

6. előadás

Kozmikus sugárzás és külső heliosféra

Király Péter

Az előadás vázlata

Néhány nemtriviális alapfogalom: kozmikus sugárzás, Naprendszer, helioszféra (belső és külső), lökéshullám, „nagy helioszférikus lökéshullám”, heliopauza, orr-hullám, SEP, felszedett (pick-up) ionok, energikus semleges atomok, anomális kozmikus sugárzás, csillagközi környezet

A **kozmos sugárzás** (eredetileg Höhenstrahlung) felfedezése, az elsődleges részecskék pozitív töltésének kimutatása, az intenzitás földrajzi szélességtől és napciklustól való függése, magnetoszféra és helioszféra szondázása. A másodlagos komponens felhasználása a nagyenergiájú fizikában, új elemi részecskék felfedezése, kiterjedt légizáporok, energiaspektrum, irányeloszlás. Az űrkutatás korában új komponensek felfedezése, teljes elektromágneses spektrum, kis energiájú KS, atommagok, antirészecskék, neutrínók. Asztrofizikai és geofizikai vonatkozások.

A **külső helioszféra** kutatása a Pioneer, Voyager és IBEX szondák segítségével. A két Voyager energiaforrása, műszerei, eddigi útja és fontos felfedezései. Kérdések a helioszféra csillagközi határának szerkezete körül, a további aktív kutatás kilátásai. Az IBEX-öv felfedezése, kijutott-e a Voyager-1 a helioszférából?

Nagyberendezések a kozmikus sugárzási kutatások szolgálatában

Néhány nemtriviális alapfogalom



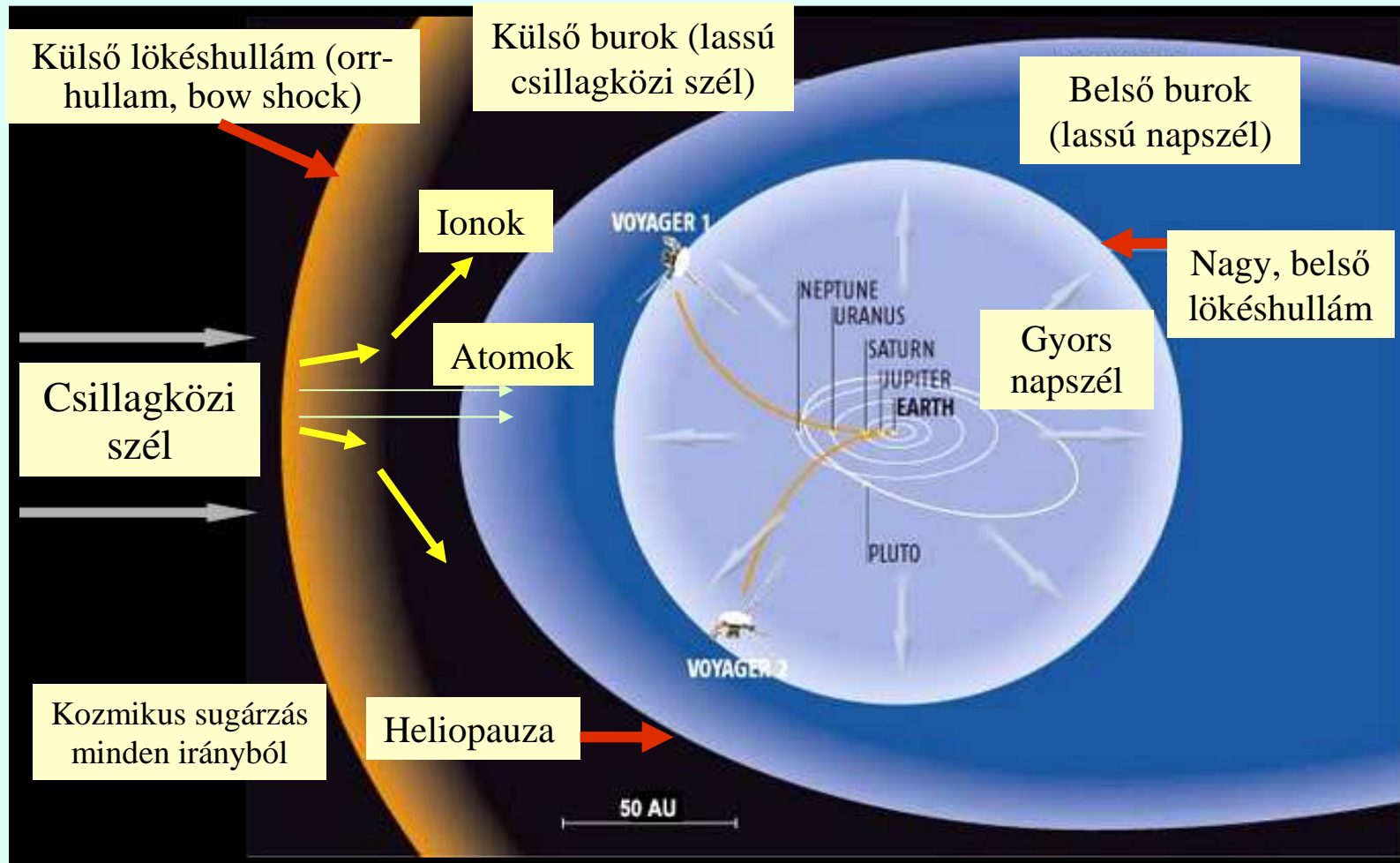
Kozmikus sugárzás (KS): elsősorban a Tejútrendszerből vagy azon kívülről érkező, nagyenergiájú részecskék (főleg atommagok) összefoglaló neve. Tágabb értelemben más részecskék (elektronok, pozitronok, neutrínók) és a nagyenergiájú gamma-fotonok is ide értendők, sőt a légkörbe érkező részecskék által keltett szekunder részecskék és fotonok is. Van, aki a Napból és a helioszférából származó nagyenergiájú részecskéket (**Solar Energetic Particles, SEP**) szoláris KS-nak nevezi.

Naprendszer: az a tartomány, ahol a **Nap gravitációs tere** dominál, és az itt lévő testek, terek, részecskék. Térbeli kiterjedése sok ezer vagy tízezer AU, de nem definiálható pontosan, és a Nap létrejötte óta végbement, részben kaotikus jellegű dinamikai folyamatok, valamint közel elhaladó csillagok hatására anyagi tartalma erősen megváltozhatott.

Helioszféra: az a tartomány, ahol a plazmafolyamatokat és energikus részecskéket **a napszél és az abba befagyott mágneses tér** dominálja. A környező csillagközi gáztól és plazmától való térbeli elkülöníthetősége vitatott, és jelenleg is intenzív kutatás tárgya.

Lökéshullámok: a lokális plazmához képest az akusztikus és magnetohidrodinamikai hullámoknál gyorsabban mozgó szakadási felületek, ahol a magnetohidrodinamikai tárgyalás csak közelítően, bizonyos megmaradási tételek erejéig érvényes. Gyakran részecskegyorsítás és nem-termikus sebességeloszlású plazma létrejöttének színhelyei.

Közelítő elképzelés a Helioszféra szerkezetéről és határaitól



Magyarázat a heliosféra ábrájához

Nagy helioszférikus lökéshullám (termination shock): a szuperszonikus/szuperalfvénikus napszelet kívülről határoló felület, ahol a **hagyományos elképzelések szerint** a napszél-plazma mozgási energiája nagyrészt hőenergiává alakul, és a napszél szubszonikussá lassul. Ezután kifelé haladva a **heliopauza** mentén a lelassult csillagközi ionokkal alkotott határfelület mentén hátrafelé áramlik. A csillagközi gáz ionizált komponense egy **külső lökéshullámban (bow shock)** lassul szubszonikussá.

Pick-up ionok (vagy felszedett ionok): a semleges csillagközi atomok áthatolnak a heliopauzán és a Naphoz közeledve részben ionizálódnak, majd az ionok a napszélbe fagyott mágneses tér körül keringve kifelé sodródnak. Bár a turbulens mágneses terek hatására irányeloszlásuk „szétkenődik”, sokáig a napszél-től eltérő, gyorsulásra hajlamosabb populációt alkotnak. Nagyrészt ezek lehetnek az akár 100 MeV körüli energiákra felgyorsult **anomális kozmikus sugárzási** részecskék forrásai, amik aztán részben visszaáramolnak a belső helioszférába is.



Friss pick-up ionok keringése a mágneses erővonalak körül

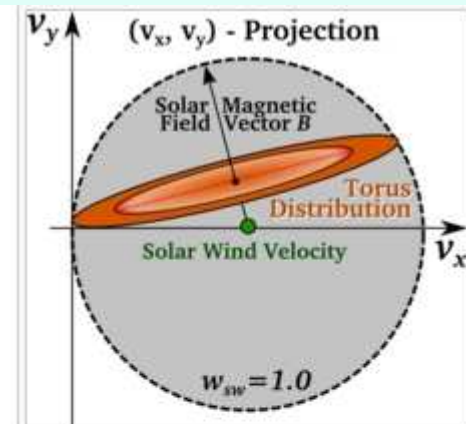
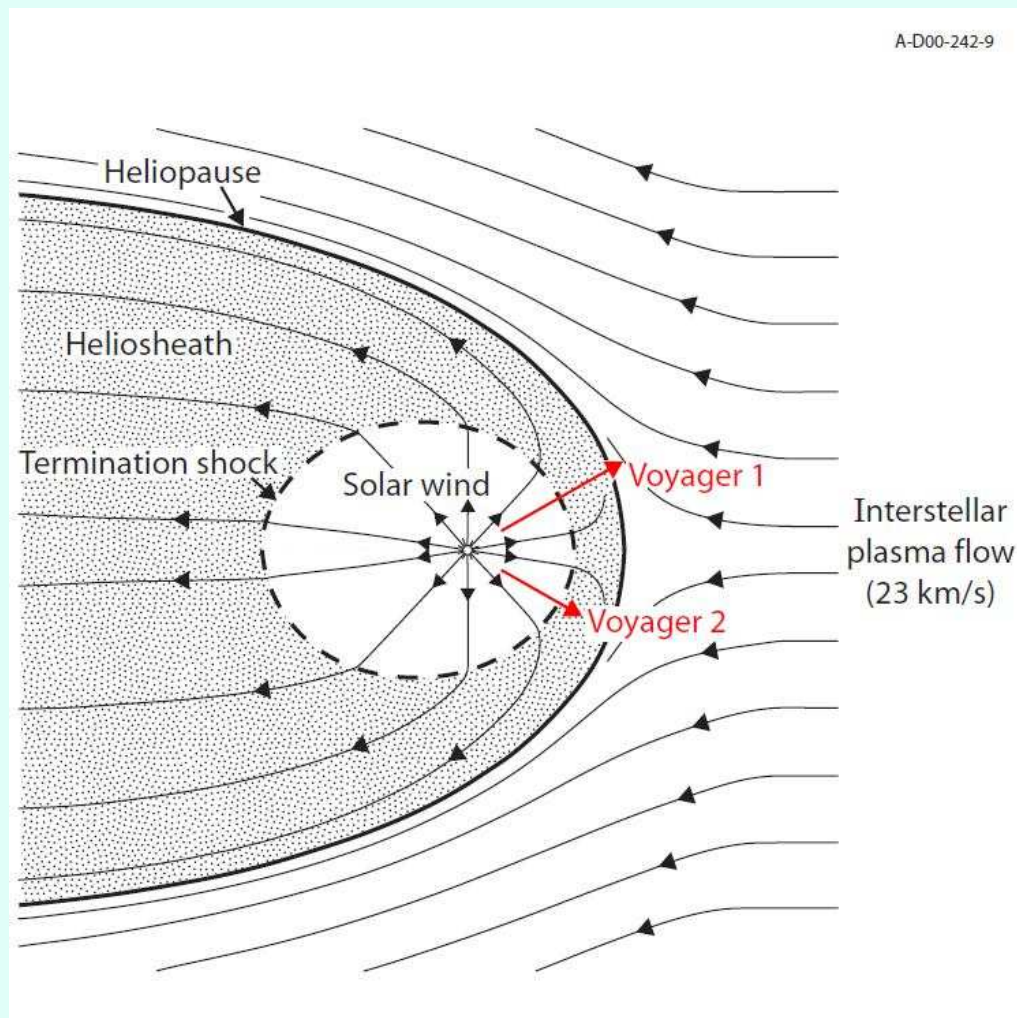


Illustration of the pickup ion velocity distribution function shortly after the ionization.^[1]

Egy másik hagyományos heliosféra-modell



A Nap-eredetű és az áramló csillagközi plazma ionizált részének várt áramlása a Nap körüli helioszférában és környezetében.

Kérdés, mennyire torzítja az egyszerű képet a **belső és külső eredetű mágneses tér találkozása**, esetleges összecsatolódása, és a nagyenergiájú részecskék okozta nyomás.

