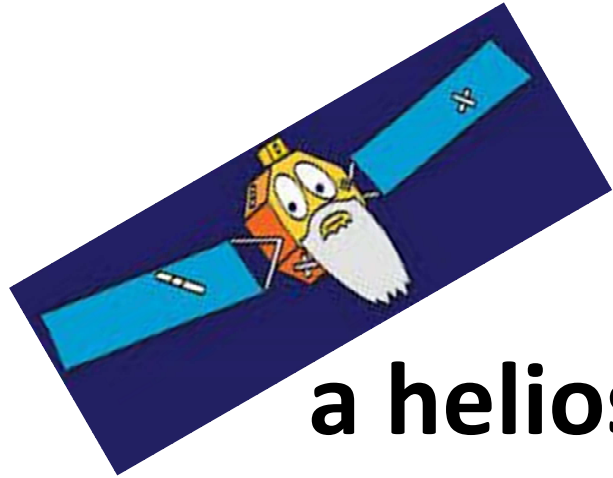




Veteránok

a helioszféra határvidékén:

a Voyager-küldetés



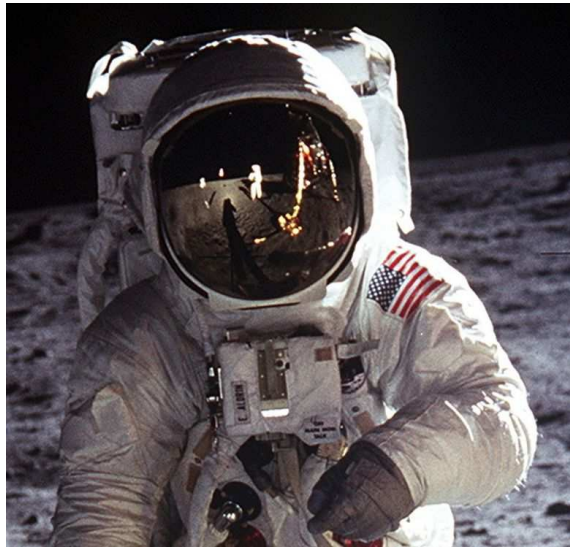
KFKI Veterán-klub előadás, 2017. december 1.

Király Péter, Wigner RMI

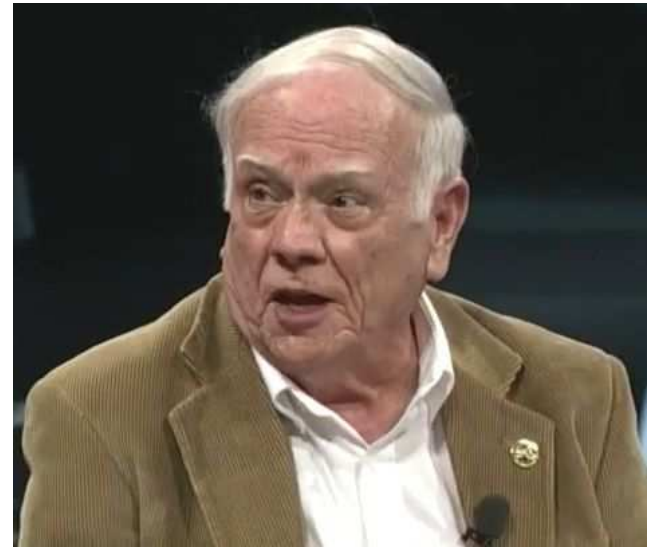
A Voyager-küldetés fogantatása

Az USA az Apollo-program (1961-72, első holdraszállás 1969) utánra új célokat keresett.

1964-ben a Sugárhajtóművek Laboratóriumában (**JPL, Jet Propulsion Laboratory**, amit eredetileg **Kármán Tódor** részére alapítottak 1936-ban) egy nyári gyakorlatos PhD diák, **Gary Flandro** jött rá a következőre: ha az 1970-es évek második felében indítunk egy küldetést, akkor a szondák gravitációs rásegítéssel végig tudják látogatni mind a 4 külső bolygót. **A NASA 1972-ben elfogadta és kidolgozta a küldetés tervét, majd 1977. aug. 20-án (V2) ill szept. 5-én (V1) sor került az indításra.**



Neil Armstrong a Holdon magát fényképezi (1969)

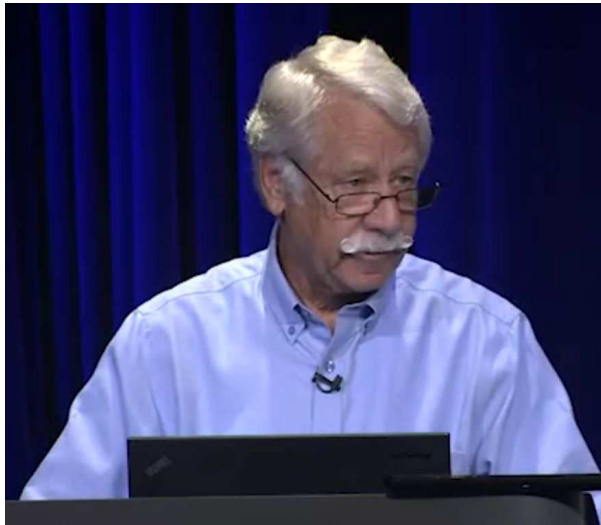


Gary Flandro 1964-ben és 2017. szeptember 5-én

Két ajánlott videó a Voyager küldetés 40 éves útjáról és eredményeiről

**Edward Stone: The Voyager Journey to Interstellar
Space (2017. január):**

<https://www.youtube.com/watch?v=2MXM0HgCu2c>

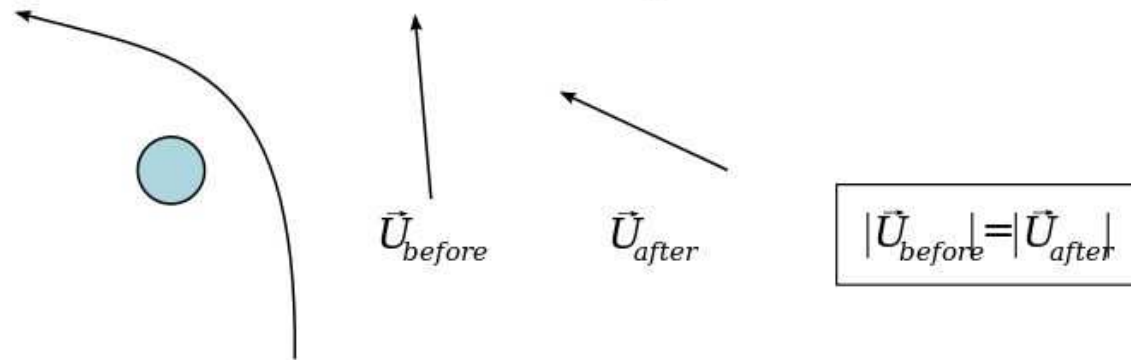


**Alan Cummings: Voyager: 40 Years in Space (JPL, von
Kármán Lectrue Series, 2017. augusztus)**

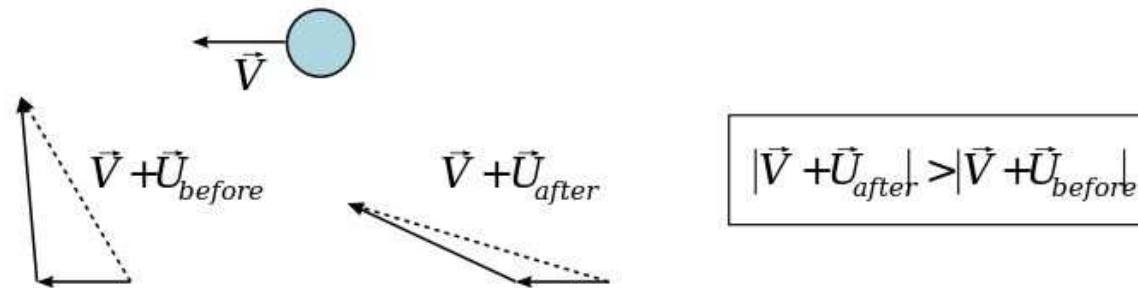
https://www.jpl.nasa.gov/videos/lectures/JPL-20170824-VKLECTf-0001-Voyager_40_Years_in_SpaceCC.mp4

Gravitációs parittya (hintamanőver) elvi vázlata

A sebesség irányának változása egy bolygó vonatkoztatási rendszerében

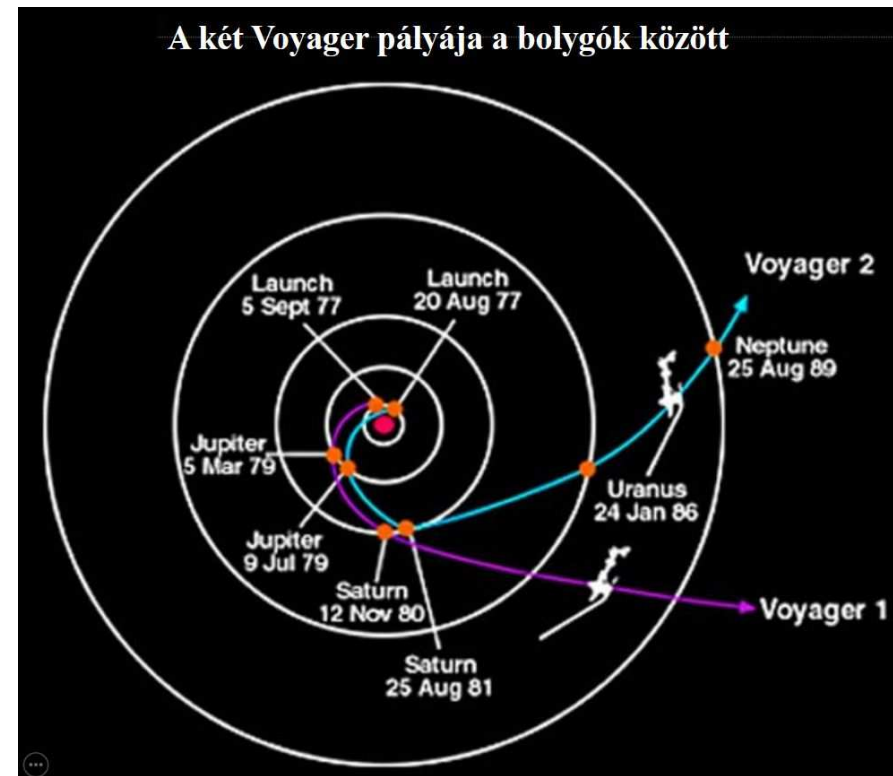
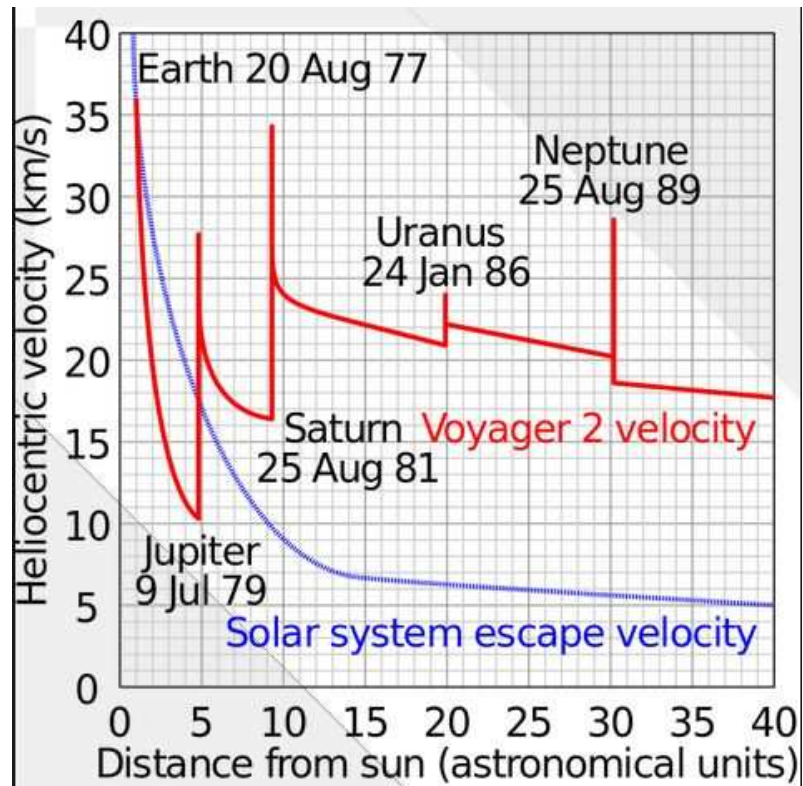


