

Földünk elektromágneses környezete, a Swarm misszió műholdjairól szemlélve

Kovács Péter,

Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály,
Űrfizikai Kutatócsoport

A Swarm misszió



Felbocsájtás dátuma: 2013. november 22.

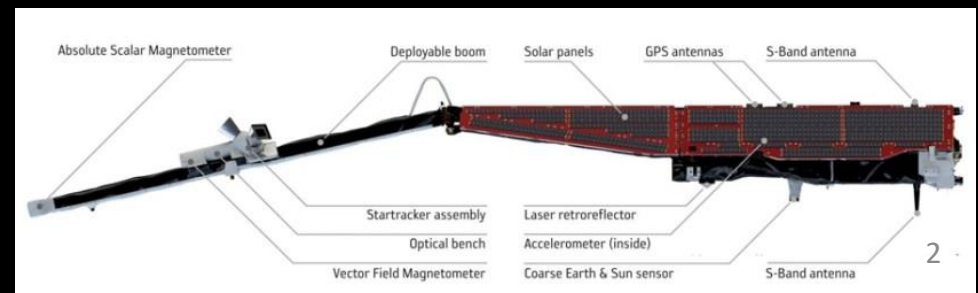
Pálya adatok:

- Magasság: $< \sim 475$ km (Swarm A & C), $< \sim 518$ km (Swarm B)
- Inklináció: 87.4° (Swarm A & C), 88.0° (Swarm B)

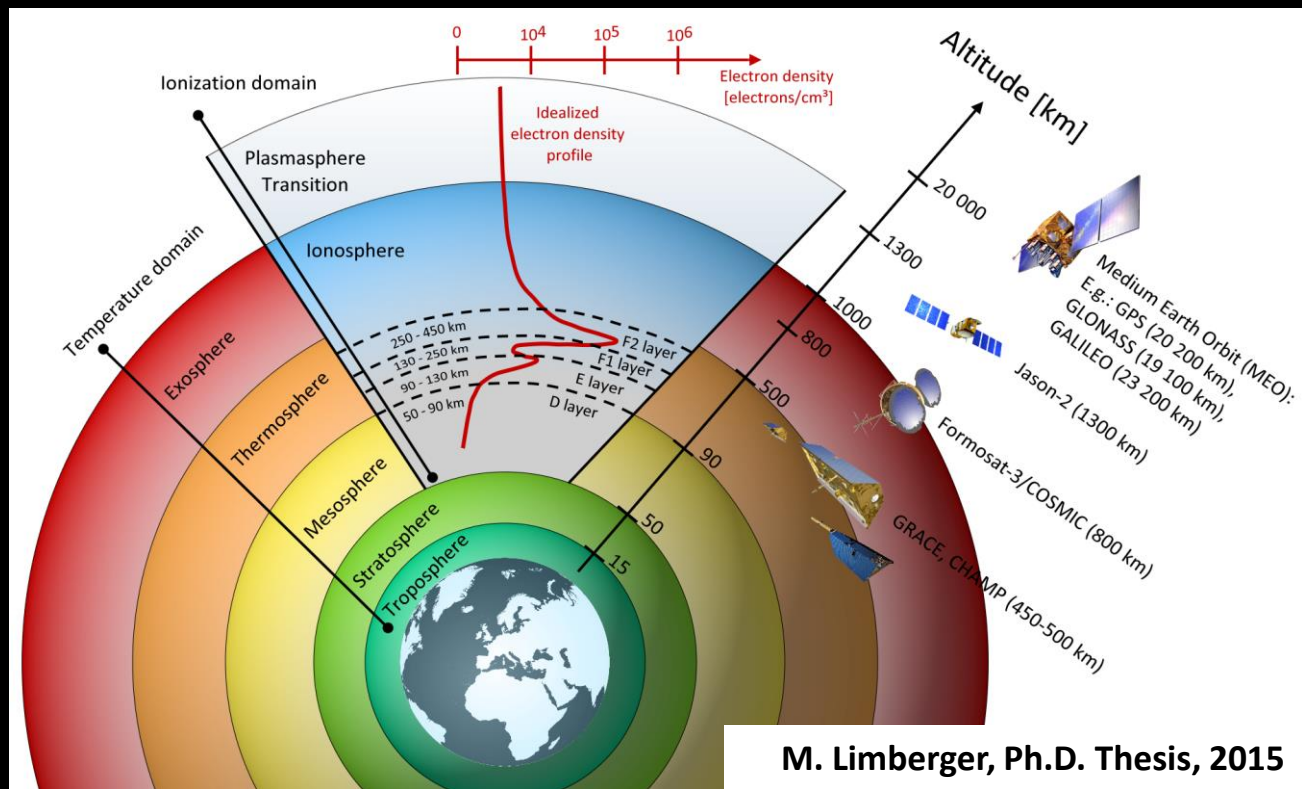
Műszerezettség: VFM (Vector-tér magnetométer), ASM(Abszolút magnetométer), EFI (Elektromos tér műszer), ACC (Gyorsulásmérő), LRR (Lézer sugár reflektor), GPS

Analízisünkben használt:

Nagy időbeli felbontással (50 Hz) regisztrált VFM mágneses vektor-tér adatok



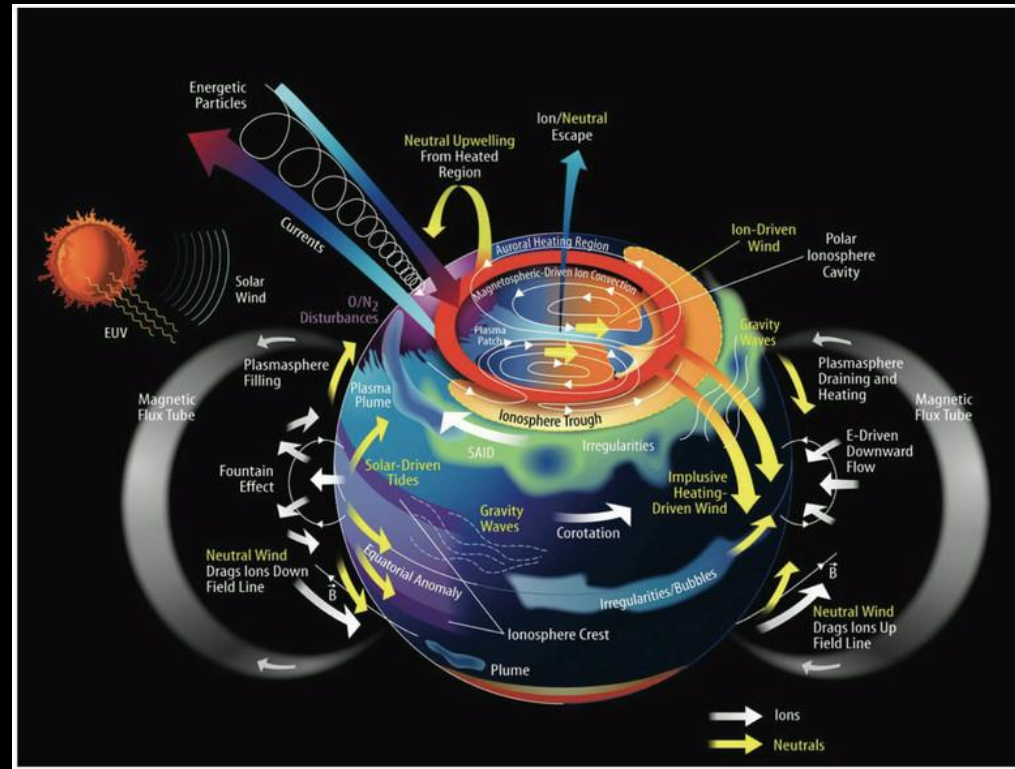
Ionoszféra



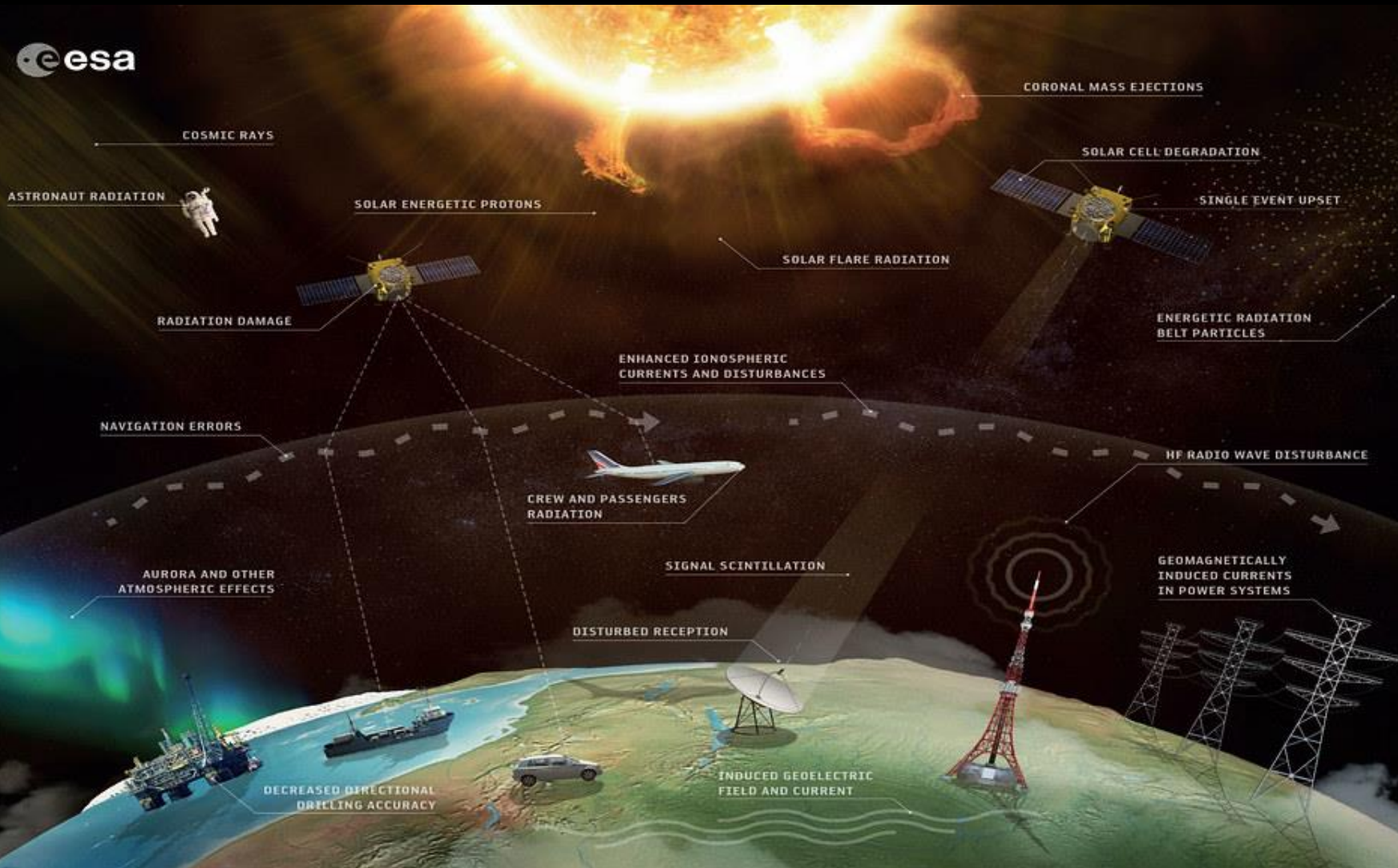
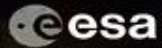
- Felszíntől 50 és 1000 km-re eső tartomány
- Ionizált állapotban lévő atomok, elektronok alkotják
- A részecskék térbeli eloszlása dinamikusan változik a magasság és a mágneses szélesség szerint
- A részecskék mozgását a földi mágneses tér, külső mágn./elektromos terek, a föld forgása, gravitációs tere, illetve a semleges atmoszféra dinamikája határozzák meg
- Részecskék koherens mozgása elektromos áramokat hoz létre, amik a felszínen és az ionoszféra különböző rétegeiben mágneses tér változást okoznak