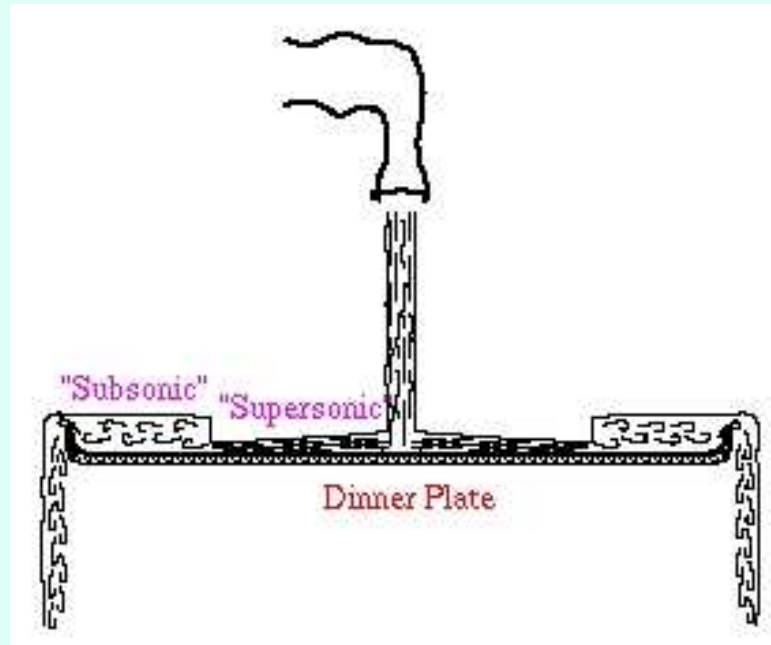
További komplikáció: eltérések az ionok Maxwell-eloszlásától, és **energikus semleges atomok** létrejötte a napszél és a befelé áramló csillagközi semleges atomok töltéscseréje révén. E semleges atomokat vizsgálja az **IBEX** szonda (Interplanetary Boundary Explorer).

Lökéshullám létrejötte kvázi-kétdimenziós vízáramlásban



Ian Axford szemléltetése a nagy helioszférikus lökéshullámhoz

Majdnem ugyanez konyhai lefolyóban, ahol a víz a falról visszaáramlik



**A helioszférán kívülről érkező
(galaktikus és extragalaktikus)**

kozmosz sugárzás

A kozmikus sugárzás felfedezése



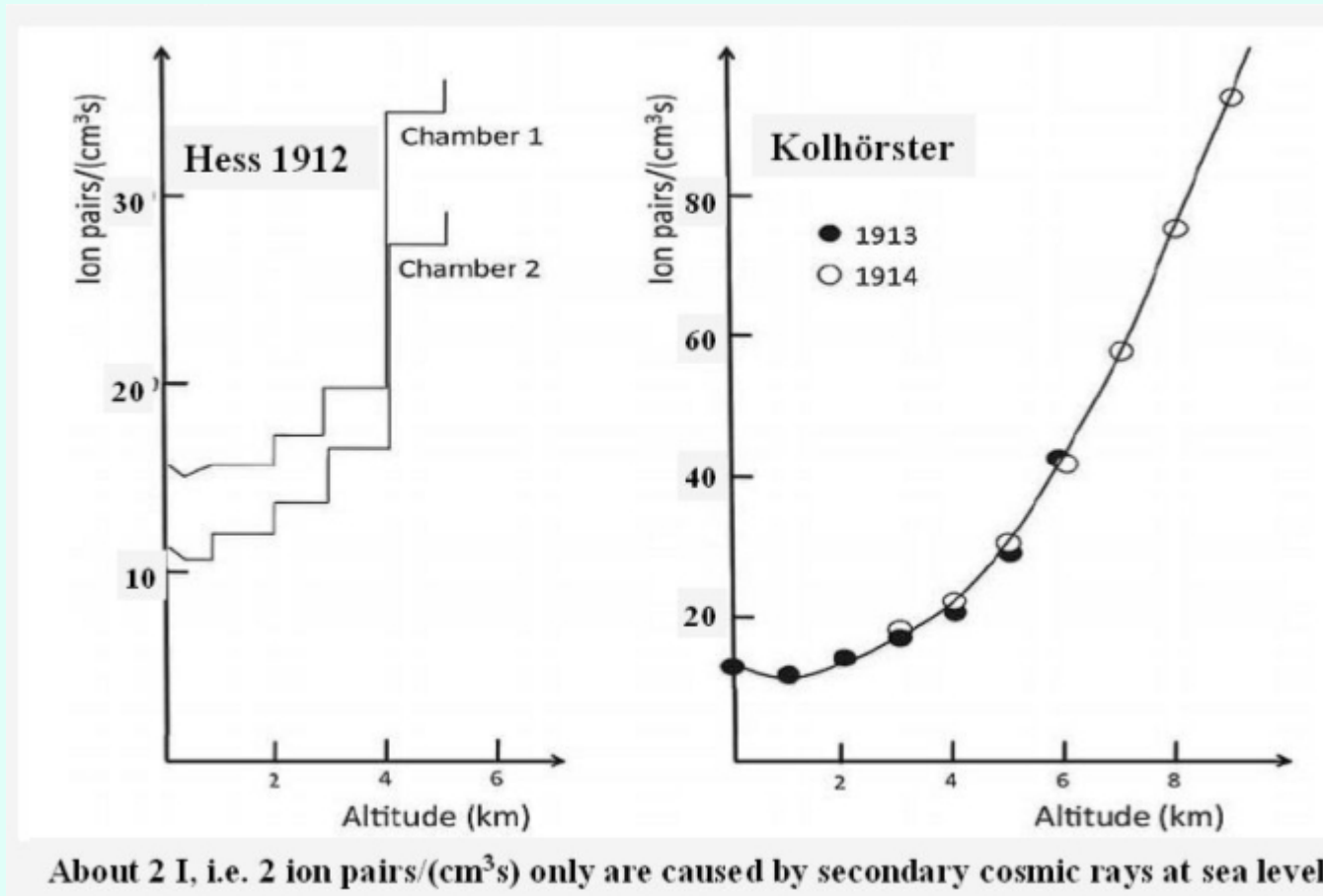
A 20. század elején a radioaktív sugárzások már ismertek voltak, de nem sikerült megmagyarázni, miért veszi el töltését egy ismert sugárzásokkal szemben ólommal jól leárnyékolat elektroszkóp.

A talaj fölötti magassággal kissé csökkent a töltésvesztés (Eiffel-torony), de a gamma-sugárzás elnyelődéséhez képest nem eléggé. Ballon-feljárásokba kezdtek, de a detektor hőmérsékletre és légnyomásra való érzékenysége nehézségeket okozott.

Victor Hess (1912 nyara) és Werner Kohörster (1913-14) végül 5300 ill. 9000 m-es ballonos feljárásokkal bizonyították, hogy a töltésvesztést okozó sugárzás a magassággal nő – ezért magassági sugárzásnak nevezték. A kozmikus sugárzás név csak az 1920-as években terjedt el, de ekkor is gamma-sugárzást feltételeztek. Csak 1928-ban sikerült bizonyítani, hogy az ionizációt a légkörbe érkező töltött részecskék, illetve az azok által keltett másodlagos részecskék okozzák. A Föld mágneses terében való elhajlásból kiderült, hogy az elsődleges részecskék pozitív töltésűek (kelet-nyugat aszimmetria).



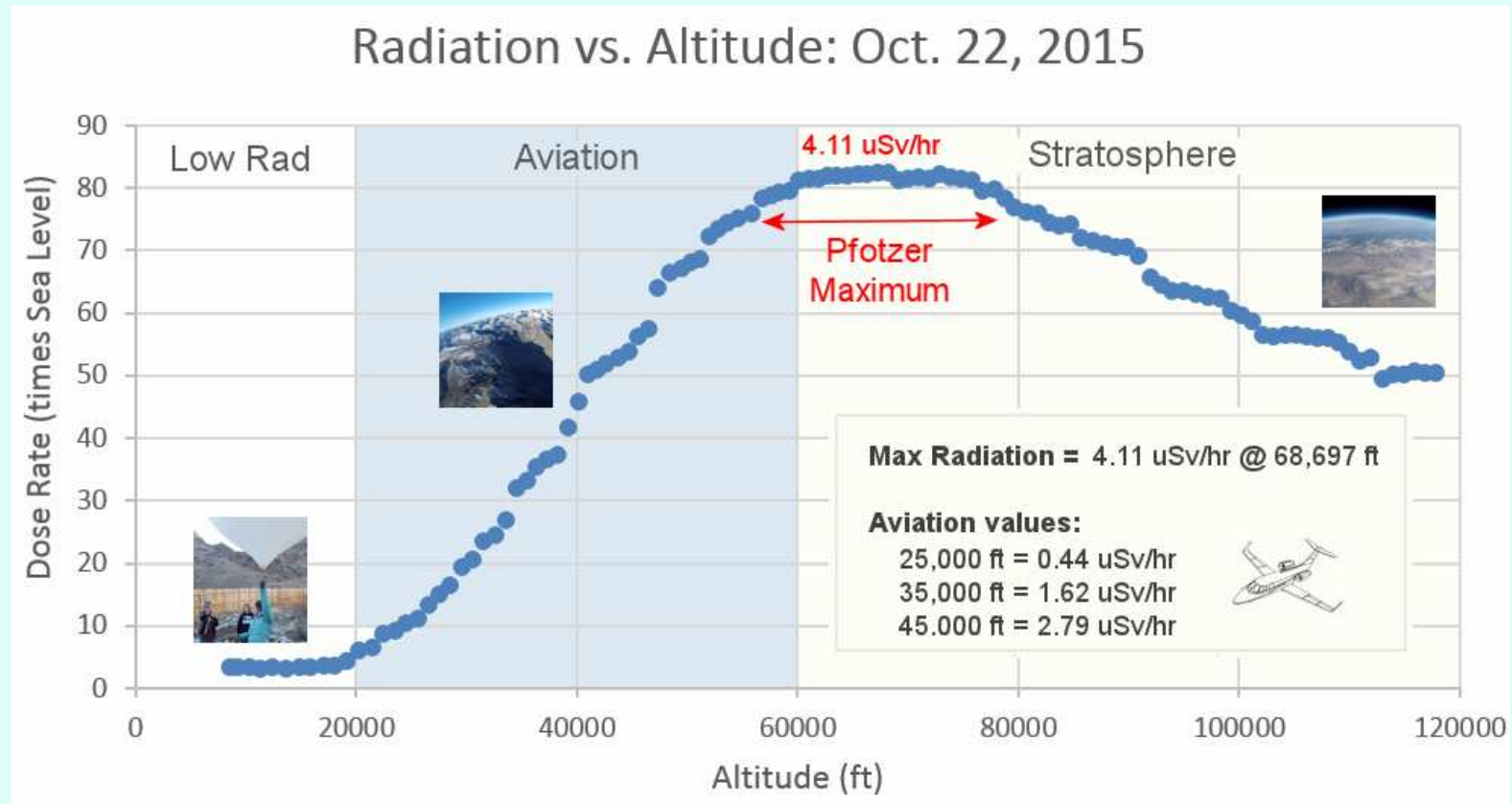
Hess és Kolhörster hajdani mérési eredményei



Később kiderült: a „sugárzásnak” 18-20 km-es magasságban maximuma van, mivel az elsődleges részecskék általában több másodlagos részecskét keltenek (Pfozter-maximum)



Mai diák-kísérletek rakétákkal és a Pfozter-maximum



A Naprendszer fizikája 6.

