

A Voyager űrszondák a Naprendszer határvidékén

2004. december tizenhatodikán a Voyager-1 a Naptól 94 csillagászati egység távolságban, $+35^\circ$ heliocentrikus ekliptikai szélességnél átlépte a napszél tartományának külső határát, az ún. *terminációs* (azaz végetérési) *lökéshullámot*. Ezzel az 1977-ben felbocsátott űrszonda a Jupiter és a Szaturnusz felkeresését követő hosszú, eseménytelen útja után ismét úttörő szerepet kapott egy ismeretlen térség kutatásában. (És mellesleg elbitorolta a Pioneer-10 és 11 szondák nevében foglalt jelzőt, amelyeket már lehangzott — ráadásul azok időközben fel is mondták a szolgálatot.)

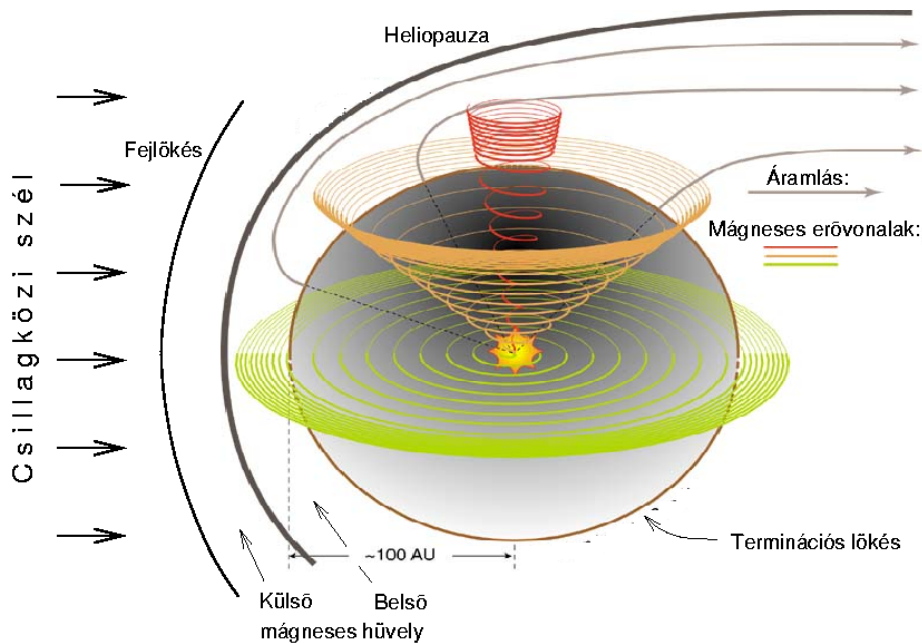


Figure 1: A heliopauza térségének szerkezete (S.T. Suess nyomán). Mivel a napszélben kifelé sodródó mágneses erővonalak végpontja a forgó Nap felszínéhez kapcsolódik, a tér dugóhúzószerűen felcsavarodik, így a Naprendszer külső tartományában az erővonalak már közel merőlegesek a Nap irányára.

A napszél, ez a Naptól kiinduló szuperszonikus plazmaáramlás forrásától távolodva egyre jobban felhígul, így torlónyomása előbb-utóbb a csillagközi anyag csekélyke nyomása alá csökken. E határon, a *heliopauzán* túl az intersztelláris közeg nem enged teret a Naptól kiáramló anyagnak. A határon a Naptól kiáramló plazma sebessége nullára csökken, amihez természetesen előbb a hang-