Ionoszféra

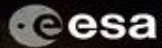
- Felszíntől 50 és 1000 km-re eső tartomány
- Ionizált állapotban lévő atomok, elektronok alkotják
- A részecskék térbeli eloszlása dinamikusan változik a magasság és a mágneses szélesség szerint
- A részecskék mozgását a földi mágneses tér, külső mágn./elektromos terek, a föld forgása, gravitációs tere, illetve a semleges atmoszféra dinamikája határozzák meg
- Részecskék koherens mozgása elektromos áramokat hoz létre, amik a felszínen és az ionoszféra különböző rétegeiben mágneses tér változást okoznak (űridőjárási következmények)



Űridőjárás



Űridőjárás



CÉL

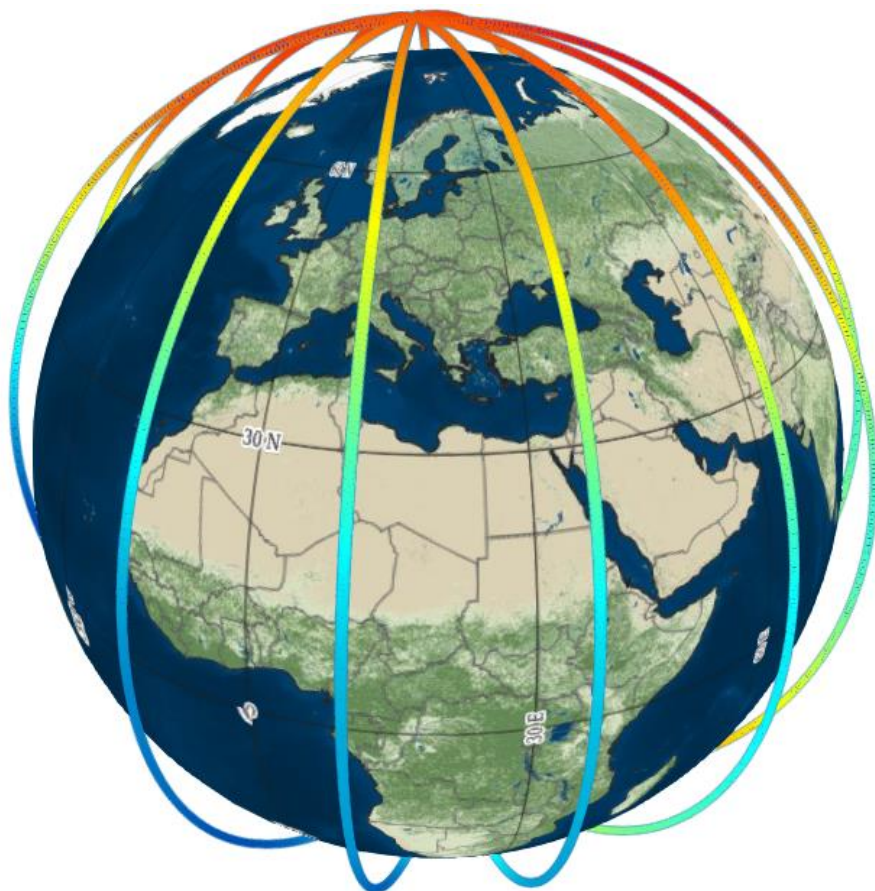
A néhány 100 km léptékű mágneses rendellenességek automatikus felderítése a műholdak adatsoraiban, és a rendellenességek fizikai eredetének meghatározása / tanulmányozása

EPHEMERIS pályázat, 2019-2021 (ESA)

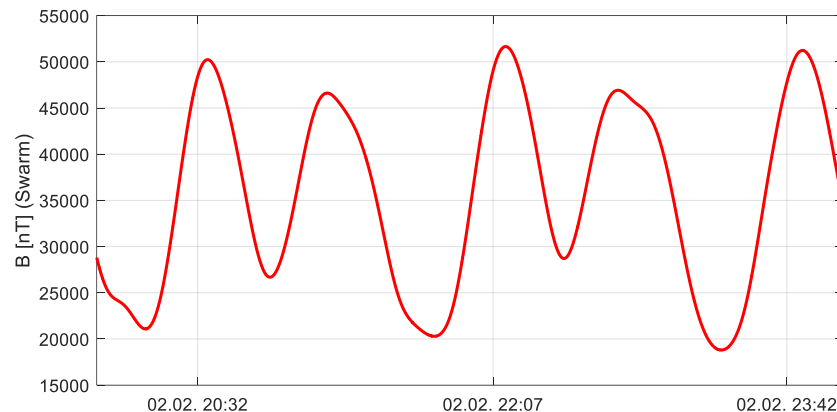


Mágneses mérés a Swarm pályája mentén

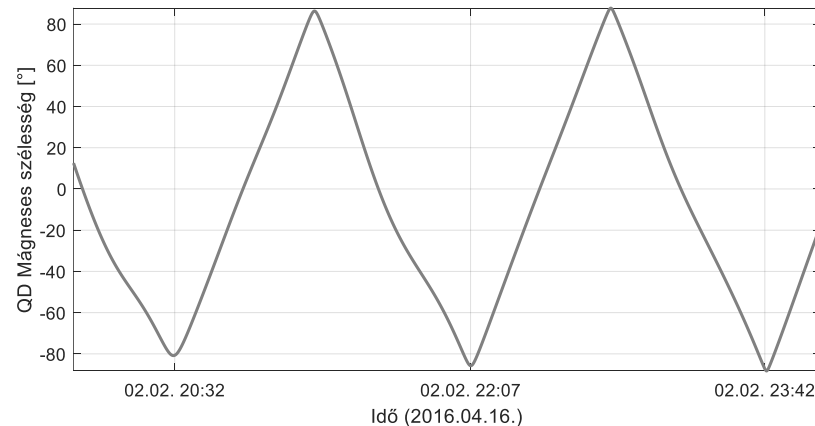
(A nyers mérésekben alapvetően a Föld belső eredetű tere jelentkezik)



Abszolút mágneses tér a Swarm-A hold két teljes földkörüli pályája (függőleges vonalak közötti szakaszok) mentén