Akik a kozmikus sugárzás születése körül bábáskodtak

Hall of
Fame for
early CR
Research



CTR Wilson



Victor Hess



Werner Kolhörster



Rossi, Millikan, Compton



Carl Anderson

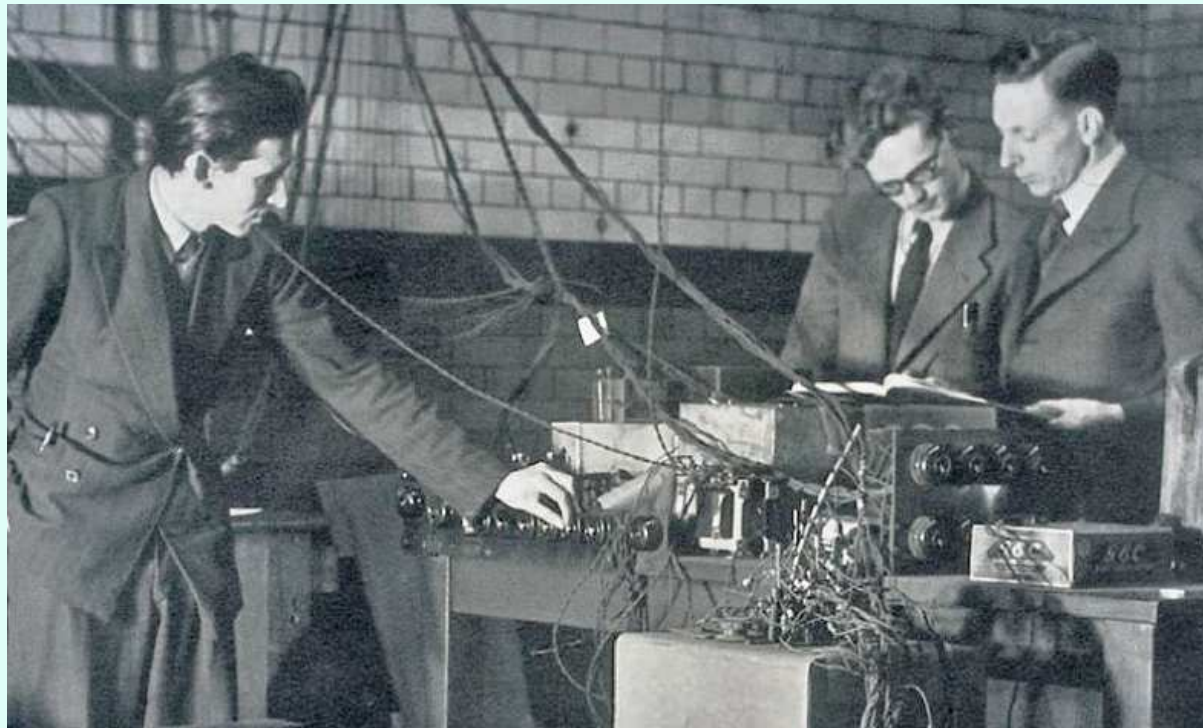


PMS Blackett

A nagyenergiájú kölcsönhatások fizikájának születése



Az 1930-as évek elejétől az 1950-es évek közepéig a nagyenergiájú fizika fő részecskeforrása a kozmikus sugárzás másodlagos (légköri) komponense volt. Így fedezték fel a **pozitront, a müont, a piont, a kaont és a hiperonokat**, ami több Nobel-díjjal is járt. Ilyen vizsgálatokat végzett Manchesterben Jánossy Lajos is, aki később a KFKI egyik megalapítója volt.



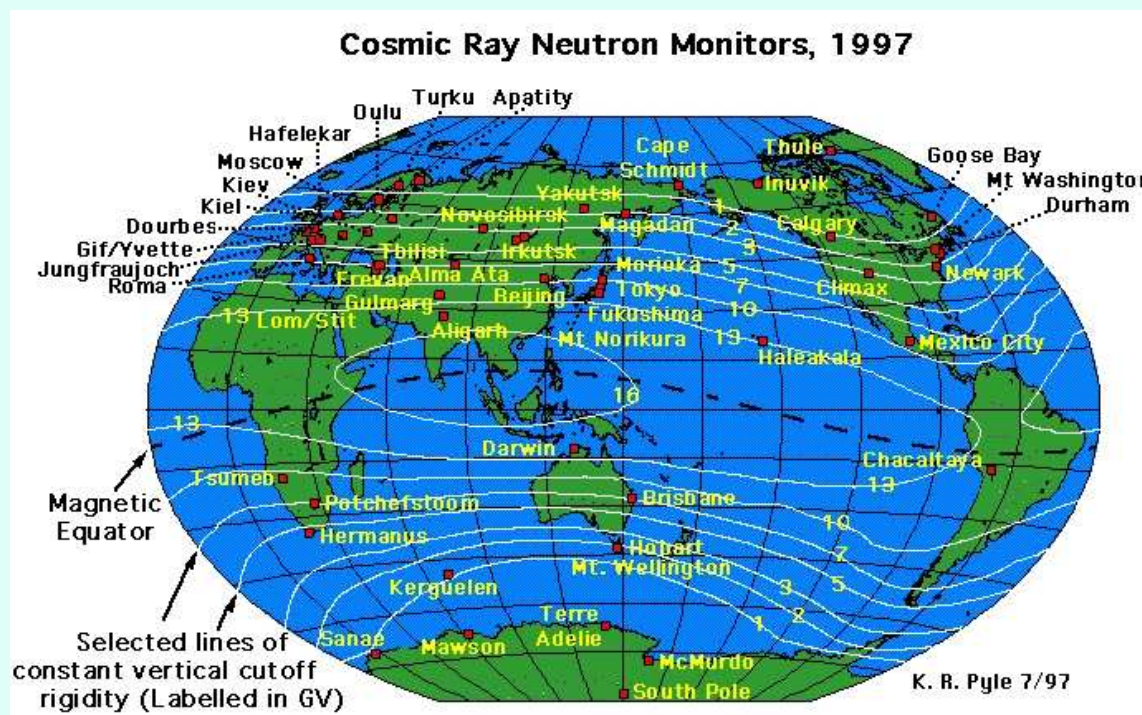
A Naprendszer fizikája 6.

Jánossy Lajos (balról) 1944-ben, manchesteri laboratóriumukban egy GM-csöves mérés mellett, melyet 15 t ólom felhasználásával maguk állítottak össze.

A magnetoszféra és helioszféra szondázása kozmikus sugárzással

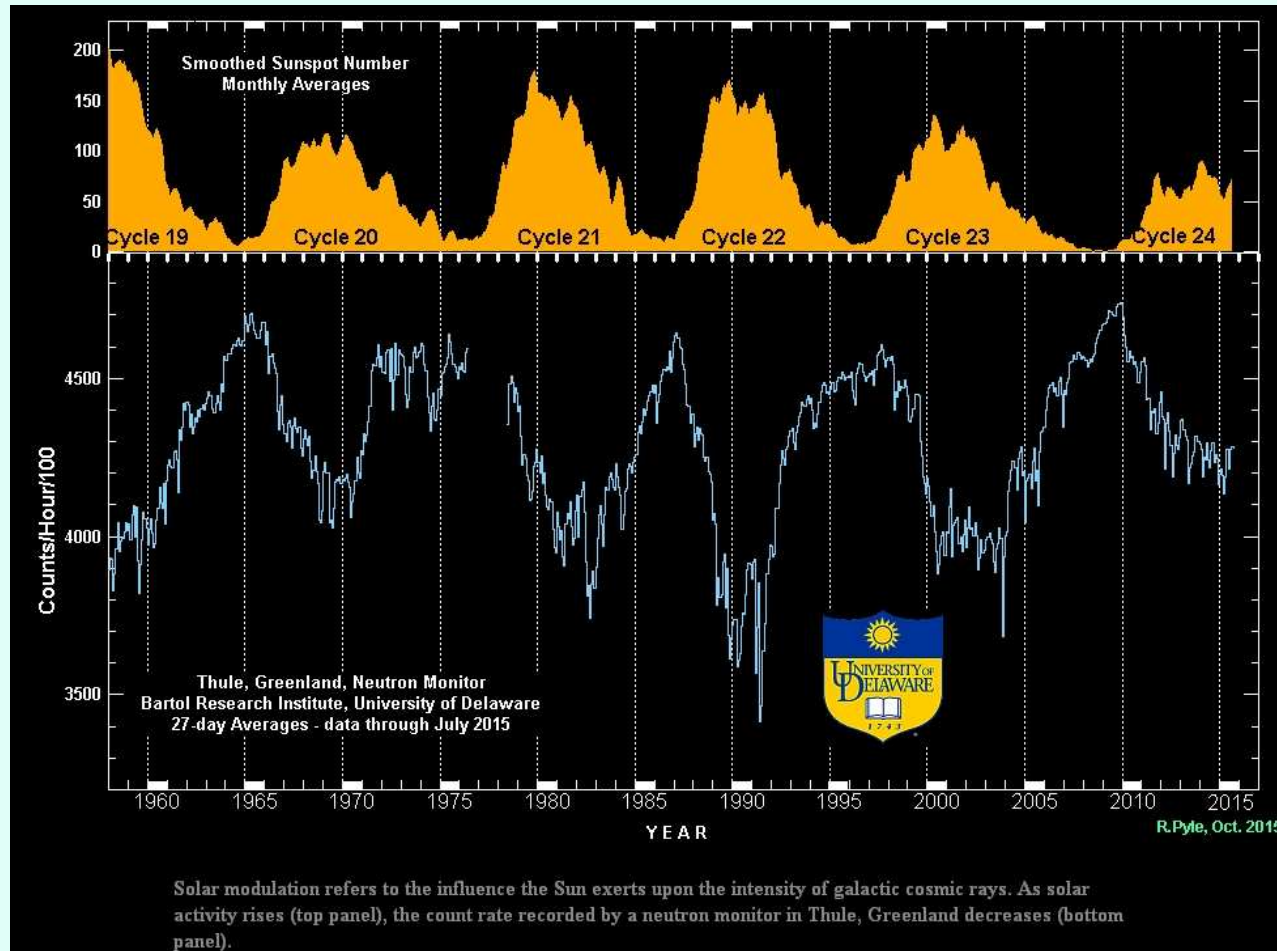


Már az 1930-as években felismerték, hogy a kozmikus sugárzás erőssége a geomágneses szélességtől függ, és a napciklus fázisával is változik. Így lehetőség nyílt a Föld mágneses terének és a helioszféra mágneses szerkezetének távérzékelésére is. A 2. világháború után az ún. **neutronmonitorok** és müonmonitorok hálózatával végezték a szondázást.



Az űrkorszak előtt a kozmikus sugárzásnak fontos szerepe volt a magnetoszféra felmérésében. Adott helyen bizonyos értéknél kisebb impulzusú protonok nem tudták elérni a légkör határát a függőleges irányban. A térkép e határokat mutatja Gigavolt egységekben. Kis energiájú részecskék a sarkok közelében tudnak leginkább behatolni (pl. Grönland, Antarktisz). A mágneses tér szerkezetét a Nap-eredetű CME-k is befolyásolják.

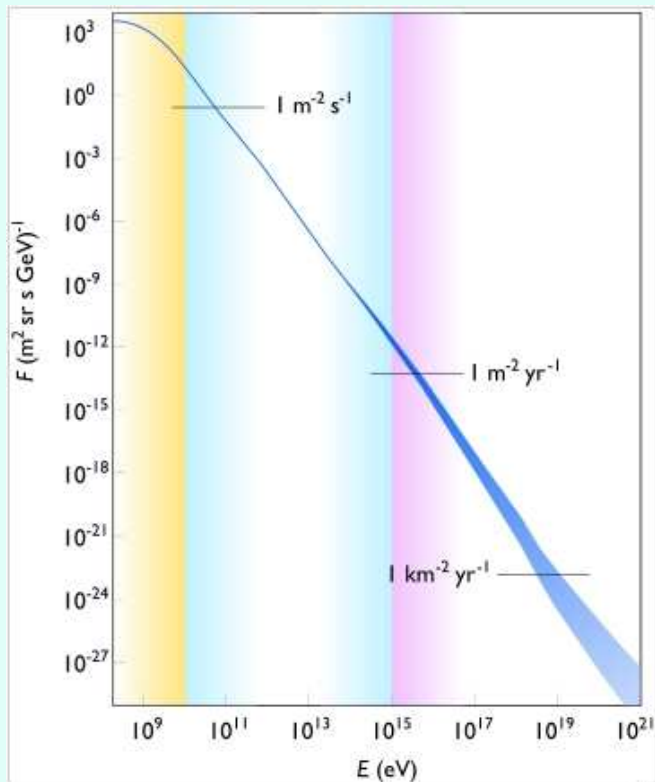
A relatív napfoltszám és a kozmikus sugárzás ellenfázisú változásai



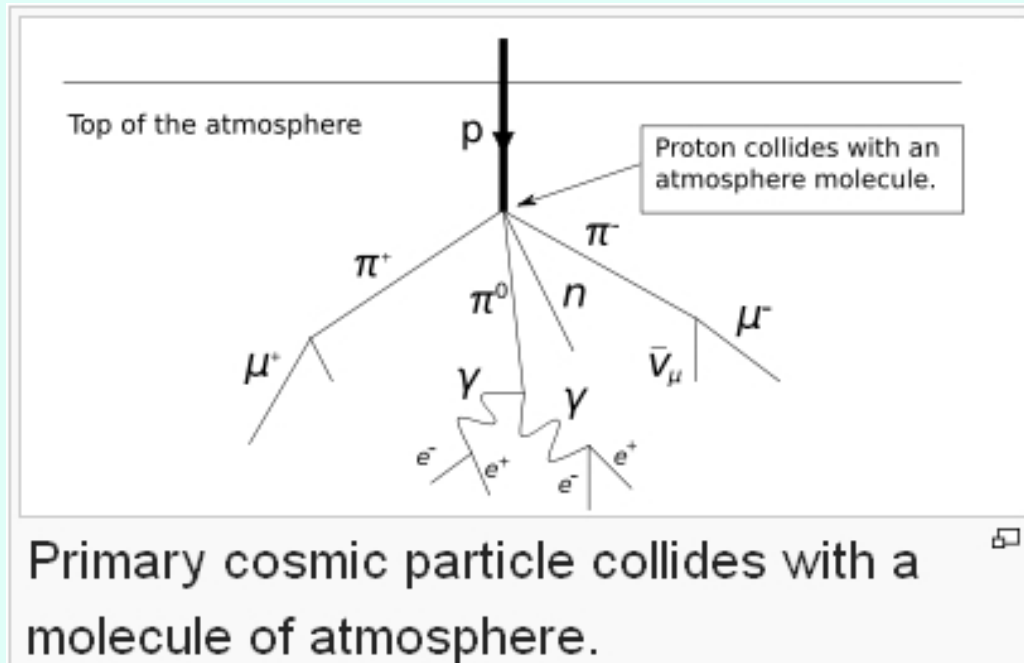
A földfelszíni KS intenzitását a napciklus fázisa is befolyásolja, mivel kis napaktivitás idején a KS könnyebben hatol be a helioszférába.

