökeshullám mozgásától függően). A Voyager-2 áthaladása azért is nagyon érdekes lesz, mert ennek a szondának a plazmadetektora kiválóan működik, így a napszélre vonatkozó adatokat közvetlenül is tudjuk majd mérni, nem kell az energikus részecskék anizotropiája alapján tett bizonytalan becslésekre hagyatkoznunk. Várható, hogy a két szonda mérési eredményeinek együttes elemzése elvezet helioszféránk, és ezzel együtt a csillagok környezetében kialakuló analóg asztroszférák jobb megértéséhez.

Irodalom

1. KIRÁLY PÉTER: *Szoláris, helioszférikus és kozmikus részecskesugárzás* – Fizikai Szemle 51/8 (2001) 238
2. W.I. AXFORD, S.T. SUESS: *The Heliosphere* – Web dokumentum, URL: web.mit.edu/space/www/helio.review/axford.suess.html
3. P. KIRÁLY: *The way out of the Bubble: implications of recent Voyager-1 data* – Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference, Pune, India (2005); közlésre elfogadva.
4. S.M. KRIMIGIS ÉS MÁSONK: *Voyager 1 exited the solar wind at a distance of ~85 AU from the Sun* – Nature 426 (2003) 45
5. F.B. McDONALD ÉS MÁSONK: *Enhancements of energetic particles near the heliospheric termination shock* – Nature 426 (2003) 48
6. N.F. NESS ÉS MÁSONK: *Studies of the termination shock and heliospheric beat at >92 AU; Voyager 1 magnetic field measurements* – Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference, Pune, India (2005); közlésre elfogadva.

OPTIKAI FREKVENCIAMETROLÓGIA, AVAGY MIRE JÓK A FREKVENCIAFÉSŰK?

Dombi Péter
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

Amikor a Nobel-díj kihirdetést követő órákban a kísérleti munkájáért díjazott *Theodor Hänsch* német tudósnak szegeztek azt az újságírói kérdést, hogy miért is nyerhette el ezt a kitüntetést, tömören és szerényen (és mellel teljesen helytállóan is) úgy fogalmazott: „Nagyon pontos méréseket végeztem...” Ő *John Hall* amerikai fizikussal megosztva kapta a díj felét a „lézeralapú precíziós spektroszkópiában” elért eredményekért, az „optikai frekven-

ciafésű-technikát is beleértve”. Sokan esetleg már arról is értesültek, hogy a frekvenciafésűk a femtoszekundumos fényimpulzusokat kibocsátó lézerekre épülnek. Talán nem árt a következőkben ezekre az összefüggésekre pontosabban is rávilágítani annak kapcsán, hogy mik is ezek a különleges nevű eszközök, nem megfelelően a szép számban rendelkezésre álló érdekes alkalmazásokról és magyar vonatkozásokról sem.