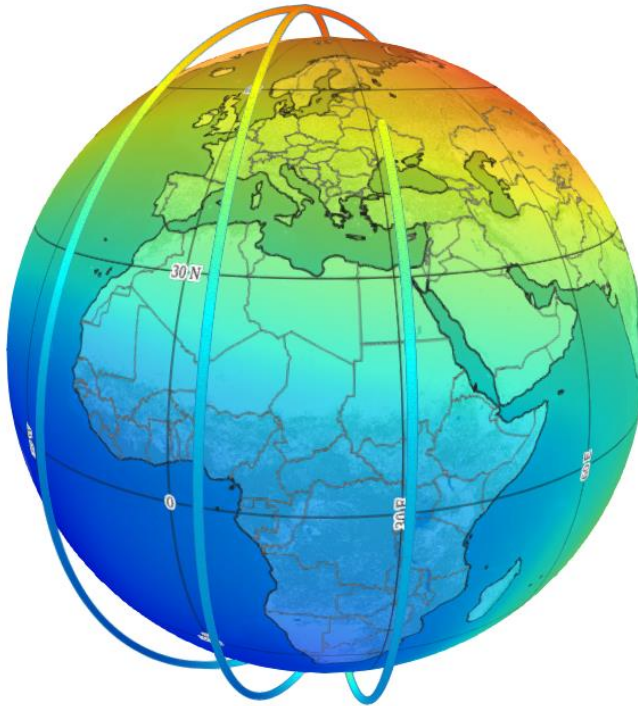


A pálya mágneses szélessége a felső grafikonnal azonos időszakban

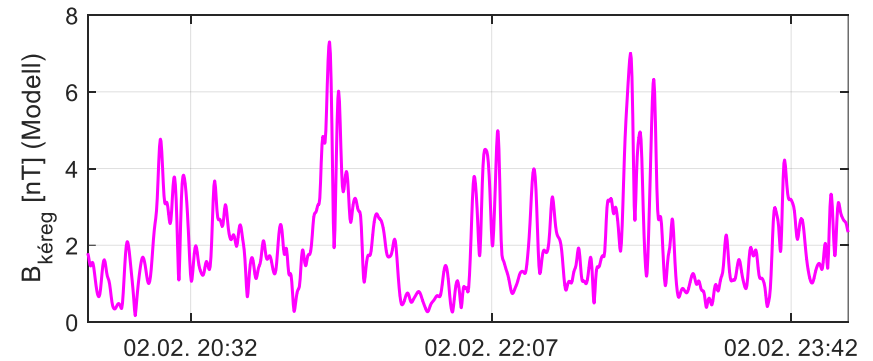
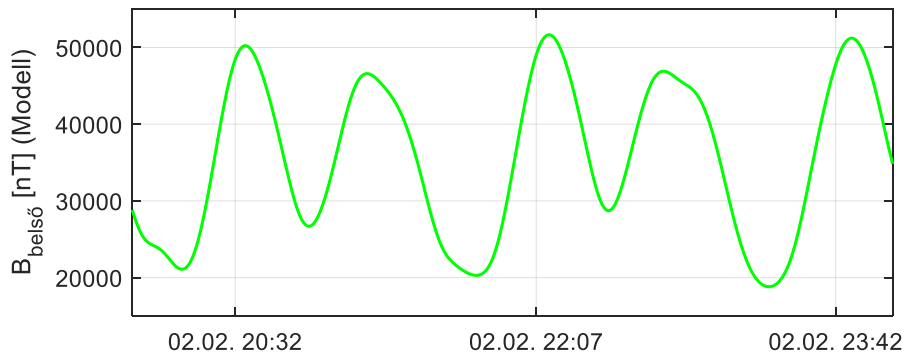
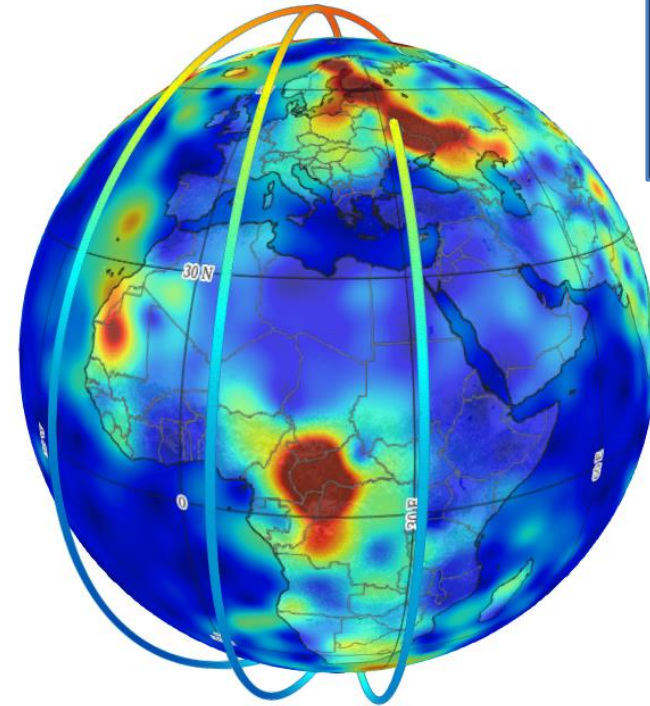


Mágneses mérés a Swarm pályája mentén

Belső
eredetű tér
(fölmág-
neses
dinamó)
modellje

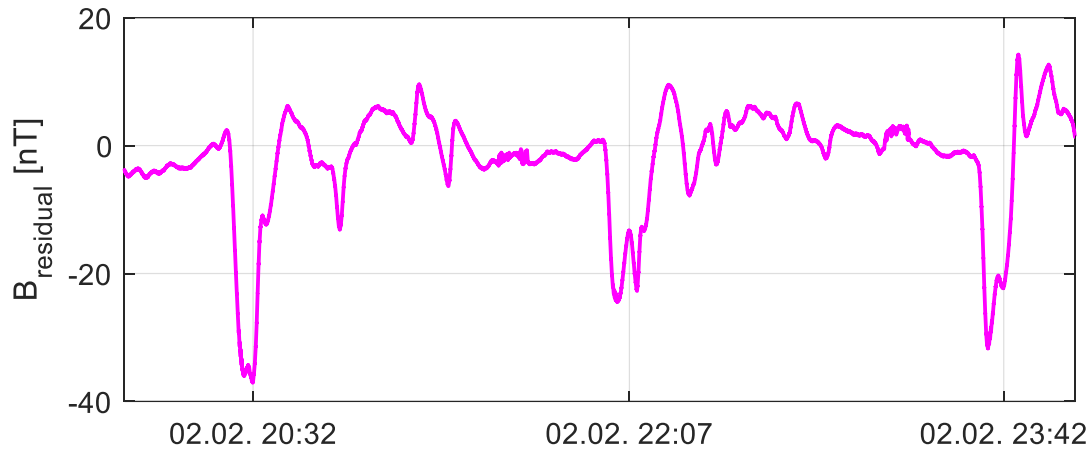


Kéreg
mágneses
terének
modellje



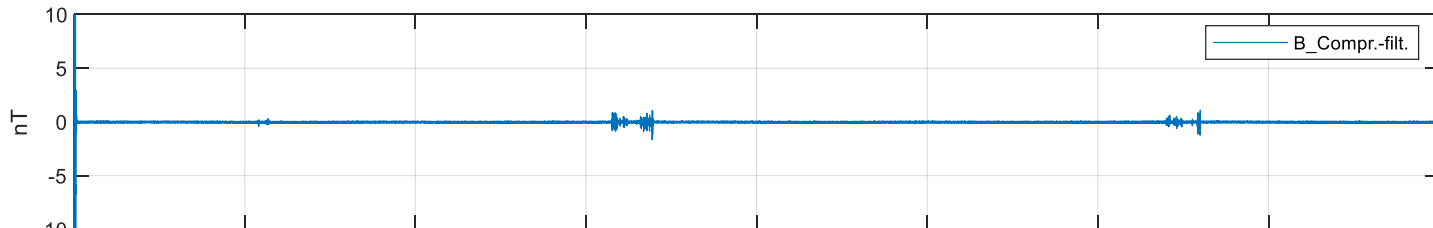
Mágneses mérés a Swarm pályája mentén

(A földi eredetű terek (belső tér + kéreg anomáliák) eltávolítása után)

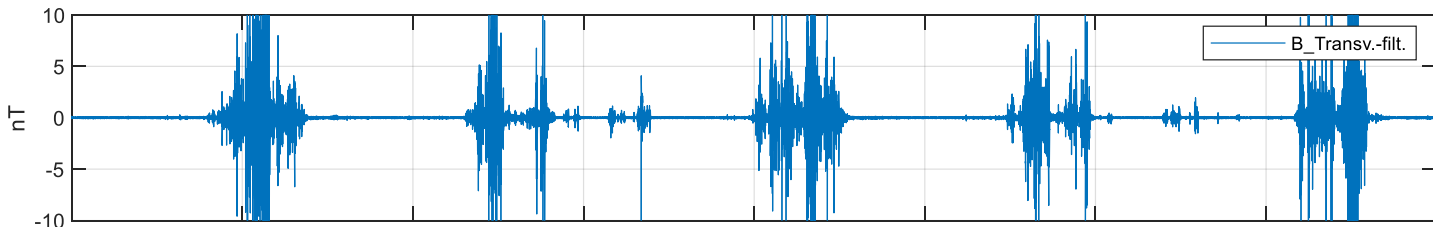


Maradék (reziduális) mágneses tér további transzformációi:

1. A vektor mágneses tér főtér szerinti transzformációja -> erővonalmenti (kompressziós) és erővonalra merőleges (transzverzális) komponensek
2. Felüláteresztő szűrés



- *Kompressziós fluktuációk*



Feltételezés:
A fluktuációk
turbulens eredetűek

- *Transzverzális fluktuációk*

Time	20:30	21:00	21:30	22:00	22:30	23:00	23:30	00:00
Lat.	-86.7°	26.2°	39.3°	-74.7°	8.9°	56.6°	-57.5°	-8.8°
Lon.	126.1°	168.9°	-21.9°	-18.3°	145.5°	-46.2°	-46.1°	122.2°

A turbulencia alapvető ismérvei



Leonardo (1452 – 1519)

Az áramlás egy adott ponton megjósolhatatlan, kaotikus

A turbulens dinamika örvénylő struktúrák formájában jelenik meg.

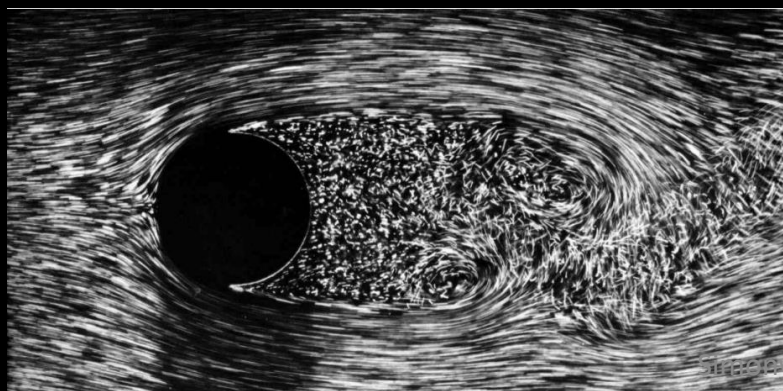
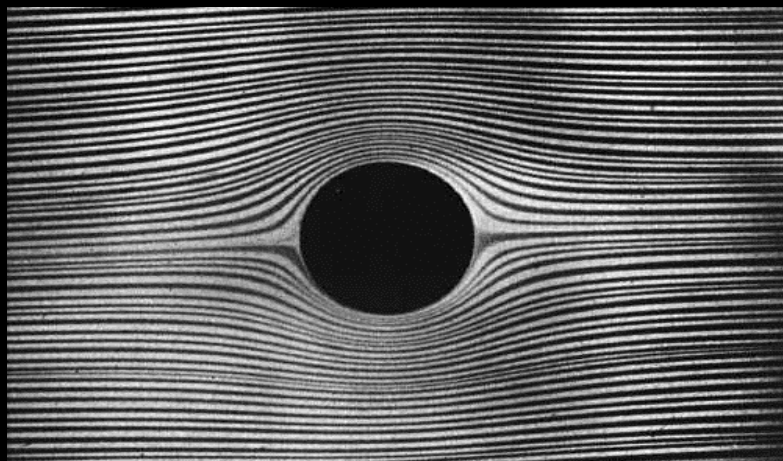
Az örvények mérete változó – a turbulencia multiskálájú folyamat.

Az örvények egymásba ágyazódnak, a struktúrák között az energia egymásnak átadódik

A turbulens örvények között önhasznló szimmetria

Navier – Stokes egyenlet

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = - \left(\frac{\nabla p}{\rho} \right) + \nu \nabla^2 \mathbf{u}$$



*Claude-Louis Navier,
1785-1836 (French
engineer, physicist)*



*George Stokes,
1819-1903
(Irish
mathematician,
physicist)*

A NS egyenlet nem tartalmaz véletlenszerű tagot, a folyadék áramlása turbulencia esetén mégis megjósolhatatlan.

***Ok:** A NS egyenlet nemlinearitása miatt az áramlás kaotikus*

Hidrodinamika (HD) vs. Magnetohidrodinamika (MHD)

(Azaz: Mi a köze folyadékok áramlásának a mágnesezett plazma dinamikájához?
A dinamikát leíró egyenletek (HD és MHD) azonos alakúak.)

