

A NAPRENDSZER FIZIKÁJA

2025. őszi félév

Németh Zoltán et al.

*Wigner Fizikai Kutatóközpont
Űrfizikai és Űrtechnológiai Osztály*

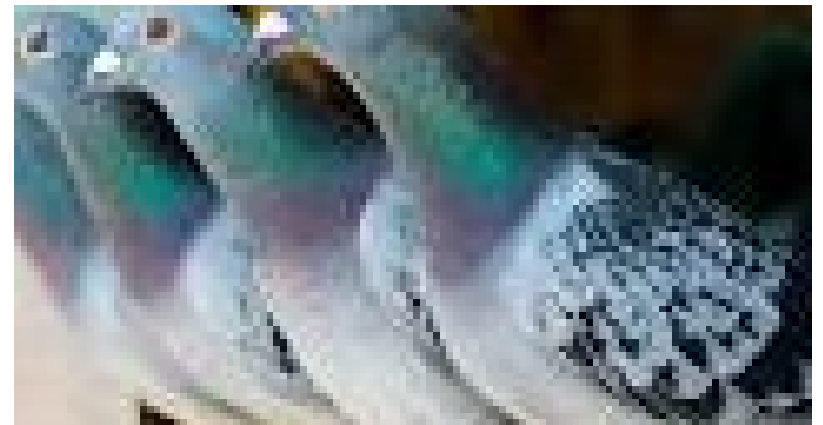
nemeth.zoltan@wigner.mta.hu

Földmágneses tér

Az űridőjárás földmágneses térre gyakorolt
hatása

Kovács Péter

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont



Érzékeljük-e a földmágneses teret?

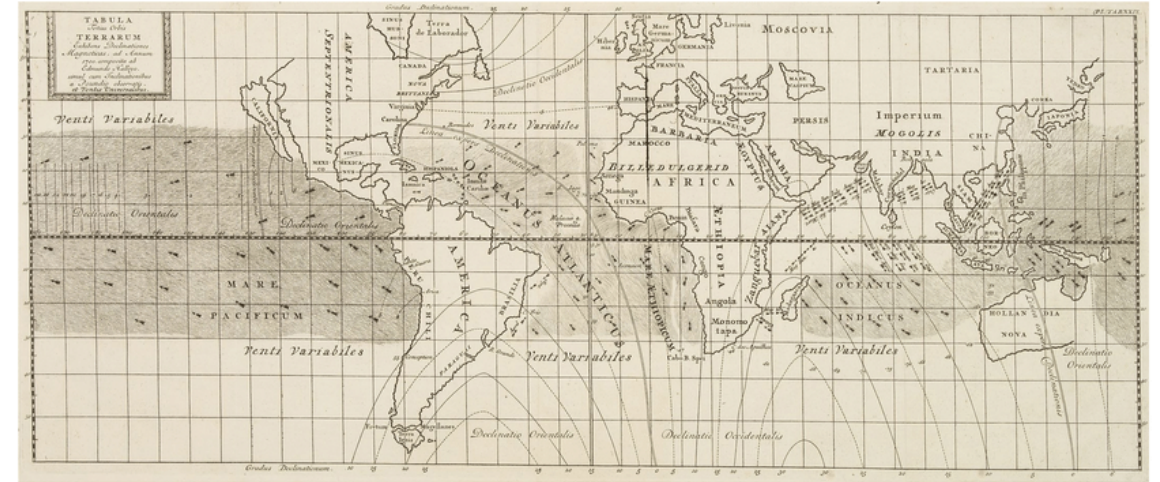
Földmágneses tér

Az űridőjárás földmágneses térre gyakorolt hatása

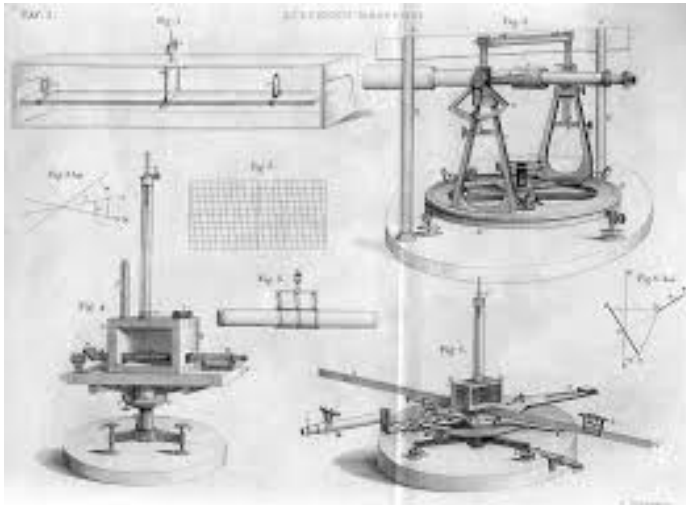
- A Földmágneses tér megfigyelése (geológiai korok, régmúlt, múlt, jelen)
- A Föld belső eredetű mágneses tere, és ennek térbeli leírása
- A földmágneses tér külső eredetű változásai
 - Periodikus, nyugodt napi változások
 - Geomágneses viharok, alviharok

A földmágneses tér megfigyelése műszerekkel

Kínai mágneses iránytű
rekonstrukciója (i.e. 70-80)



Deklináció térkép, (E. Halley, 1701)



Carl Friedrich Gauss
(1777-1855)



Wilhelm Eduard
Weber
(1804-1891)

Gauss & Weber: Obszervatóriumi észlelések
elindítása

- 1832: A Göttingeni Mágneses Unió
(Göttinger Magnetischer Verein)
megalakítása
- Első mágneses obszervatóriumok alapítása,
München-ben és Berlinben



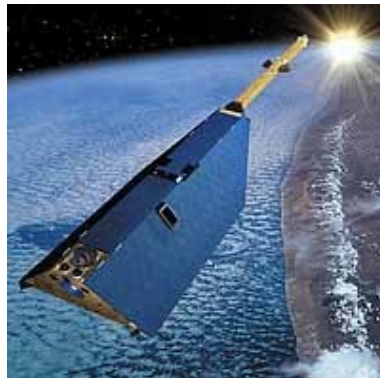
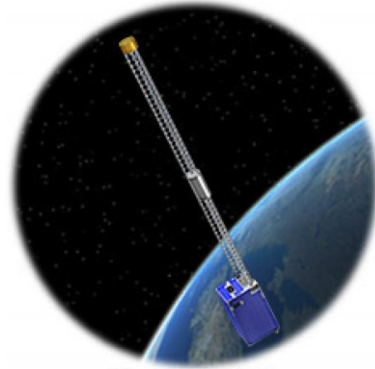
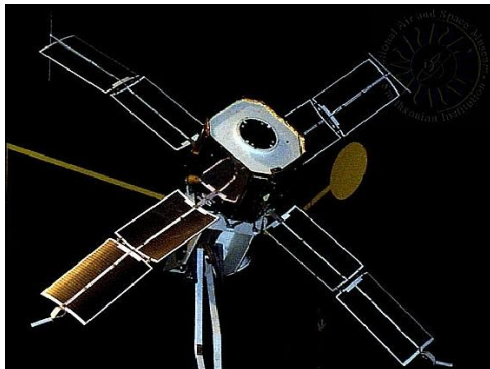
Obszervatóriumok

Magyarországon:
Tihany és Nagycenk

A földmágneses tér megfigyelése műszerekkel



Terepi mérések



Űr megfigyelések (20.
század közepétől)

***MagSat, Oersted,
CHAMP, Swarm***

A földmágneses tér mérése a történelmi és geológiai korokban

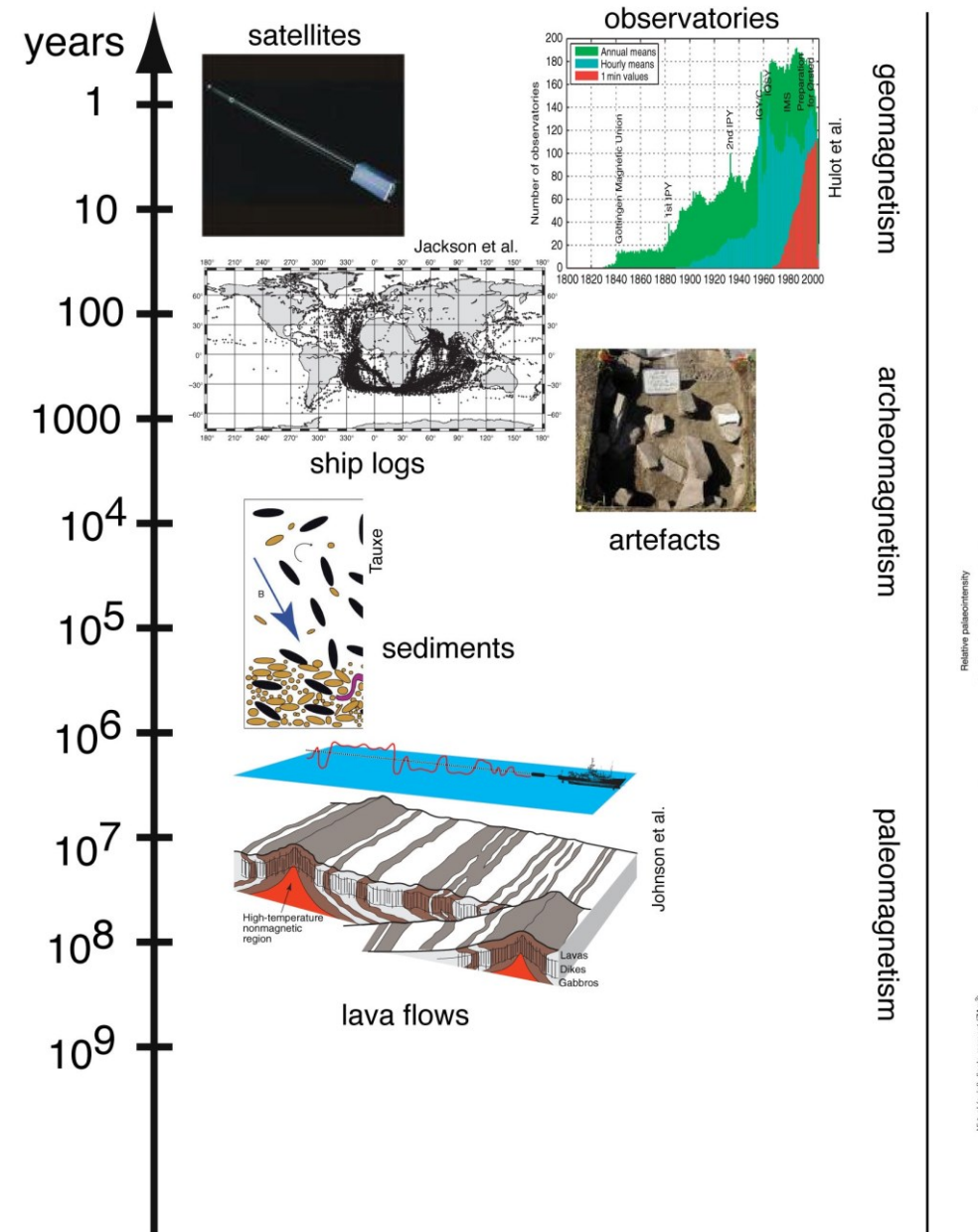
Történelmi korok:

Az archeomágneses objektumok (irány és intenzitás) mágnesezettségének mérése

Geológiai korok:

A vulkáni és üledékes kőzetek mágnesezettségének mérése

(A kőzetek és az archeomágneses objektumok – például az égetett téglák vagy kerámiák – megőrzik („befagyasztják”) a Föld mágneses terét keletkezésük vagy lehűlésük idejéből. A „befagyasztás hőmérséklete: Curie hőmérséklet.)