A Nap vonatkoztatási rendszerében a sebesség nagysága is változik

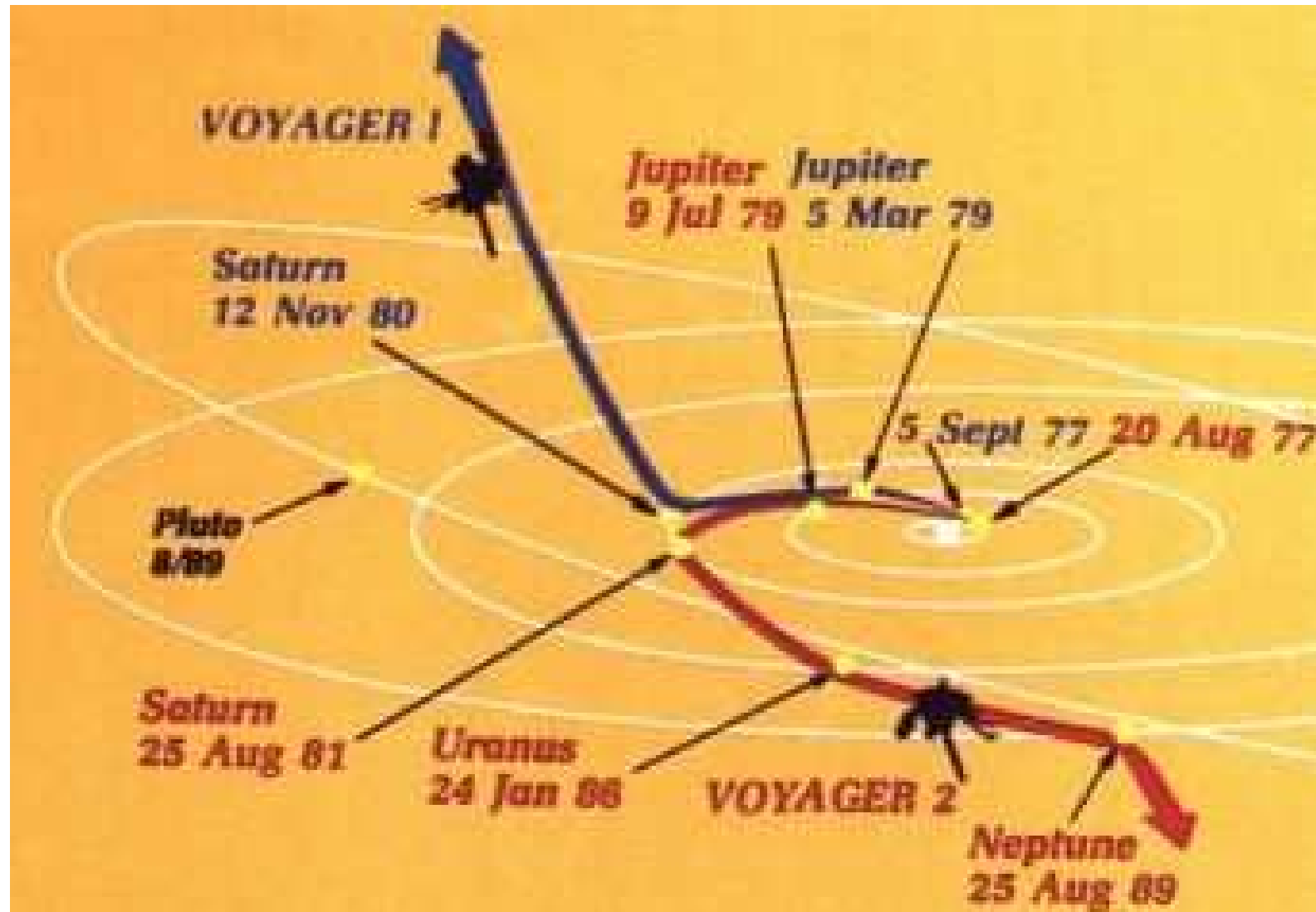


Two-dimensional schematic of gravitational slingshot. The arrows show the direction in which the spacecraft is traveling before and after the encounter. The length of the arrows shows the spacecraft's speed.

A Voyager-2 sebességének változásai és mindkét Voyager pályája a bolygók között



A Gary Flandro terve alapján megvalósult Voyager küldetés, amire később kb. 175 évig a bolygók állása miatt nincs lehetőség.



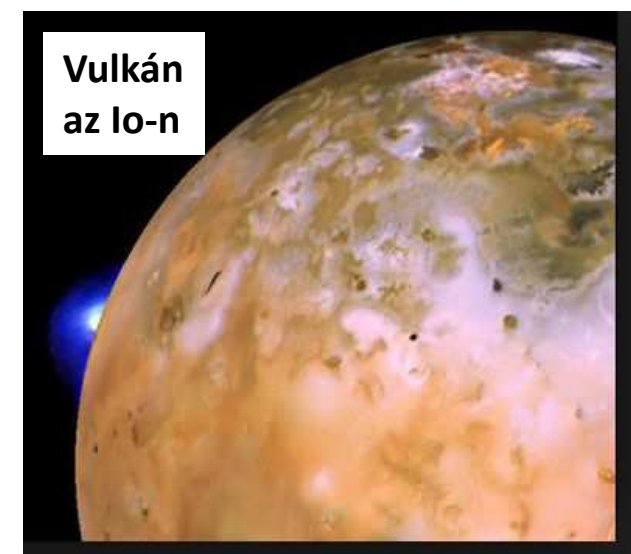
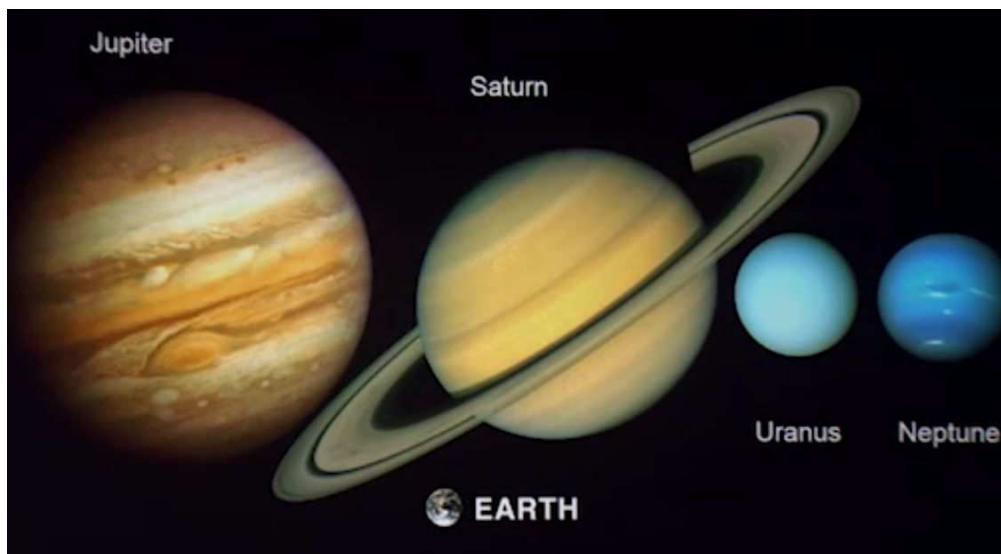
A felkészülés és a fellövés problémái és a végül igen sikeres elsődleges küldetés

Az 1972-ben ill. 1973-ban fellőtt Pioneer 10 és 11 szonda a Jupiter sugárzási övezeteiben a földinél sokkal nagyobb dózisteljesítményt észlelt, ezért szükség volt az elektronika és a detektorok sugárálló alkatrészekkel való áttervezésére.

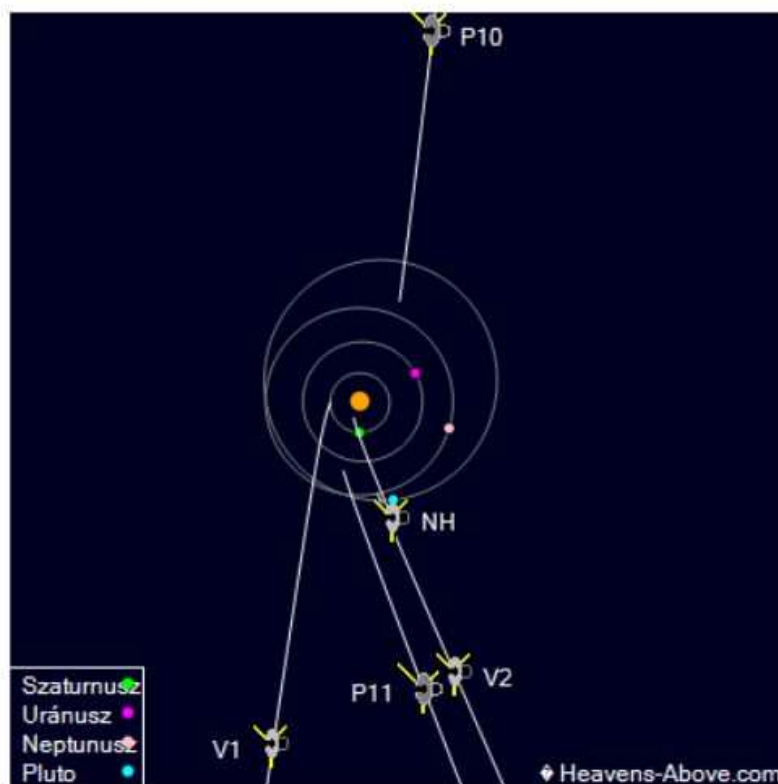
Mivel sok váratlan környezetre ill. eseményre is számítani lehetett, lehetőséget kellett biztosítani a programok rugalmas módosíthatóságára.

A Voyager-2 felbocsátása után a detektorok tartója nem teljesen tolódott ki. A Voyager-1 fellövésénél üzemanyag-szivárgás történt, és végül a földkörüli pálya elhagyása éppen hogy sikerült (kb. 3 s-os gyorsításra maradt üzemanyag).

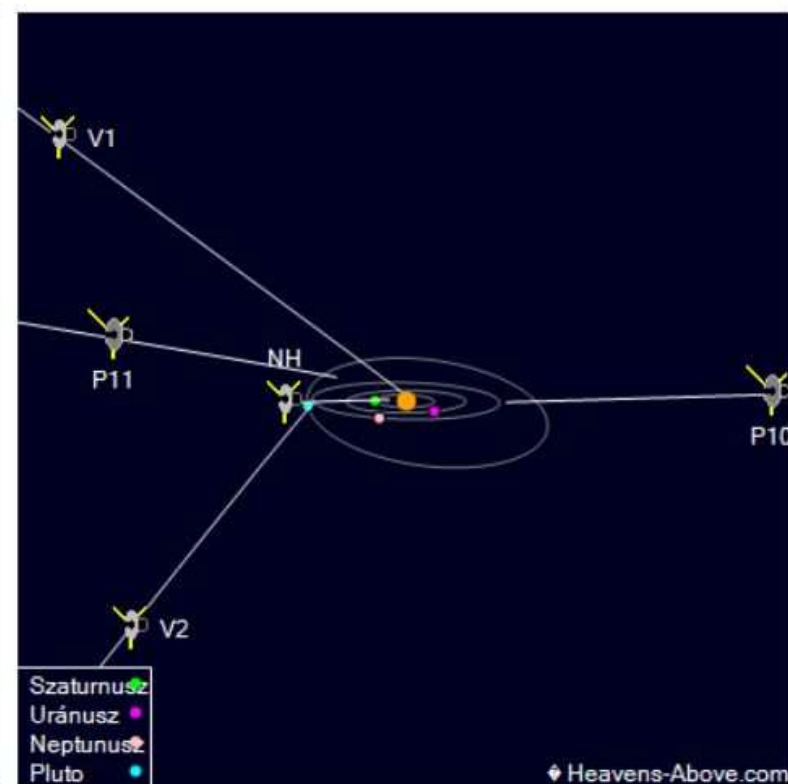
A Voyagerek nélkül a Galileo és Cassini programokra sem lett volna lehetőség.



A Naprendszer elhagyni készülő űrszondák helyzete és néhány adata



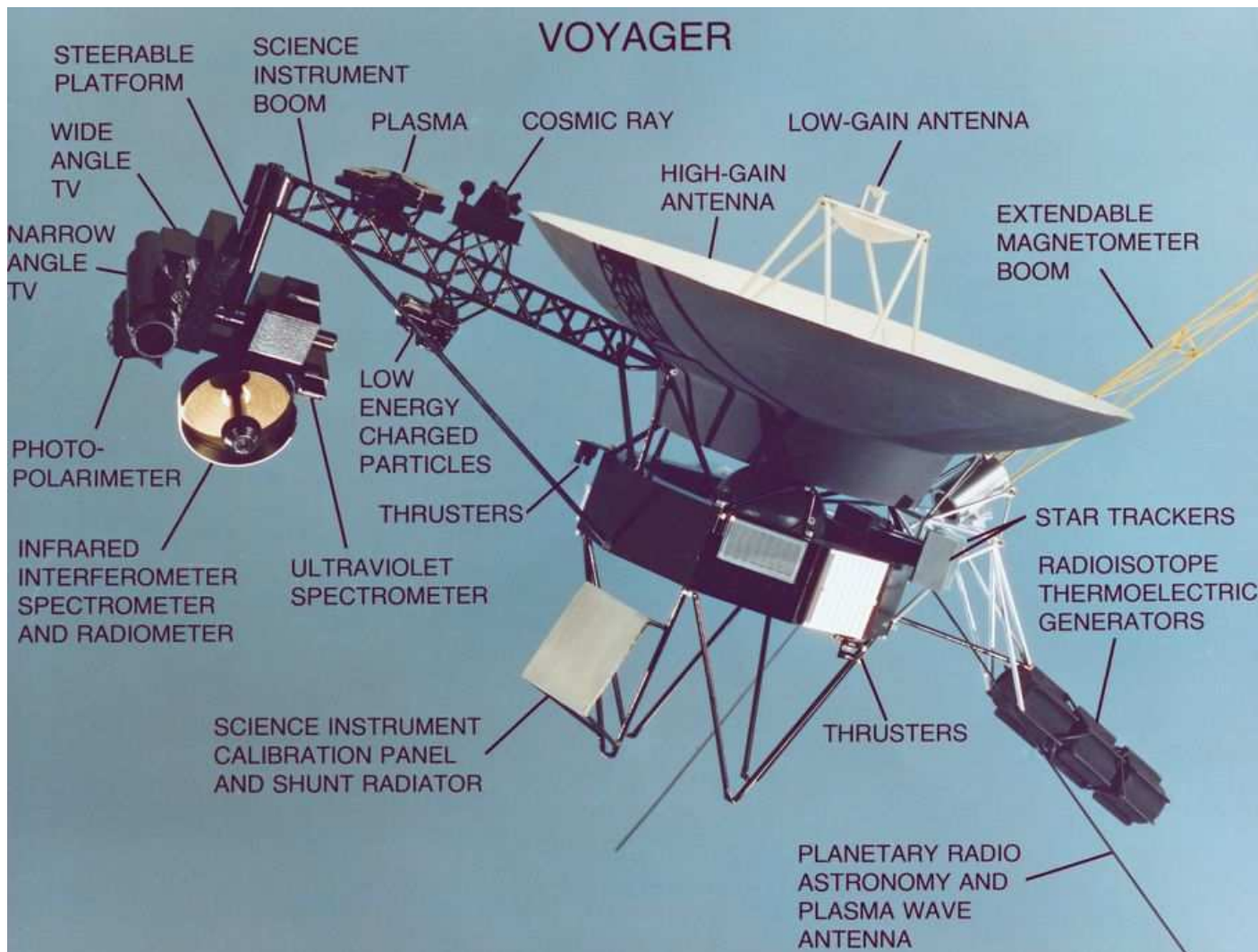
Az ekliptikus sík 90°-os felülnézete



Ekliptika feletti 10°-os látószög

	Pioneer 10	Pioneer 11	Voyager 2	Voyager 1	New Horizons
Távolsága a Naptól (CsE)	119,878	98,742	116,067	140,513	40,086
Naphoz viszonyított relatív sebesség (km/s)	11,960	11,263	15,353	16,986	14,188
Naphoz viszonyított relatív sebesség (CsE/év)	2,523	2,376	3,239	3,583	2,993
Ekliptikus szélesség	3°	14°	-36°	35°	2°