Hidrodinamika (HD)

(a folyadék összenyomhatatlanságának feltétele mellett ($\rho = const.$))

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = - \left(\frac{\nabla p}{\rho} \right) + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} ,$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$



Claude-Louis Navier,
1785-1836



George Stokes, 1819-1903

Magnetohidrodinamika (MHD)

(kontinuitási egyenletek, Maxwell egyenletek, Ohm törvény)

$$\frac{\partial \mathbf{z}^\pm}{\partial t} \mp (\mathbf{c}_A \cdot \nabla) \mathbf{z}^\pm + (\mathbf{z}^\mp \cdot \nabla) \mathbf{z}^\pm = -\nabla P_{tot}^* + \nu^\pm \nabla^2 \mathbf{z}^\pm + \nu^\mp \nabla^2 \mathbf{z}^\mp$$

$$\nabla \cdot \mathbf{z}^\pm = 0$$



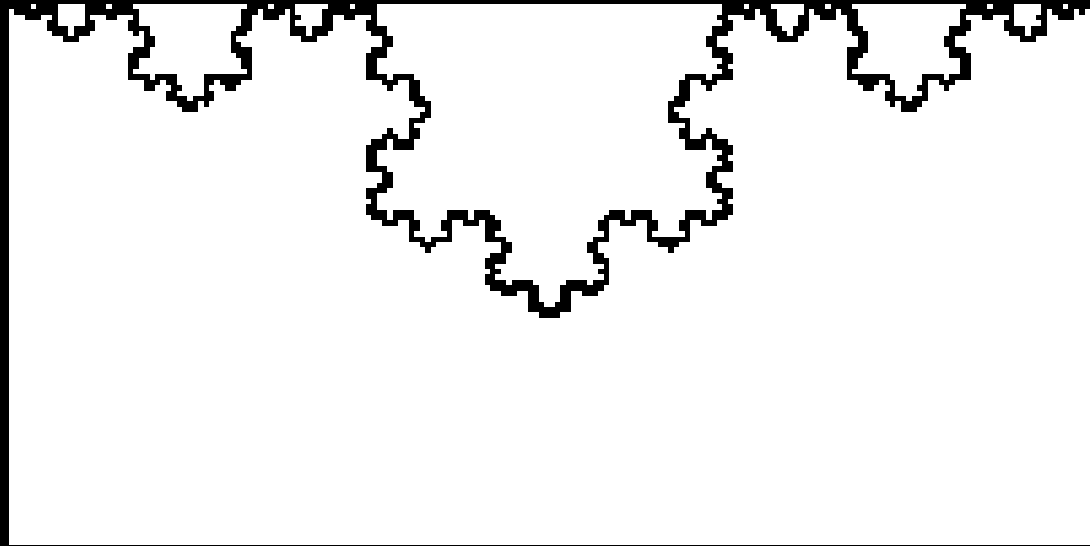
Hannes Alfvén,
1908-1995

Alfvén speed	Elsässer variable	Dissipative coefficients
$c_A = B_0 / \sqrt{4\pi\rho}$	$\mathbf{z}^\pm = \mathbf{u} \pm \mathbf{b} = \mathbf{u} \pm (\mathbf{b}' + \mathbf{B}_0)$	$2\nu^\pm = \nu \pm \eta$

Skálázási szimmetria – Önhasonlóság, Fraktál alakzatok

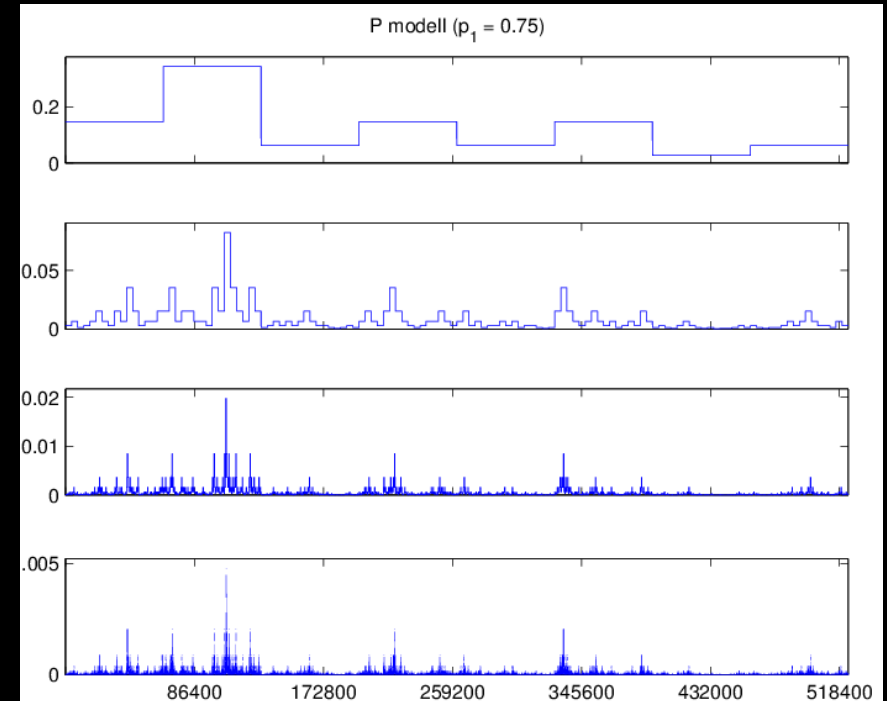
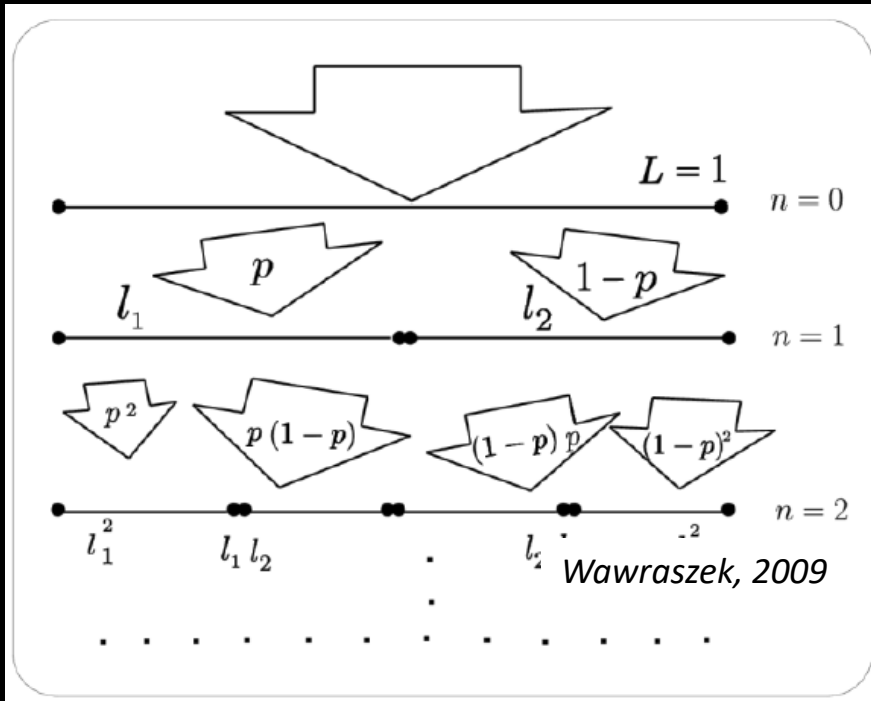
Fraktál objektumok jellemzője, hogy különböző méretarányokban (nagyításban) vizsgálva őket, azonos képet mutatnak. Matematikailag, a szimmetriát az alábbi összefüggés írja le, amelynek lényeges paramétere az α skálázási exponens.

$$\delta u_{\lambda l} \sim \lambda^{\alpha} \delta u_l$$



A multifraktál szimmetria

Turbulenciában az önhasonló szimmetria az örvénylő struktúrák között érvényesül, a klasszikus fraktál alakzatokhoz képest két különbséggel: (1) A szimmetria statisztikai értelemben értelmezhető, (2) A szimmetriát nem egy, hanem számtalan skálázási exponens írja le. Ez a multifraktál szimmetria. Multifraktál szimmetria kialakulásának oka lehet, hogy az örvények közötti energia-áram nem egyenletesen tölti ki a teret. Ezt modellezi az alább bemutatott P modell.



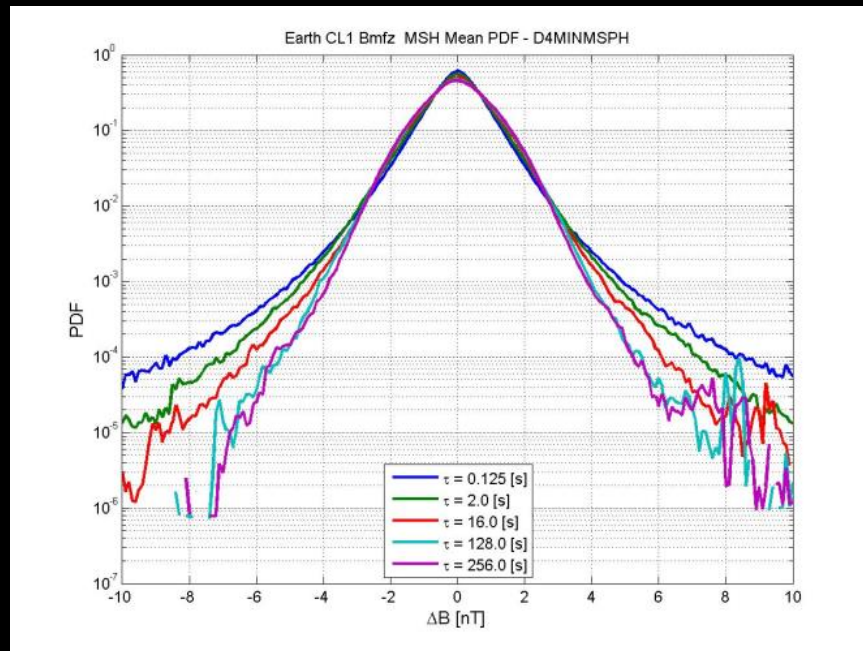
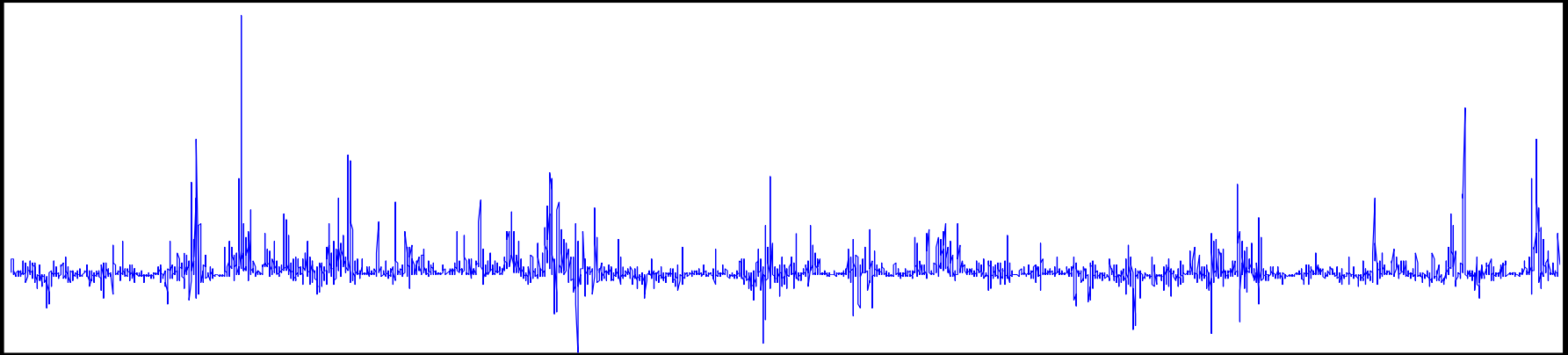
P modell alapján generált turbulens energia áram multifraktál szimmetriával. Modell szabad paramétere: p