Földi mágneses obszervatóriumi hálózat

(Edinburgh WDC,
<https://wdc.bgs.ac.uk/>)

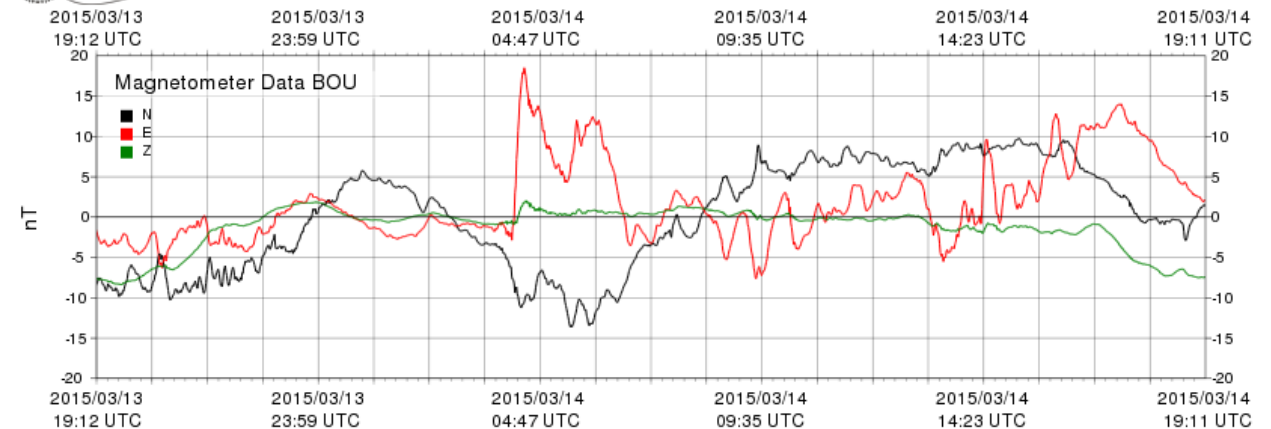
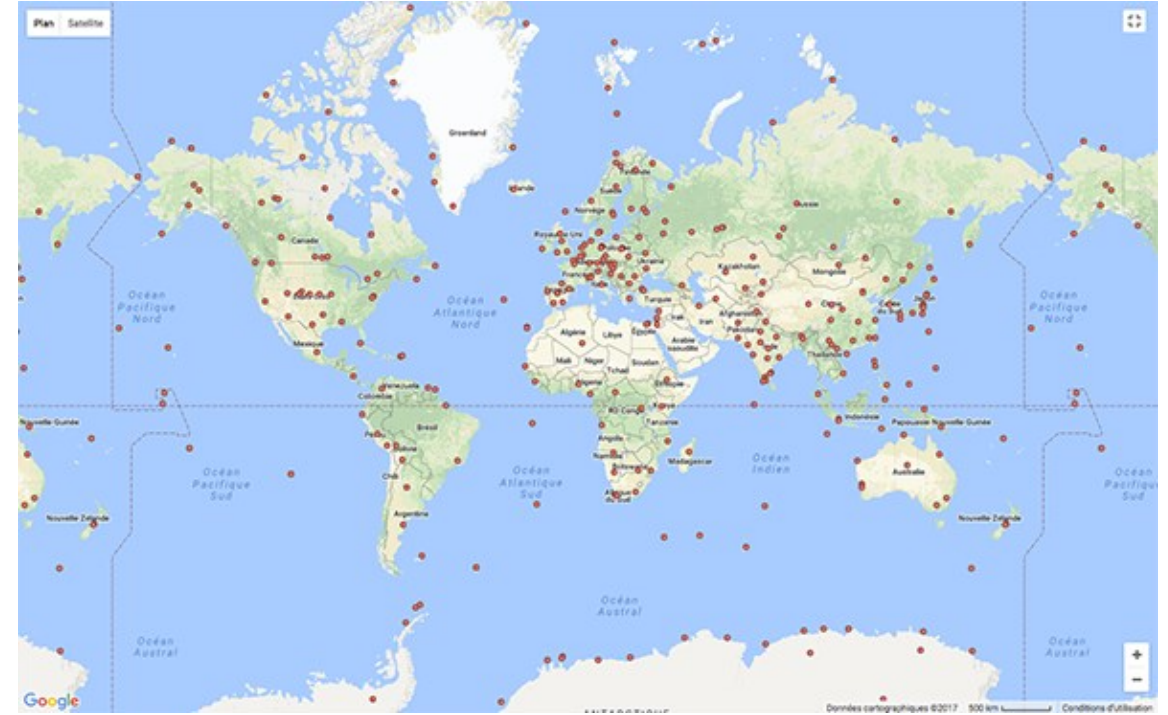
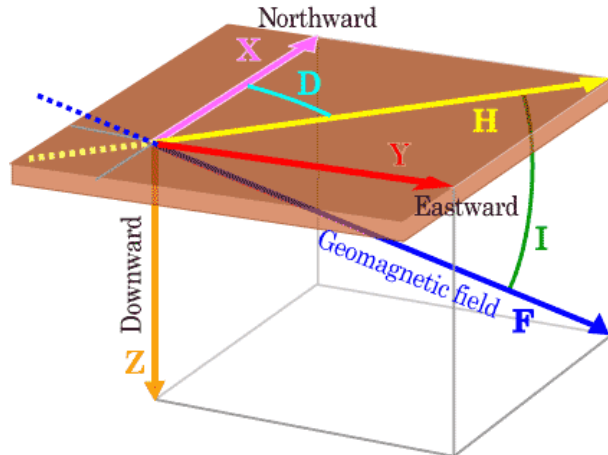
Mért mágneses paraméterek

Vagy:

- X, Y, Z, F
komponensek (X, Y, Z) és totál tér (F)

Vagy:

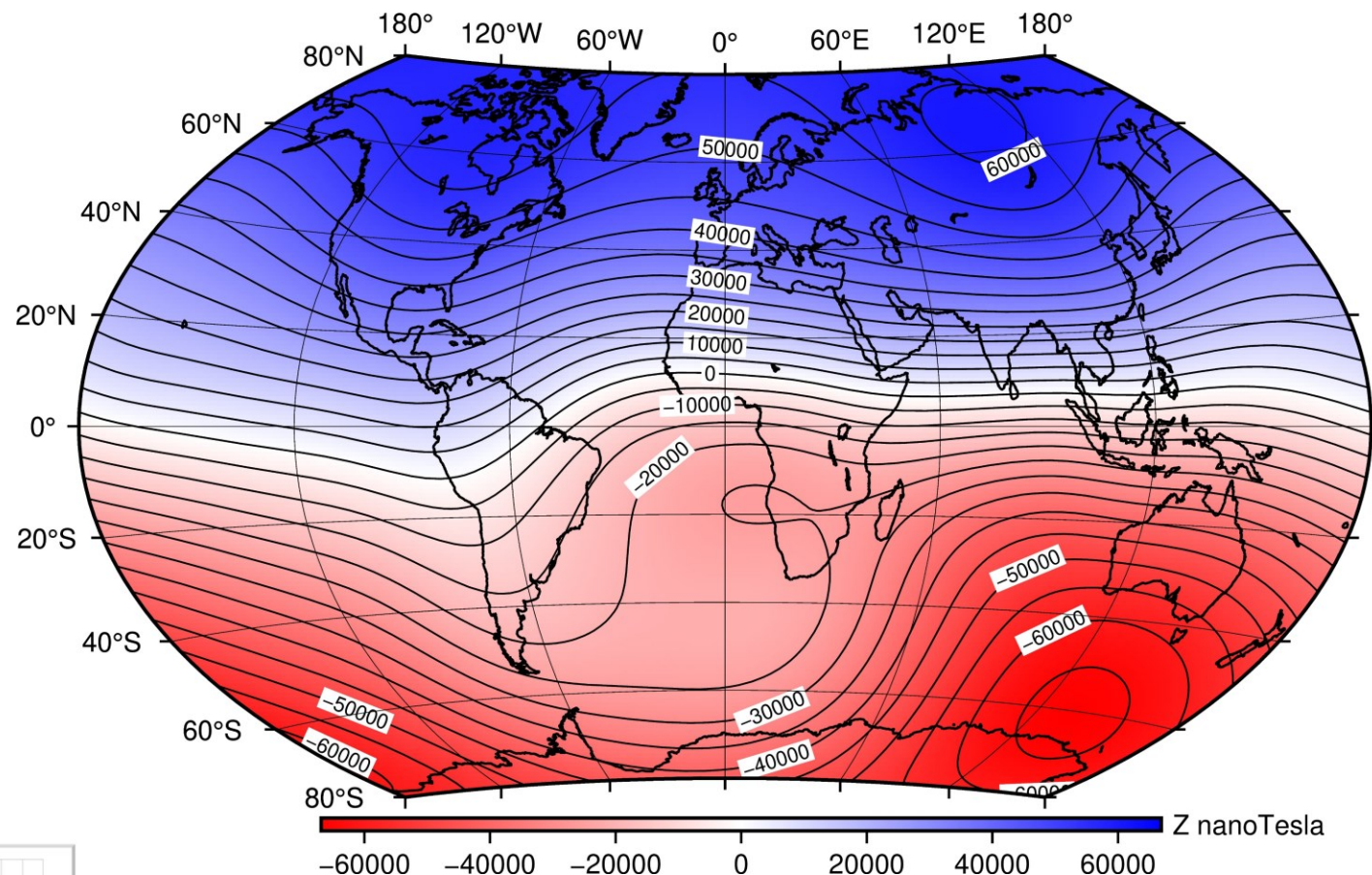
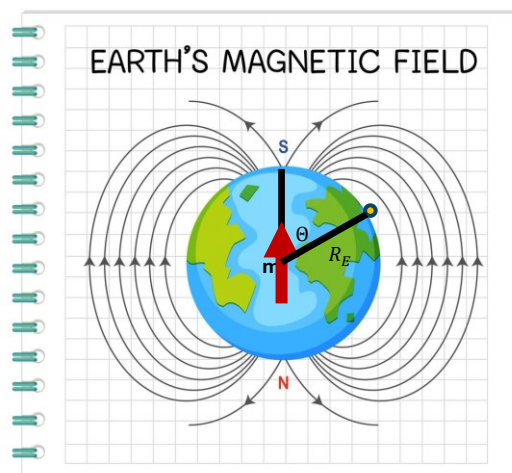
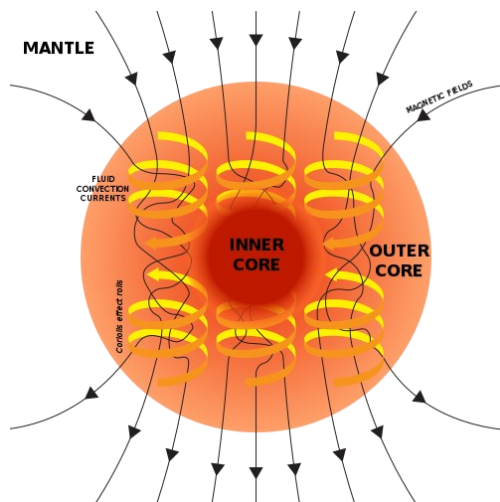
- D, H, Z, F deklináció (D), komponensek (H, Z) és totál tér (F)



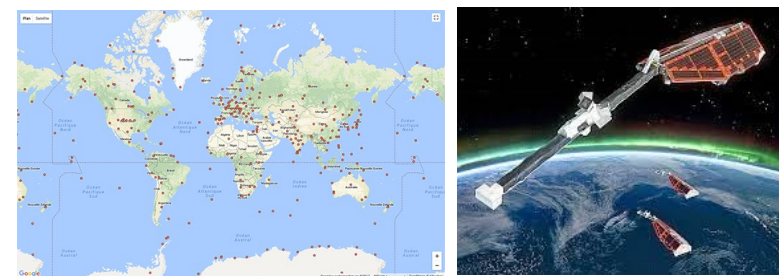
A földmágneses tér belső eredetű változása (1/3)

Belső eredetű változás alatt értjük azokat a változásokat, amiknek forrása a külső mag, illetve a földkéreg

A belső eredetű változás térben és időben is megfigyelhető. Az időbeli változások jellemzően évszázados, illetve nagyobb időskálán zajlanak.
(Az előadásban csak a térbeli változásokat tárgyaljuk)



- <https://geomag.bgs.ac.uk/education/earthmag.html>



A földmágneses tér belső eredetű változása (2/3)

A geomágneses tér IGRF modellje

- Gömb Harmonikus sorfejtés
- Bemenő adatok: Obszervatóriumi éves átlagok, műholdas mérések, terepi mérések

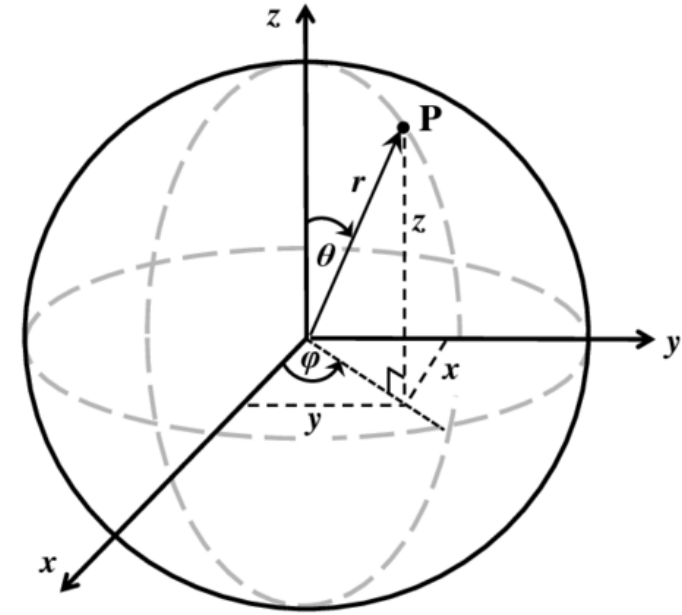
$$V(r, \theta, \phi, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos(m\phi) + h_n^m(t) \sin(m\phi)] P_n^m(\cos \theta)$$

$a = 6371.2 \text{ km}$ (Earth's radius)

<https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>

http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/igrf_calc.html

*IGRF: International Geomagnetic Reference Field



A földmágneses tér belső eredetű változása (3/3)

A gömbharmonikus modell energia spektruma

- Megmutatja, hogy a modell különböző hullámhosszú (n fokszerű, lásd előző dia) összetevői milyen mértékben járulnak hozzá a földmágneses tér alakításába
- A spektrum megtörése az $n \sim 13$ fokú harmonikusnál jelzi azt a határt, aminél nagyobb hullámhosszú (kisebb n) komponensek a belső teret, a kisebb hullámhosszúak (nagyobb n) pedig a kéreg terét írják le.