Mivel a Nap tere kb. 11 évenként irányt is vált, a kis energiájú protonok más-más irányból tudnak könnyebben belépni, és így a KS intenzitása felváltva más-más alakú (a maximumnál hegyes ill. tompa) görbét követ.

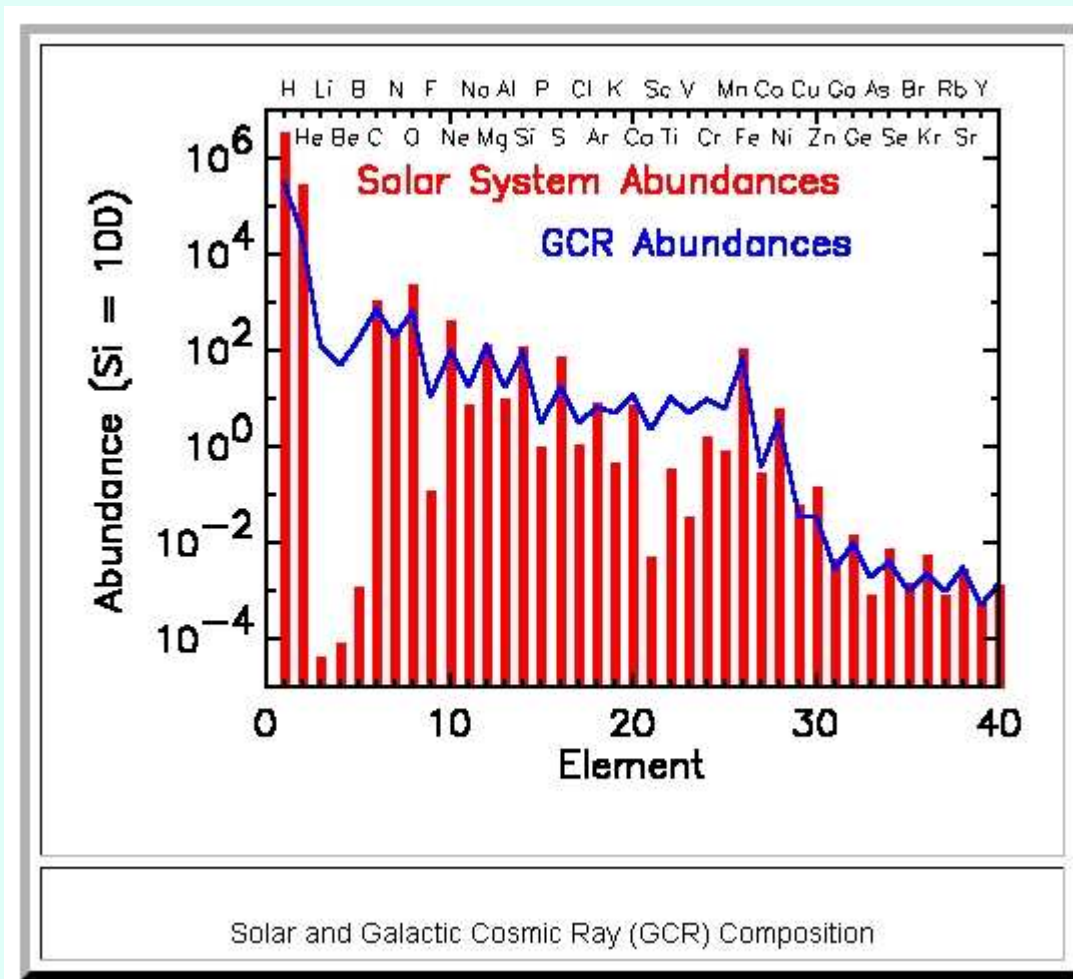
Kozmikus sugárzás energiaspektruma és légköri „záporai”



Cosmic ray flux versus particle energy

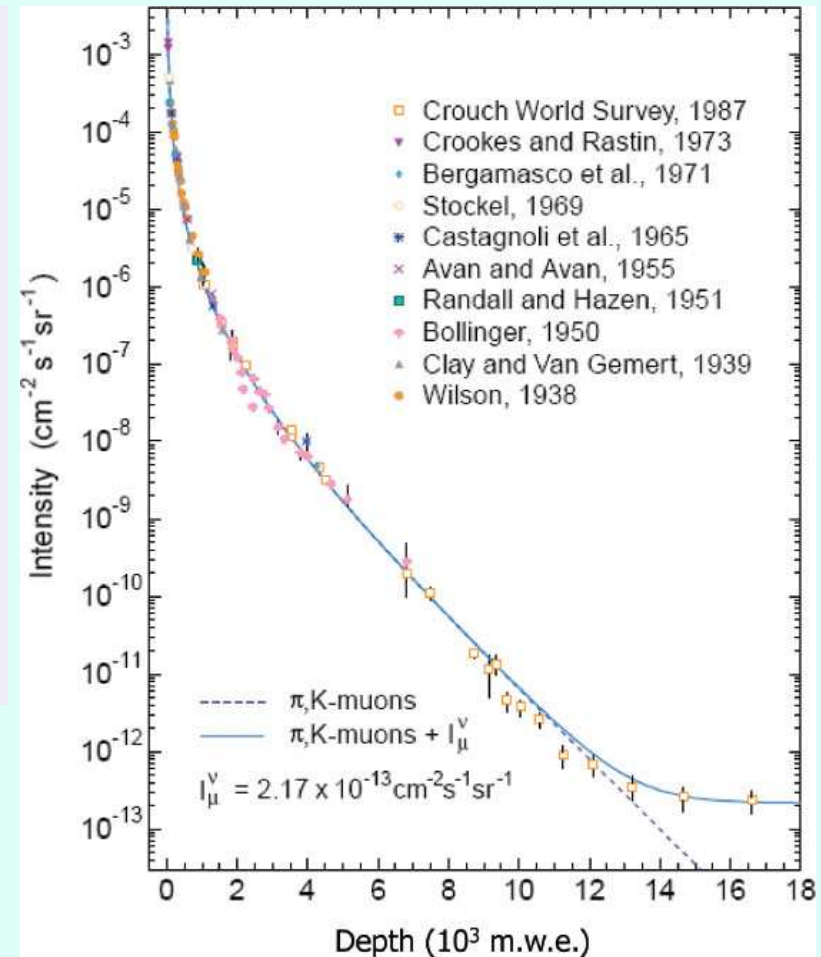
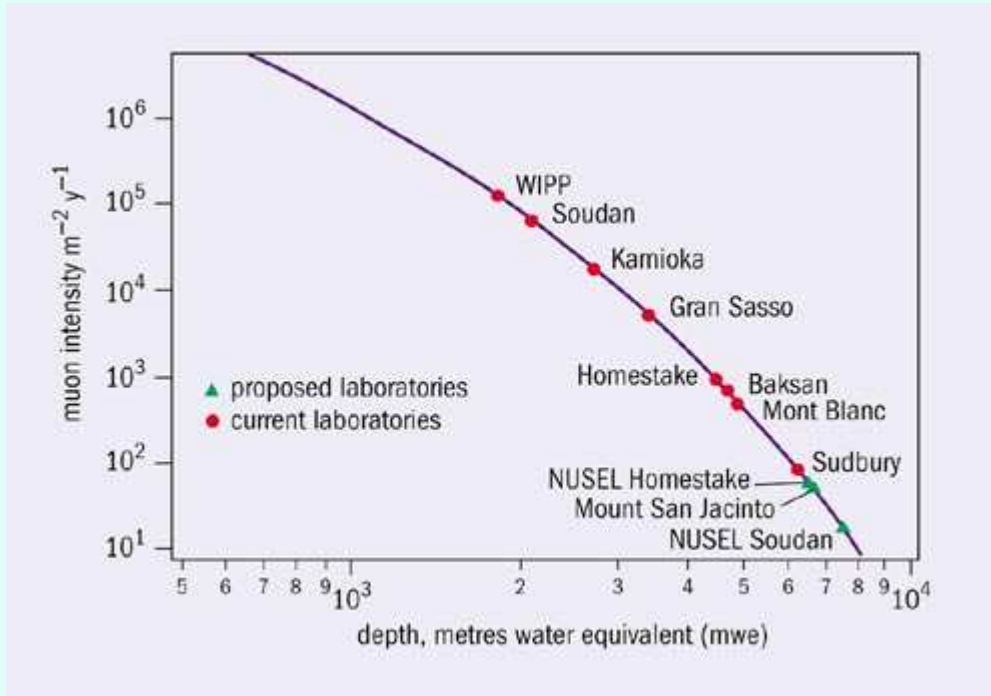


A KS-ban érkező és a naprendszerbeli elemek gyakorisága



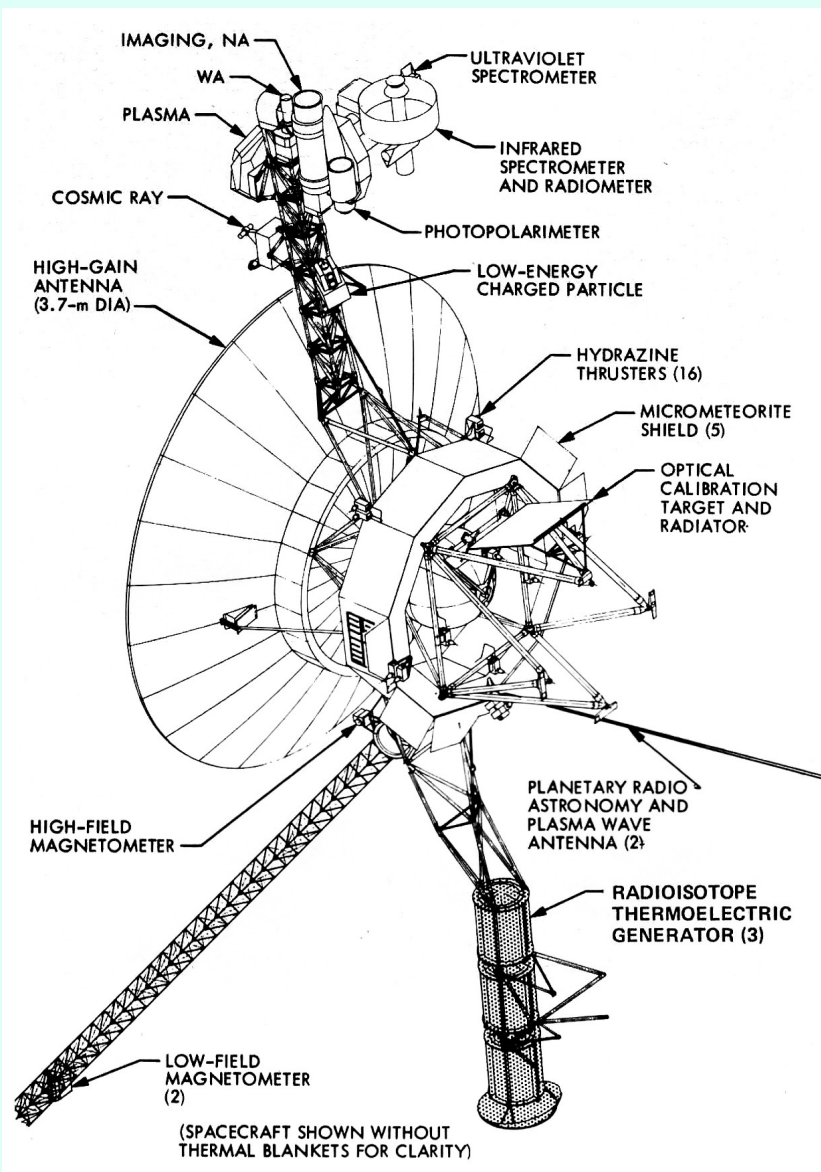
A helioszféra határára érkező KS már több gramm/cm² csillagközi gázon megy át, és az ütközések során olyan törmelékek is keletkeznek, amik a csillagokban csak nagyon ritkán találhatók meg (pl. Li, Be, B).