Meneveau, Sreenivasan, PRL, 1987

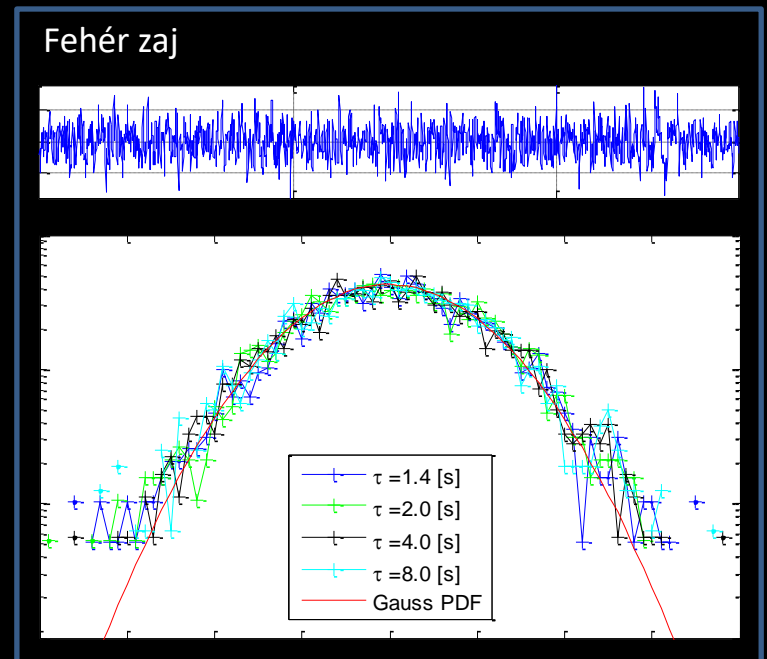
A modell által előállított idősor minden pontban különböző erősségű (α) szingularitást mutat. Az azonos szingularitású pontok halmaza a teljes tér $f(\alpha)$ dimenziójú fraktál alterét alkotja.

A multifraktál szimmetria statisztikai vizsgálata

Multifraktál adatsorban az extrém értékű szingularitások előfordulása gyakoribb, mint zajszerű folyamatokban. -> Statisztikai eloszlásuk látványosan eltérő. (Az eltérés számszerűen az eloszlások lapultságával mérhető)



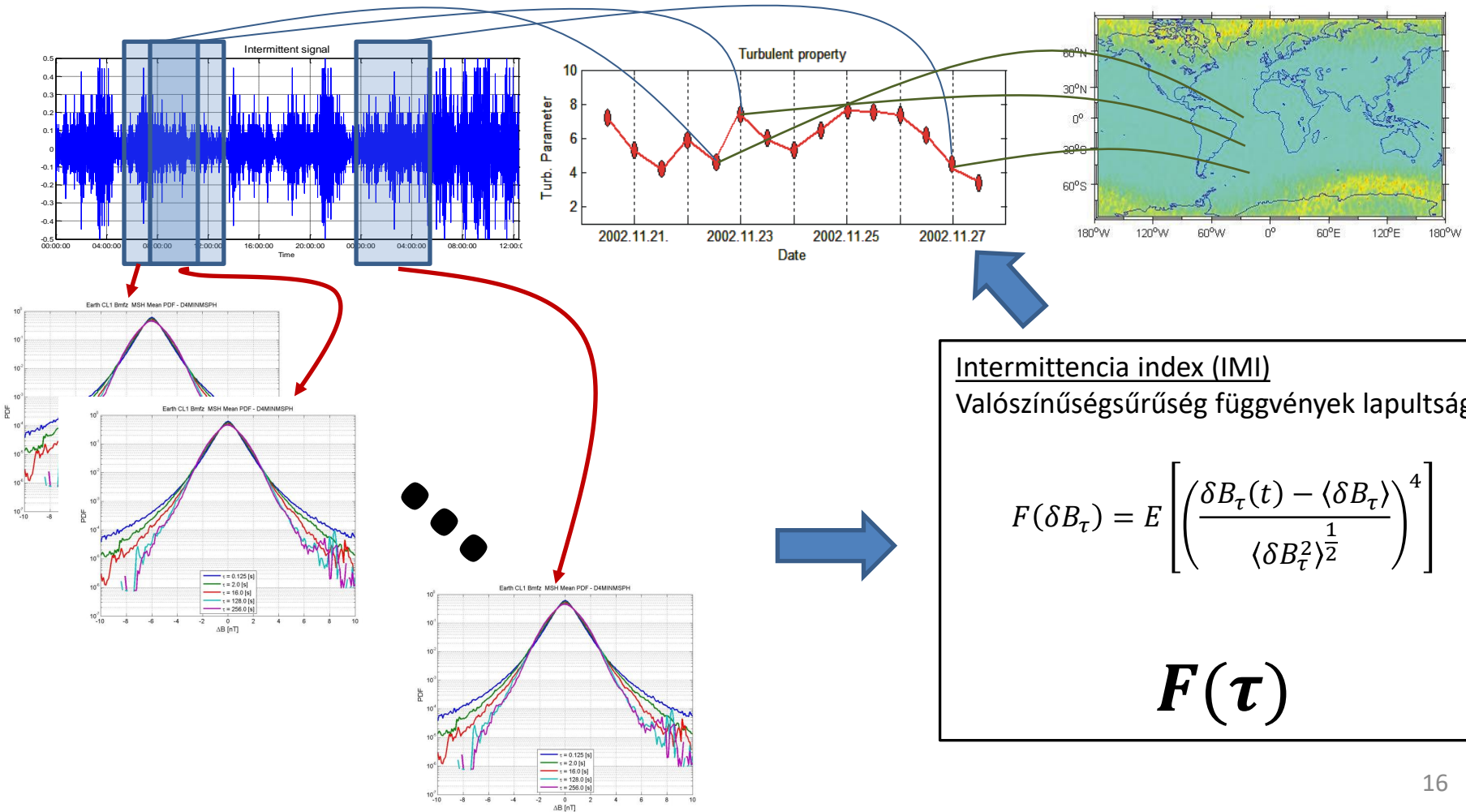
Vs.



Intermittencia index (IMI)

Scheme of the sliding-window PDF analysis (Kovács et al., P&SS, 2014)

(Input data: MAGx_HR (50Hz magnetic field record of Swarm))



Intermittencia index (IMI)
 Valószínűsűrűség függvények lapultsága

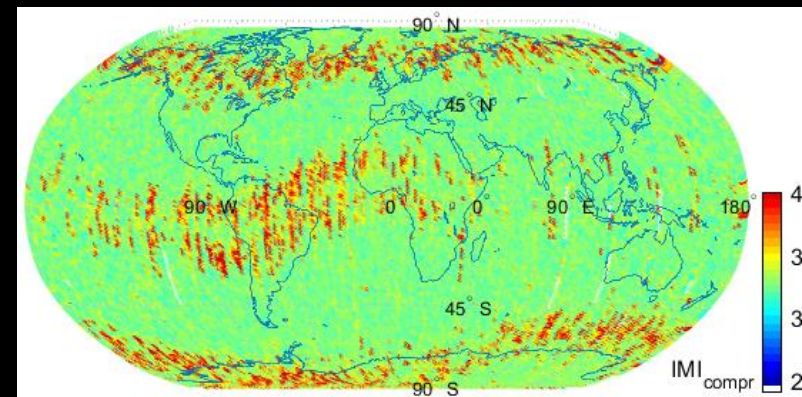
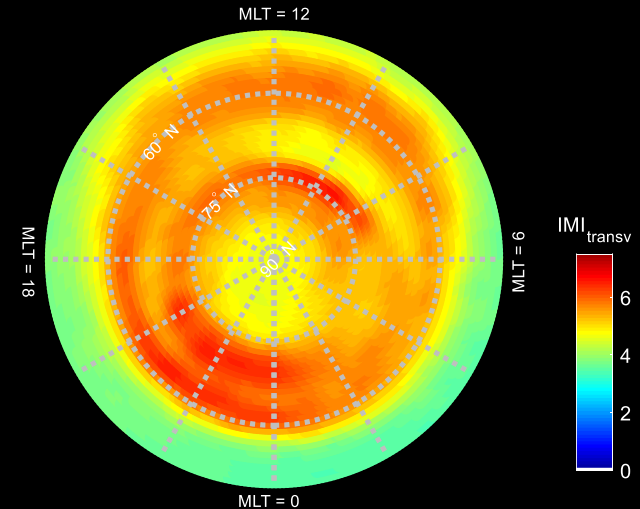
$$F(\delta B_\tau) = E \left[\left(\frac{\delta B_\tau(t) - \langle \delta B_\tau \rangle}{\langle \delta B_\tau^2 \rangle^{\frac{1}{2}}} \right)^4 \right]$$