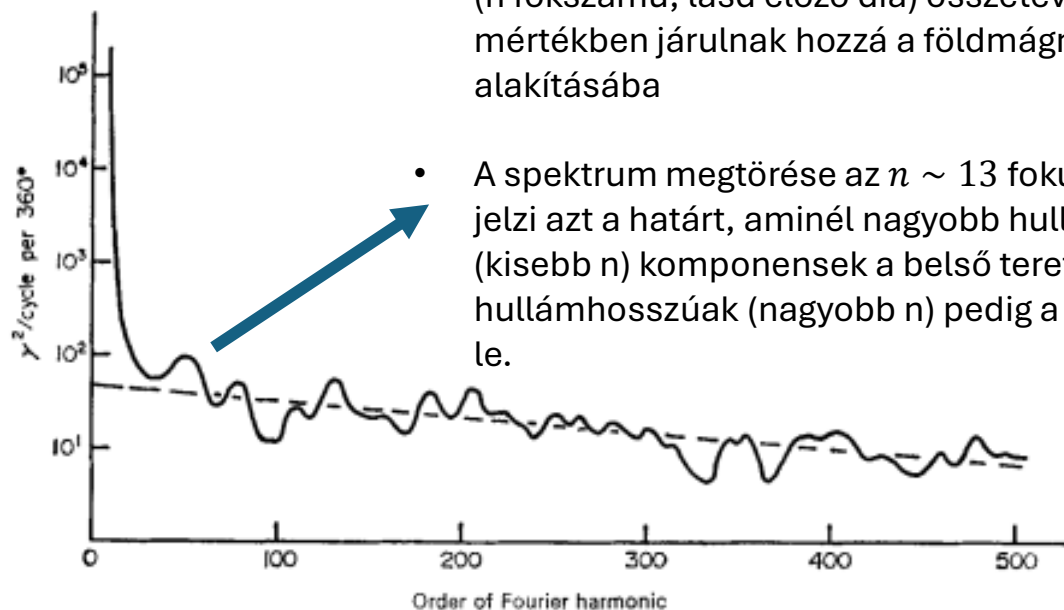
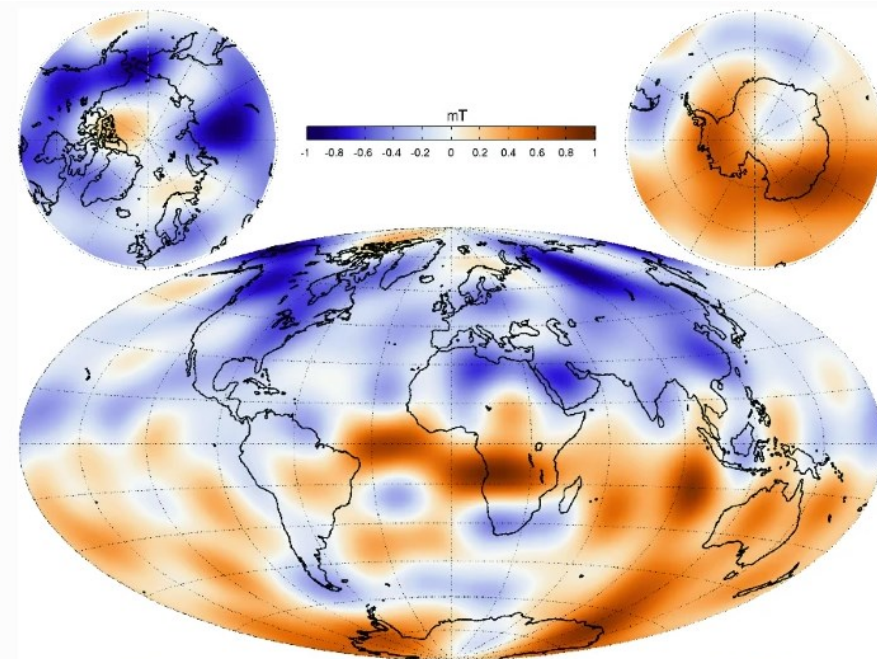


FIG. 1. Smoothed power spectrum of the round-the-world magnetic intensity profile of Allredge *et al.* (1963). (After Bullard (1967). Bullard plotted C_n^2 , not $\frac{1}{2}C_n^2$, and his ordinate scale was wrong by a factor 5.)

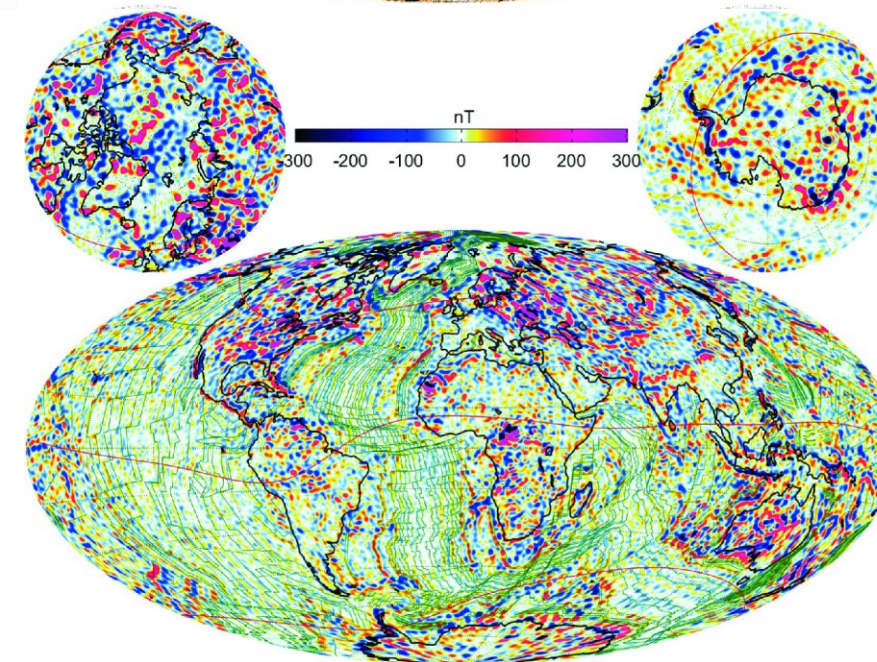
$1\gamma = 1$ nanotesla

F. J. Lowes, Spatial Power Spectrum of the Main Geomagnetic Field, and Extrapolation to the Core, *Geophysical Journal International*, Volume 36, Issue 3, March 1974, Pages 717–730, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1974.tb00622.x>

Belső eredetű tér



Földkéreg tere



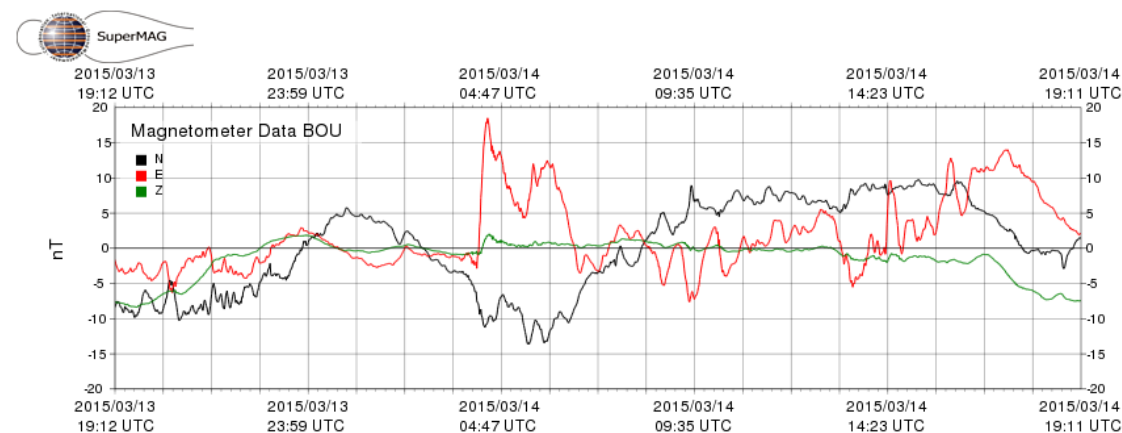
A földmágneses tér külső eredetű változása (1/16)

Külső eredetű változásnak nevezzük azokat a változásokat a mágneses térben, amelyek forrása a Föld felszínén kívül helyezkedik el.

Jellemzően, ilyen források az ionoszférában és a magnetoszférában az elektromos áramok, vagy elektromágneses hullámok, amelyeket közvetve a Nap és a napszél táplál energiával. *(Az előadásban csak az áramokat tárgyaljuk.)*

Külső eredetű terek különböző felszíni pontokon eltérő erősségűek, tipikus a helyi idő és a szélesség szerinti függés.

Külső eredetű változások lefolyásának időskálája néhány napos időtartamig terjed. (Jóval rövidebb tehát, mint a belső eredetű változásoké.)

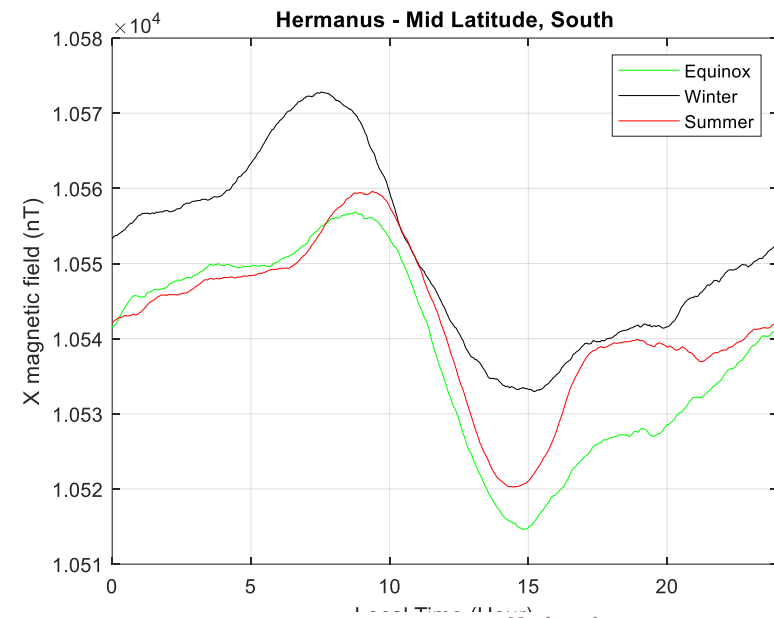
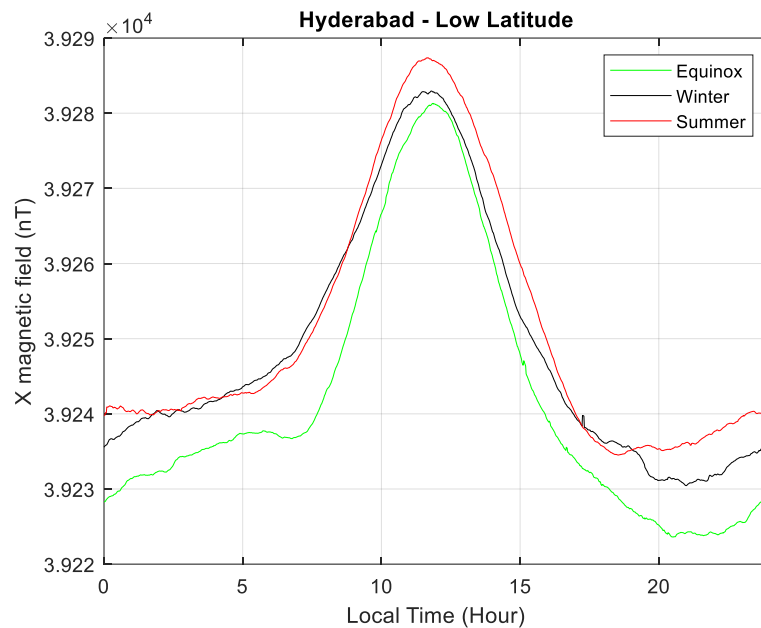
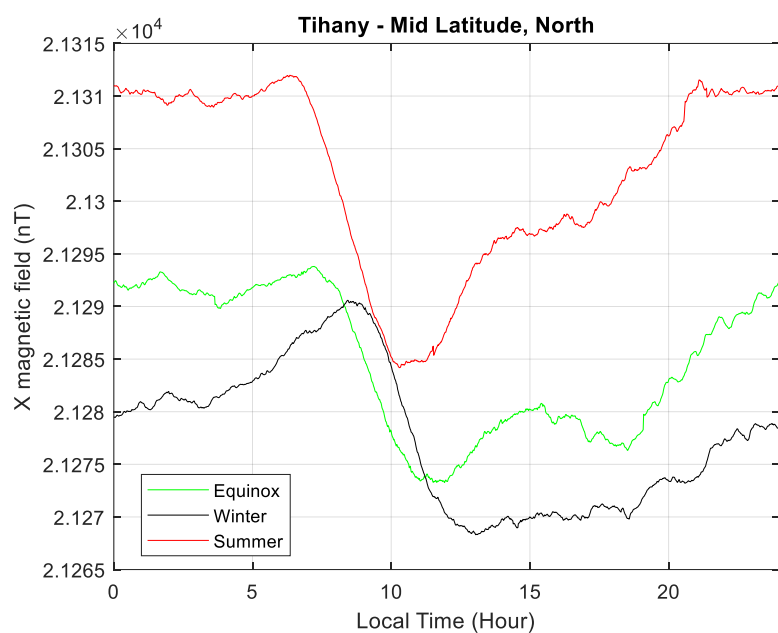