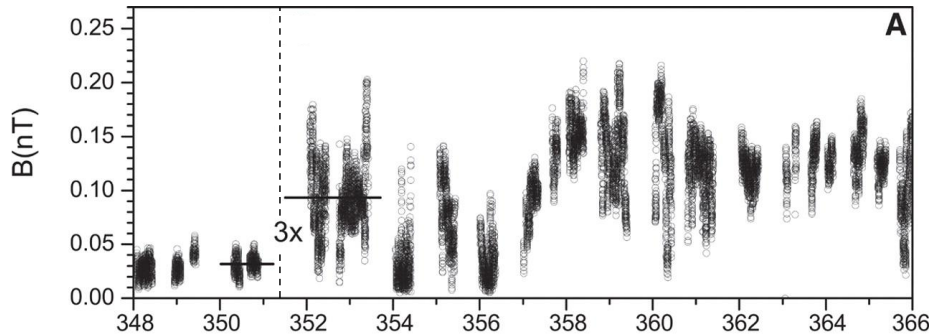


Figure 2: A Voyager-1 által mért mágneses térerősség változása a 2004. január 1. óta eltelt napok függvényében (L.F. Burlaga és mtsai nyomán, Science 309, 2027). Az oszlopokba rendezett körök kétpercenkénti mérési adatok, óránkénti bontásban.

sebesség alá kell fékeződnie. Ez viszont csak ugrásszerűen, egy lökeshullámon áthaladva lehetséges, hiszen mivel a gázban a jel csupán hangsebességgel terjed, a heliopauza felé ennél gyorsabban áramló anyag nem “szerezhet előre tudomást” arról, hogy le kell fékeződnie. Ez a terminációs lökés tulajdonképpen a napszél tartományának külső határa. A Naptól mért távolsága a napszél erősségének — s így közvetve a naptevékenységnek — a függvényében változik.

Jelen napciklusban a napszél erőssége, s így a terminációs lökés sugara 2004 derekán érte el a maximumát. Az új évezred első éveiben tehát a találkozást türelmetlenül váró űrfizikusok bosszúságára a lökésfront szinte “menekült” a Voyager-1 elől — noha a találkozás előjeleként már 2002 közepétől kezdve felerősödött a MeV körüli energiájú részecskesugárzás. 2004-ben aztán a terminációs lökés végre ismét zsugorodni kezdett, mígnem december 16-án találkozott a kifelé tartó Voyagerrel. Az áthaladás legnyilvánvalóbb jele a napszél sebességének hirtelen csökkenése lett volna — csak hogy az űrszonda plazmadetektora rég működésképtelen, így ez az adat sajnos nem volt mérhető. A mágneses tér ugrásszerű változása azonban így is egyértelműen tanúsítja, hogy a Voyager-1 behatolt a magnetopauza és a terminációs lökés közötti tartományba, a Naprendszer ún. *mágneses hüvelyébe* (heliosheath).

A napszél plazmája magával sodorja a Nap belé fagyott, dugóhúzószzerűen felcsavarodott mágneses erővonalait is, melyek így a terminációs lökés után lelassult áramlásban feltorlódnak (?? ábra). Ezért a mágneses hüvelyben a térerősség jóval magasabb, mint a szuperszonikus napszél tartományában. Ráadásul a hüvelyben a napszélbelinél jóval erősebb és más jellegű *mágneses turbulencia* uralkodik.

Mint a ?? ábrán látható, a fenti várakozásokkal egybevágóan a Voyager-1 által mért mágneses térerősség 2004.12.16, az év 351. napja után mintegy háromszorosára nőtt: ilyen erős mágneses teret utoljára a Neptunusz pályájánál mért tartósan a szonda. Ugyanakkor megerősödtek a mágneses térben mutatóköző rövidtávú véletlen változások is, ami erős mágneses turbulencia jelenlétére utal. A véletlen változások statisztikai jellemzői is alapvetően eltérnek a koráb-

ban mértéktől. Mindez egyértelműen jelzi, hogy a szonda valóban belépett a mágneses hüvelybe.

A mérési adatok ugyanakkor meglepetéseket is tartogattak. A mágneses tér irányítása például ellentétes a várttal. Mivel napjainkban a Nap északi sarka déli mágneses polaritású, a Voyager-1 ekliptikai szélességén az erővonalaknak befelé kellene tartaniuk — helyett a találkozás óta kifelé tartó teret mér a szonda. Ez lehet a mágneses hüvelyben zajló, a mágneses teret eltorzító áramlások következménye, vagy egy hosszantartó helyi zavar eredménye. Valóban, a 2003. október/novemberi intenzív naptevékenység¹, az ún. “mindenszenteki események” (Halloween events) hatása 2004 őszén érte el a Voyager-1 térségét, és hónapokig eltartott, így a terminációs lökés átlépésekor a térségben uralkodó viszonyok nem feltétlenül tekinthetők tipikusnak.