$F(\tau)$

Mágneses irregularitások területi eloszlása

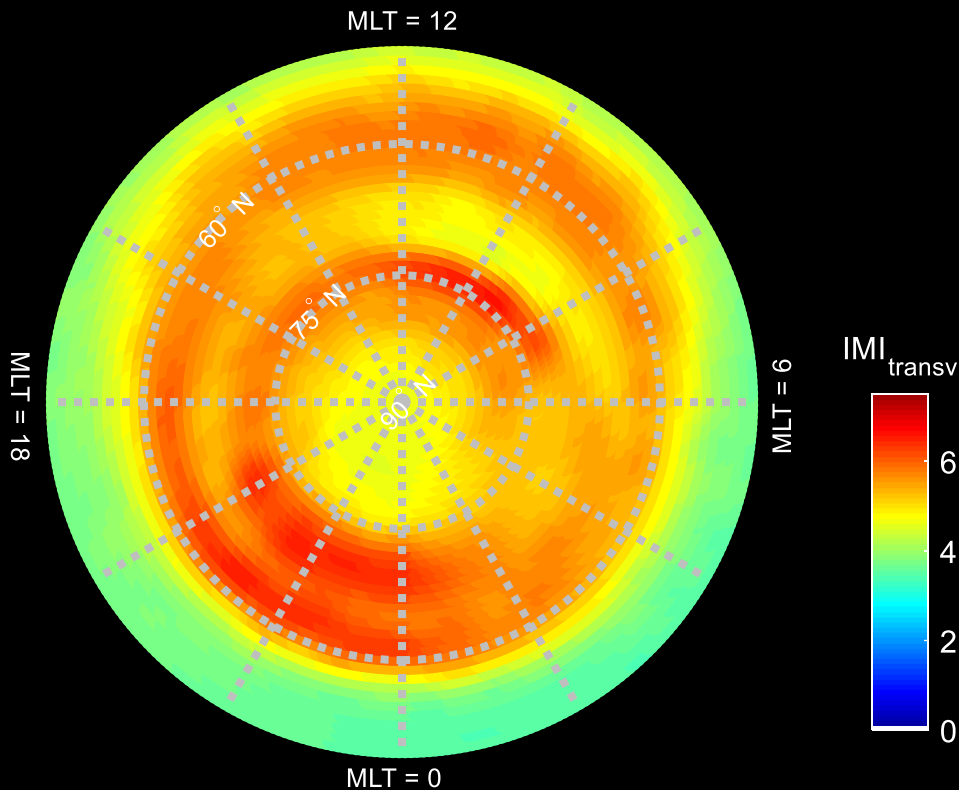
(Az intermittencia index térképi ábrázolása)

- A mágneses pólusok környékén
- A mágneses egyenlítő környékén



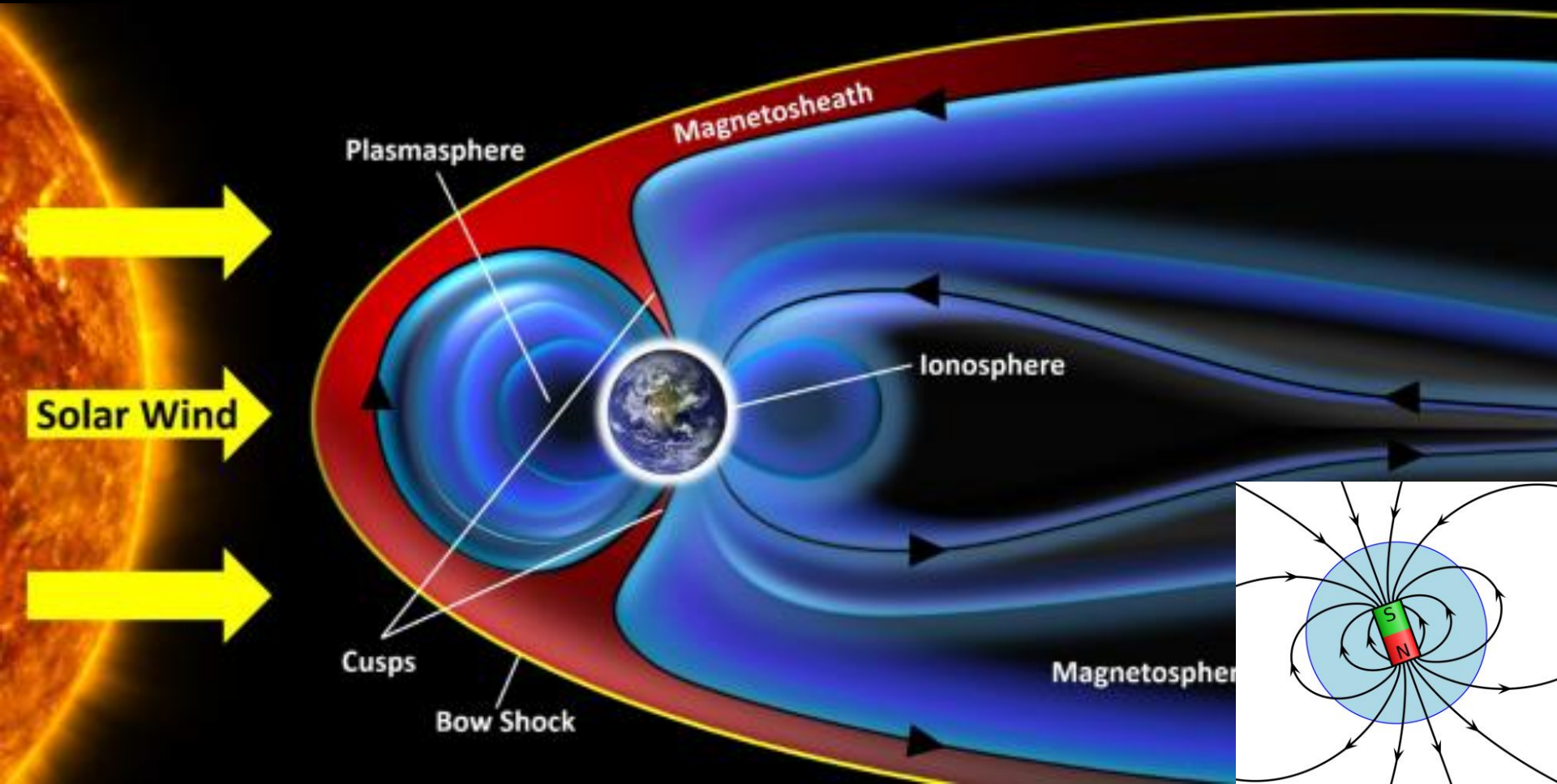
Mágneses irregularitások területi eloszlása az ionoszférában

Poláris tartomány



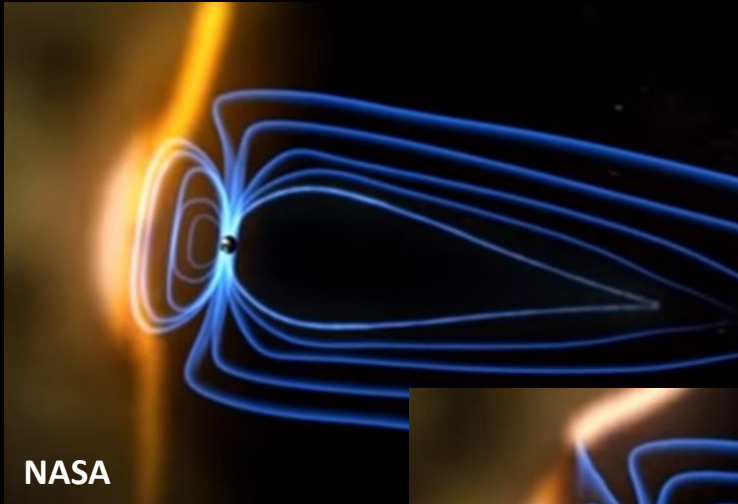
A mágneses irregularitások tipikus helyeit bemutató térképen a belső gyűrű elhelyezkedése azonos a sarkifény megjelenésének tartományával. A külső gyűrű feltételezhetően a plazmaszféra határát jelöli ki.

A magnetoszféra szerkezete

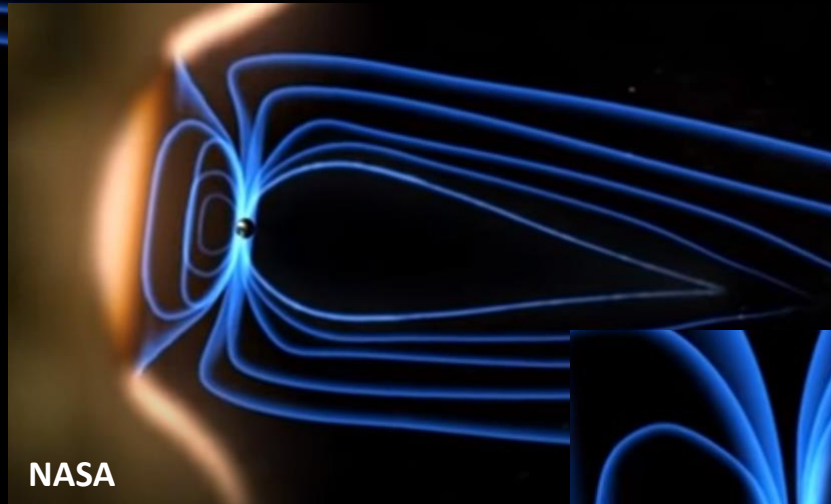


Napszél – magnetoszféra kölcshatás

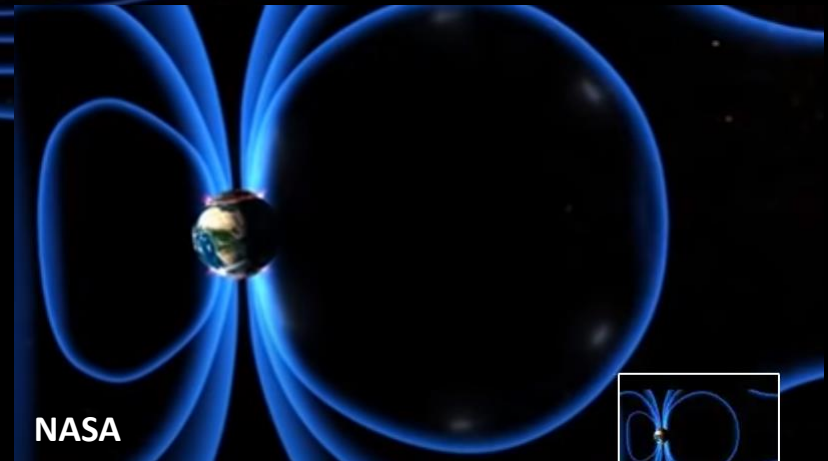
Az erővonalátkötődés folyamata



A napszél nagy energiájú részecskeáramának és mágneses terének találkozása a magnetoszférával