Obszervatóriumi észlelések publikus forrásai:

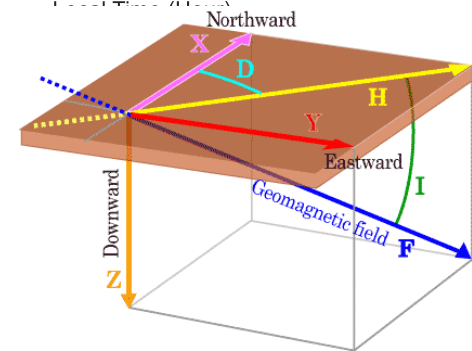
- ☞ World Data Center, Edinburgh:
<http://www.wdc.bgs.ac.uk/>
- ☞ SuperMag: <https://supermag.jhuapl.edu/>
- ☞ Intermagnet: <https://www.intermagnet.org/>
- ☞ Tihany geomagnetic observatory:
<http://91.226.79.148/>

A földmágneses tér külső eredetű változása (2/16)

A nyugodt napi változás (Solar Quiet - Sq)

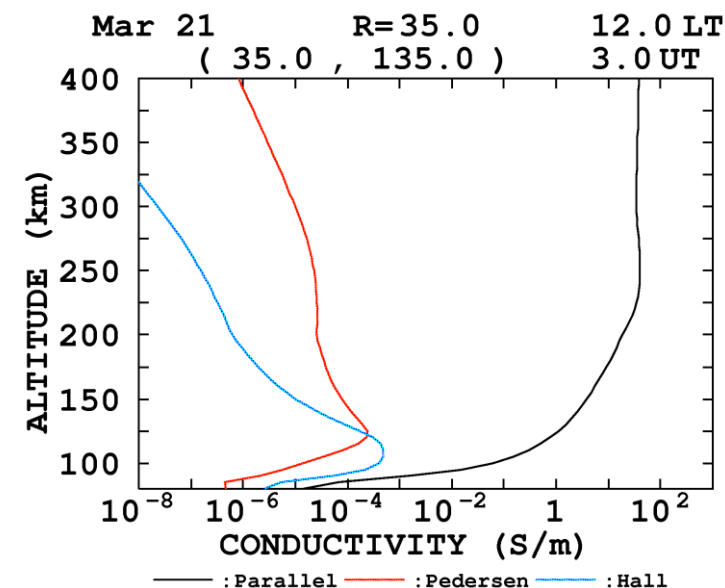
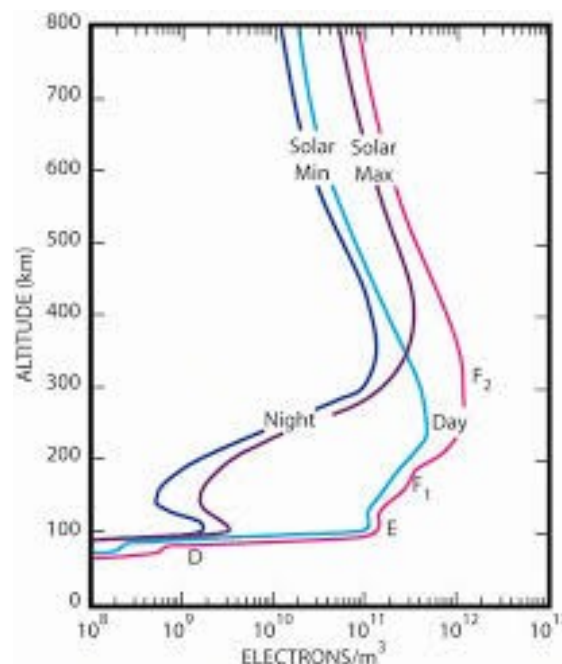
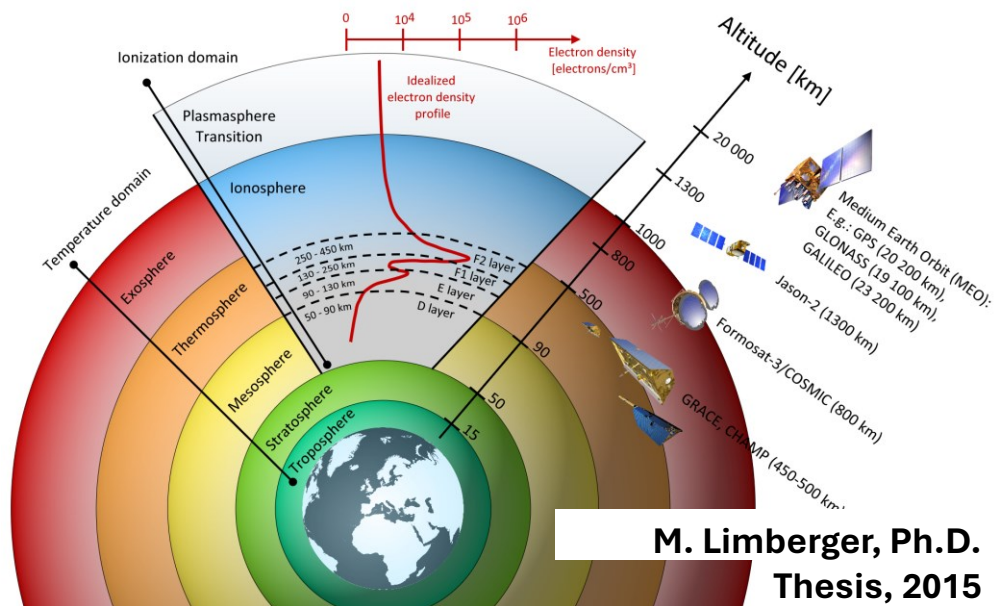


- Változás periódusa: 1 nap
- Nagyságrendje: néhány száz 10 nT (legerősebb a nyári hónapokban)
- Maximális változás helyi délben
- A változás szélességfüggő



A földmágneses tér külső eredetű változása (3/16)

A nyugodt napi változás (Solar Quiet - Sq) eredete – Ekvivalens áramrendszer az ionoszférában



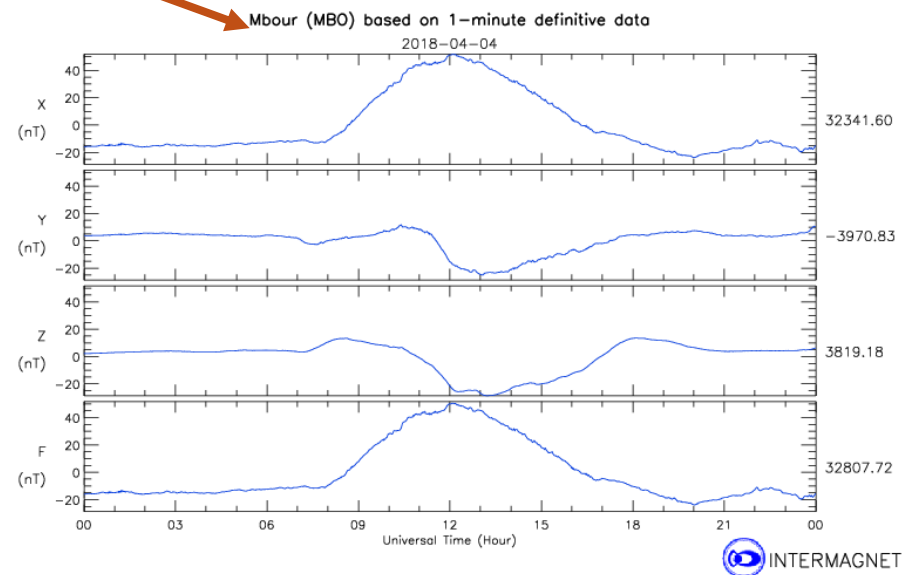
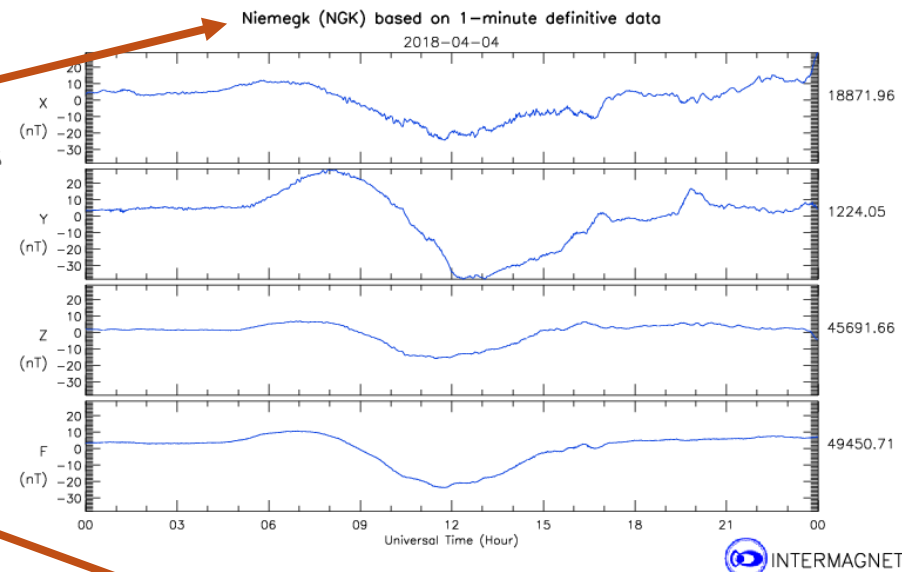
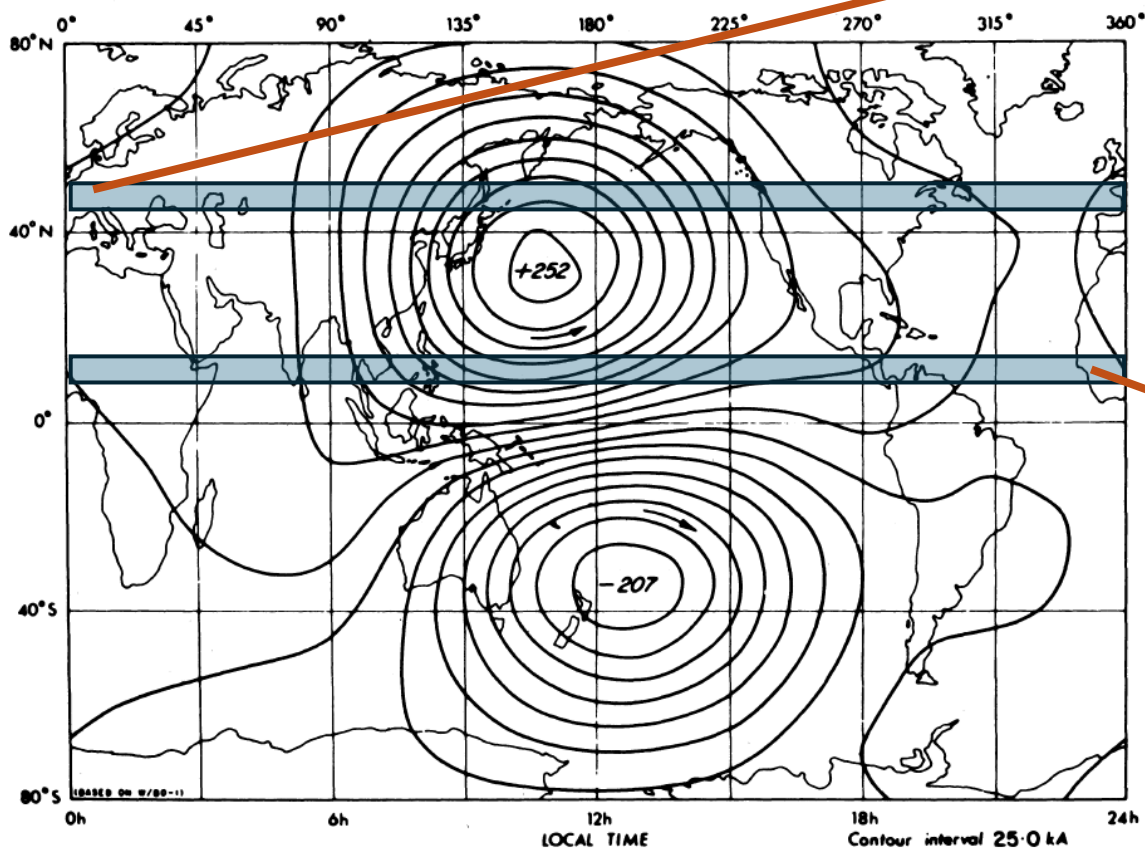
- Az ionoszféra a Föld légkörének felső, elektromosan vezető rétege, kb. 60 és 1000 km magasság között.
- A napsugárzás (UV és röntgen) hatására jön létre, a levegő molekuláinak ionizálása révén
- Az ionoszféra részecskesűrűség profilja réteges szerkezetet mutat, ami függ a Nap aktivitásától és az éjszaka-nappal változástól
- Az ionoszféra vezetőképességének magasság profilja eltér a sűrűség magasság profiljától. Legerősebben az E réteg vezet, az elektromos áramok szerepi itt a legjelentősebb.