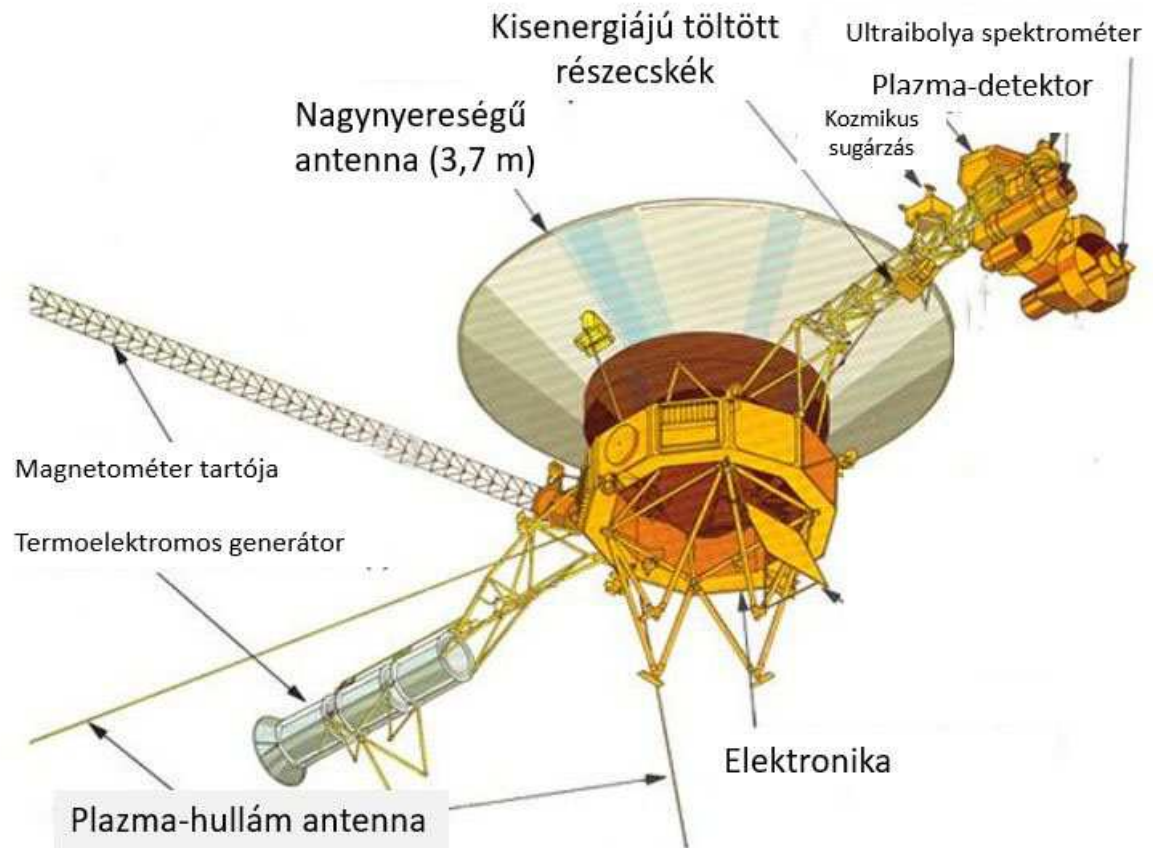
A Voyager szondák kezdeti konfigurációja. Az energiát Pu-238 alfa-bomlása biztosította. A kezdeti elektromos teljesítmény 470 W volt, jelenleg ennek kb. a fele. A Pu-238 alfa-bomló, felezési ideje 87,7 év, de az átalakítás hatásfoka is romlik.



A Voyager szondák és még működő műszercsoportjaik

Instrument Status

Instrument	Voyager 1	Voyager 2
Cosmic Ray Subsystem (CRS)	ON	ON
Low-Energy Charged Particles (LECP)	ON	ON
Magnetometer (MAG)	ON	ON
Plasma Wave Subsystem (PWS)	ON	ON
Plasma Science (PLS)	OFF	ON

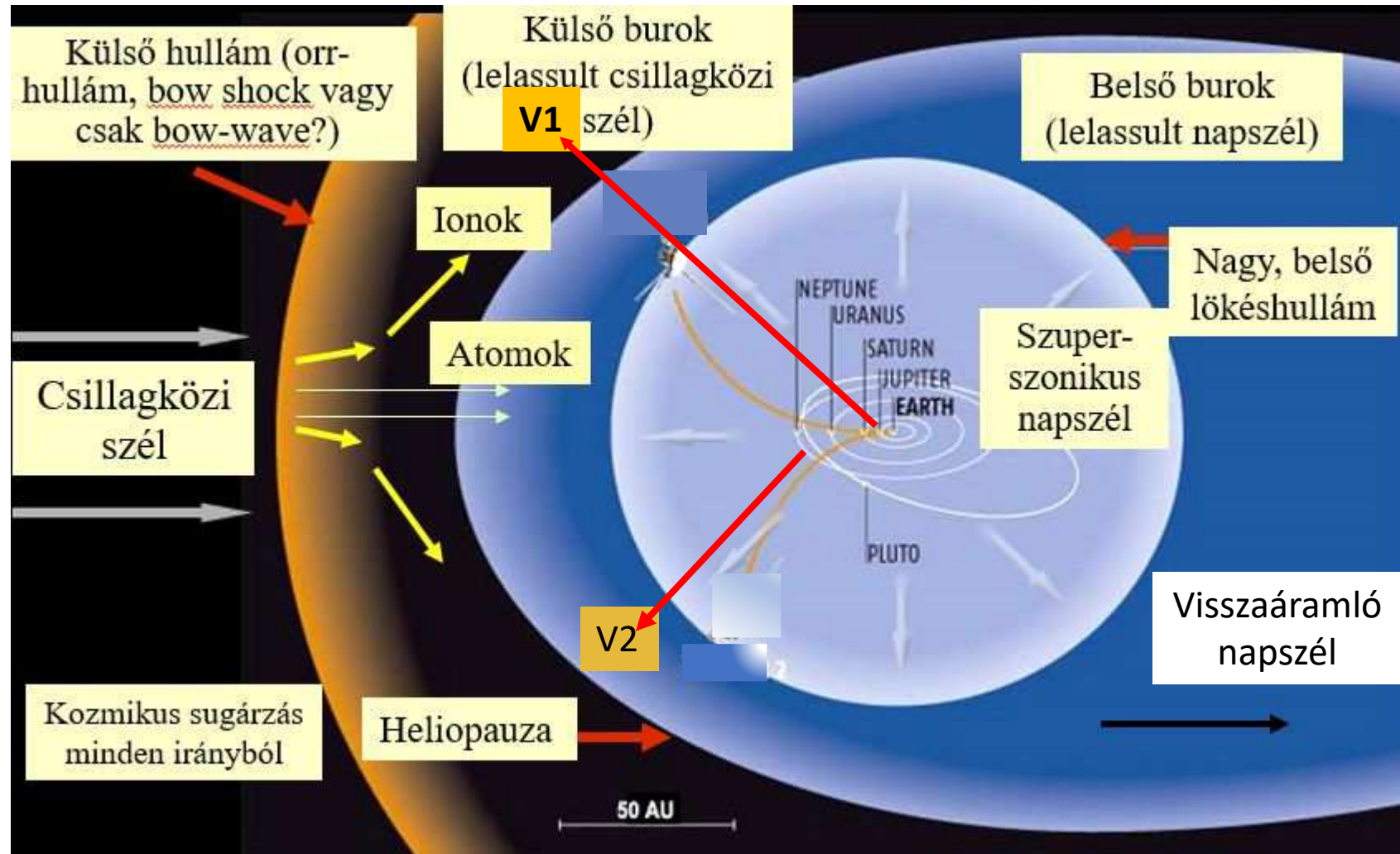




A NASA Deep Space Network (DSN) egyik 70 méter átmérőjű rádióantennája. A Voyagerek számára például innen lehet parancsokat feladni, míg a Voyagerek 23 W teljesítményű antennáról adják adataikat 160 bit/s sebességgel.

A NASA 3 antennarendszere Kaliforniában, Canberrában és Madridban van.

A kifelé áramló napszél tartománya a csillagközi térben: **a Helioszféra**

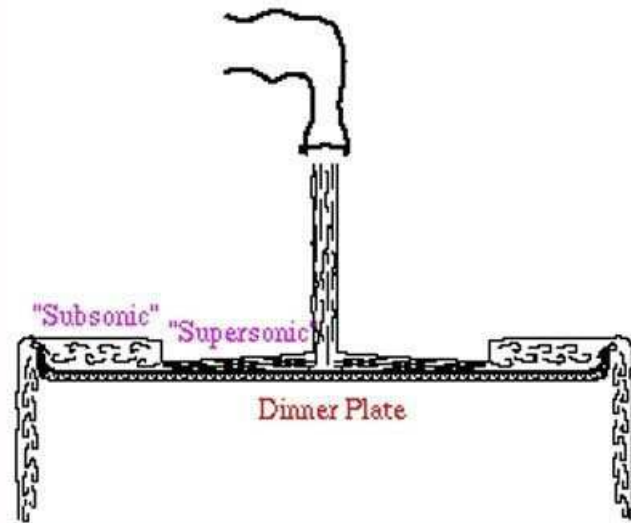


A helioszféra mágneses tere egy hullámos felület, az ún. áramlemez alatt és felett ellenkező irányú spirál mintát követ.

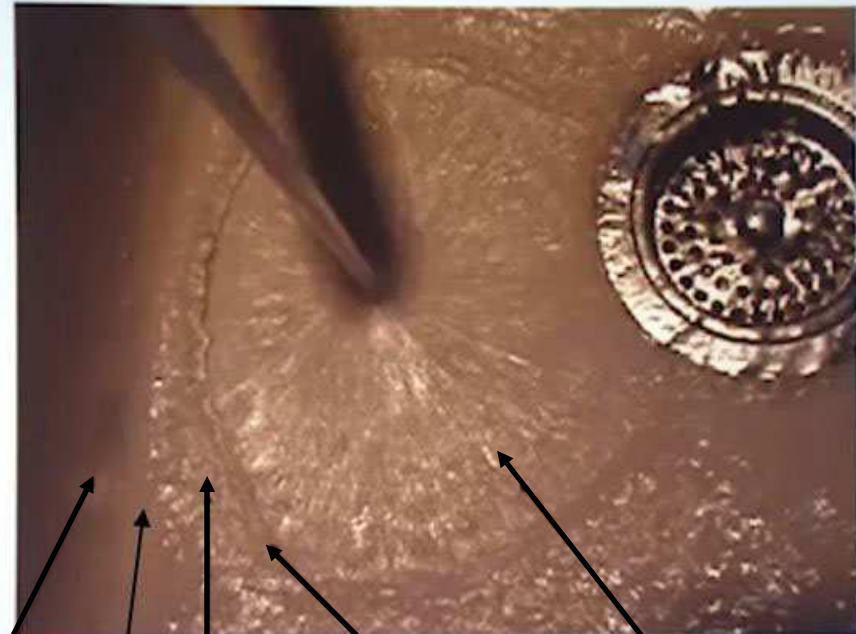


Lökéshullám létrejötte kvázi-kétdimenziós vízáramlásban

Ian Axford szemléltetése a nagy helioszférikus lökéshullámhoz



Helioszféra egy konyhai lefolyóban (Cummings)



Csillagközi tér

Heliopauza

Szubszonikus
napszél

Nagy
lökéshullám

Szuperszonikus
napszél

Kép a Voyagerek 40 éves jubileumát köszöntő előadásból

Majdnem ugyanez saját konyhai
lefolyómban, ahol a víz a falról visszaáramlik

Helioszferikus küldetések felülvizsgálata Washingtonban 1995 tavaszán (Pioneer 10, 11, Voyager 1, 2, Ulysses, SAMPEX

Ian Axford vezette 7 fős bizottság (melynek egyedüli európai tagja voltam) előtt védték meg a küldetések és műszercsoportok vezetői a következő 5 évre szóló terveiket.

A Voyager küldetés folytatása is kérdésessé vált, hiszen a szondákkal való kétirányú kommunikáció nagyon leterhelte a NASA három nagy rádiótávcső-központját (DSN, Deep Space Network). Bár a nagy lökéshullámon és esetleg később a heliopauzán való áthaladást fontos célnak tekintették, nem lehetett tudni, hogy ez mikorra várható.