Kozmikus sugárzási müonok intenzitása nagy mélységekben



Mintegy 14 km vízekvivalens mélységtől kezdve már a minden irányból érkező, légköri neutrínók által keltett részecskék dominálnak.

**A Voyager-küldetés:
a külső helioszféra és a helyi
csillagközi szél
kölcsonhatásának vizsgálata**



Az 1977-ben indított Voyager szondák szerkezete

V2 és V1 38 éves születésnapja: 2015. aug. 20 ill. szept. 5.

Jelenlegi távolságuk a Naptól: kb. 111 ill. 134 AU

Fontos fedélzeti egységek:

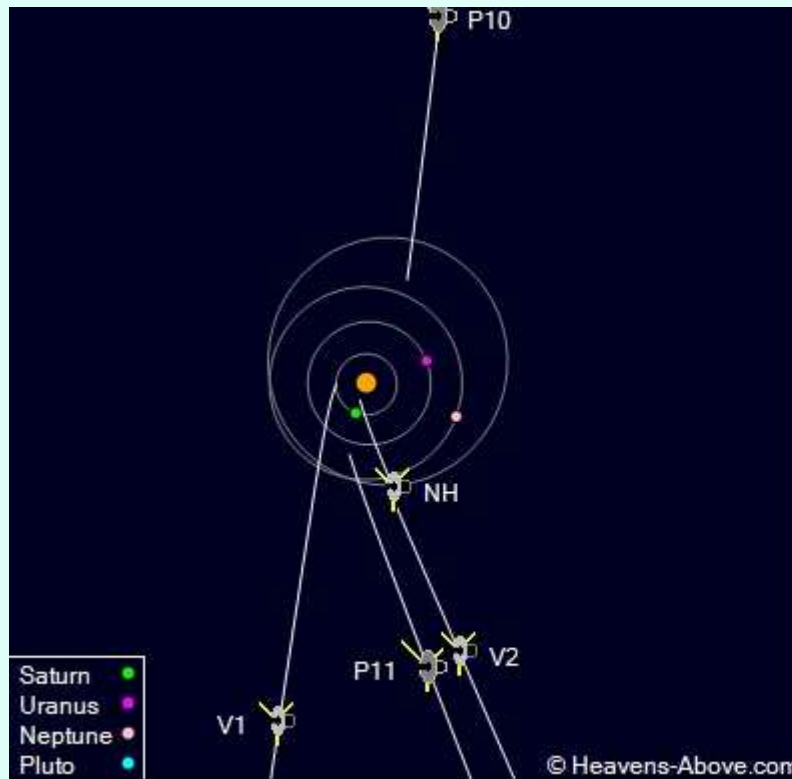
Radioaktív hőgenerátor (RTG), Pu²³⁸ oxid, 88 éves felezési idő.

Nagynyereségű antenna (23 W)

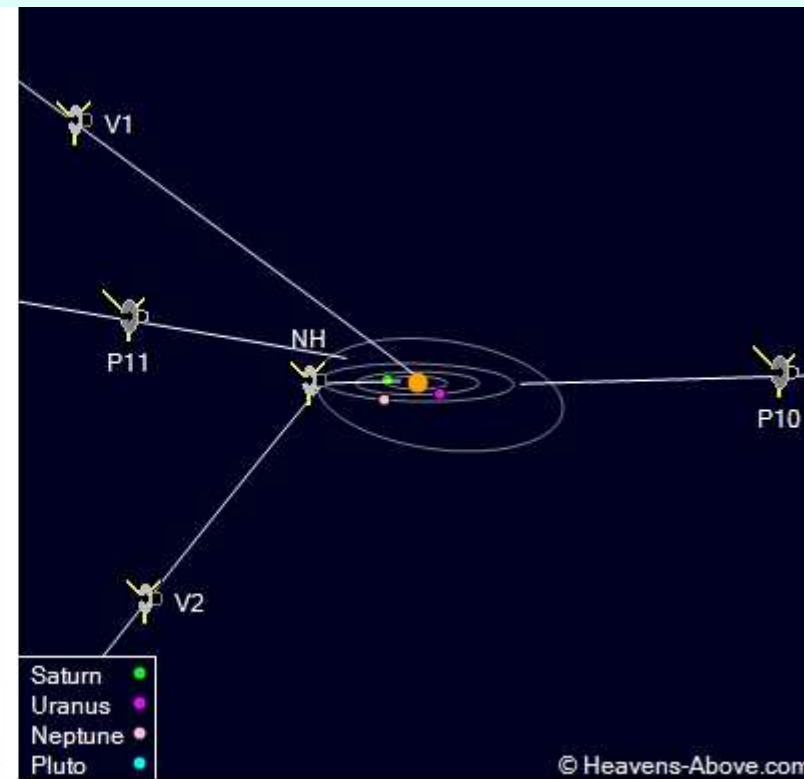
Programozható számítógépek

Magnó 62,5 MB kapacitással

A Naprendszert elhagyni készülő űrszondák helyzete



View from 90° above ecliptic plane



View from 10° above ecliptic plane

A kifelé tartó szondák jelenlegi paramétereit

	Pioneer 10	Pioneer 11	Voyager 2	Voyager 1	New Horizons
Distance from Sun (AU)	115.634	94.775	110.728	134.490	35.045
Speed relative to Sun (km/s)	11.983	11.296	15.377	17.002	14.411
Speed relative to Sun (AU/year)	2.528	2.383	3.244	3.587	3.040
Ecliptic latitude	3°	14°	-36°	35°	2°
Declination	25° 53'	-8° 45'	-56° 58'	12° 15'	-20° 33'
Right ascension	5 ^h 7 ^m	18 ^h 51 ^m	20 ^h 1 ^m	17 ^h 14 ^m	19 ^h 9 ^m
Constellation	Taurus	Scutum	Pavo	Ophiuchus	Sagittarius
Distance from Earth (AU)	115.975	94.845	110.883	134.178	35.167
One-way light time (hours)	16.08	13.15	15.37	18.60	4.87
Brightness of Sun from spacecraft (Magnitude)	-16.4	-16.8	-16.5	-16.1	-19.0
Spacecraft still functioning?	no	no	yes	yes	yes
Launch date	1972-Mar-03	1973-Apr-06	1977-Aug-20	1977-Sep-05	2006-Jan-19

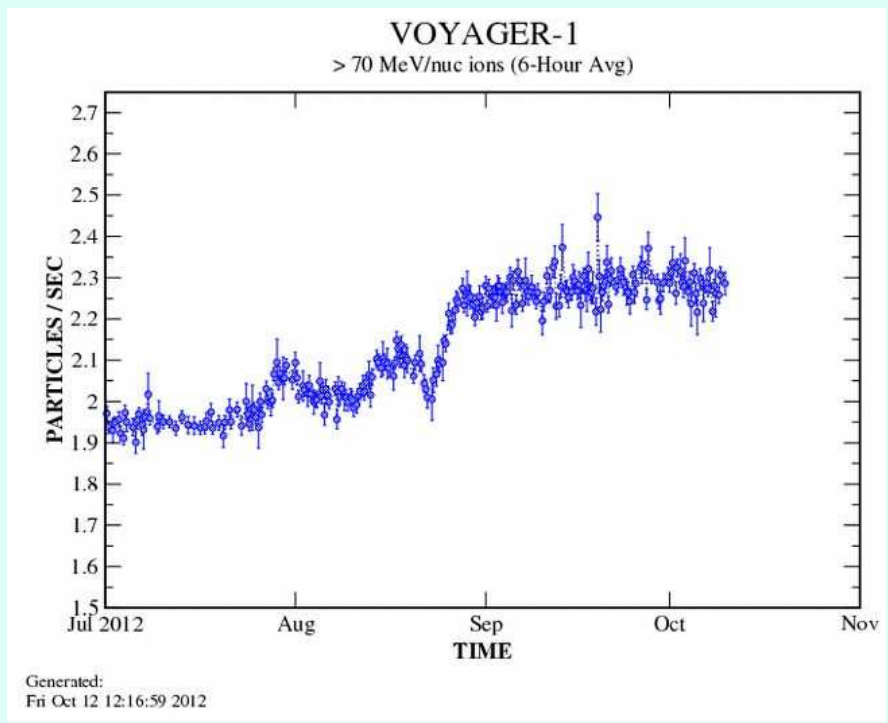
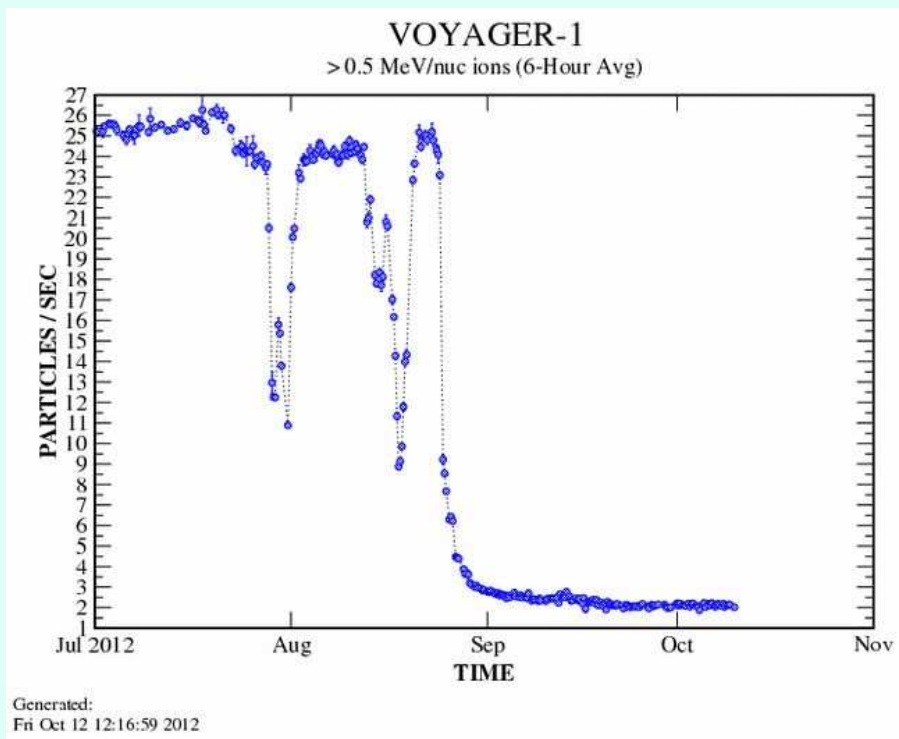
Mindkét Voyager szonda áthaladt már a napszélplazma szuperszonikus és szubszonikus tartományát elválasztó nagy lökéshullámon, 2004 decemberében ill. 2007 augusztusában, és az áthaladások sok meglepetést okoztak.

Azóta a Voyager szondák a Helioszféra belső, lassú napszelet tartalmazó burkában haladtak kifelé, más-más környezetben. Emellett a **2008-ban fellőtt IBEX szonda** is váratlan szerkezetet talált a külső helioszférából beáramló semleges atomoknál.