$$\sigma_{Ped} = \frac{eN_e}{B} \left(\frac{\omega_e \nu_{en}}{\omega^2 + \nu_{en}^2} + \frac{\omega_i \nu_{in}}{\omega_i^2 + \nu_{in}^2} \right)$$
$$\sigma_{Hall} = \frac{eN_e}{B} \left(\frac{\omega_e^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} + \frac{\omega_i^2}{\omega_i^2 + \nu_{in}^2} \right)$$

A földmágneses tér külső eredetű változása (4/16)

A nyugodt napi változás (Solar Quiet - Sq) eredete – Ekvivalens áramrendszer az ionoszférában

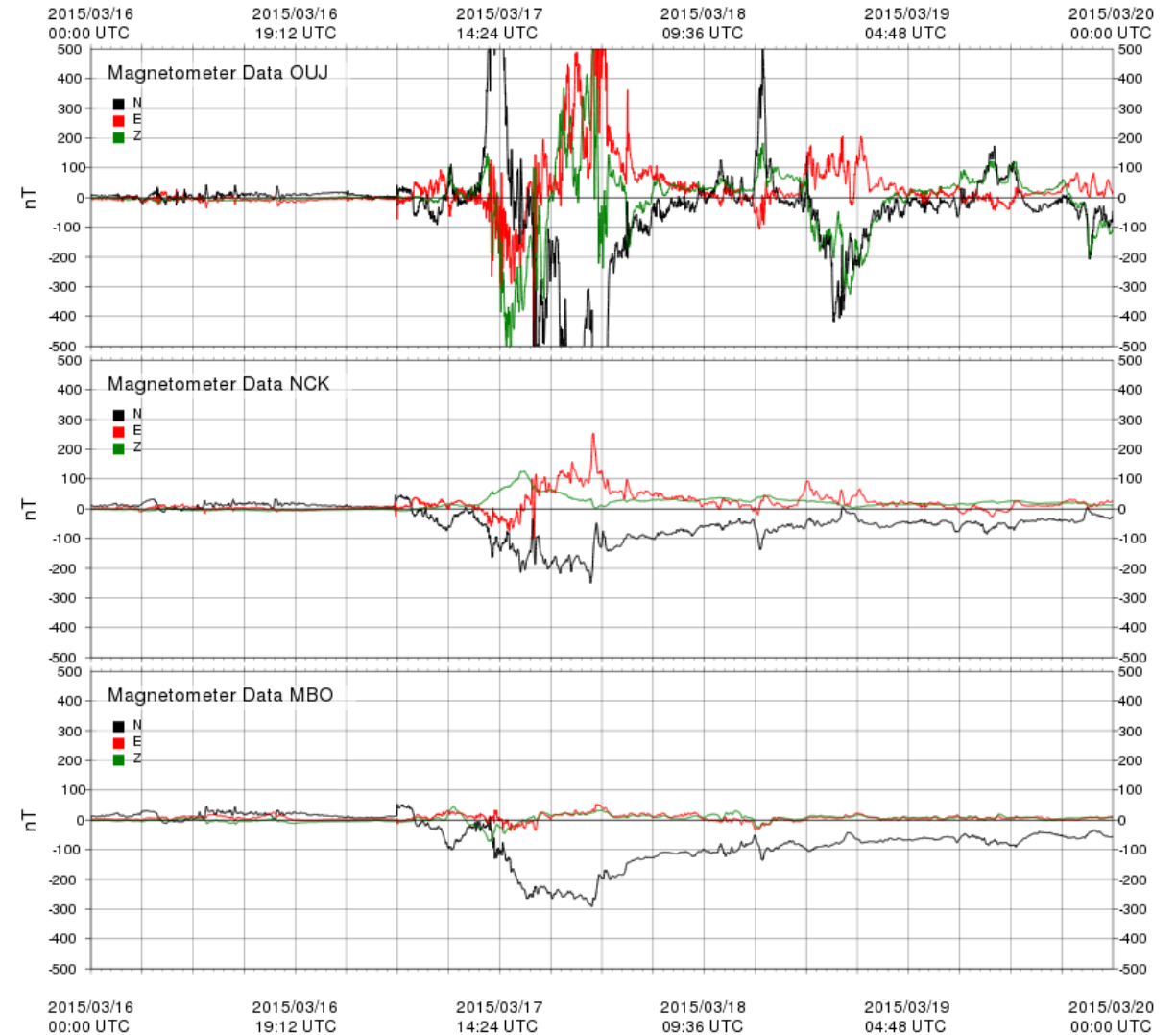
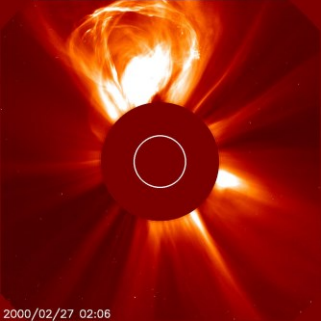
1. 1-1 áramcella az É-i és D-i féltekéken
2. Keleti irányú elektrojet az egyenlítő mentén



A földmágneses tér külső eredetű változása (5/16)

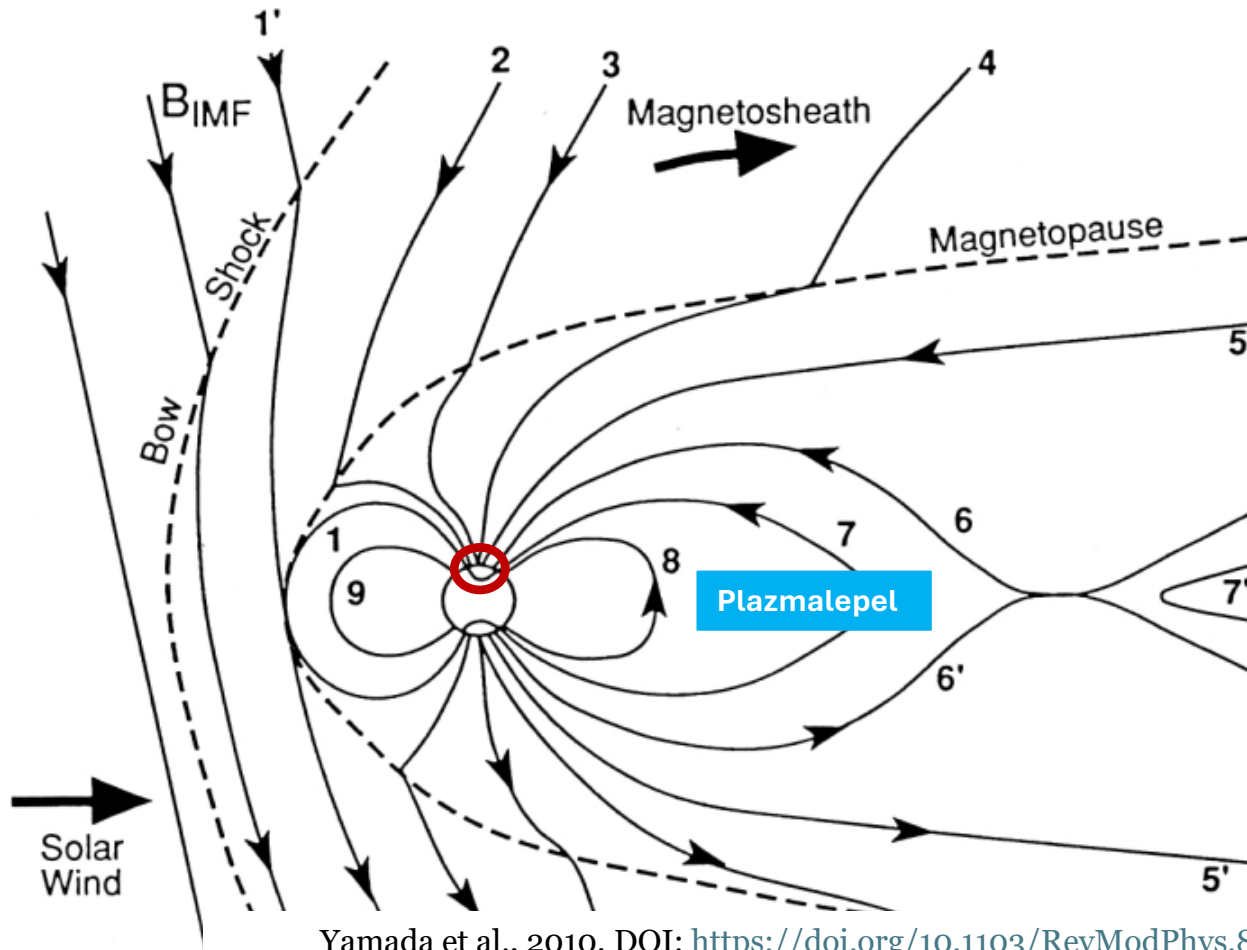
Geomágneses viharok

- A napszél és a magnetoszféra energetikai kölcsönhatása következtében alakulnak ki. -> a két rendszer mágneses erővonalai átkötődnek
- Összetett áramrendszer jön létre a magnetoszférában, az ionoszférában (E réteg), és a mágneses erővonalak mentén a két rendszer között
- Az áramokat nagy energiájú részecskék táplálják, amik az energiájukat a napszélből nyerik
- Az áramok hatására létrejövő felszíni mágneses változások erőssége, jellege a mágneses szélességtől függően változik – legerősebben a sarkifény tartományban (lásd a jobb oldali ábrarozatot, amely azonos y skálán mutatja a mágneses komponensek változását fentről lefelé csökkenő mágneses szélességeken)

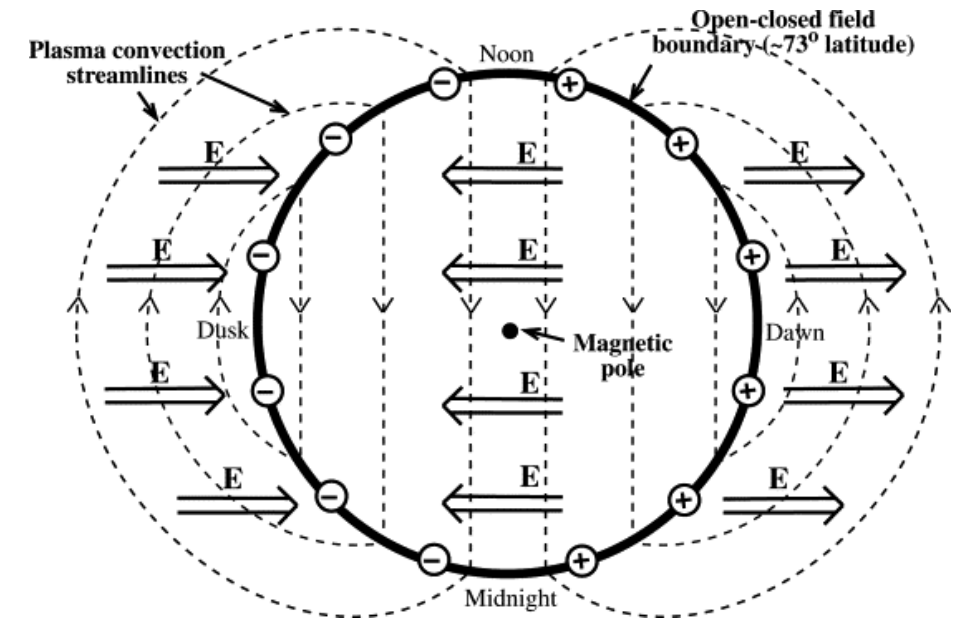


A földmágneses tér külső eredetű változása (6/16)

