Űrfizika

Muraközy Judit

EPSS

2026. 10. 28.

Miről lesz szó a mai órán?

Csillagunk részei
Naptevékenység - dinamó, napciklus, napfoltok, -fáklyák, flerek, protuberanciák
Szoláris plazmaáramok - koronafűtés, napszél és struktúrái, koronaanyag-kidobódások
Bolygó-magnetoszférák - magnetoszféra-struktúra, áramok, geomágneses aktivitás
Ionoszférák
Hélioszféra
Kozmikus sugárzás

Csillagok



Egy a sok közül? – "Földi" laboratórium



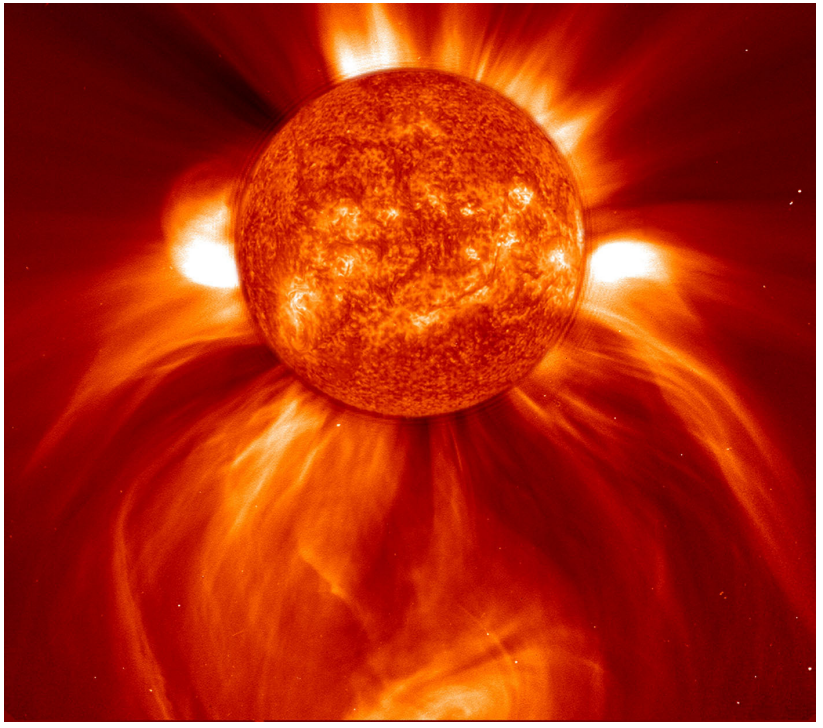
– jelenleg a HRD főágán

– változócsillag

– foltos csillag

– a legközelebbi csillag (1AU, 8 fényperc, 215 napsugár)

– a Naprendszer egyetlen csillaga



Magnetohidrodinamika

anyaga: **plazma**: egyenlő számú pozitív/negatív részecskéket tartalmazó gázok, kvázisemleges
kollektív tulajdonságok: Debye-hossz (azon kívül hőmozgás)
Kontinuitási egyenlet (tömegmegmaradás)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho v) = 0 \tag{1}$$

Mozgásegyenlet:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + (v\nabla)v \right) = -\nabla p + jxB + \rho g \tag{2}$$