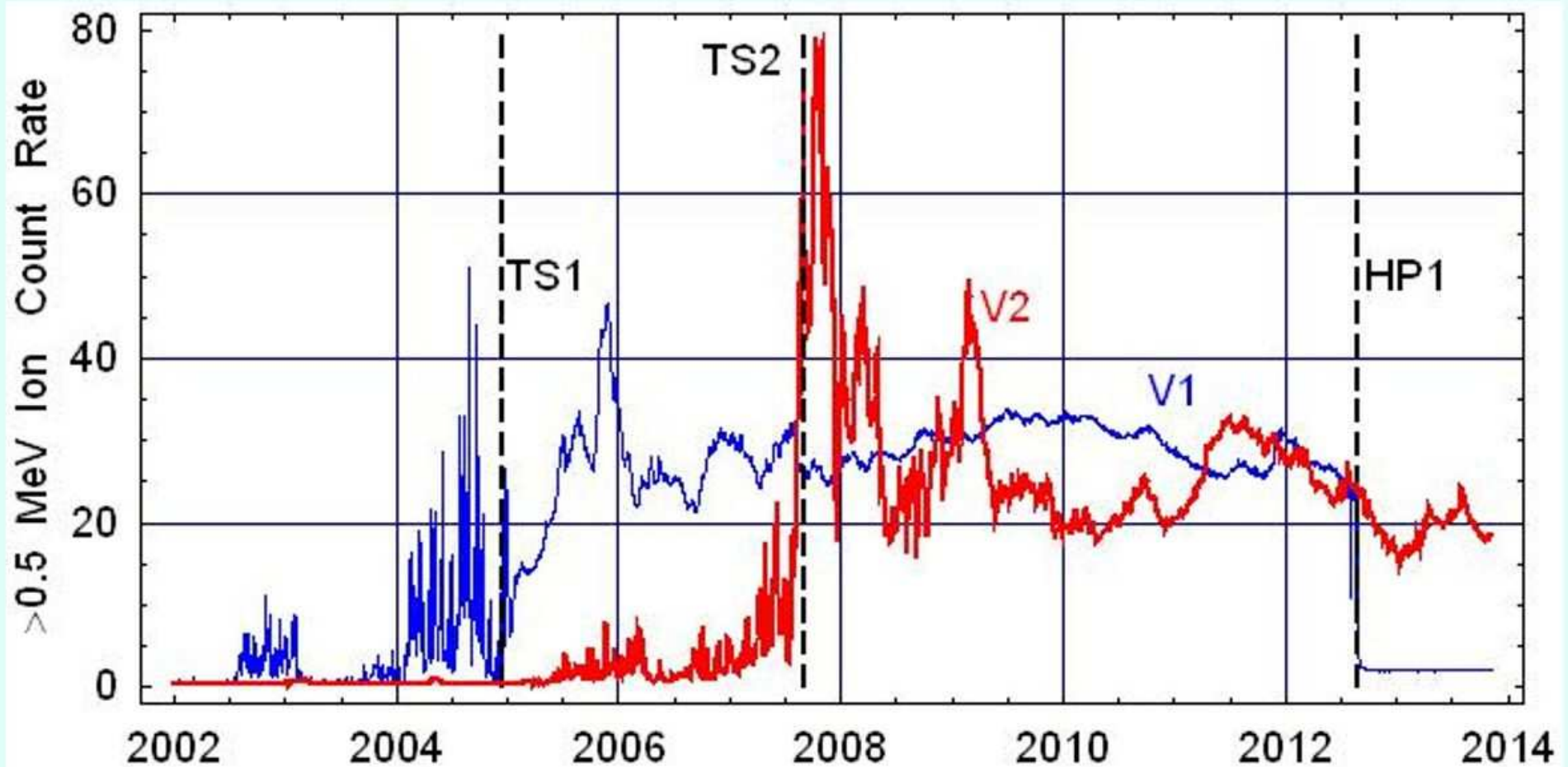
A bizottság azt javasolta, hogy a két Voyager és a még működő Pioneer-10 új, IM (Interstellar Mission) néven külön küldetesként szerepeljen, és 3 év múlva facility-ként működjön, egyaránt hozzáférhetővé váljon az amerikai és külföldi kutatók számára.

Végül a Pioneer-10 a vártnál hamarabb szüntette be működését, így VIM néven egy Voyager Interstellar Mission jött létre, és adatai csak részben váltak általánosan hozzáférhetővé.

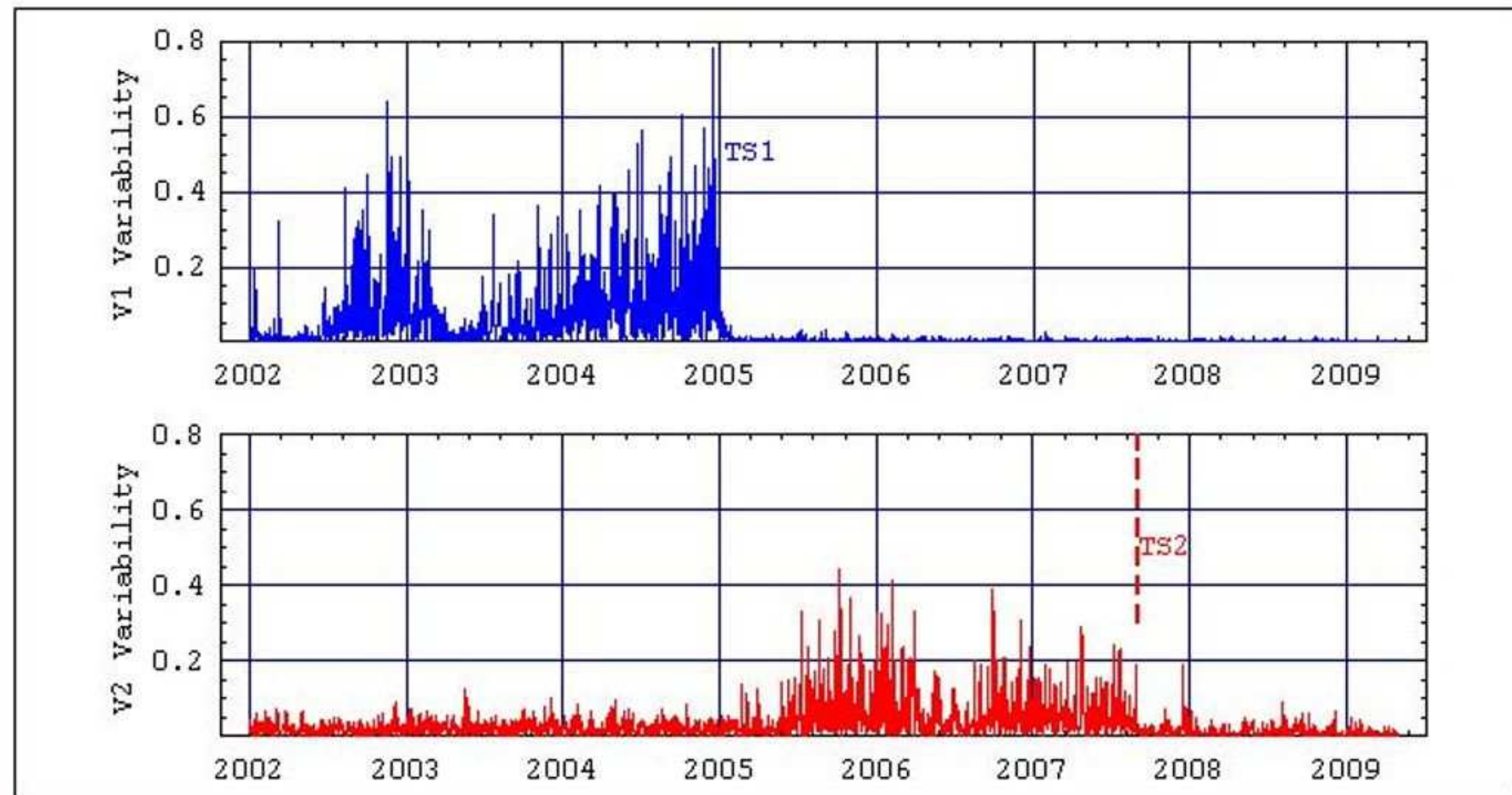
A Voyager szondák mérési eredményei a bolygókon túl, a nagy belső lökéshullám és a lelassult napszél tartományában.

A lelassult napszél és a közeli csillagközi gáz tartományát összefoglalóan a helioszféra határvidékének nevezhetjük.

A V1 és V2 szonda MeV körüli beütésszámának változásai. Jól látható a lökéshullám (TS1, 2) ill. a heliopauza hatása.

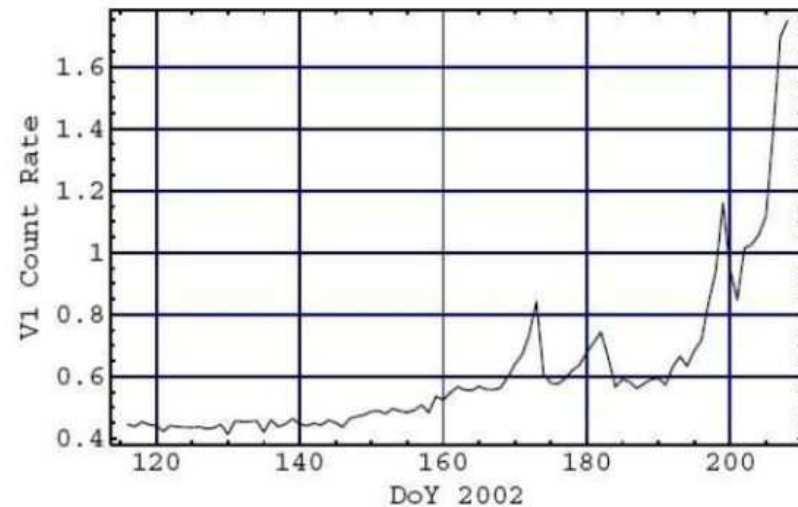
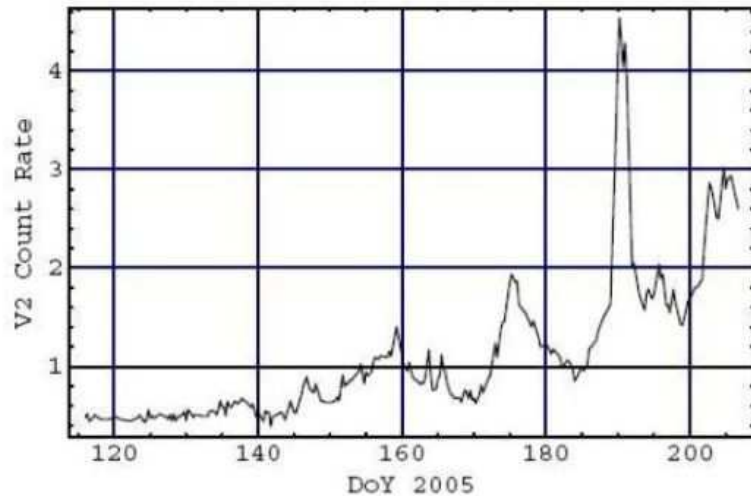


A V1 és V2 által mért beütésszámok logaritmikus változékonysága (az egymás utáni napok beütésszámai logaritmusának különbségei, abszolút értékben)



A gyors váltakozást részecskenyalábok keltette instabilitások okozhatták.

2005-ös kozmikus sugárzási konferencia (Pune, India), a V1 lökéshullámon való áthaladása (2004. dec. 16.) után. Fontos észrevétel volt, hogy a V2 áthaladása is 2-3 éven belül várható. Kb. 2,7 év múlva (2007. augusztus 30.) be is következett.



The > 0.5 MeV/nucleon ion flux recently measured by Voyager 2 (left) compared with those recorded by Voyager 1 three years ago (right) (Kiraly [52]).

A Voyager-2 lassú napszélbe való átlépését a plazma-detektor is észlelte, bár arról a nyilvános weblapon több hónapig furcsa adatok jelentek meg. Az átlépés napján a PI-tól már megkérdeztem, nem történt-e átlépés, de erre egyelőre nem érkezett válasz.

2006 novemberének végén jelentek meg az új napszél-adatok. December 6-án megkérdeztem, miben változott a kiértékelés, amire még aznap választ is kaptam:

"Hi Peter,

the problem has not been the data or analysis, it has been politics. We had to wait for the AGU where there will be talks on the crossing and a press conference Monday morning. Magnetometer data across the shock is very good. We have velocities. Density increases at the shock."