Geomágneses viharok – Dungey ciklus



Yamada et al., 2010, DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.603>,
after Hughes (1995), Introduction to Space Physics, edited by
M. Kivelson and C. Russell (Cambridge University Press,
London), p. 227



Konvekciós elektromos tér:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v}_{nsz} \times \mathbf{B}$$

A földmágneses tér külső eredetű változása (7/16)

Geomágneses viharok – Részecskék mozgása magnetoszféra éjszakai oldalán

1. Konvekciós elektromos tér:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v}_{nsz} \times \mathbf{B}$$

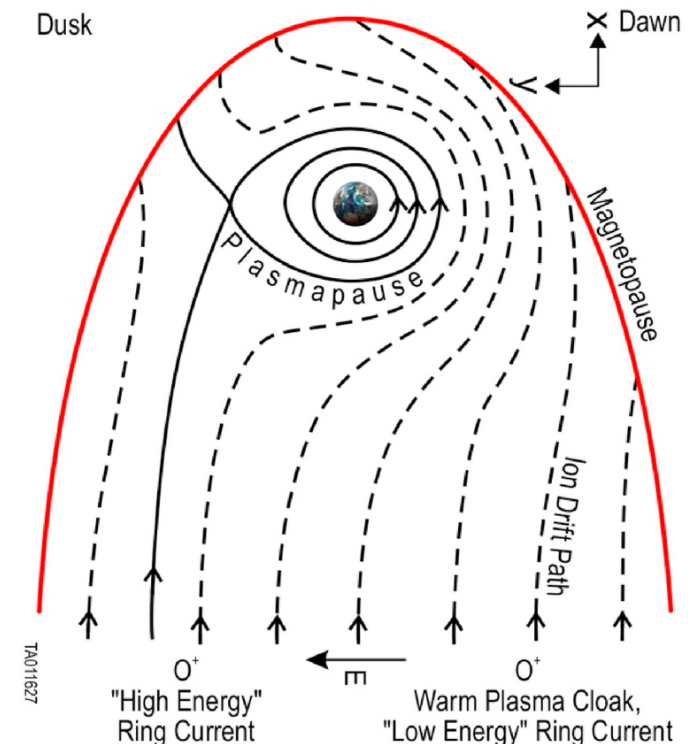
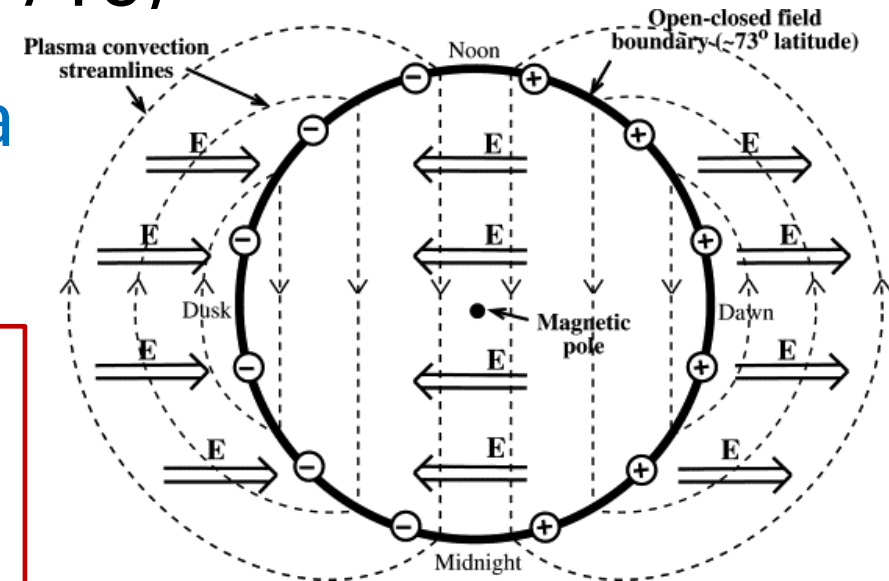
2. Elektromos tér potenciálja az erővonalak mentén az egyenlítői síkba vetül
3. Az elektromos tér a nagy energiájú részecskéket a plazmalepeltől a Föld felé mozgatja (elektromos drift)

$$\text{Elektromos drift: } \mathbf{v}_E = (\mathbf{E} \times \mathbf{B})/B^2$$

4. A Földhöz közel a nagy energiájú részecskék mozgását a gradiens drift határozza meg.

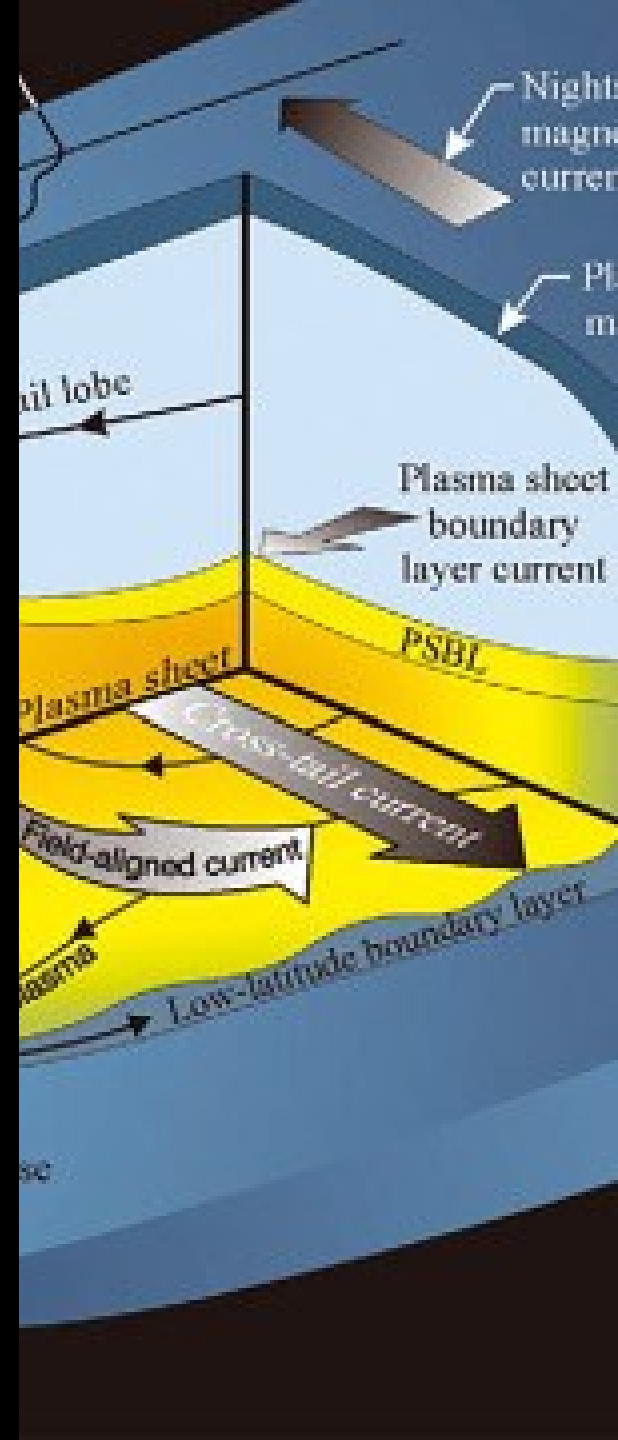
$$\text{Gradiens drift: } \mathbf{v}_\nabla = \frac{mv_\perp^2}{2qB} (\mathbf{B} \times \nabla B) \quad (q: \text{töltés nagysága})$$

5. A gradiens drift az ionokat nyugati, az elektronokat keleti irányba hajtja – Létrejön a **gyűrűáram** az egyenlítő mentén, 3-6 földugár távolságban



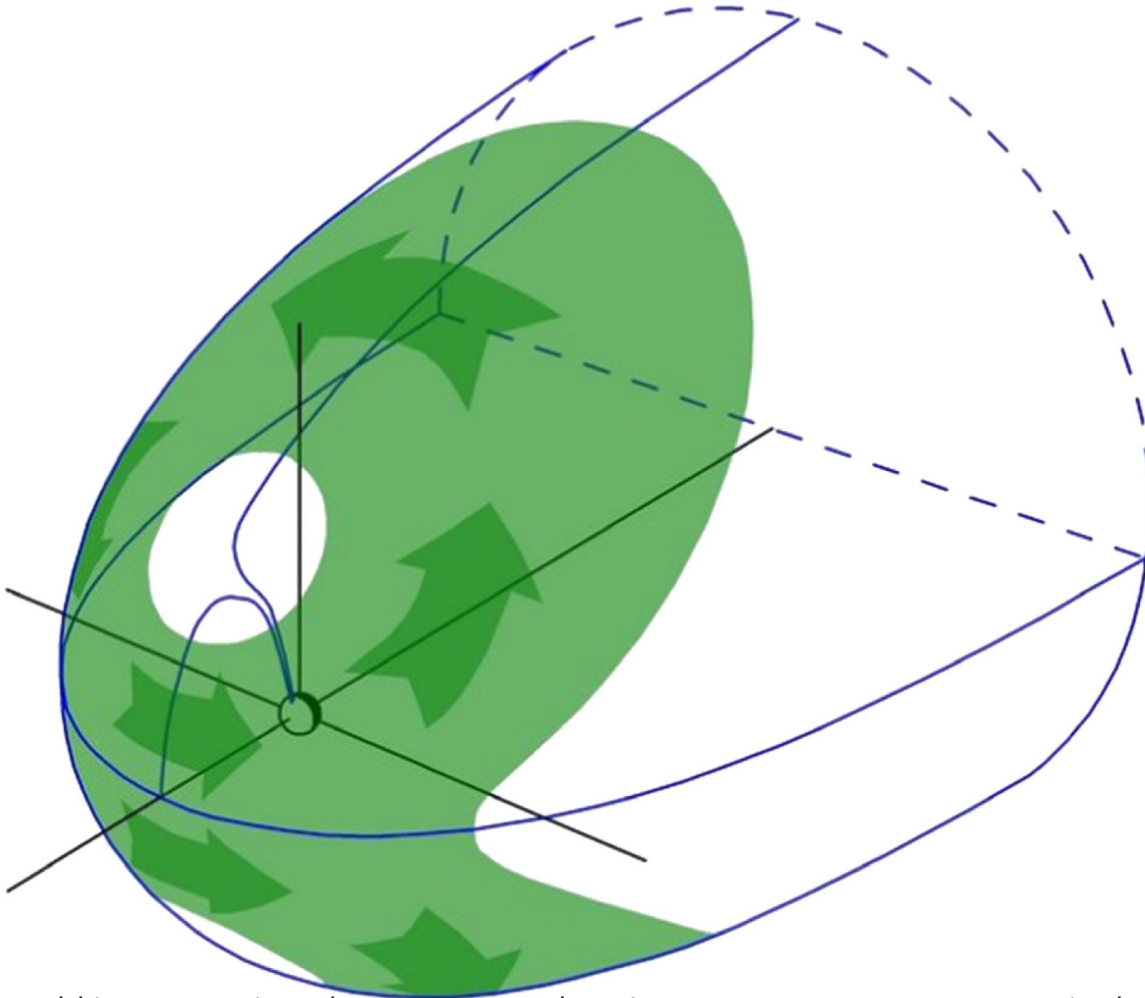
A földmágneses tér
külső eredetű
változása

Geomágneses
viharok – Gyűrűáram



A földmágneses tér külső eredetű változása (9/16)