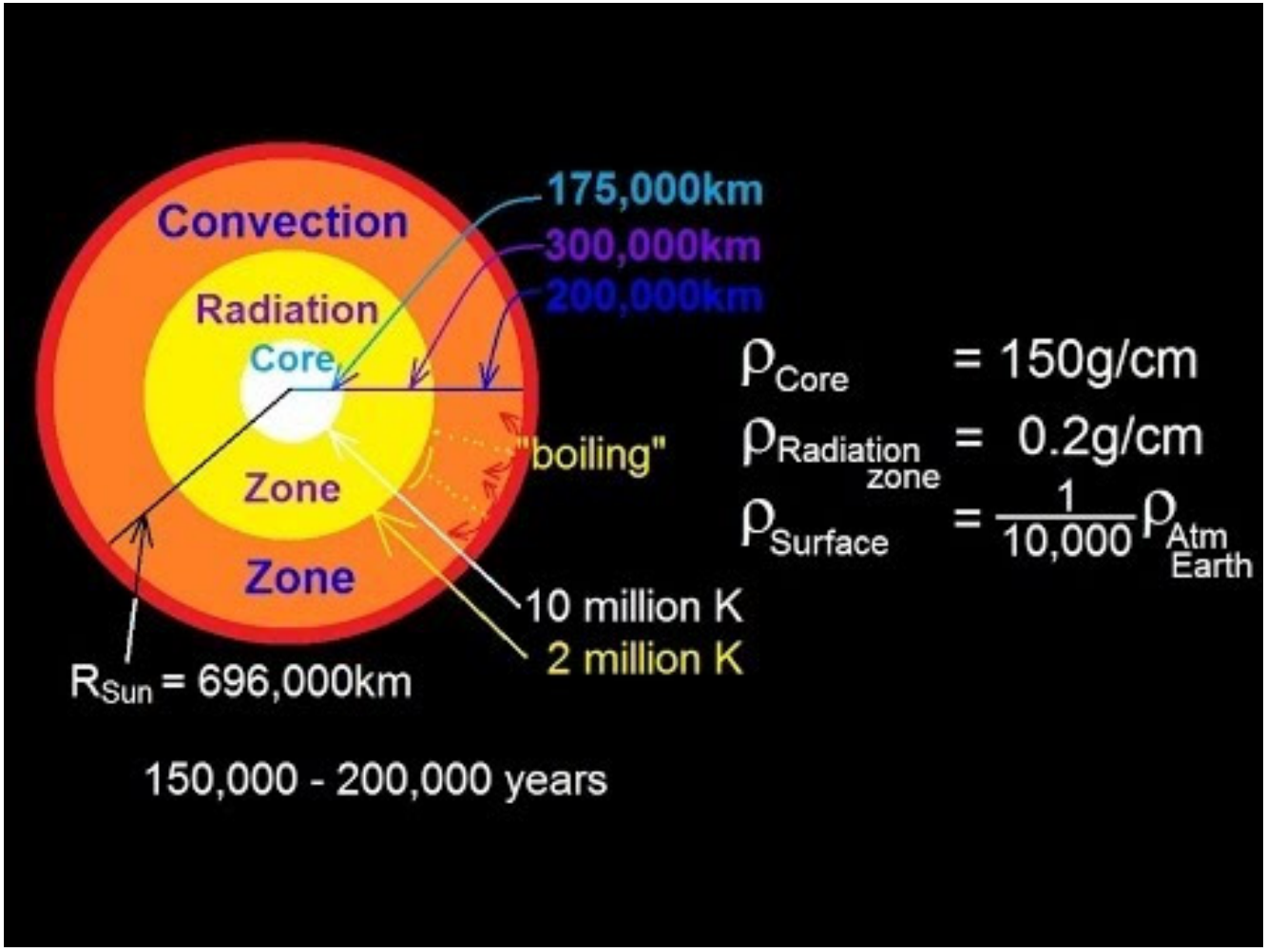
Lorentz-erő: *jxB* (gázdinamika és elektrodinamika kapcsolódása)
– mágneses nyomás: $B^2/2\mu$
– mágneses feszültség (erővonalak görbültségéből származik)
+ Maxwell-egyenletek
Indukcióegyenlet: a mágneses tér hogyan változik az időben

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla x|vxB| + \frac{1}{\mu\sigma}\nabla^2 B \tag{3}$$

η mágneses diffuzivitás (két eset: kis μ–nagy σ sebességtér; nagy μ–kis σ a mágn. tér szétdiffundál)

első esetre: **Alfvén-féle befagyási tétel**: a nagy vezetőképességű plazma mozgása során magával viszi a mágneses teret.

Belseje



– mag
(10 millió K, 175e km, $150 g/cm^3$)

– sugárzási zóna
(2 millió K, 300e km, $0.2 g/cm^3$)
(–tachoklína: $0.04 R_\odot$)

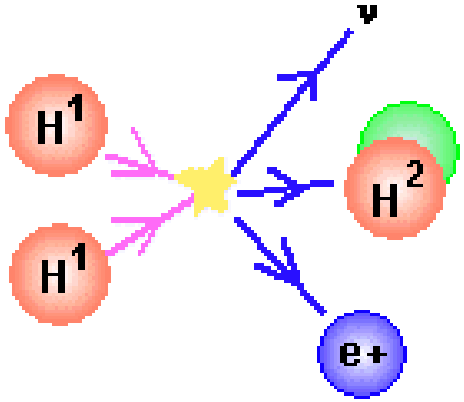
– konvekciós zóna
(5700 K, 200e km, 0.0000002 g/cm^3)