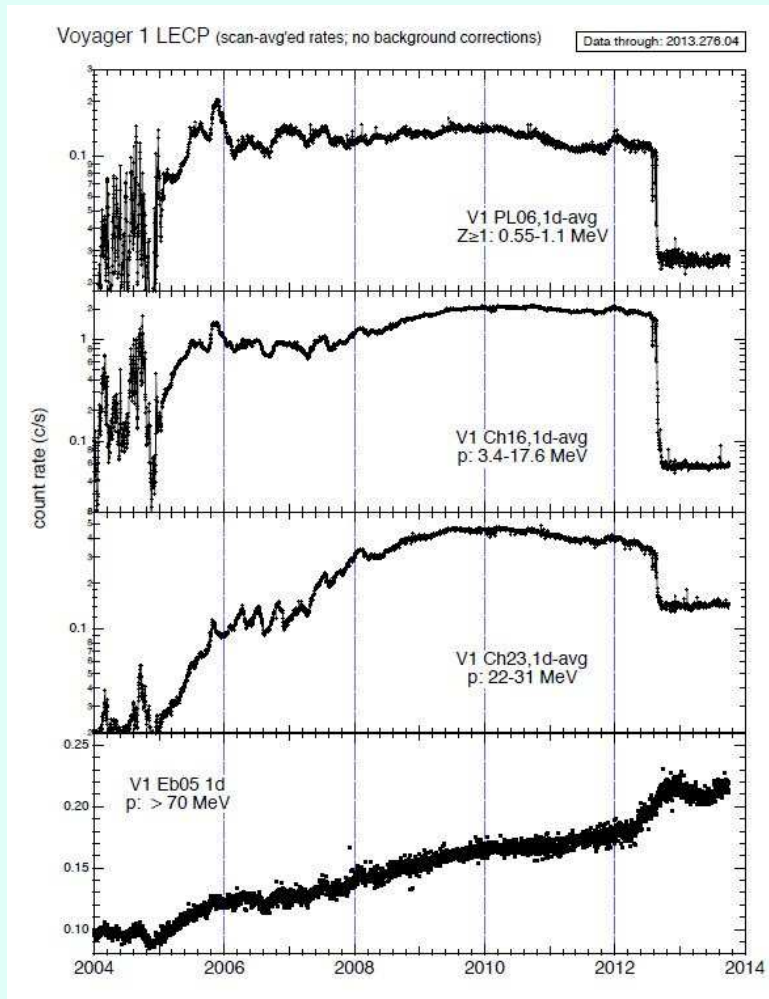
Legújabb, még részben megmagyarázatlan felfedezés:

2012. augusztus 25-én a V1 áthaladt egy éles határon, ahol a néhány 10 keV-től néhány 10 MeV-ig terjedő energiájú ionok fluxusa drasztikusan csökkent – V1 **kiléphetett a Helioszférából a csillagközi szélbe, vagy új, ismeretlen tartományba jutott.**

**2012. aug. végétől a MeV-es fluxus stabilan lecsökkent,
a 70 MeV fölötti (kozmikus sugárzás) megnövekedett.
Azóta is lényegében változatlan mindkét fluxus. Kérdés
azonban, hogy V1 ekkor valóban a helioszféra határát
érte-e el, vagy csak egy közbenső határfelületet?**



Más energiákon is hasonlóak a változások:



**Energikus részecskék
fluxusának változásai
különböző energiákon
2004-től 2014-ig.**

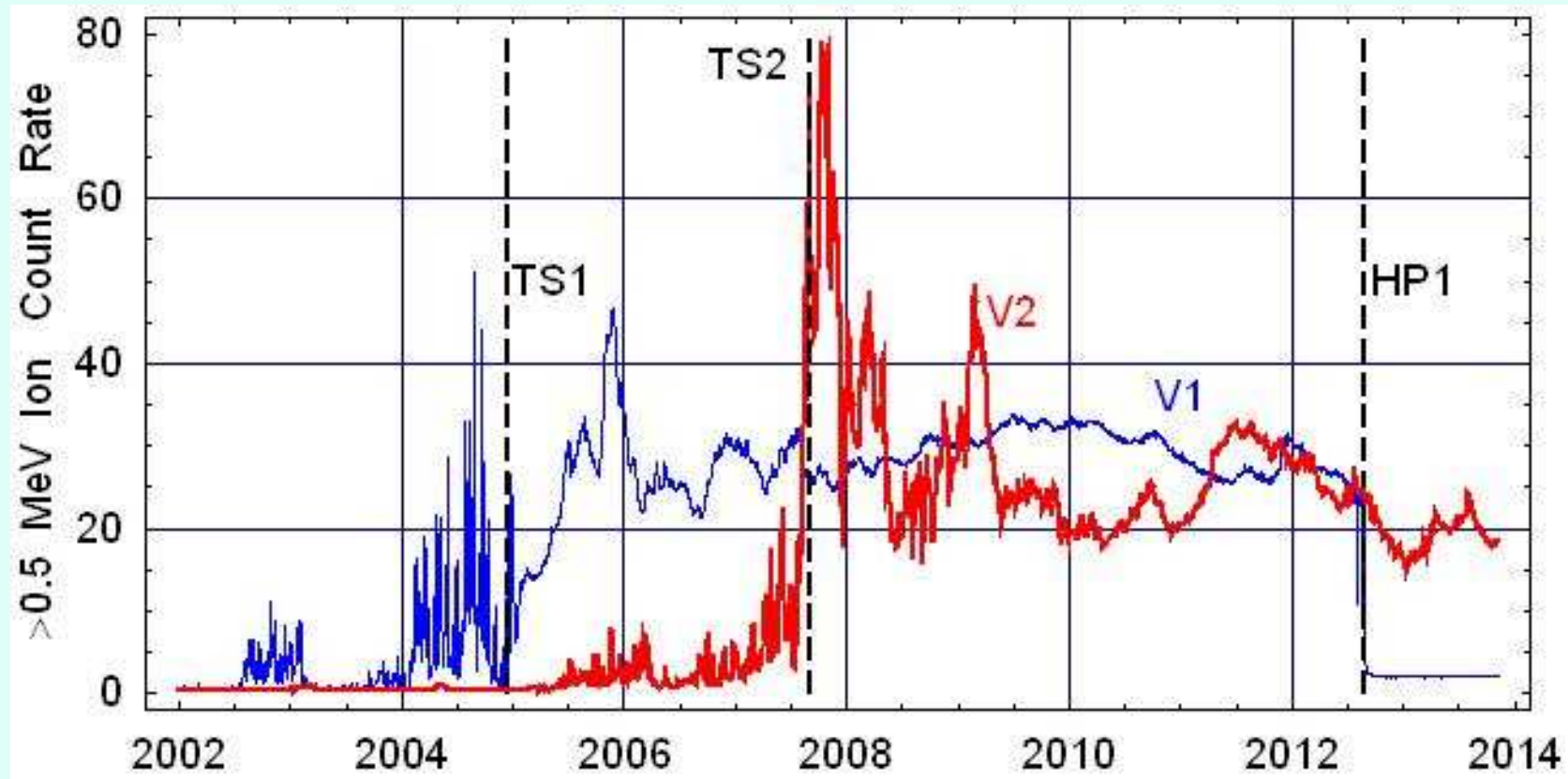
**2012. augusztus 3-án, miután a július végi intenzitás-
adatok a NASA-tól beérkeztek, az alábbi e-mailt
küldtem több ismert kozmikus fizikusnak:**

**„Voyager-1 data appear to indicate that our most
distant messenger might be leaving the Heliosphere just
now: low-energy ion count rates have drastically
decreased, while those of relatively high-energy ones
started to sharply increase.**

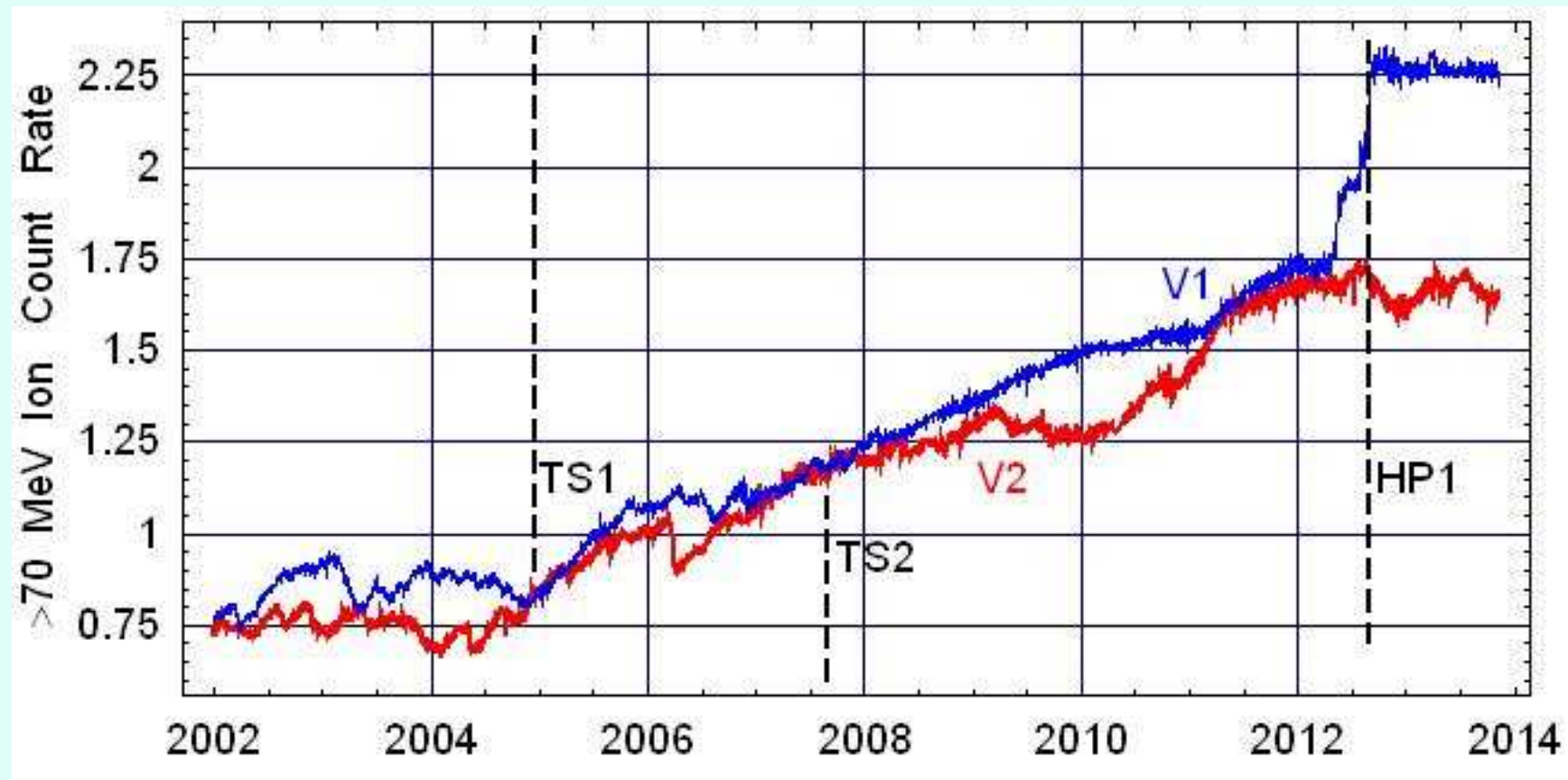
**Of course it may not be the final farewell yet, but the
changes are quite spectacular at present (see the current
data enclosed).”**

(Bár ez akkor tényleg csak múló változásnak bizonyult, pár
hétrel később valóban végbement a maradandó változás is.)

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

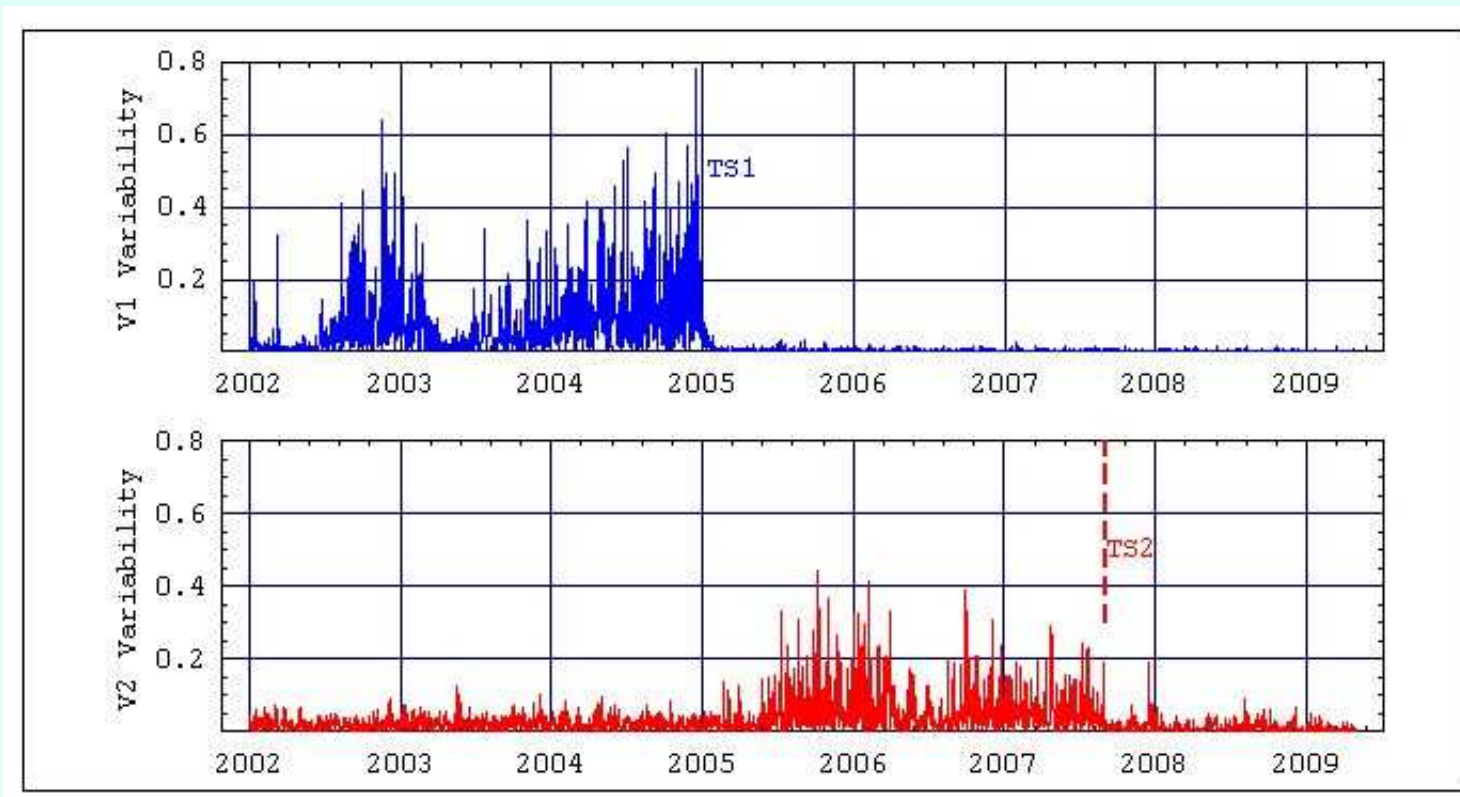


A 70 MeV feletti, főleg KS-eredetű beütésszámok a V1 és V2 szondánál. V1-nél HP1 után talán már a csillagközi fluxus látszik.