Az eredetileg feltett és a később módosított napszél-adatok

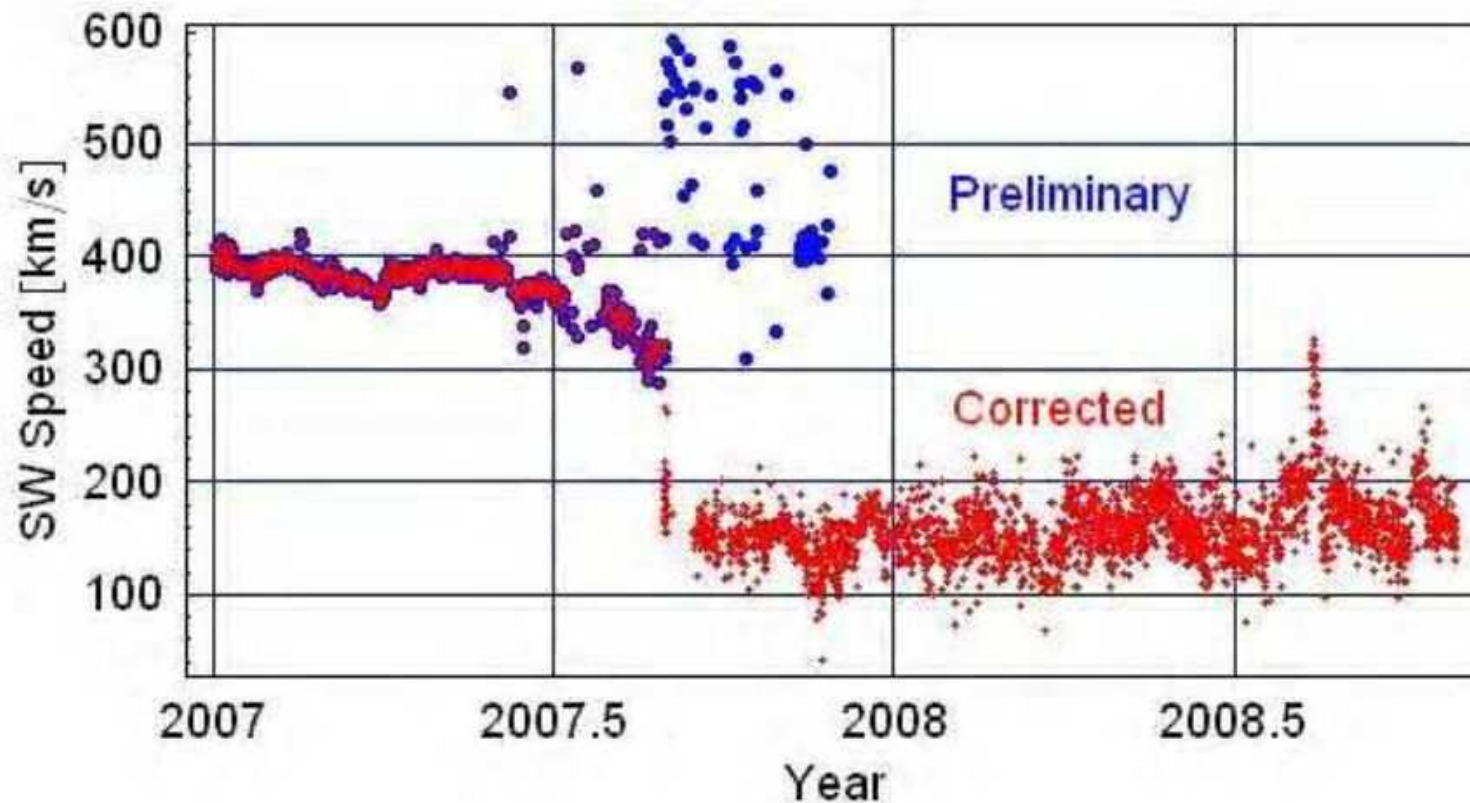
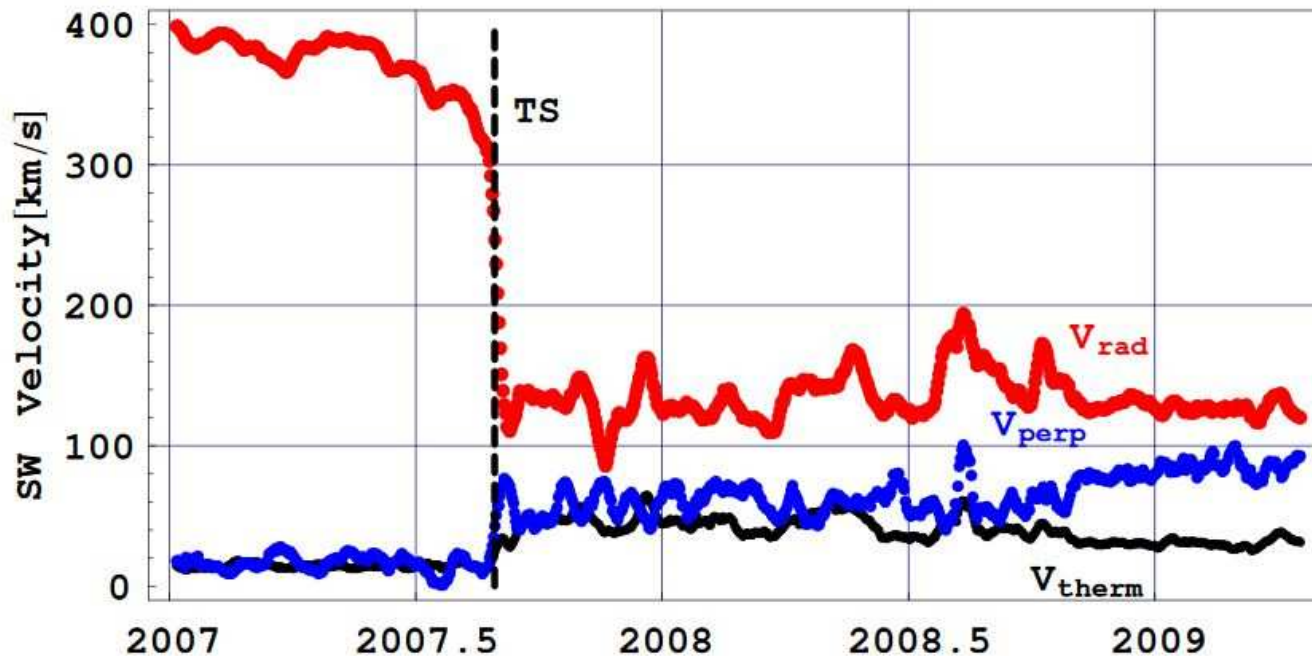


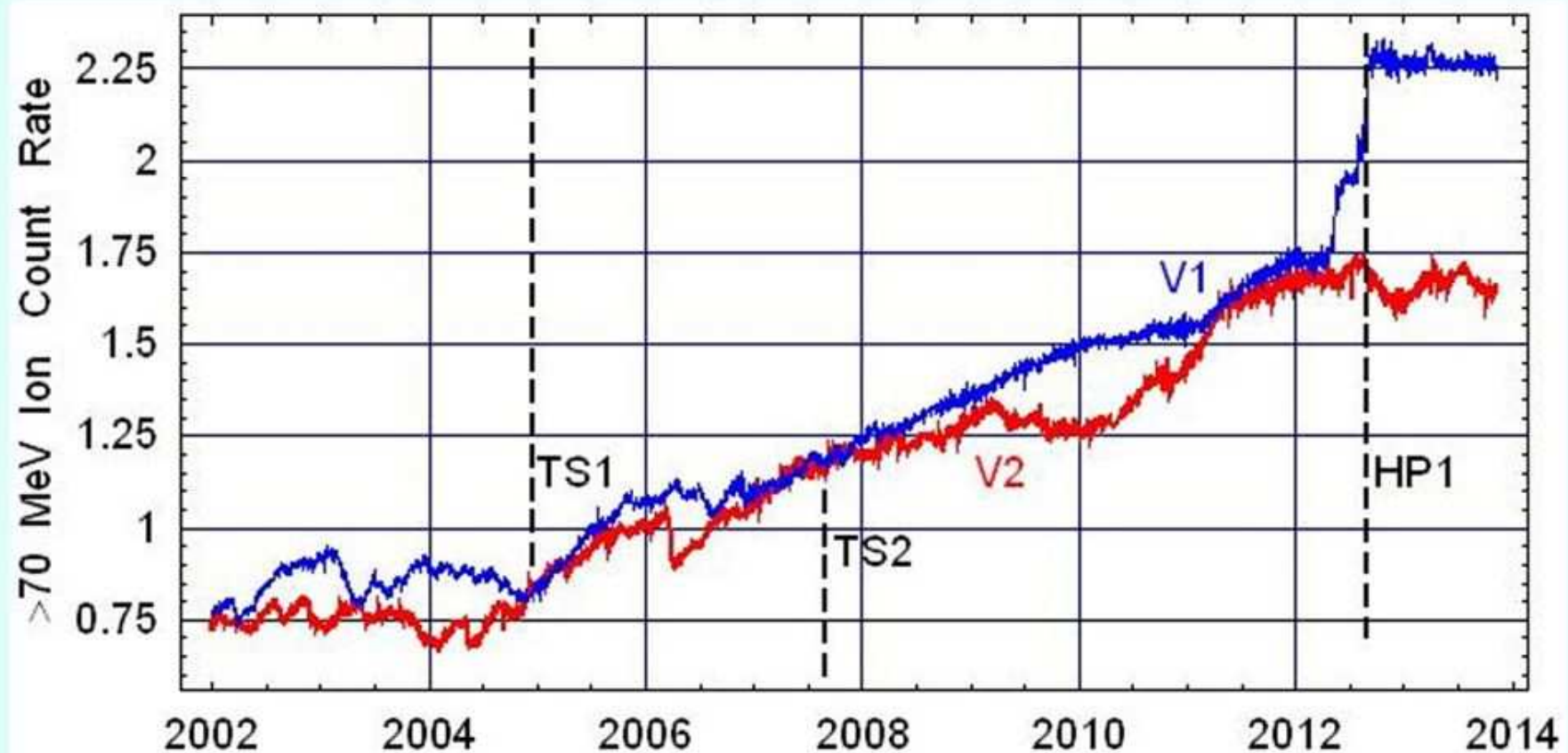
Figure 1. Preliminary (blue, larger dots) and corrected (red, smaller dots) hourly SW speed data aboard V2, as posted on the PSE web site before and after late November 2007.

A napszél sebességének komponensei és a termikus sebesség

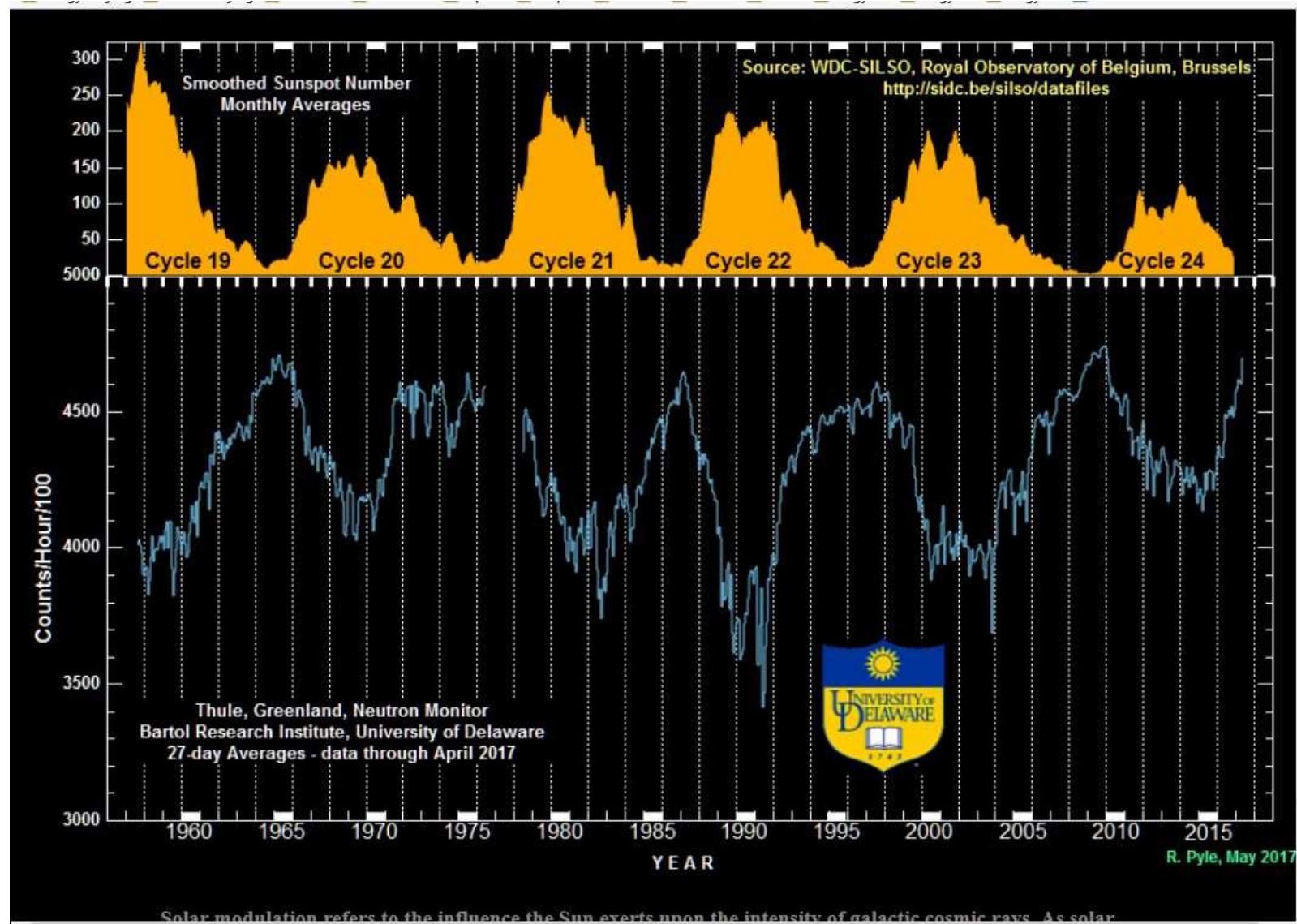


Radial and perpendicular components of the SW velocity (upper and middle curves), compared to the rms thermal speed of ions characterising SW temperature (a 10-day smoothing was applied)

A 100 MeV körüli, főleg kozmikus sugárzási ionok beütésszámának változásai. A nagy lökéshullám hatása nem látszik. 2006-ban a több hónapig tartó csökkenések oka valószínűleg a Napból érkező CME (coronal mass ejection, korona-tömegkidobódás).



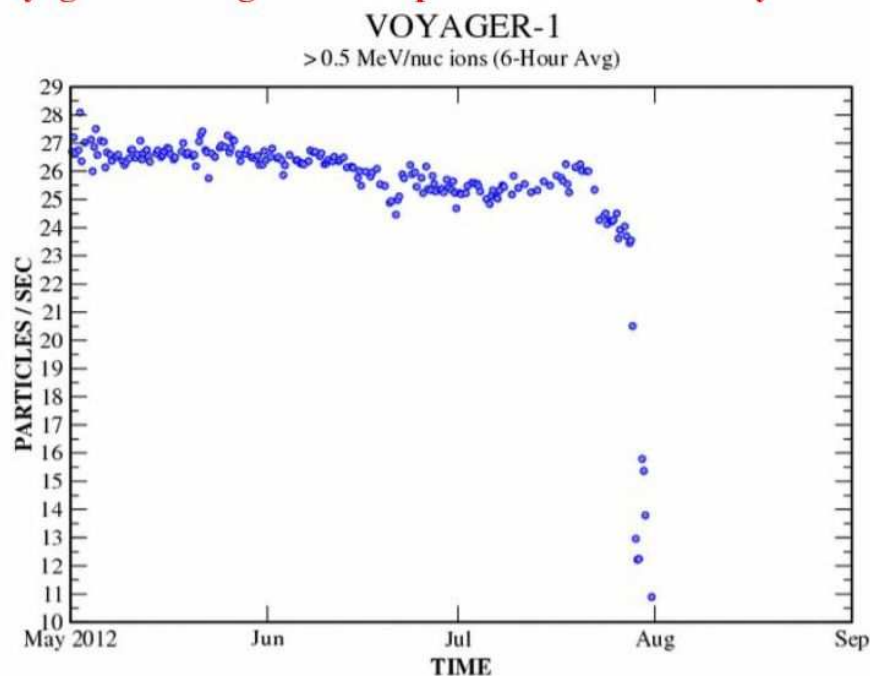
A helioszférába kívülről befelé diffundáló kozmikus sugárzás változásai (moduláció) a Nap aktivitását jellemző relatív napfoltszámmal ellenfázisban vannak.