Energiatermelés

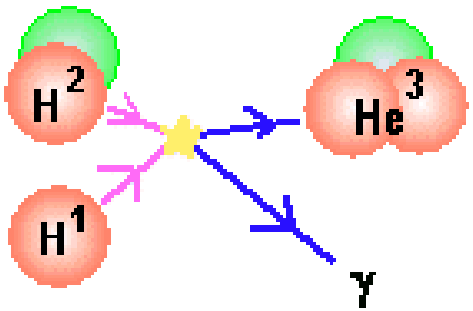
Alacsonyabb hőmérsékleten (pár millió fok):
– **p – p ciklus** (ppI lánc, ppII lánc, ppIII lánc)

Magasabb hőmérsékleten (10^8 K fölött):
– **CNO ciklus**

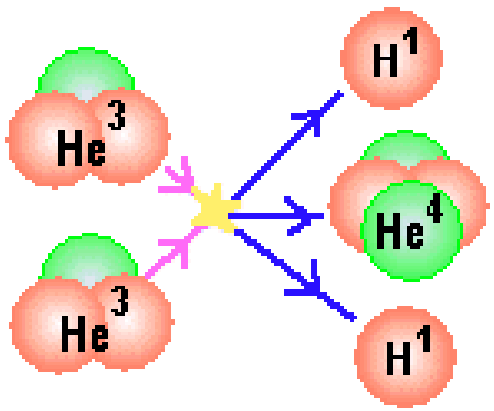
p – p ciklus főcsatorna



$$H^1 + H^1 \longrightarrow D^2 + e^+ + \nu$$



$$D^2 + H^1 \longrightarrow He^3 + \gamma$$



$$He^3 + He^3 \longrightarrow He^4 + H^1 + H^1$$

p – p ciklus mellékágak

Kisebb valószínűséggel:

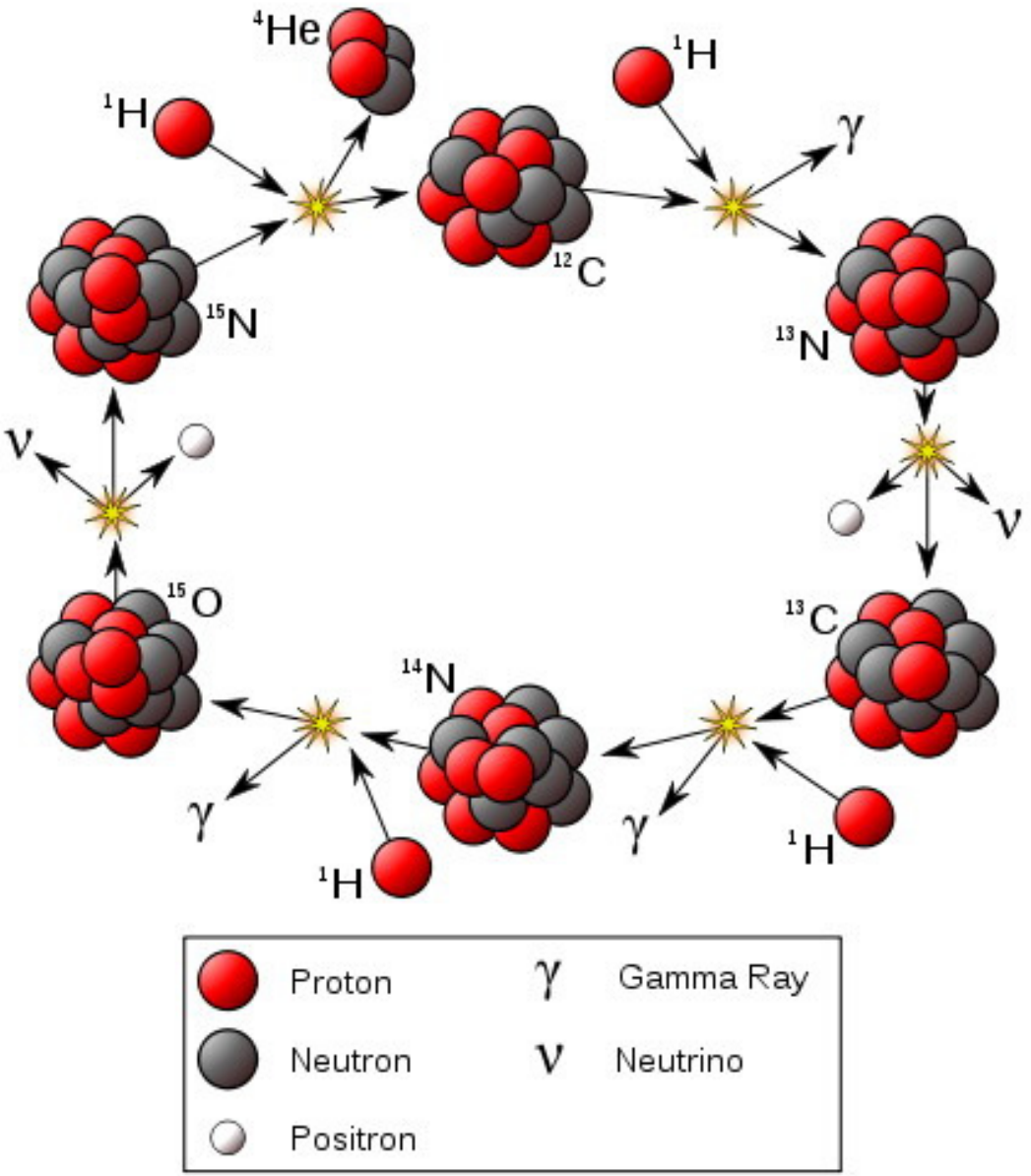
pp II lánc

$$He^3 + He^4 \longrightarrow Be^7 + \gamma$$
$$Be^7 + e^- \longrightarrow Li^7 + \nu$$
$$Li^7 + H^1 \longrightarrow He^4 + He^4$$