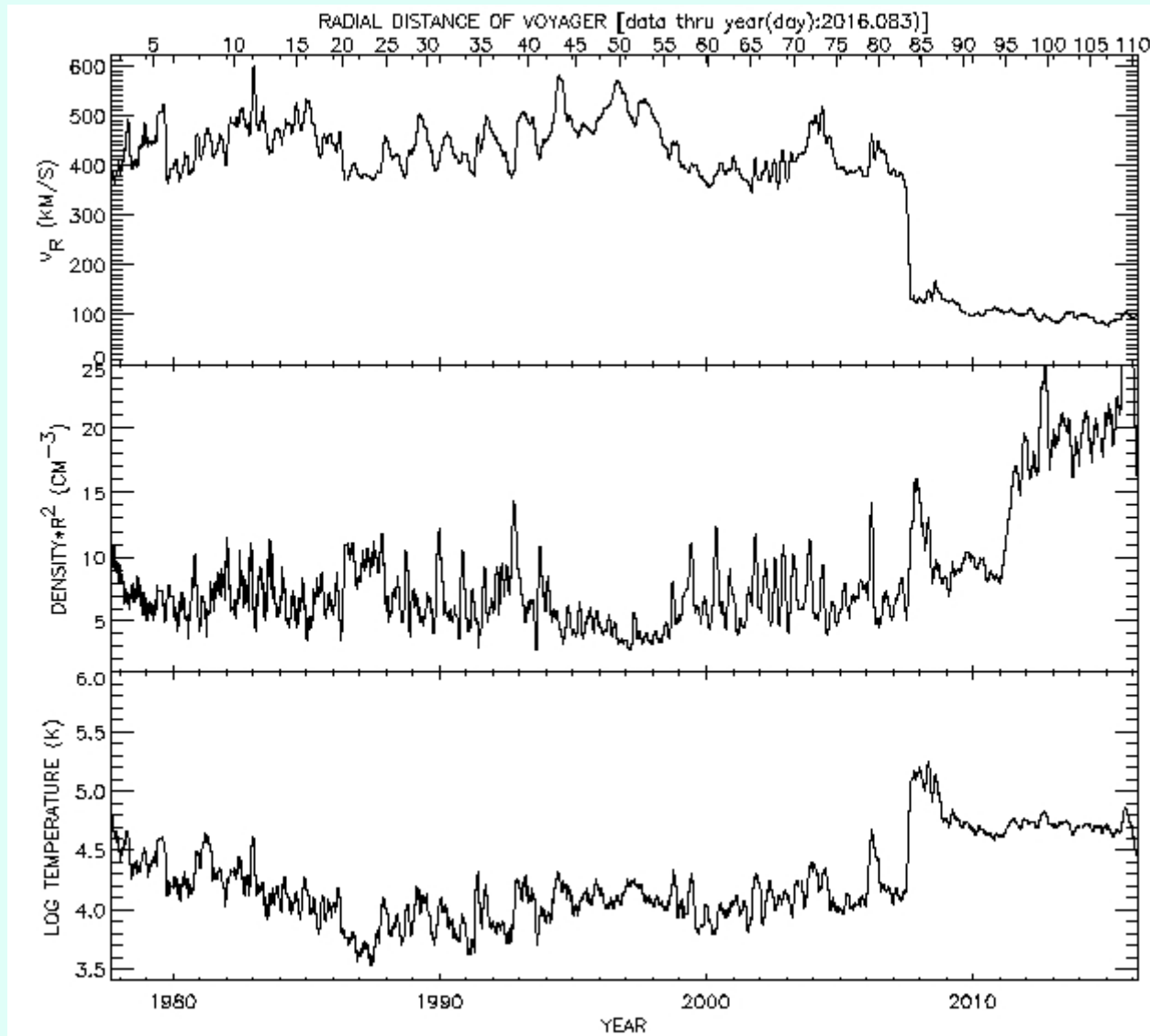


A V1 és V2 által mért beütésszámok logaritmusos változékonysága (az egymás utáni napok beütésszámai logaritmusának különbségei, abszolút értékekben)

(Látszik, hogy a nagy lökéshullám előtt az intenzitás igen gyorsan változik, utána nem..)

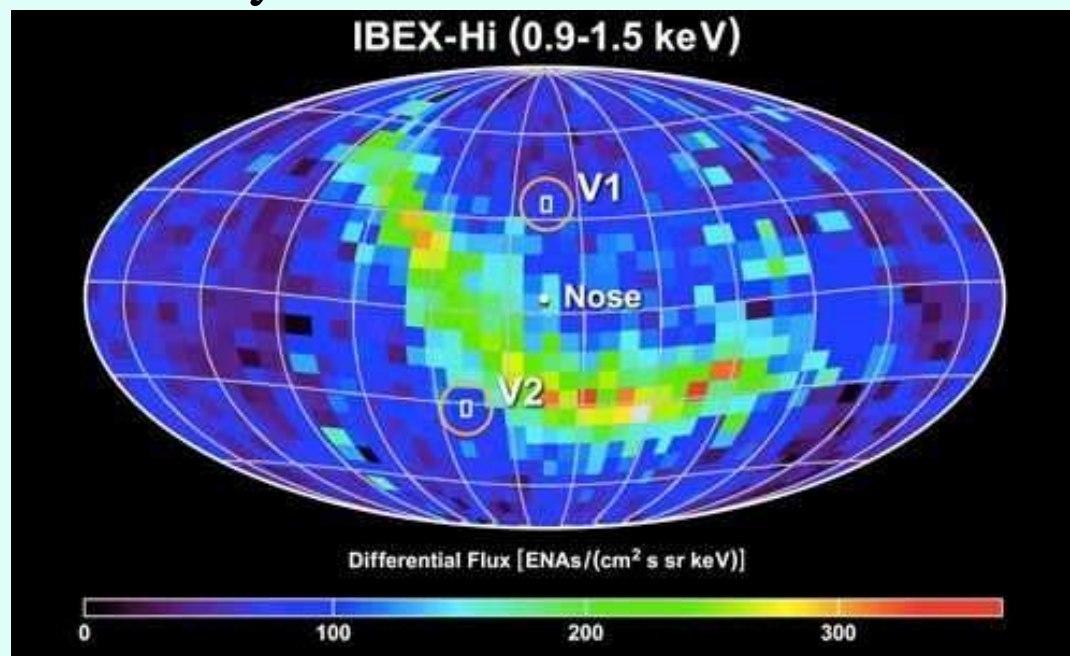


A gyors változást részecskenyalábok keltette instabilitások okozhatták.



A V2 által mért napszéladatok a 38 év során. Látszik, hogy a nagy lökéshullámon való átmenet után a radiális sebesség lecsökkent, a sűrűség és a hőmérséklet pedig megnőtt (de kevésbé, mint azt várták).

A 2008-ban fellőtt IBEX műhold energikus semleges atomok segítségével tanulmányozza a külső Helioszféra szerkezetét.



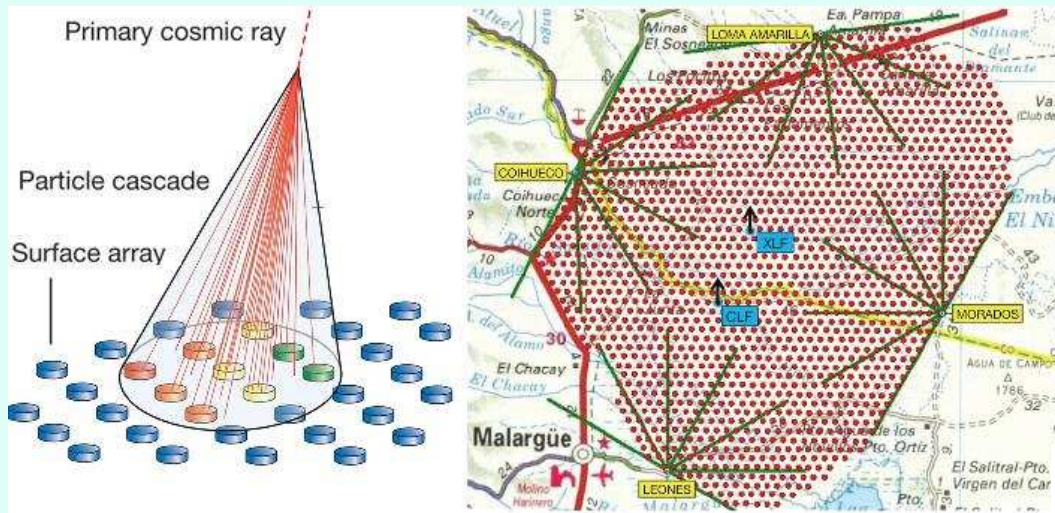
Azt találták, hogy egy **keskeny, gyűrű-alakú sáv**ból jön a legtöbb 1 keV körüli energiájú semleges atom. Feltételezik, hogy ennek a gyűrűnek a síkja merőleges a közeli csillagközi mágneses térre, aminek irányát más mérések is igazolják. A Voyager-1 szonda mágneses mérései viszont azt mutatják, hogy **V1 még mindig a helioszféra mágneses terében van**, bár környezetéből a keV-es és MeV-es helioszférikus részecskék már 2012-ben eltűntek. Így a **heliopauza még kijebb lehet**.

Lehet, hogy a V1 szonda csak egy „szirtfalon” jutott át, ahol a MeV-es ionok elvesztek, de az igazi heliopauza még odébb van?



**Példák néhány korszerű, kozmikus
részecskéket és hullámokat vizsgáló
nagyberendezésre**

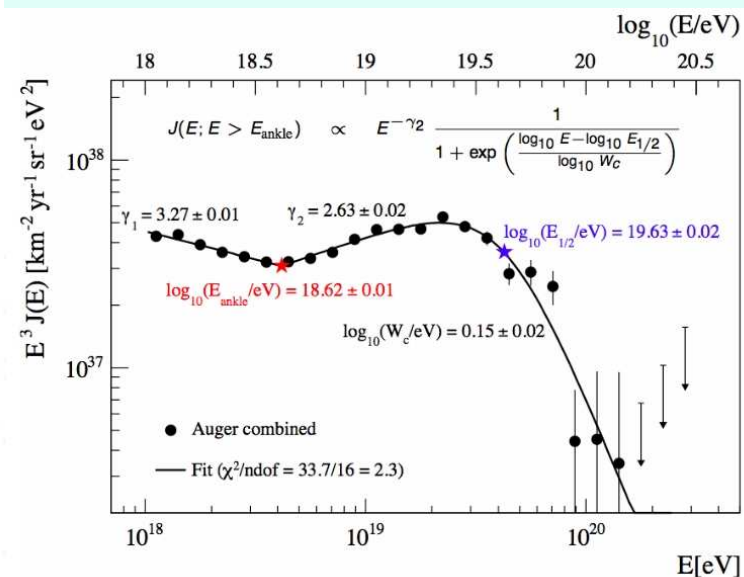
A 3000 négyzetkilométeres Auger detektor Argentínában