Geomágneses viharok – Magnetopauza (Chapman-Ferraro) áram



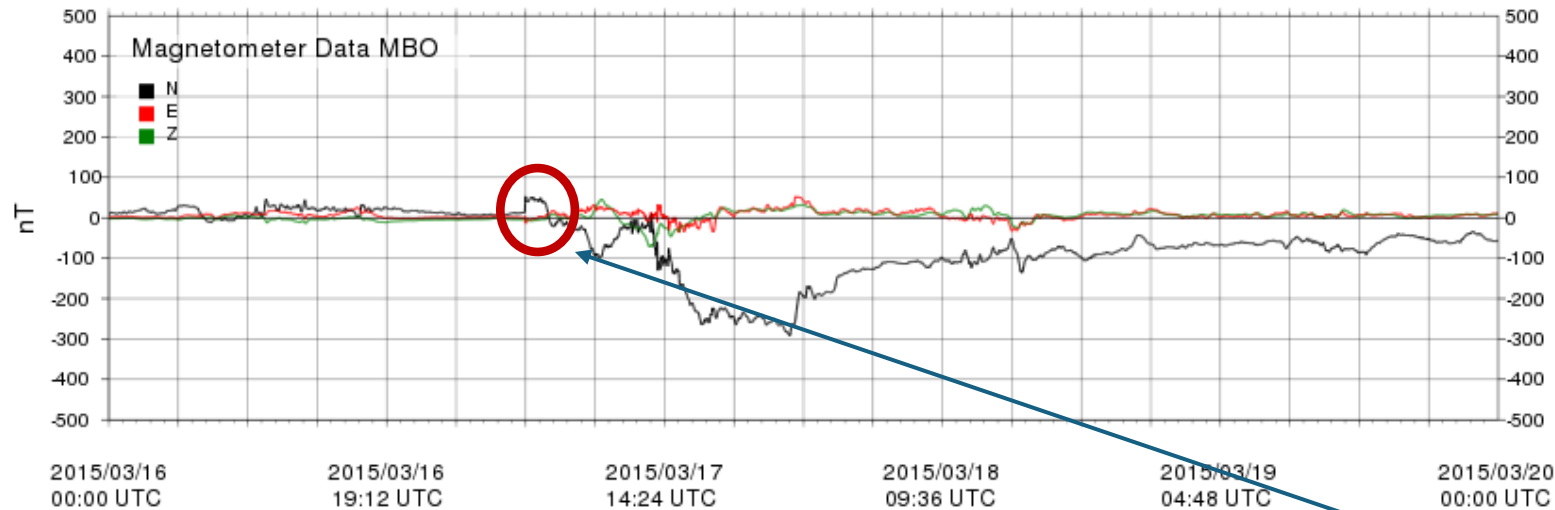
1. A magnetopauza (MP) áram a mágneses tér, napszél és magnetoszféra közötti hirtelen változása következtében lép fel, az Ampère törvény értelmében:

$$\mathbf{j} = \frac{\nabla \times \mathbf{B}}{\mu_0}$$

2. A MP áram a magnetoszféra orránál, az egyenlítő síkban a hajnali oldaltól az alkonyati oldal felé folyik. A magnetoszféra éjszakai oldala felé záródik.
3. Az áram a napszél felé árnyékolja a földi teret, a magnetoszféra felé pedig növeli azt.
4. A napszél dinamikai nyomásának erősödésével a magnetopauza közelít a Föld felé, ezzel párhuzamosan a MP áram is felerősödik.

A földmágneses tér külső eredetű változása (10/16)

Geomágneses viharok – Mágneses tér változása a felszínen kis és közepes szélességeken (Hirtelen viharkezdet)



A napszél dinamikai nyomásának erősödésével a magnetopauza közelít a Föld felé, ezzel párhuzamosan a MP áram is felerősödik.

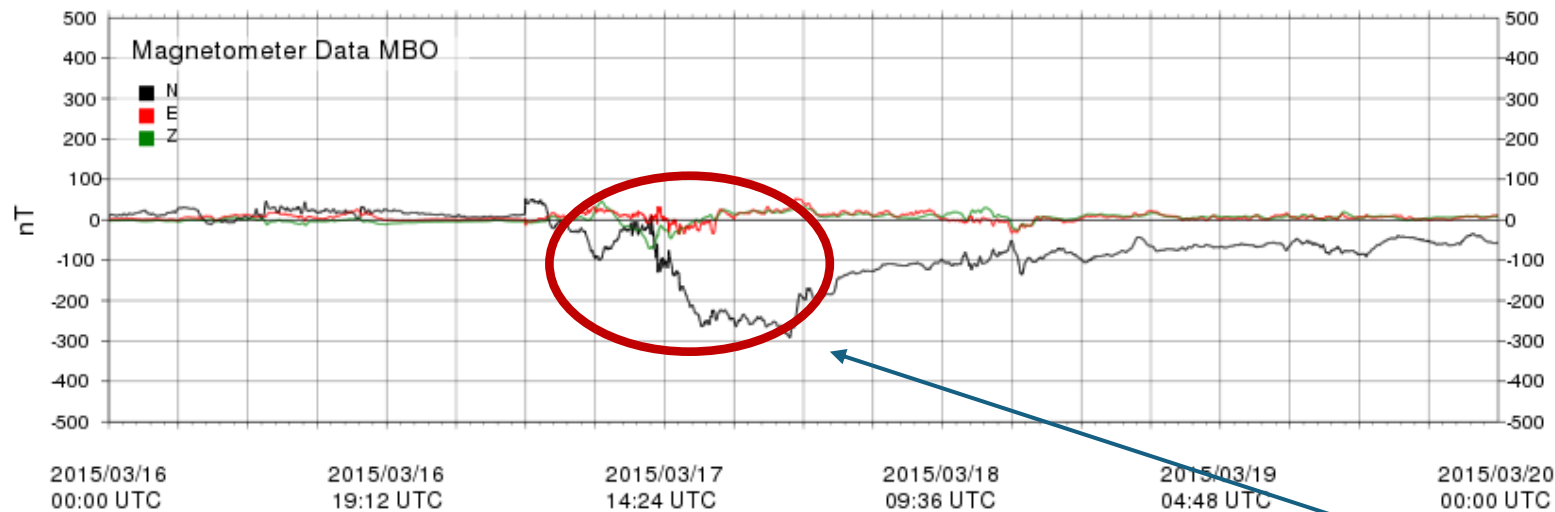
Mindkét hatás a mágneses tér növekedését eredményezi a magnetoszféra nappali oldalán

**Hirtelen viharkezdet
(Sudden Storm Commencement – SSC)**

Tipikus CME által okozott geomágneses viharok esetén

A földmágneses tér külső eredetű változása (11/16)

Geomágneses viharok – Mágneses tér változása a felszínen kis és közepes szélességeken (Főfázis)



A főfázis a nagy energiájú gyűrűáram részecskék belső magnetoszférába történő áramlása és a nyugati irányú gyűrűáram felerősödése következtében jön létre.

(lásd 18. dia)

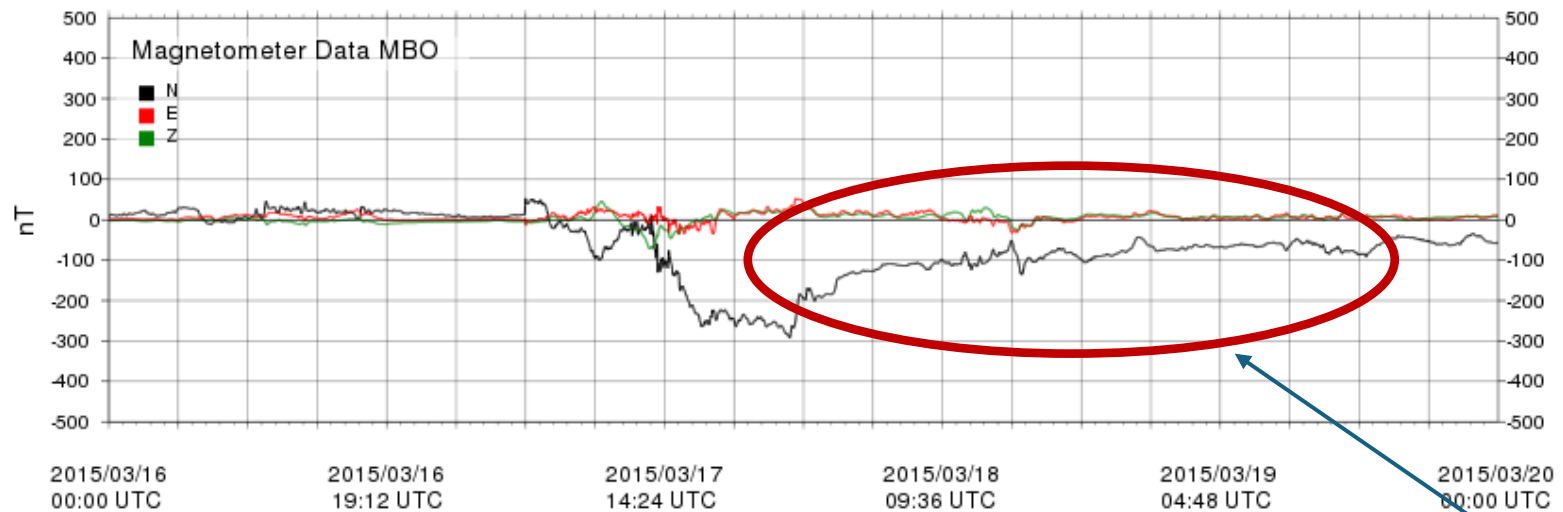
Időtartama: ~ 1 nap

A nyugati irányú áram hatása a kis és közepes szélességű obszervatóriumokban a legjelentősebb.

Az áram az mágneses tér északi irányú (X) komponensének nagyságát csökkenti.

A földmágneses tér külső eredetű változása (12/16)

Geomágneses viharok – Mágneses tér változása a felszínen kis és közepes szélességeken (Felépülési v. visszatérési fázis)



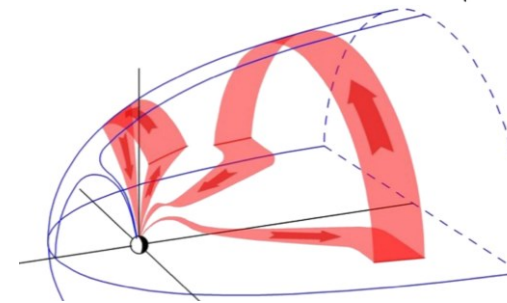
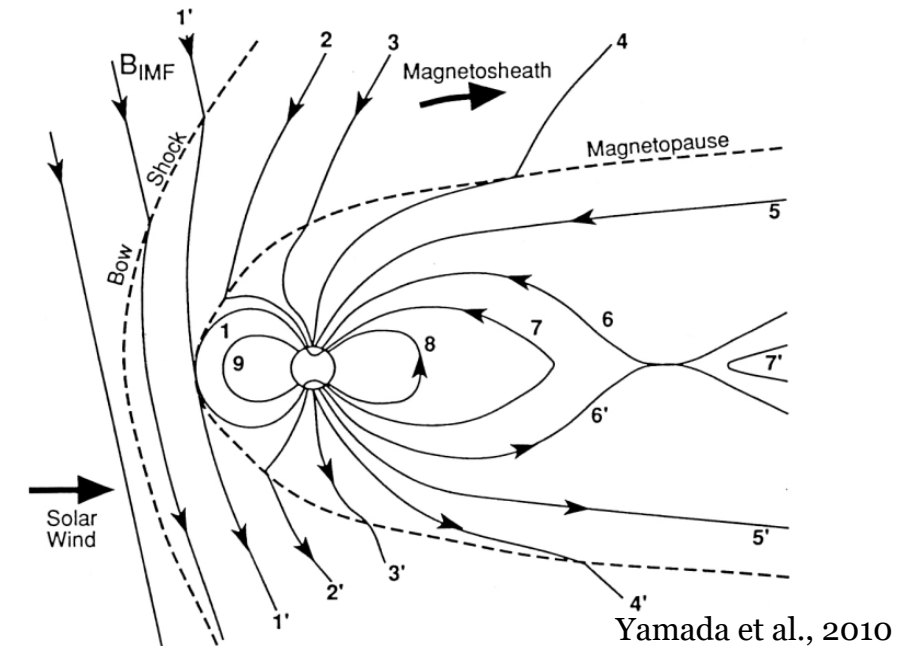
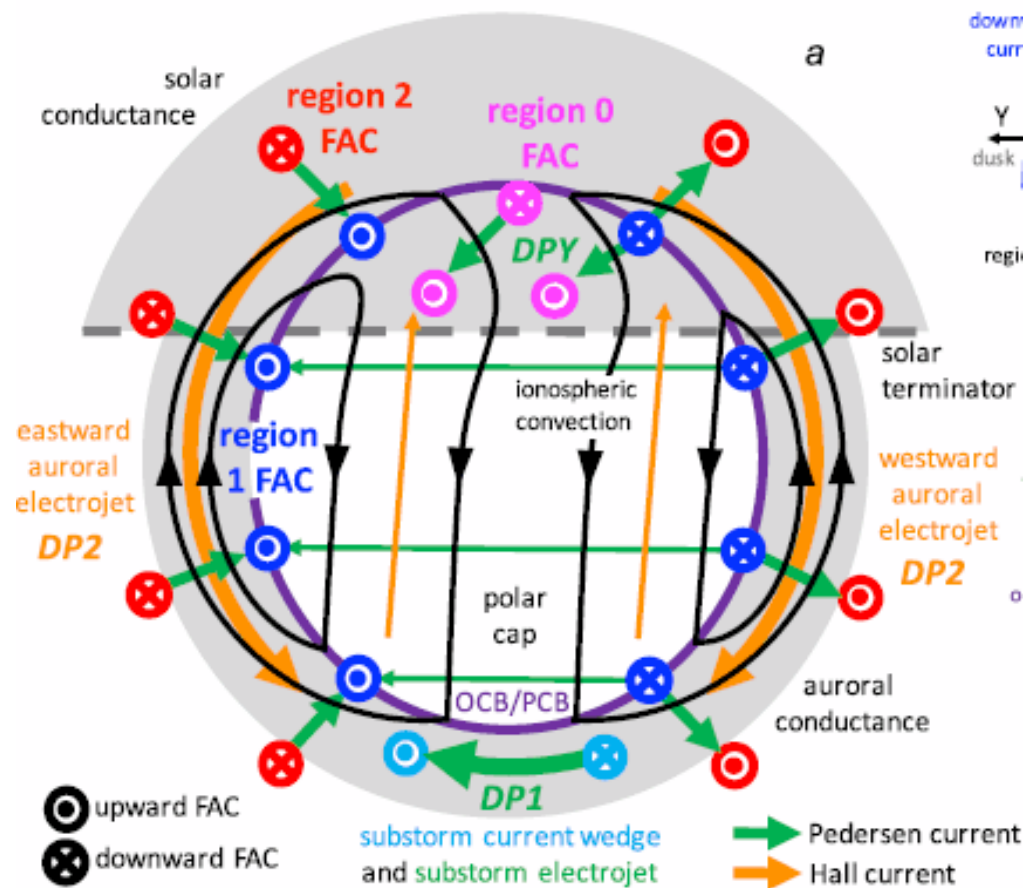
A felépülési fázis során az ionoszférából fokozatosan kis energiájú részecskék töltik fel a gyűrűáram tartományt, ezáltal az áram elveszti erősségét.