pp III lánc

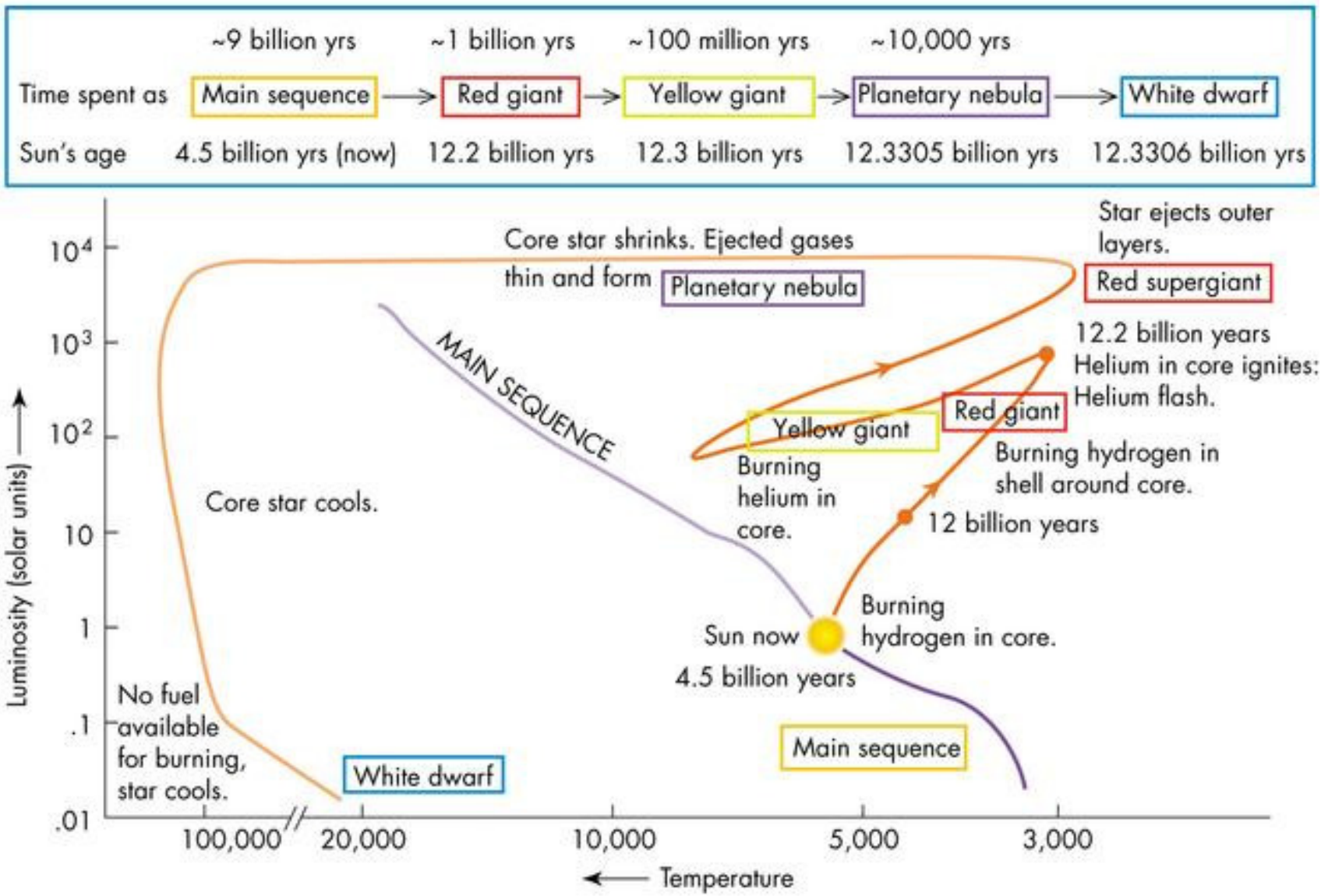
$$Be^7 + H^1 \longrightarrow B^8 + \gamma$$
$$B^8 \longrightarrow Be^8 + e^+ + \nu$$
$$Be^8 \longrightarrow He^4 + He^4$$