Még nagyobb elképedést okozott, hogy a várakozással ellentétben az űrszonda nem találta meg az ún. *anomális kozmikus sugarak*² forrását. Ezeket a furcsa, nagyenergiájú töltött részecskéket az 1970-es évek elején fedezték fel először. 10 MeV/nukleon körüli energiájuk jóval kisebb a Naprendszeren kívülről érkező galaktikus kozmikus sugarakénál, így elvben nem juthatnának át a Naprendszer mágneses hüvelyén. Szoláris eredetüket viszont kizárja, hogy intenzitásuk a Naptól távolodva nő. Összetételük is szokatlan: aránylag nagy mennyiségben tartalmazzák magas ionizációs potenciálú atomok (He, O, Ne) egyszerű ionjait. A fenti jellemzők alapján arra következtethetünk, hogy őseik a csillagközi anyag semleges atomjai, melyekre a mágneses tér nincs hatással, így könnyen bejuthatnak a Naprendszer belső tartományába. Itt azonban előbb-utóbb ionizálódnak, s a napszél magával sodorja őket kifelé — az ilyen ún. felszedett (pickup) ionokat napszélmérésekből valóban jól ismerjük. A terminációs lökessel találkozván a felszedett ionok nagy sebességre gyorsulhatnak az ún. *Fermi-mechanizmus* révén. Ez a lökeshullámokban működő részecskegyorsítás a “mozgó tükrök” elvén alapszik: ha a részecske véletlen mozgása során újra és újra áthalad a lökésen, fokozatosan igen nagy energiára tehet szert. Az asztrofizikában nagy jelentőséget tulajdonítanak ennek a részecskegyorsítási folyamatnak, amit most a Voyager szondák közvetlenül tanulmányozhattak volna.

Az anomális kozmikus sugarak intenzitásában várt erős csúcs azonban elmaradt: a sugárzás intenzitása a mágneses hüvelyben kifelé haladva továbbra is ugyanolyan fokozatosan nő, mint azon belül. A rejtély megoldására tett legújabb kísérlet D. McComas és N. Schwadron amerikai kutatók 2006 elején közzétett modellje. Ez a korábbi modellektől eltérően figyelembe veszi, hogy a Napnak a környező csillagközi anyaghoz viszonyított mozgása miatt nemcsak a heliopauza, de (az 1. ábrával ellentétben) a terminációs lökés is csepp alakúvá torzul. A modell szerint a gömbszimmetriától való eltérés folytán a felszedett ionok felgyorsítása a terminációs lökés farokrészére korlátozódik, míg a Voyager szondák a fejrészen haladnak át.

Mi várható még? A Voyager-2 2004 végén, a Naptól 75 csillagászati egység távolságban már érzékelte a terminációs lökésről visszavert első részecskéket. (A

¹Csillagászati Évkönyv 2005, 147. oldal

²Csillagászati Évkönyv 2003, 274. oldal.

Voyager-1 esetében ez csak 86 AU-nál történt meg, ami ismét csak a lökés erősen aszimmetrikus alakjára utal.) A várakozás szerint a második szonda 2009-ben vagy 2010-ben lép majd át a terminációs lökésen, ez esetben ép plazmadetektorral. A szondák radioizotópos áramforrása legalább 2020-ig szolgáltat még energiát. Így némi szerencsével megérhetik, míg a heliopauzát elérve kilépnek az “igazi” csillagközi térbe — vagy legalábbis az ún. *külső mágneses hüvelybe*, amely a csillagközi gázban lövedékként mozgó heliopauza előtti *fejhullámon* belül, de a heliopauzán túl fekszik.

Petrovay Kristóf

Science, 2005 szeptember 23

Geophysical Research Letters, 2006 február 17