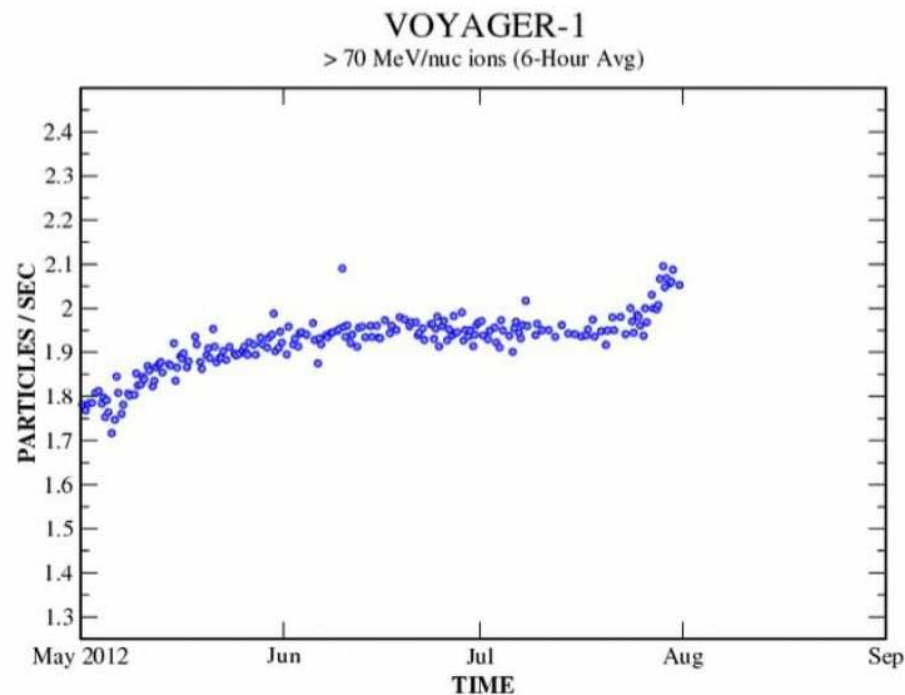
**A Voyager-1 szonda kilépése a
csillagközi térbe,
kezdetben kérdőjelekkel**

Érdekesség: a MeV-es részecskék beütésszámának első hirtelen leesése pont a **kozmikus sugárzás felfedezése centenáriumának ünneplése** előtt volt. Ezt ott sokat tárgyaltuk. Ezután a szint visszaállt, és **a tényleges kilépés csak augusztus 25-én, pont Neil Armstrong halálának napján, a Naptól 121,5 AU távolságban volt.** Az átlépés hivatalos bejelentése viszont csak több, mint 1 évvel később, 2013 szeptemberében történt, árulkodó plazma-hullámok észlelése után.

Voyager-1 leaving the Heliosphere at the end of July 2012?



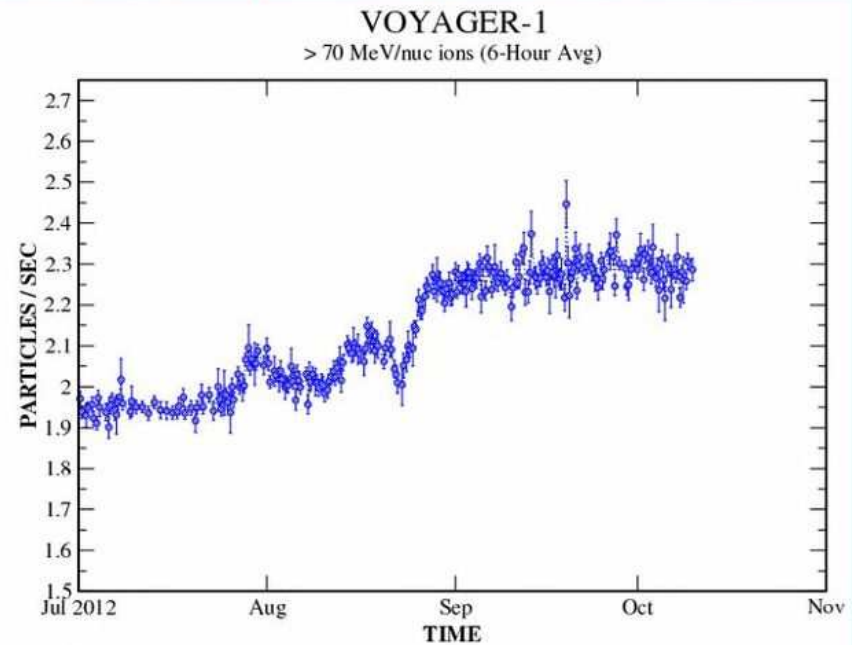
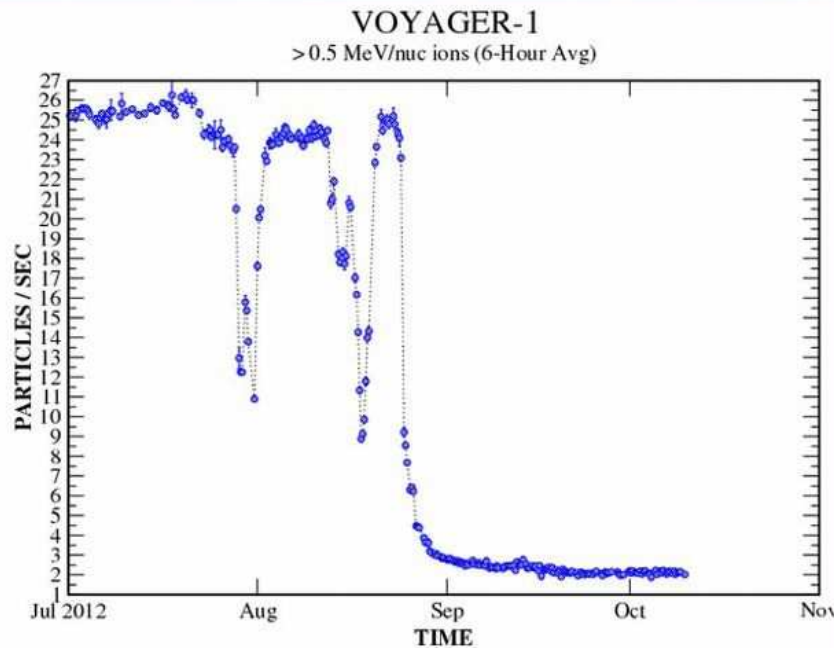
Generated:
Fri Aug 3 07:01:19 2012



Generated:
Fri Aug 3 07:01:18 2012

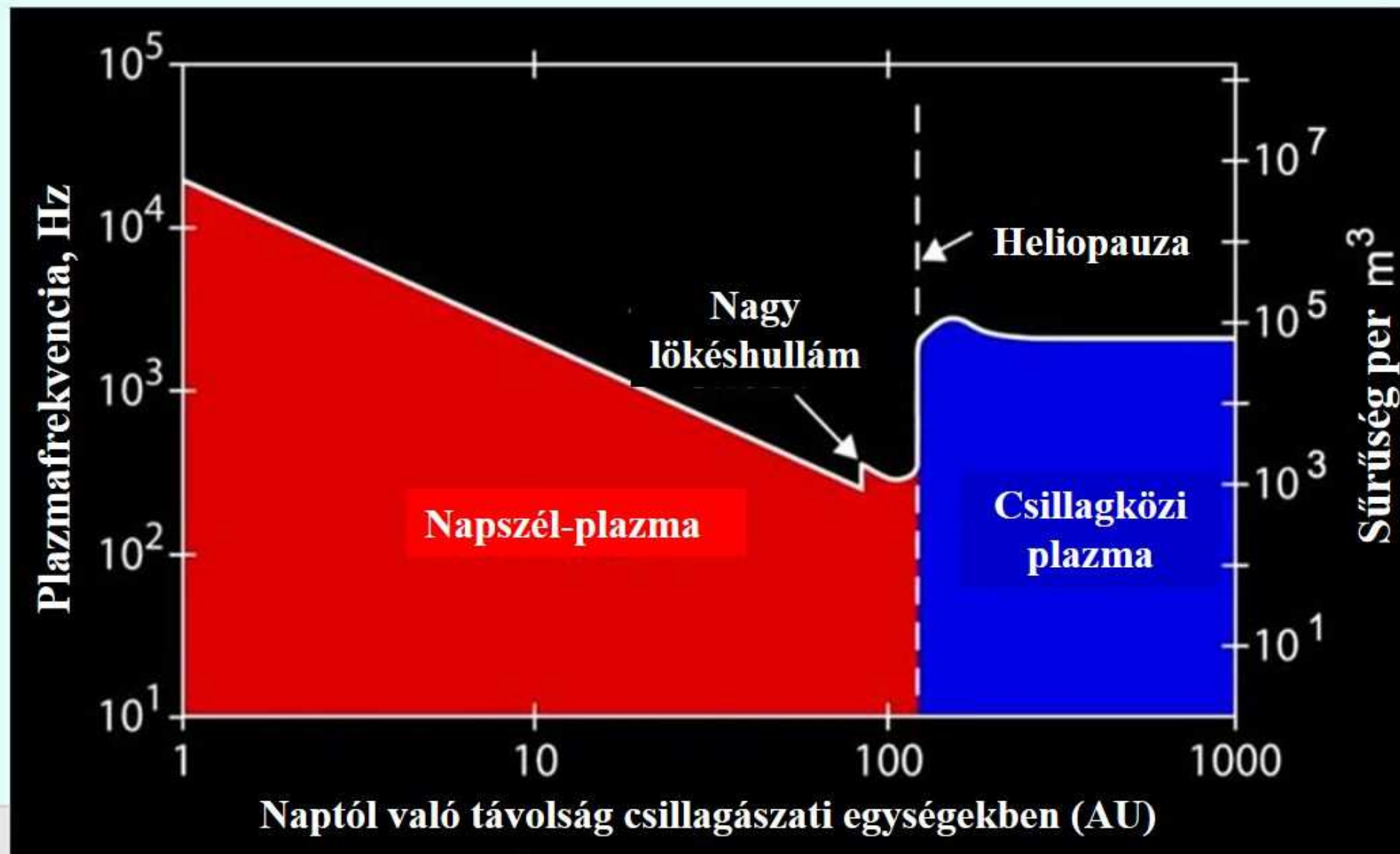
A MeV körüli, helioszférában felgyorsult ionok a V1 szonda csillagközi térbe való átlépésekor elég hirtelen eltűnnek, míg 70 MeV fölött a kozmikus sugárzási ionok intenzitása lassabban, de kb. 20 %-kal megnő, és az átlépés után alig változik. A heliopauza helyzete a szondáénál nagyobb sebességgel változik (fluktuál), emiatt van több hirtelen lecsökkenés majdnem egy hónapos időtartamon belül.

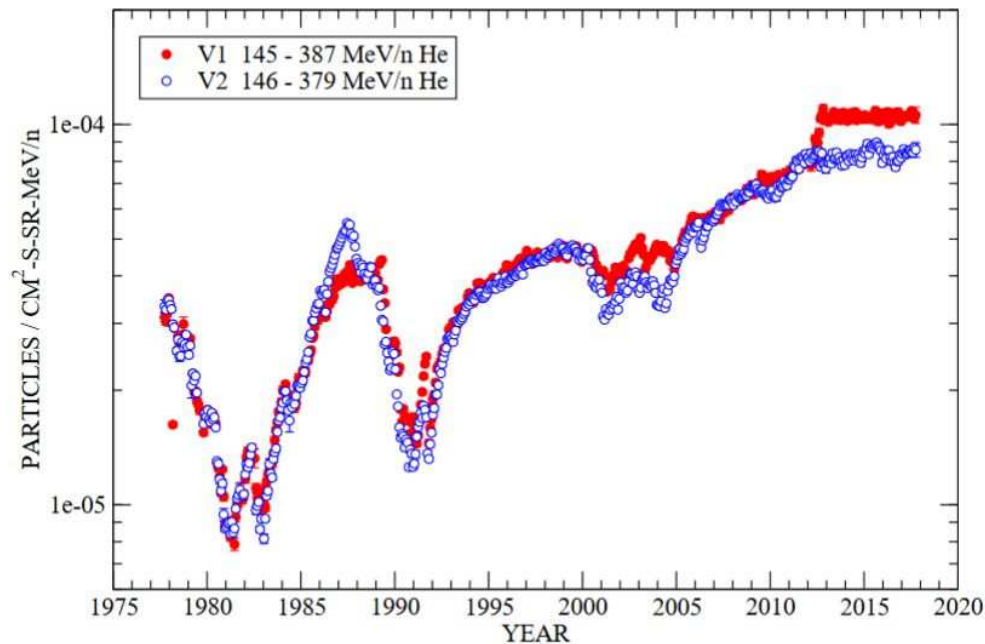
A néhány MeV-es ill. a > 70 MeV-es ionok 2012-ben, a heliopauza átlépése előtt és után