Időtartama: 4-5 nap

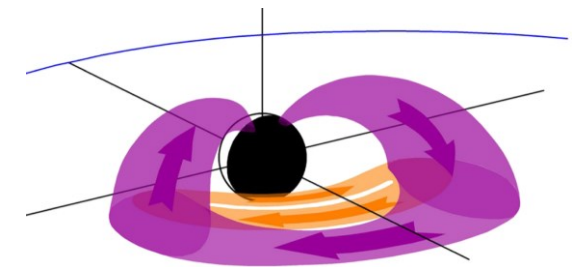
Az áram gyengülése következtében a mágneses tér északi irányú (X) komponensének nagysága fokozatosan emelkedik.

A földmágneses tér külső eredetű változása (13/16)

Geomágneses viharok – Elektromos áramok az auróra tartományban



Region-1 FAC

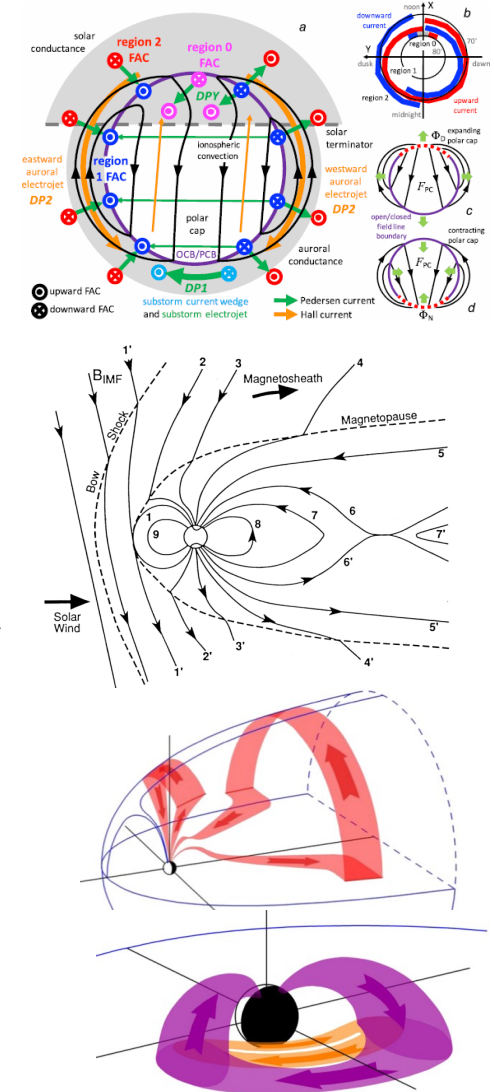


Region-2 FAC

A földmágneses tér külső eredetű változása (14/16)

Geomágneses viharok – Elektromos áramok az auróra tartományban

1. Zárt erővonalak mentén nagy energiájú részecskék csapódnak az ionoszféra aurorális E rétegébe, jelentősen növelve a vezetőképességet (szürke tartomány az ábrán).
2. A sarki sapka tartományból nyitott, napszélhez kötött erővonalak indulnak ki, részecskék ide nem csapódnak be, a vezetőképesség itt kicsi.
3. Az erővonalátkötődés következtében felerősödik a konvekciós elektromos (E_c) tér a hajnali oldal felől a napnyugta felé.
4. A konvekciós elektromos tér, valamint a függőleges mágneses tér hatására a sarki sapkában az éjszakai oldal felől a déli oldal felé mutató Hall áram indul meg. ($\mathbf{j} = -\sigma_H(\mathbf{E}_c \times \frac{\mathbf{B}}{B})$, ahol σ_H a Hall vezetőképesség) (barna nyilak)
5. Az áram a jól vezető aurora ív mentén záródik, ami az esti oldalon kelet, a hajnali oldalon pedig nyugati irányban folyik. Ez a sarki elektrojet, más néven DP2 típusú áram. (Az elektrojet, kisebb erősséggel, de nyugodt időszakban is jelen van.)
6. E_c hatására Pedersen áram indul a sarki sapkán keresztül a hajnali oldal irányából az esti oldal felé. ($\mathbf{j} = \sigma_P \mathbf{E}_c$, ahol σ_P a Pedersen vezetőképesség) (zöld nyilak)
7. A Pedersen áram hatására pozitív töltések halmozódnak fel az esti oldalon, negatív töltések pedig a hajnali oldalon. A töltés-szétválás újabb elektromos teret alakít ki az auróra ív (szürke tartomány a jobb felső ábrán) egyenlítő és pólus felé eső határai között. Ennek hatására, a jól vezető auróra tartomány határai között szintén Pedersen áram folyik. (zöld nyilak)
8. Az auróra Pedersen áramai – a vezetőképesség hirtelen csökkenése miatt – a határokon az erővonalak mentén terjednek tovább, és kilépnek a magnetoszféra irányába. Ezek az erővonalmenti (field-aligned current, FAC), más néven Birkeland áramok. A pólushoz közeli FAC rendszer (esti oldalon az ionoszféra, hajnali oldalon pedig a magnetoszféra felé folyik) neve Region-1 FAC, az egyenlítőhöz közelebb lévőé (esti oldalon a magnetoszféra, hajnali oldalon az ionoszféra felé folyik) pedig Region-2 FAC.
9. Region-1 FAC a plazmalepel határán a távoli csóvába folyik és a semleges réteg áramhoz kapcsolódik. Region-2 FAC pedig a nyugati gyűrűáramhoz csatlakozik az egyenlítői sík mentén.



A földmágneses tér külső eredetű változása (15/16)

Geomágneses alviharok – DP1 elektromos áram

1. Alviharok növekedési fázisa (~1 óra)

Magnetoszféra: Ha a nappali és az éjszakai oldali erővonalátkötődés nincs egyensúlyban (általános eset), a csóvában a mágneses fluxus megemelkedik. Megnő a semleges rétegben folyó áramok erőssége, ami a csóva éjszakai oldal felé történő elnyúlásához vezet.

Ionoszféra: Az erővonalak mentén becsapódó részecskék hatására megjelenik az azimutálisan elnyújtott vékony sarkifény ív

2. Kiterjedési fázis (30-60 perc)

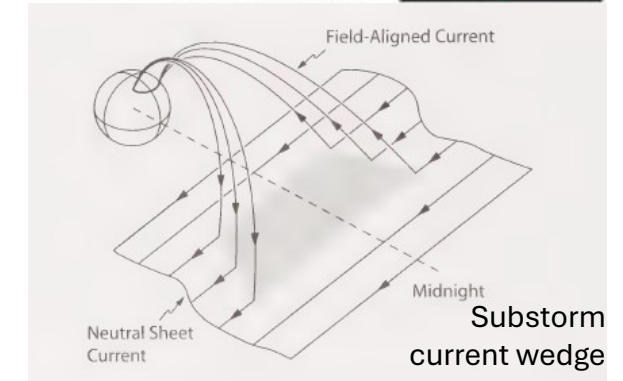
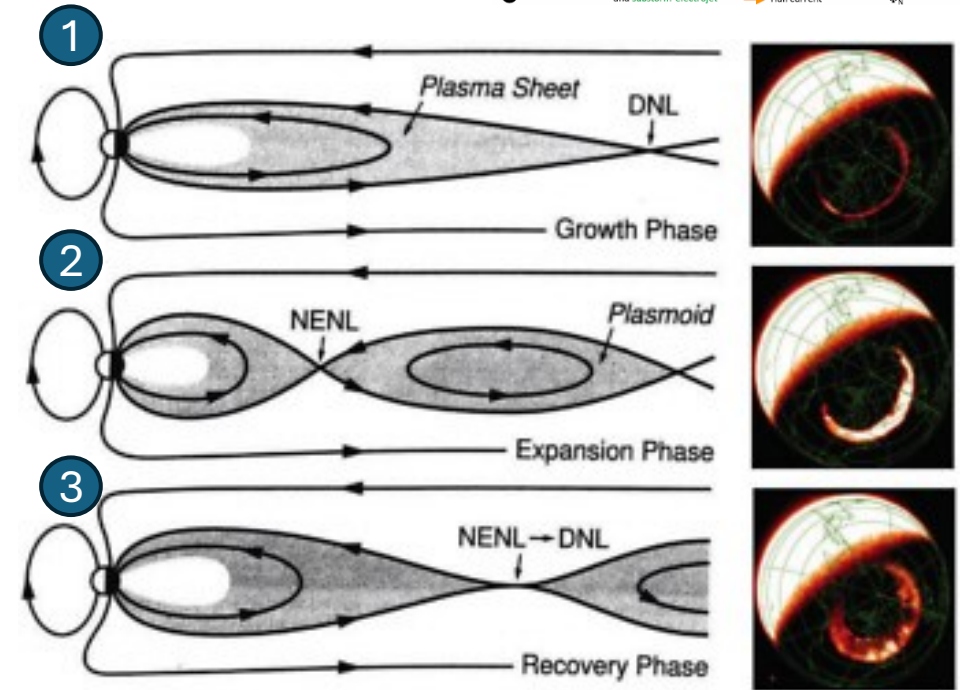
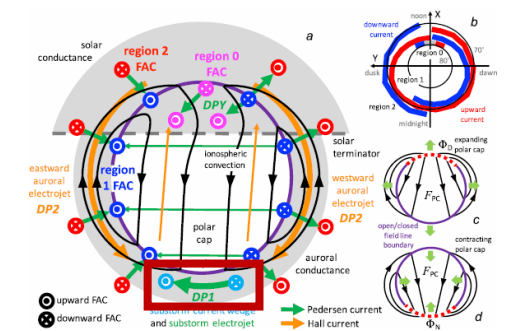
Magnetoszféra: A csóva elnyújtott erővonalai ~30 RE (földsugár) távolságban dipolarizálódnak, mégpedig egy Földhöz közeli semleges tartomány mentén létrejövő újabb erővonalátkötődés következtében (NENL). Az átkötődött erővonalak a Föld felé mozduknak, miközben jelentős mennyiségű részecskét juttatnak az ionoszférába éjszakai tartományába. A két átkötődés közötti „plazmoid” az éjszakai irányban távozik a napszéllel.

Ionoszféra: A sarkifény ív hirtelen felfénylik, kiterjed, észak és nyugat felé széterjed (*westward traveling surge*). A megnövekedett részecskesűrűség és vezetőképesség hatására felerősödik az éjszakai DP1 áram (*Substorm electrojet*). A DP1 áram az erővonalak mentén lép ki a magnetoszférába a sarkifény zóna határainál, és a csóva semleges réteg áramlemezéhez csatlakozik, ott, ahol a NENL létrejön (*Substorm current wedge*).

3. Visszatérési fázis (1-2 óra)

Magnetoszféra: A NENL fokozatosan megszűnik, illetve egybeolvad a távoli átkötődési zónával (DNL). Részecskeáram az ionoszféra irányában lecsökken.

Ionoszféra: A sarkifény elhalványul



Baumjohann,
Treumann, Basic
Space Plasma Physics,
3rd edition, World
Scientific, 2021,
<https://doi.org/10.1142/12771>

A földmágneses tér külső eredetű változása (16/16)

Geomágneses alviharok – DP1 elektromos áram