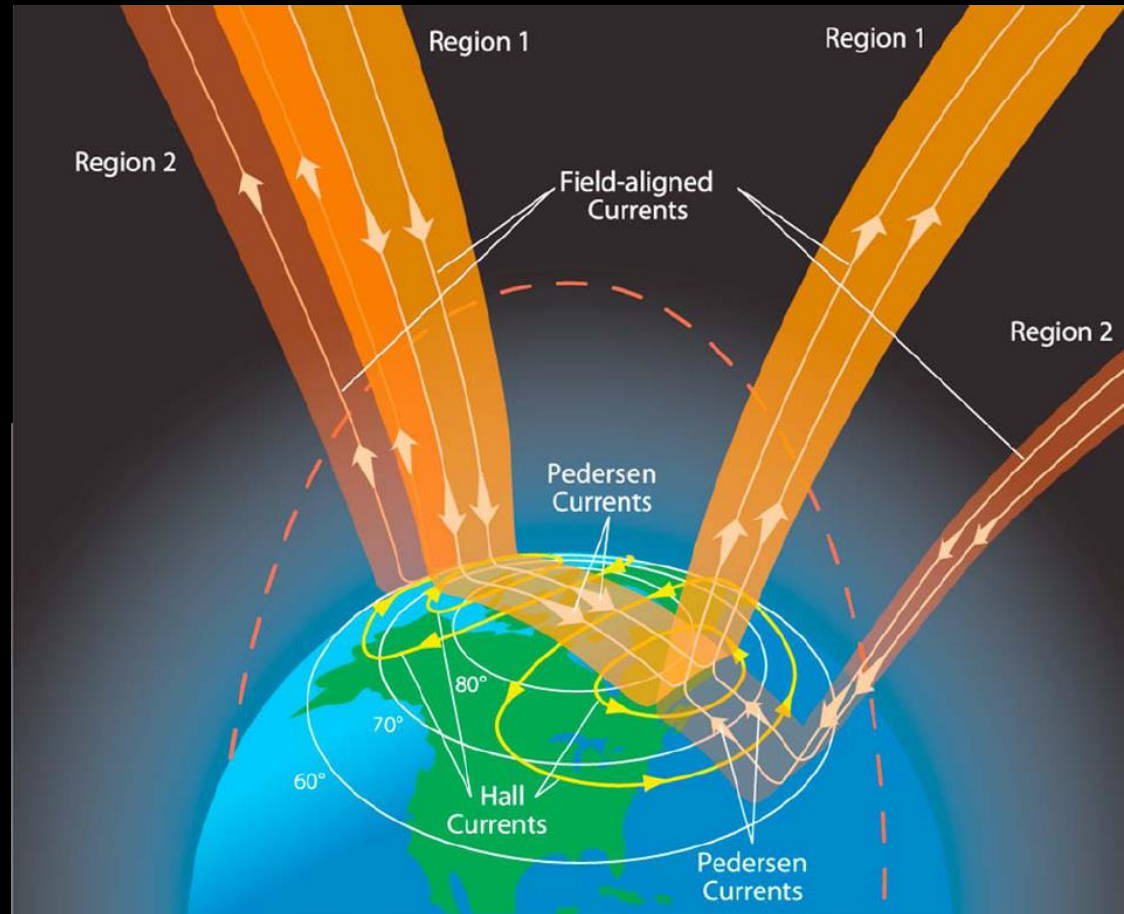
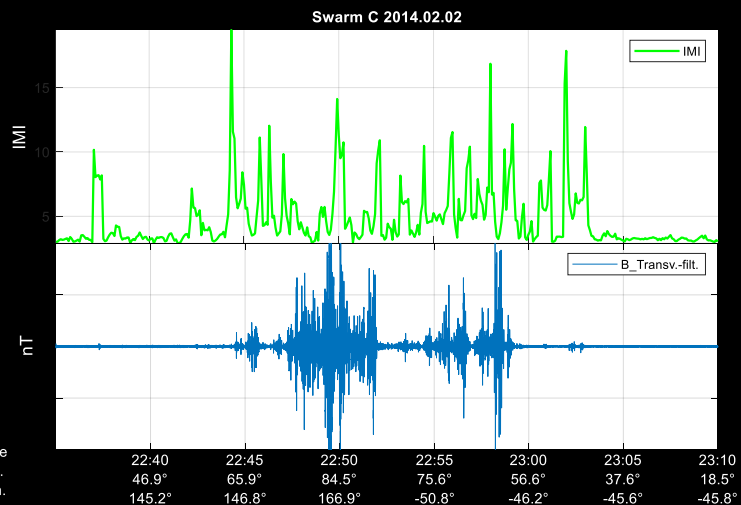
A magnetoszféra és a napszél erővonalainak összekapcsolódása – A magnetoszféra felnyílása



Auróra kialakulása, sarki áramrendszerek beindulása

Áramok az ionoszféra poláris tartományában

A poláris tartományban, a Swarm műholdak magasságán, a mágneses tér irreguláris, transzverzális (erővonalra merőleges) fluktuációit alapvetően az erővonalmenti áramok (Region1, Region2) okozzák. Illetve, a nappali oldalon a plazmaszféra határa is irreguláris tartományként jelentkezik.

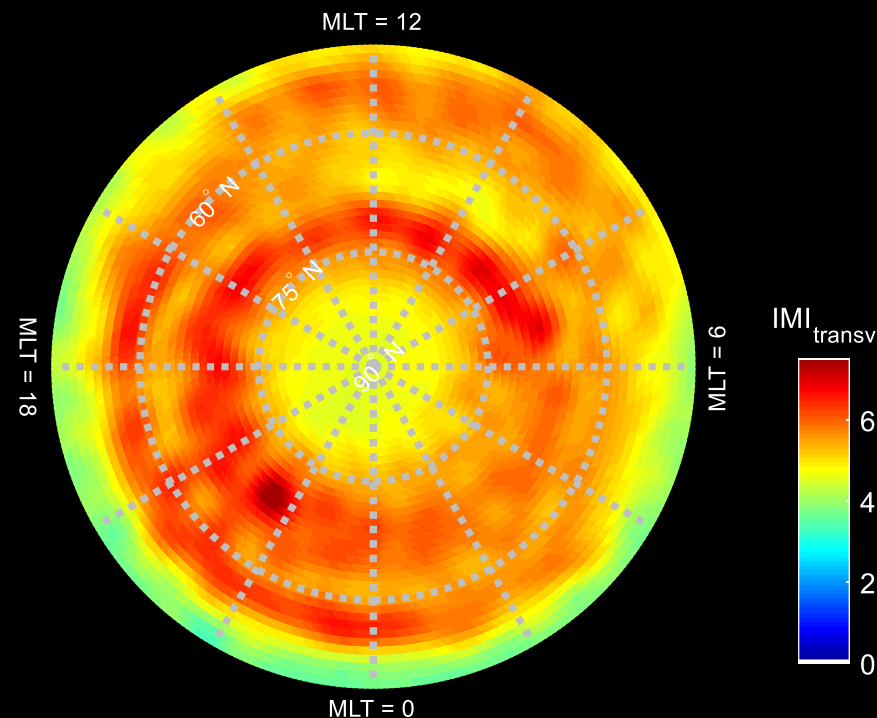
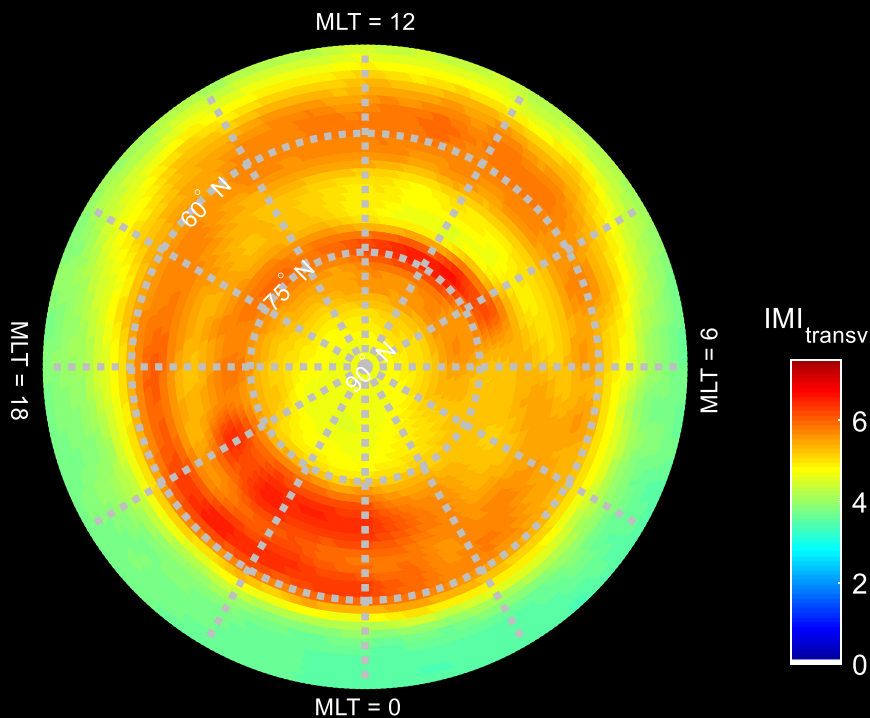


Mágneses irregularitások területi eloszlása a poláris tartományban

Az eloszlás geomágneses aktivitástól való függése

Nyugodt geomágneses időszak
 $K_p < 2$

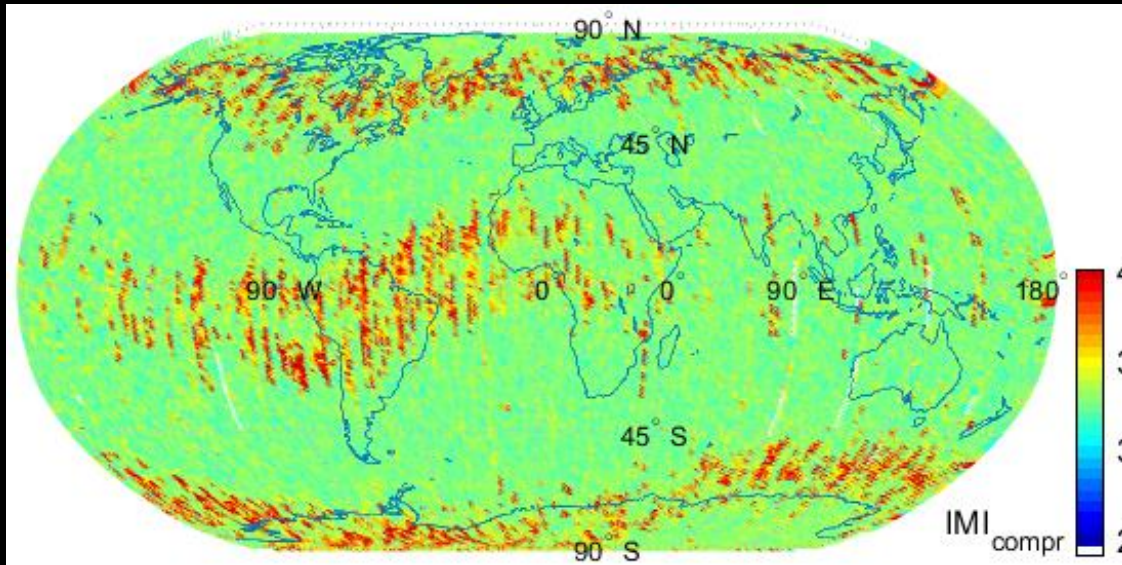
Aktív geomágneses időszak
 $K_p > 4$



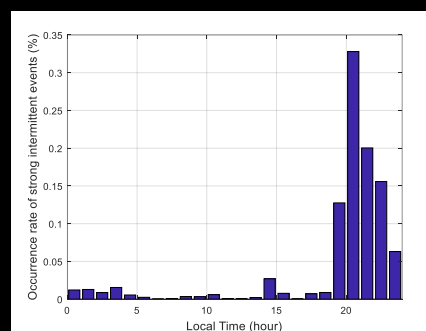
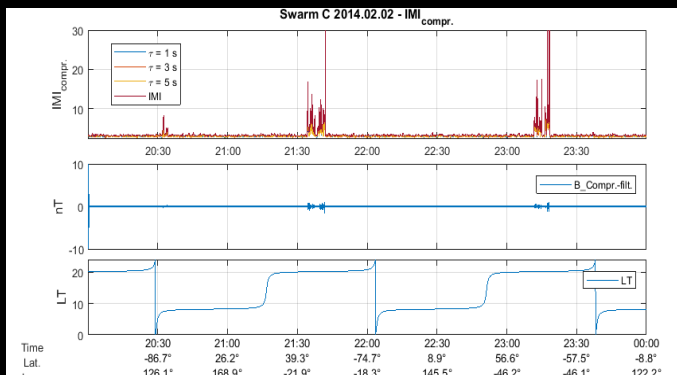
K_p index: geomágneses aktivitást, 0 és 9 közötti logaritmikus skálán leíró index