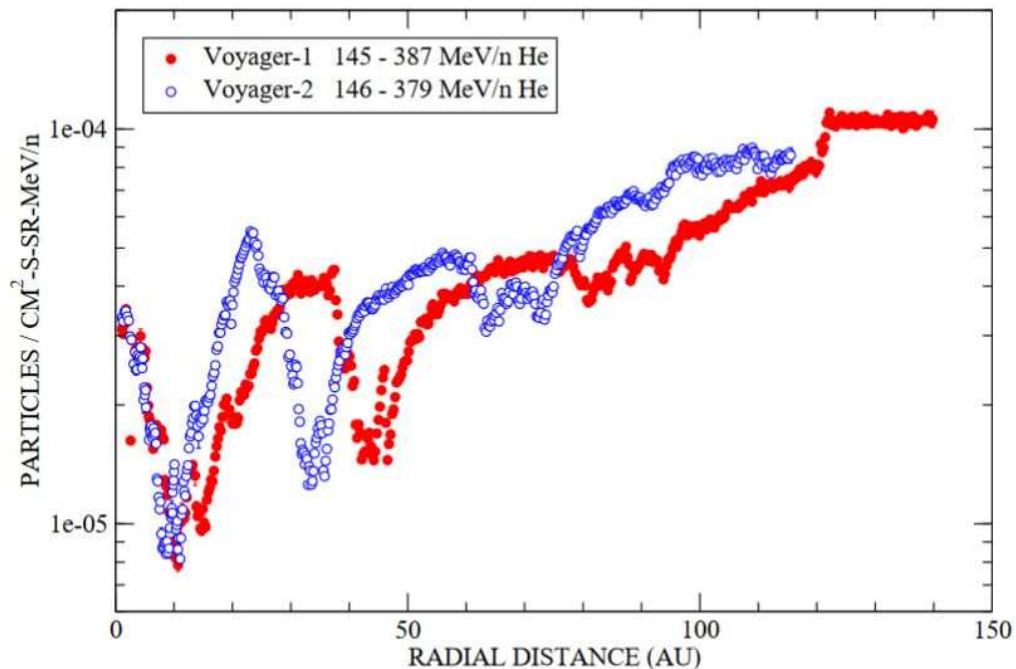
**Modell-számítás a plazmasűrűség és plazmafrekvencia változásaira.
Nagy CME-k után 1-2 évvel a csillagközi plazmában is fellépnek zavarok.**

(CME: Coronal Mass Ejection, vagyis anyagkidobódás a napkoronából)



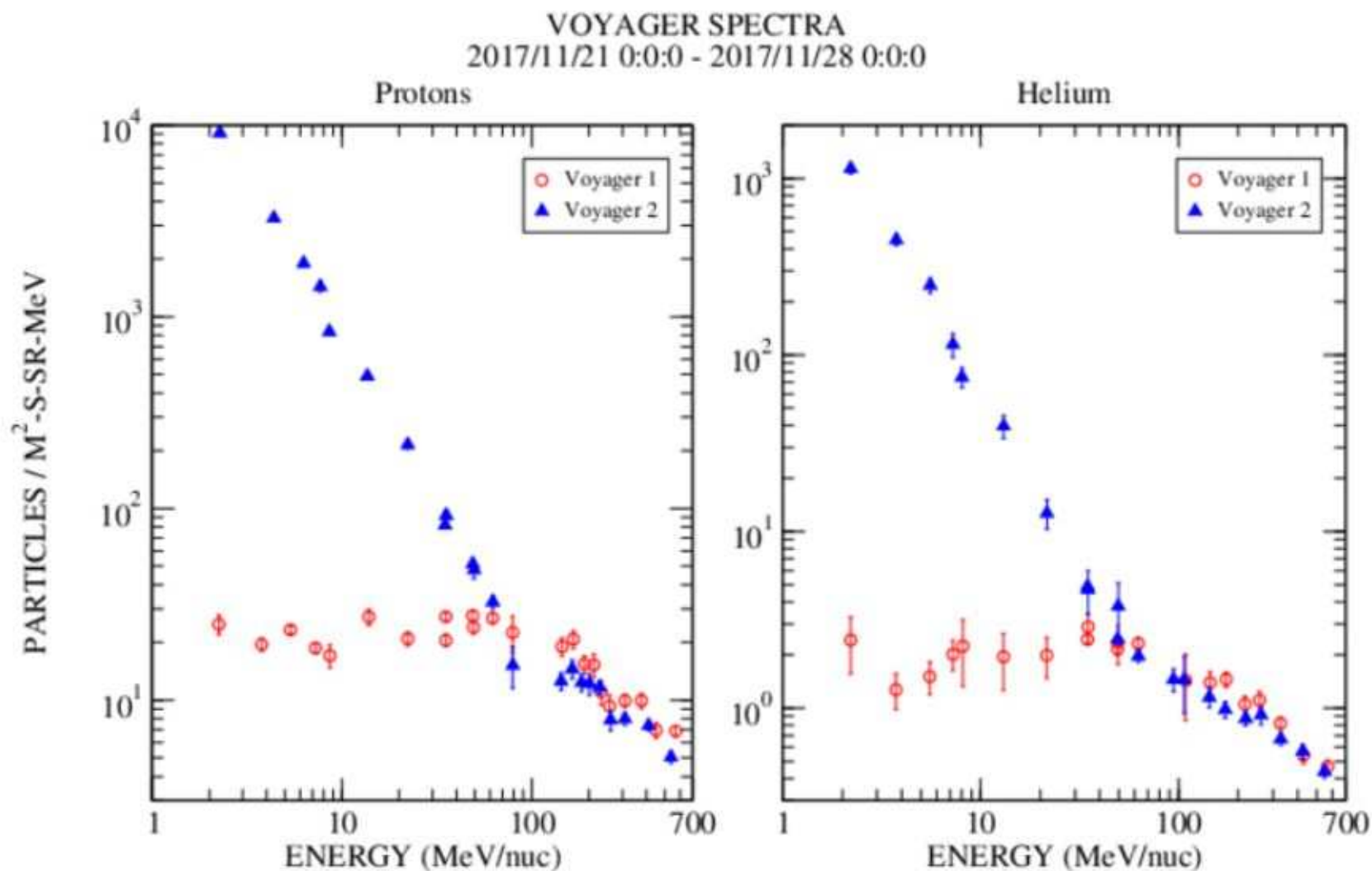


A nagyenergiájú hélium fluxus változásai a V1 és V2 szondánál egyrészt az idő, másrészt a Naptól mért távolság függvényében.



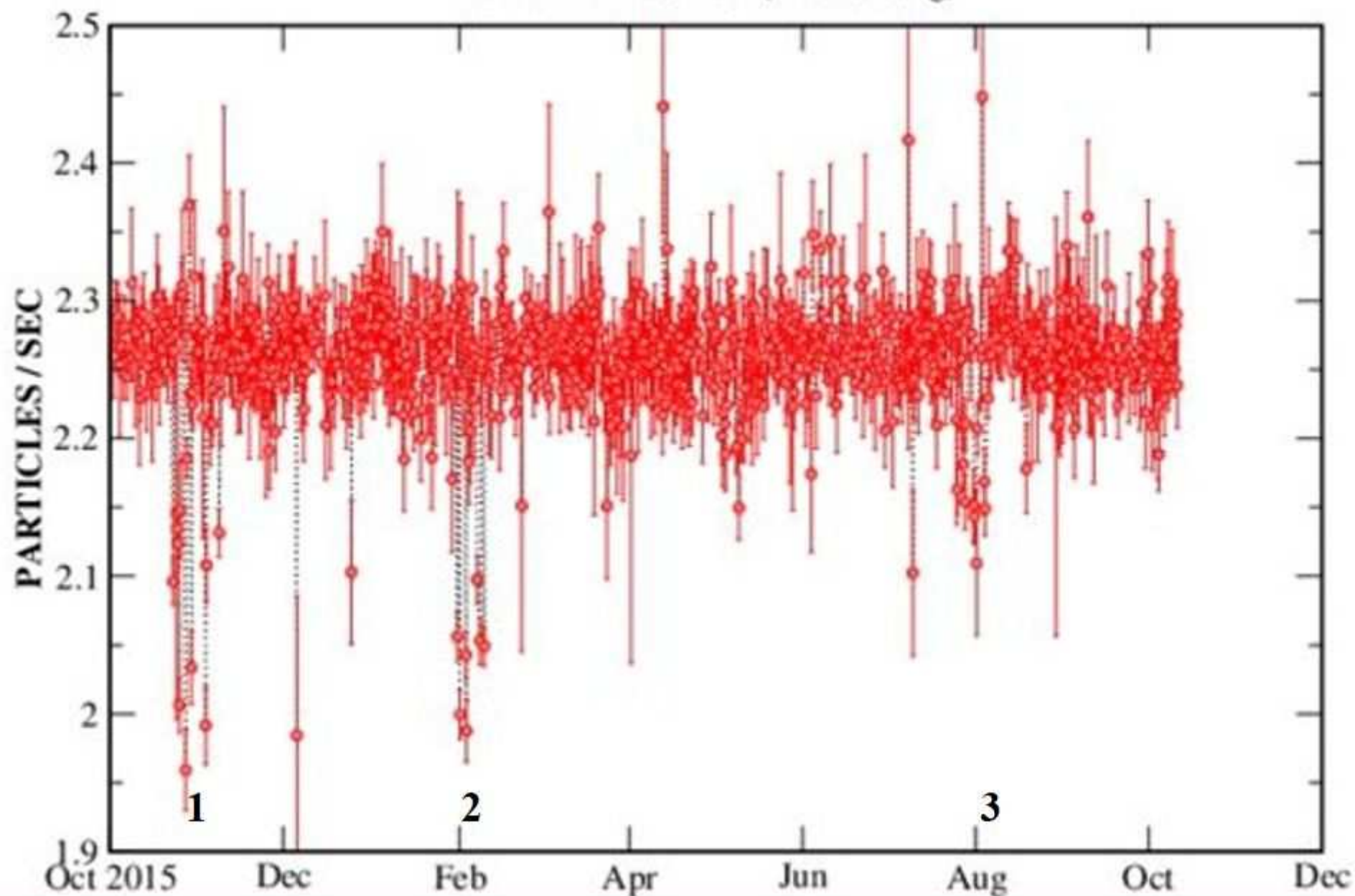
A két ábra összehasonlításából látható, hogy a V1 és V2 által mért kozmikus sugárzási hélium fluxusát inkább a Nap aktivitása, mint a Naptól való távolság befolyásolja.

**Protonok és alfa-részecskék energiaspektruma a helioszféra határvidékén:
V1-nél a csillagközi térben (piros) és V2-nél a lelassult napszélben (kék)**