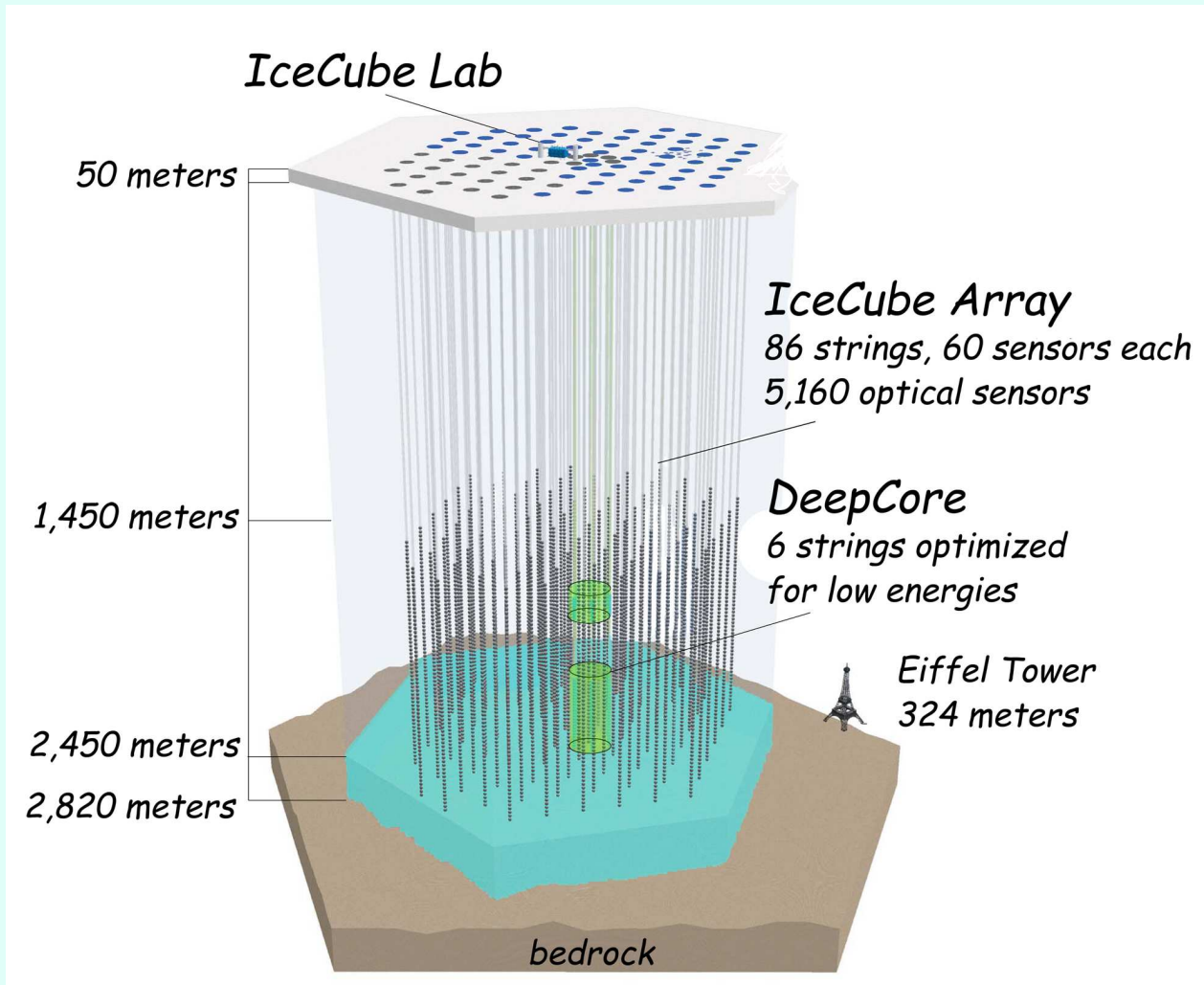


Alul a kozmikus sugárzási spektrum „vége”, amit az Auger mért ki, és ami a mikrohullámú háttéren való pionkeltésre utal.



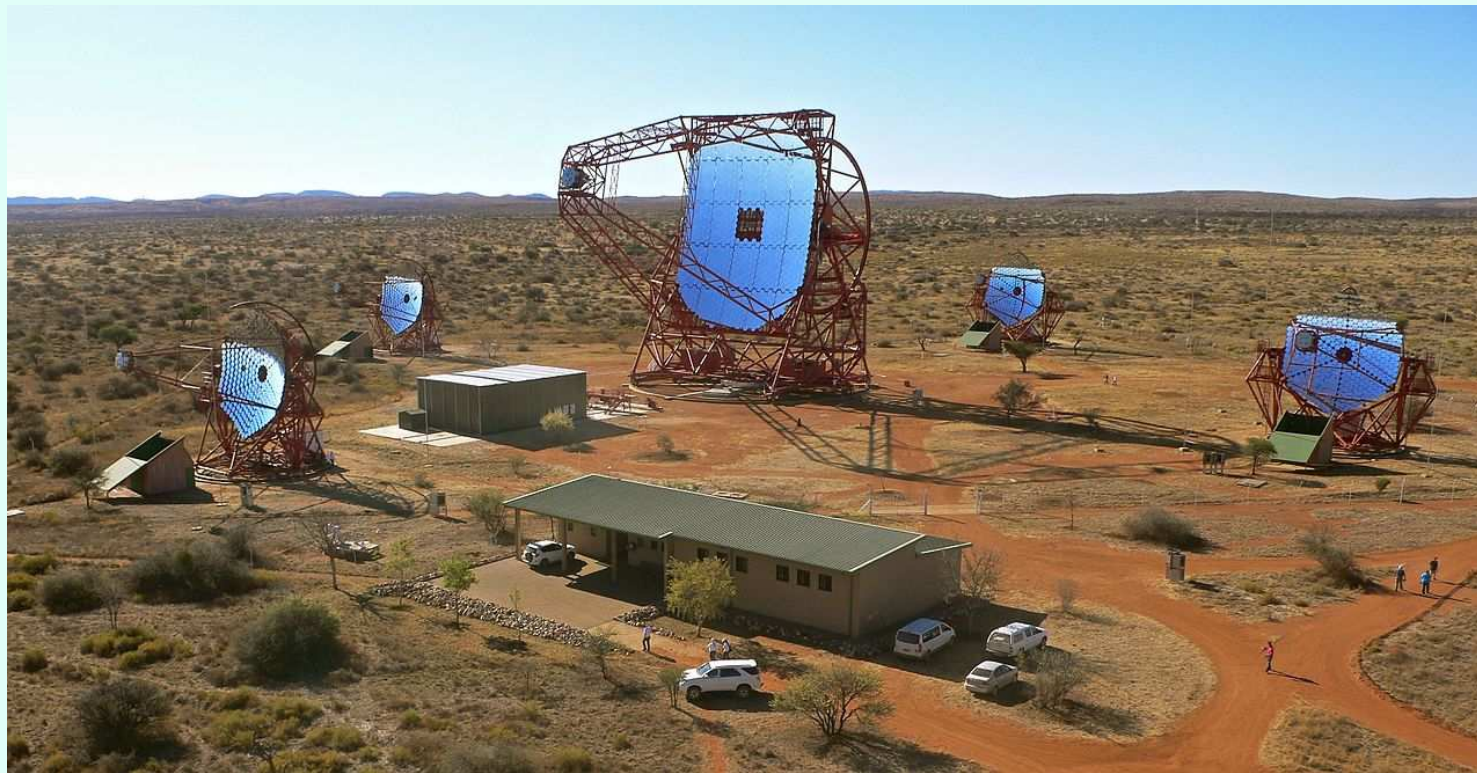
A Naprendszer fizikáj





A köbkilométeres jégkock-detektor a déli sarkon, ami már nem légköri eredetű, hanem távolról érkező kozmikus neutrínókat is mért. Mellette méretarányosan az Eiffel-torony.

A H.E.S.S. légköri Cserenkov-detektor a kozmikus sugárzási és gamma-eredetű légköri záporok észlelésére és irányuk pontos meghatározására (mozaik-tükrök átmérői: 12 és 28 m)

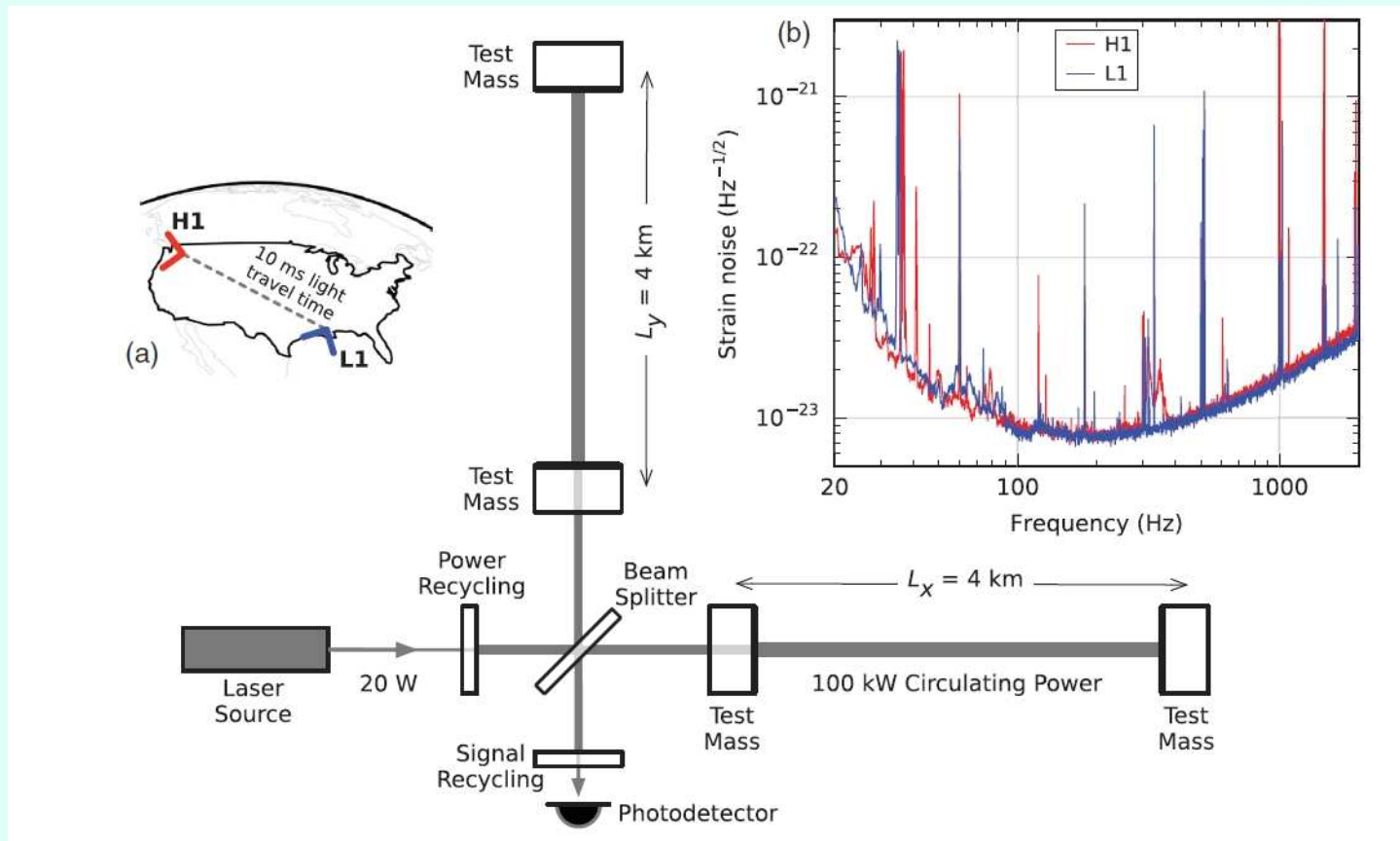


8 tonnás „Alfa Mágneses Spektrométer” (AMS-02) részecske-
és antirészecske-detektor a Nemzetközi Űrállomáson



A Naprendszer fizikája 6.

A legújabb LIGO gravitációs hullám-detektor, amivel nemrégiben mutatták ki e hullámok létezését.



Javasolt ellenőrző kérdések

Mennyiben tér el a Naprendszer és a heliosféra fogalma?

Hogyan szondázza a kozmikus sugárzás a földi magnetosféra és a heliosféra szerkezetét és változásait?

Milyen új részecskéket fedeztek fel a másodlagos kozmikus sugárzásban?

Miért más a Naprendszer és a kozmikus sugárzás elemösszetétele?

Mit nevezünk kozmikus sugárzási zápornak?

Mi biztosítja a Voyager-szondák energiaellátását?

Milyen fontos határfelületeken jutott már túl a két Voyager szonda?

Hogyan keletkeznek a pick-up ionok és az energikus semleges atomok?

Milyen típusú részecskéket detektál az IBEX műhold?



A NAPRENDSZER FIZIKÁJA 2016

 **WIGNER**

Prof. Szegő Károly et al.

*Wigner Fizikai Kutatóközpont
Űrfizikai és Űrtechnológiai Osztály*

szego.karoly@wigner.mta.hu