Mágneses irregularitások területi eloszlása az ionoszférában

Egyenlítői tartomány

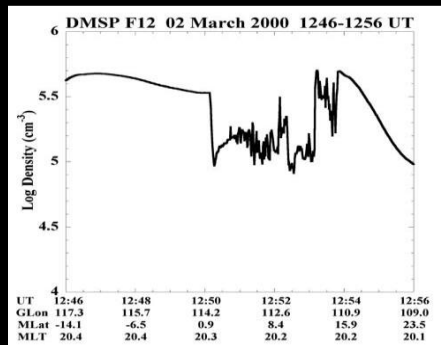
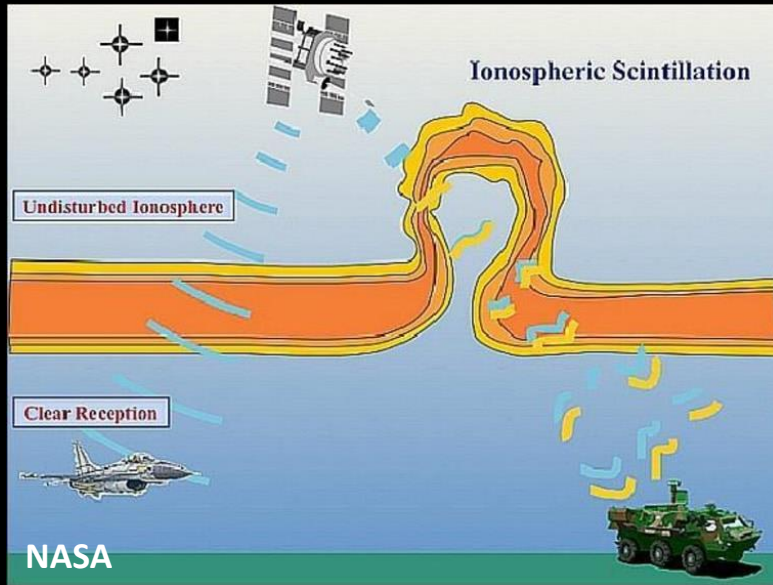


- A kompressziós mágneses tér intermittens fluktuációi jellemzően a $\pm 10^\circ$ mágneses szélesség körül jelentkeznek, a mágneses egyenlítő mentén szimmetrikus elrendeződésben.
- Leggyakoribbak a napnyugta utáni időszakban
- Az intermittens fluktuációk szektorális eloszlása szezonálisan változik, de legjellemzőbb az Atlanti és Dél-Amerikai szektorban.

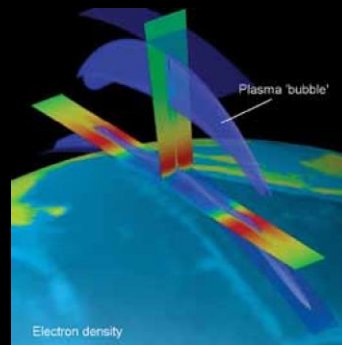


Mágneses irregularitások okozói az egyenlítői tartományban

Plazma buborékok



Burke et al., JGR, 2004

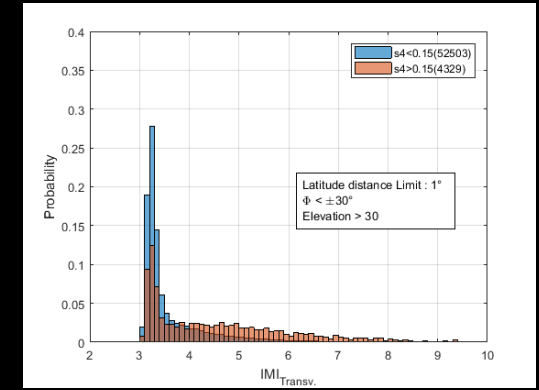
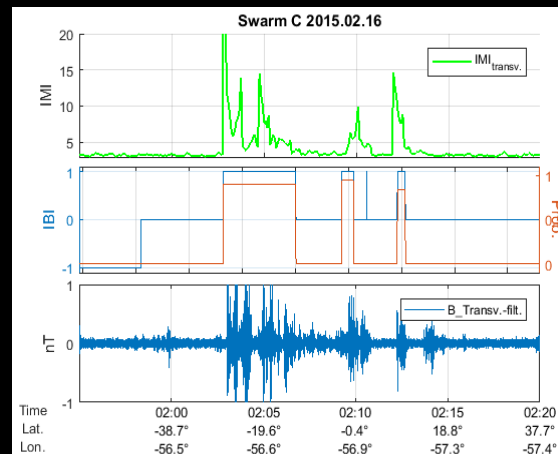
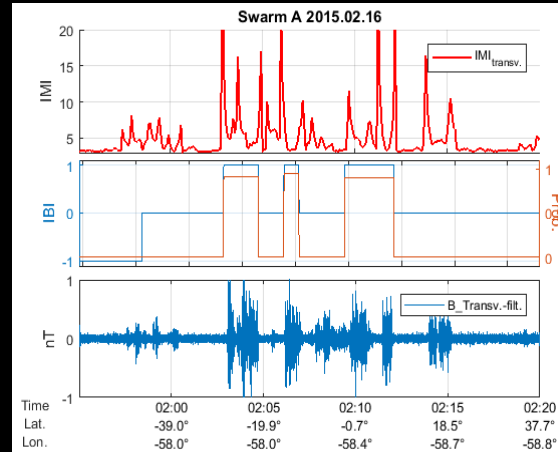
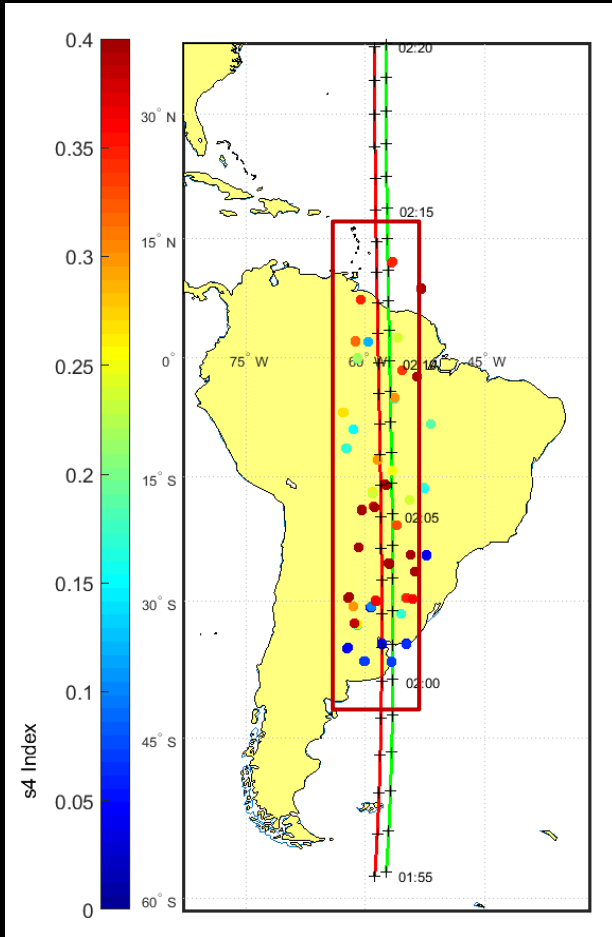


Joyce, Krall, 2011

- Plazma sűrűség ritkulás az ionoszféra F rétegében (jellemző mérete: ~ 100 km)
- Rayleigh-Taylor (RT) instabilitás hatására alakul ki, ami a plazmasűrűség magassági gradiensének hirtelen változása következtében léphet fel
- Szabálytalanul fluktuáló mágneses tér változás kíséri
- Előfordulásuk leggyakoribb a napnyugta utáni időszakban
- Szektoriális eloszlásuk évszak függő, de legjellemzőbb az Atlanti és Dél-Amerikai szektorban.
- Szoros kapcsolat a plazma buborékok előfordulása és a napciklus között
- Jelentős űridőjárási hatás – GNSS jelek szcintillációja (szóródás a ~ 100 km nagyságrendű plazma ritkulási zónákon)

Mágneses irregularitások az egyenlítői tartományban

Irregularitások és felszíni GNSS jelek szcintillációja közötti korreláció
(esettanulmány és statisztika)



Intervallum:
2015 Feb. 16, 01:55-02:20
GNSS Network: LISN
(amplitúdó szcintilláció index: S4)

Összefoglalás

- Az Európai Űrügynökség (ESA) Swarm missziójának műholdjait (3 műhold) 2013 novemberében állították pályára. A pályák polárisak, kezdeti magasságaik 475 (két hold) és 518 km (ionoszféra F rétege).
- A mágneses mérések pontossága és időbeli felbontása lehetővé teszik az ionoszféra irreguláris mágneses fluktuációinak statisztikai alapú monitorozását, automatikus algoritmus alkalmazásával
- Az irregularitások kimutatásánál feltételeztük a mögöttük lévő folyamatok turbulens jellegét. A turbulens jelleg erősségének jellemzésére bevezettük az intermittencia indexeket (IMI).
- Kimutattuk az IMI idősor kapcsolatát az auróra tartományból induló erővonalmenti áramokkal, és egyenlítői plazmabuborékok előfordulásával. Mindkét jelenség szoros kapcsolatban áll az űridőjárási folyamatokkal.

További terv:

Az ionoszféra irregularitásai és földrengések közötti kapcsolat statisztikai vizsgálata.
Esetleges földrengés előrejelző jelek kimutatása.



Köszönöm a figyelmet

Kovács Péter

és az Űrfizikai Kutatócsoport