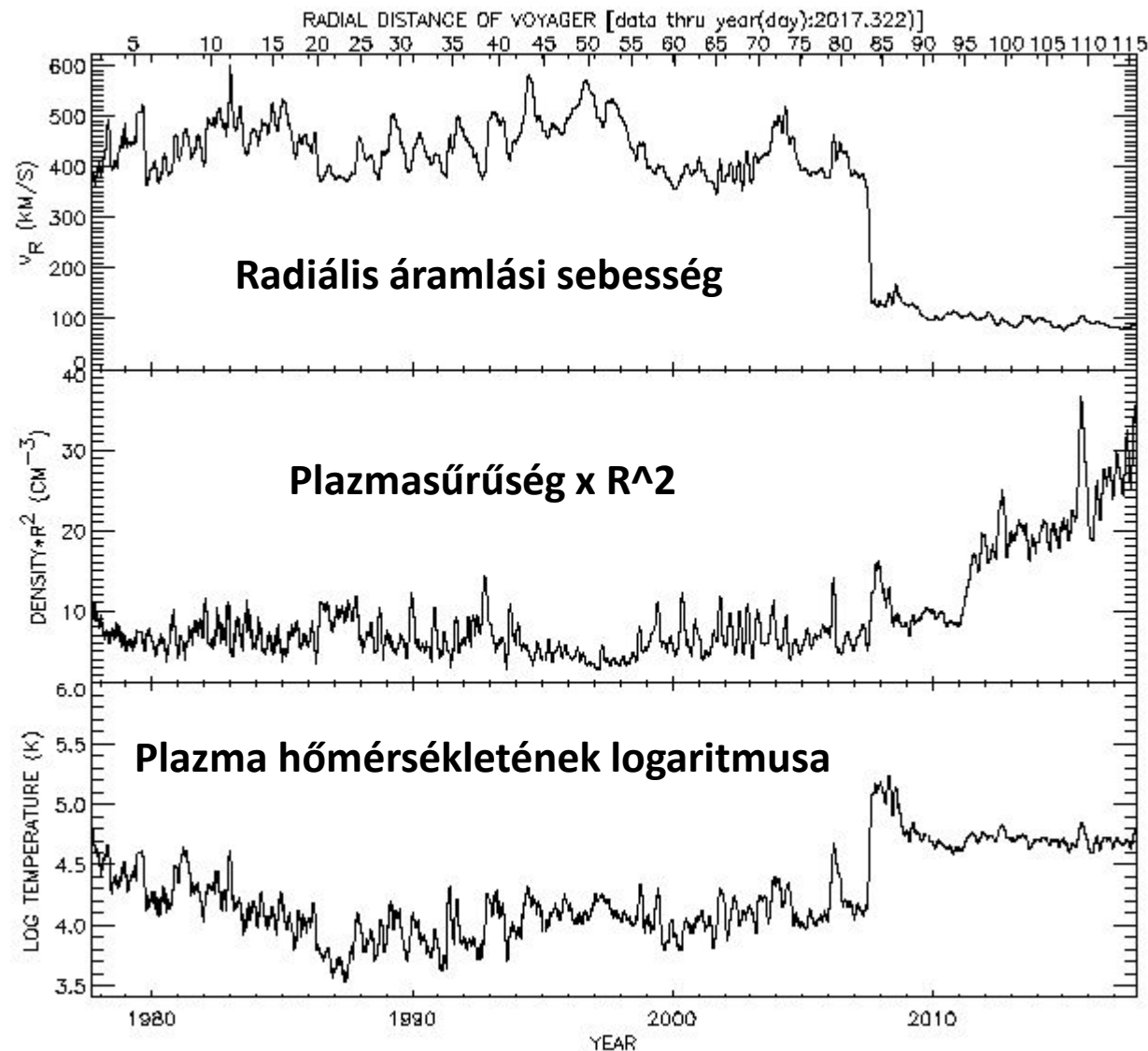


A kozmikus sugárzás 3 lecsökkenése a csillagközi térben

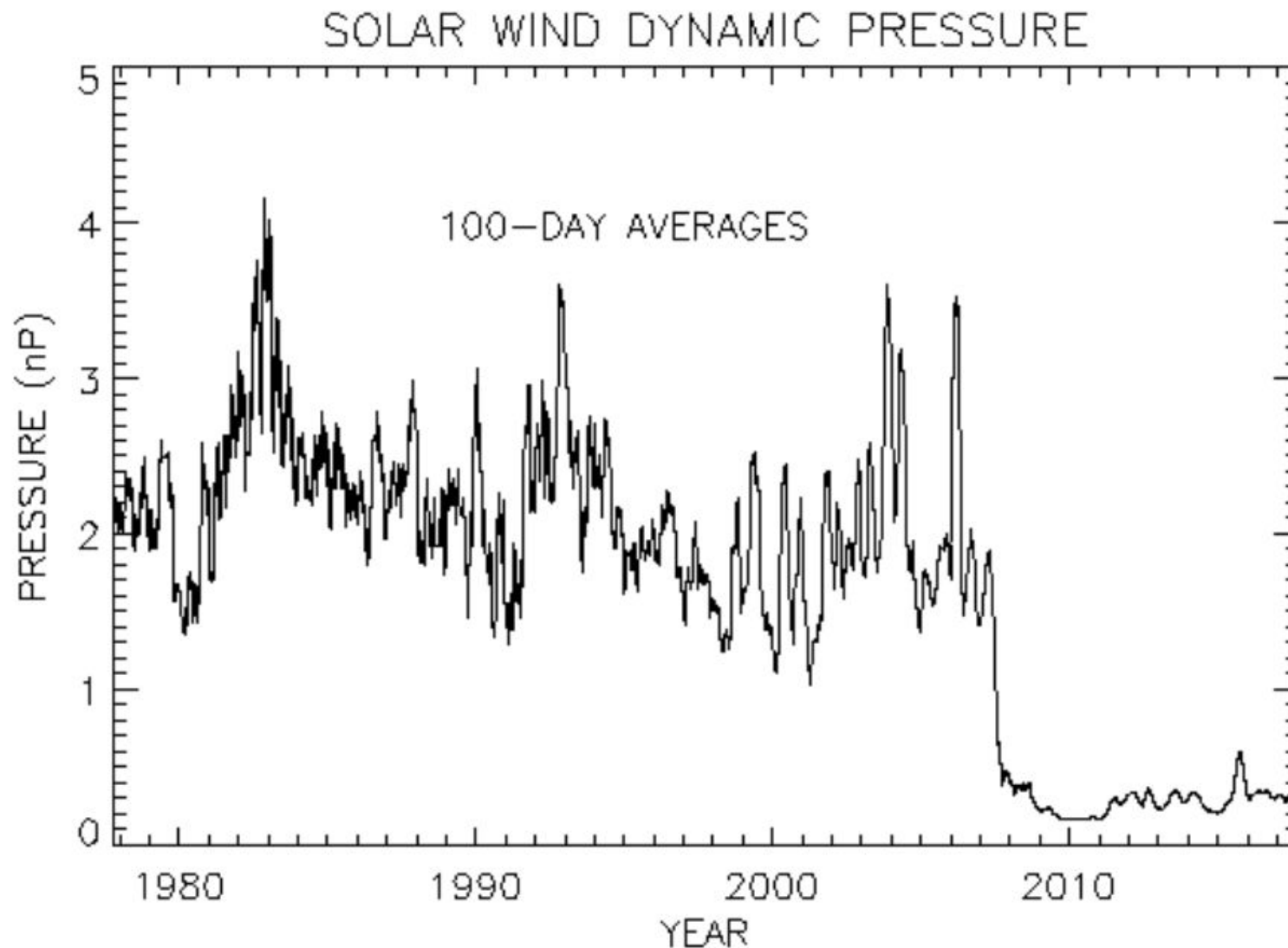
> 70 MeV/nuc ions (6-Hour Avg)



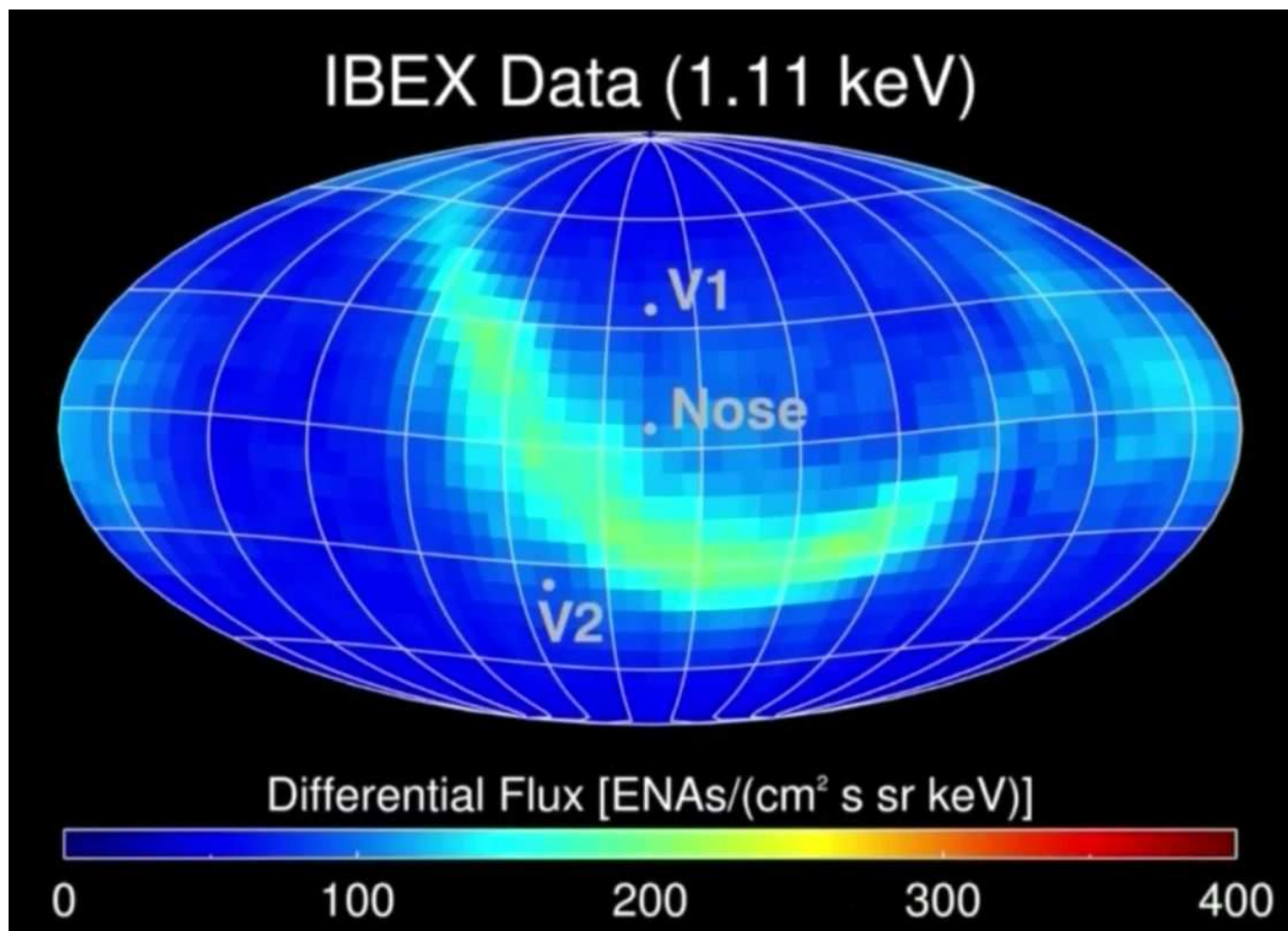
A Voyager-2 plazmadetektorának mérései az egész küldetés folyamán



A napszél dinamikus nyomásának változásai V2-nél az egész küldetés alatt. A lökéshullám utáni látszólagos nagy csökkenést az okozhatja, hogy a lelassult napszélben a nyomás nagy része szupratermális részecskéktől származik!

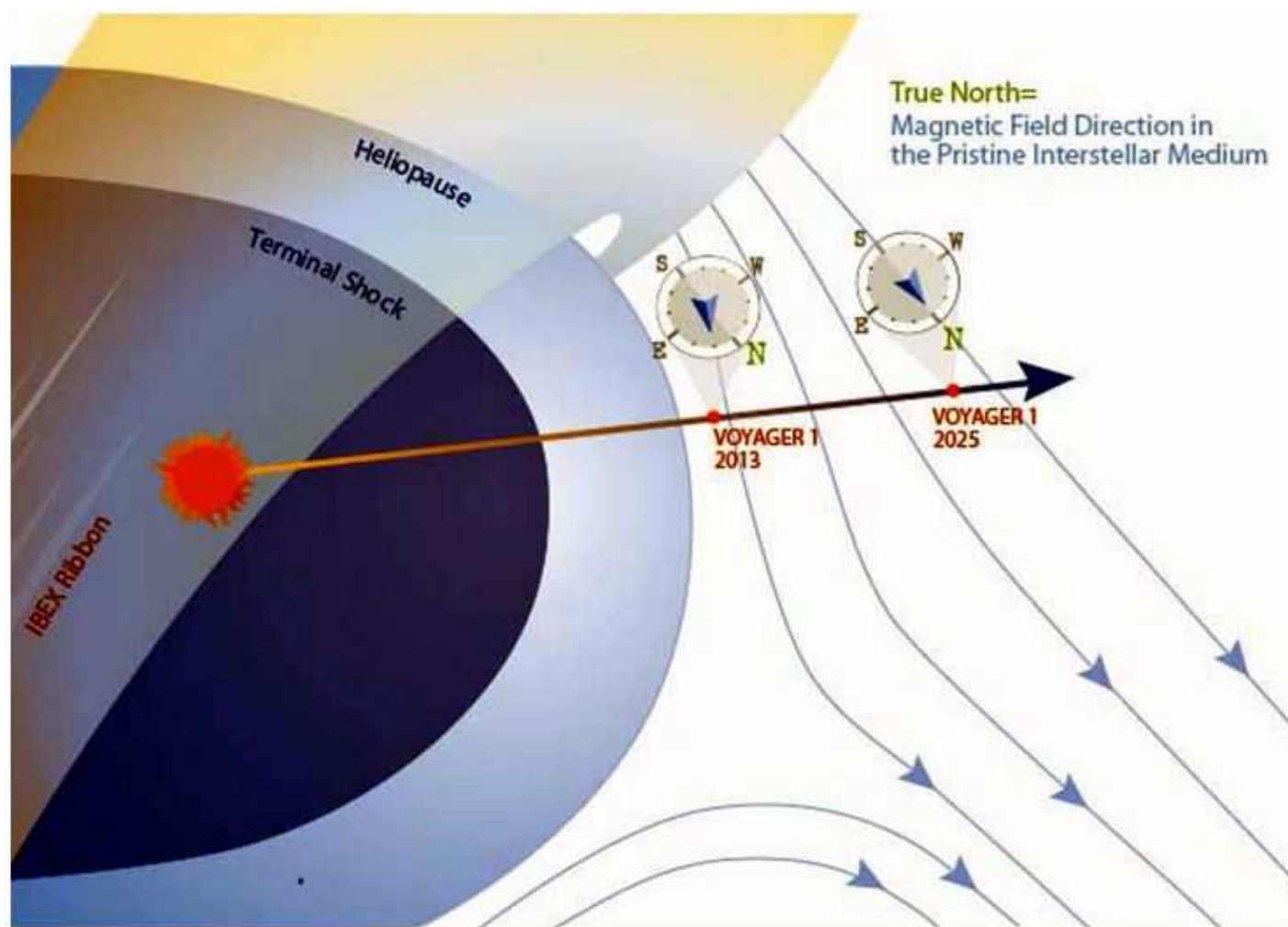


A 2008-ban földkörüli pályára bocsátott IBEX műhold szupratermális semleges atomok segítségével tanulmányozza a heliosféra határvidékét. Ezek az atomok nem közvetlenül a csillagközi gázból származnak, hanem a helioszférában ionizálódtak és nyertek energiát, majd a csillagközi gáz atomjaival töltést cserélve váltak semlegessé. Egy részük a belső heliosféra felé haladt, és vált detektálhatóvá az IBEX műholdnál. Irányeloszlásuk gyűrű alakú, melynek középpontja a közeli csillagközi mágneses tér irányával egyezhet.



**Az újonnan
felfedezett
IBEX-gyűrű**

Egy lehetséges magyarázat arra, hogy a heliopauzánál miért nem változott meg a mágneses tér iránya



Upon exiting the heliopause, the local measurements of the magnetic field by Voyager 1 differed by 40 degrees from interstellar "true magnetic north" (Credit: UNH/EOS)

Hol tartunk ma?

A szondák távolsága a Naptól kb. 140 (V1) ill. 116 AU (V2), fényidő 19,5 ill. 16 h.

A V2 kilépési ideje a helioszférából bizonytalan, jó esetben 1-2 év múlva lehet.

Az energiellátás évente kb. 4 wattal csökken, a V1 2021, a V2 2020 után egyes műszereit időnként le kell kapcsolja. 2025 után tudományos adatok nem várhatók.

A giroszkópok lekapcsolása után a mágneses tér mérése bizonytalanabbá válik.

A csillagközi térben a mágneses tér iránya lassan változik, és közeledik a más mérésekből (kozmikus sugárzás anizotrópiája, IBEX semleges atomok) várthoz.

Közeledünk a Nap-aktivitási minimumhoz, ekkor talán a V2 átlépi majd a határt.

Nagy a bizonytalanság a helioszféra alakjára nézve, ezt főleg a csillagközi mágneses tér erőssége befolyásolhatja (0,2 vagy akár 0,4 nT?)

**Lapzártakor (vagyis az előadás napján) érkezett hír:
A Voyager-1 szonda élettartamát sikerült pár évvel
meghosszabbítani a 37 éve be sem kapcsolt fúvókák
újraindításával**



NEWS | DECEMBER 1, 2017

Voyager 1 Fires Up Thrusters After 37 Years

Voyager 1, NASA's farthest and fastest spacecraft, is the only human-made object in interstellar space, the environment between the stars. The spacecraft, which has been flying for 40 years, relies on small devices called thrusters to orient itself so it can communicate with Earth. These thrusters fire in tiny pulses, or "puffs," lasting mere milliseconds, to subtly rotate the spacecraft so that its antenna points at our planet. Now, the Voyager team is able to use a set of four backup thrusters, dormant since 1980.

"With these thrusters that are still functional after 37 years without use, we will be able to extend the life of the Voyager 1 spacecraft by two to three years," said Suzanne Dodd, project manager for Voyager at NASA's Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.



Köszönöm a figyelmet!