CNO ciklus

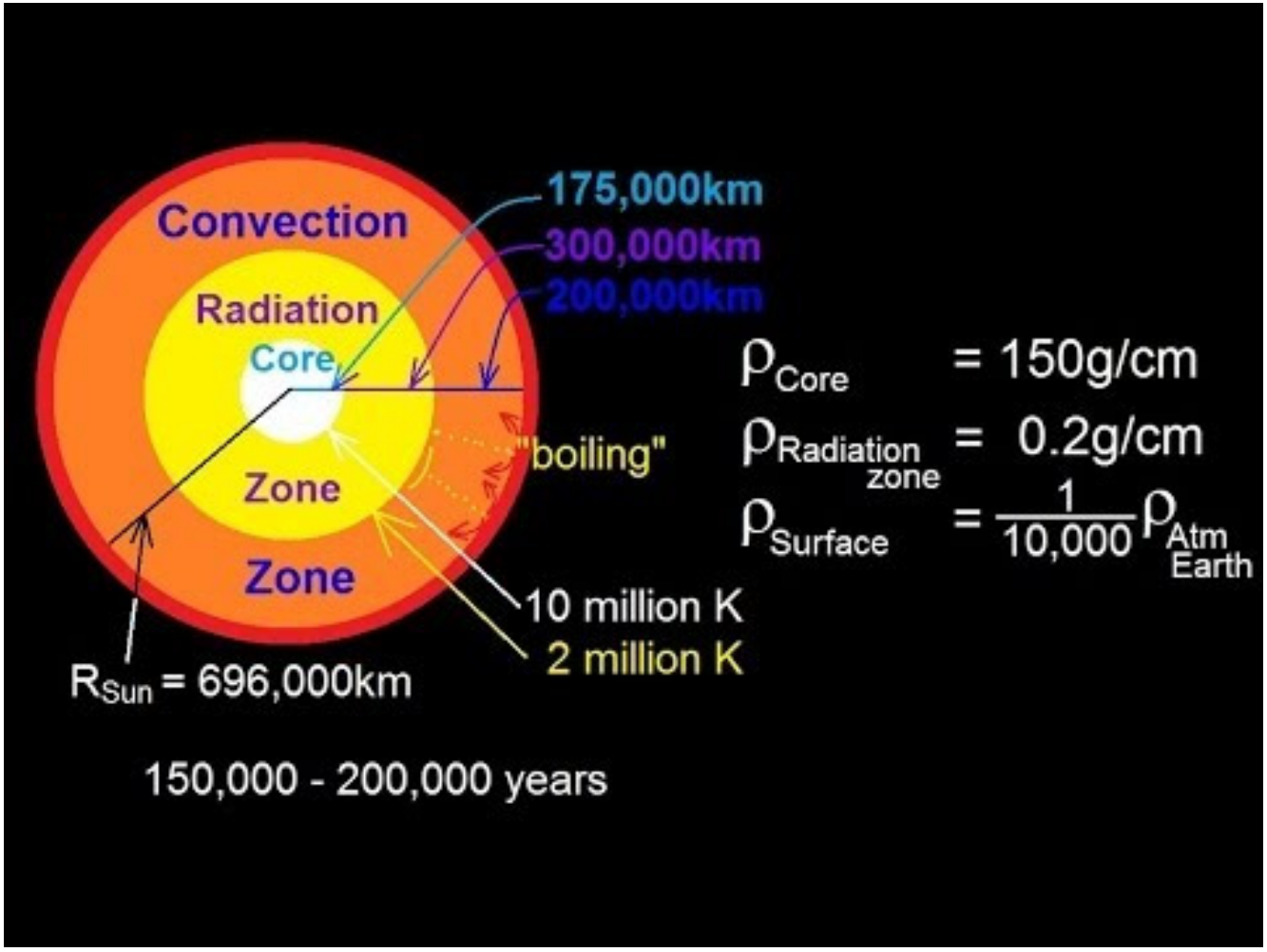


$C^{12} + H^1 \longrightarrow N^{13} + \gamma$
$N^{13} \longrightarrow C^{13} + e^+ + \nu$
$C^{13} + H^1 \longrightarrow N^{14} + \gamma$
$N^{14} + H^1 \longrightarrow O^{15} + \gamma$
$O^{15} \longrightarrow N^{15} + e^+ + \nu$
$N^{15} \longrightarrow C^{12} + He^4$
majd Ne és Si égés.
Végül $2Si^{28} \longrightarrow Fe^{56}$.

Fejlődése a HRD-n



Belseje

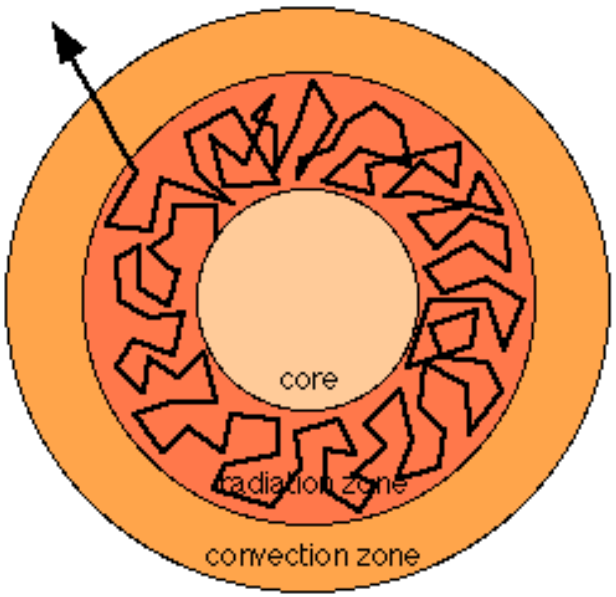


– mag
(10 millió K, 175e km, $150 g/cm^3$)

– sugárzási zóna
(2 millió K, 300e km, $0.2 g/cm^3$)
(–tachoklína: $0.04 R_\odot$)

– konvekciós zóna
(5700 K, 200e km, 0.0000002 g/cm^3)

Belseje – sugárzási zóna



(image credit: M.B. Larson)

Átlagos szabad úthossz:

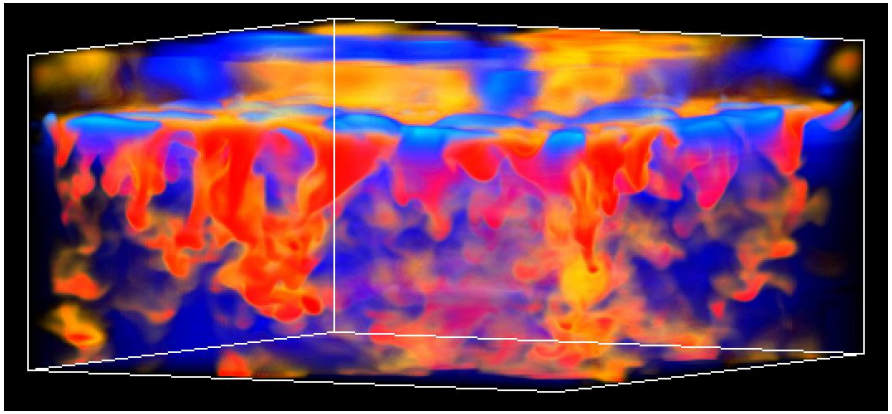
$$l_f = \frac{1}{\kappa\rho} \tag{4}$$

ahol ρ a sűrűség, κ a közepes abszorpciós koefficiens

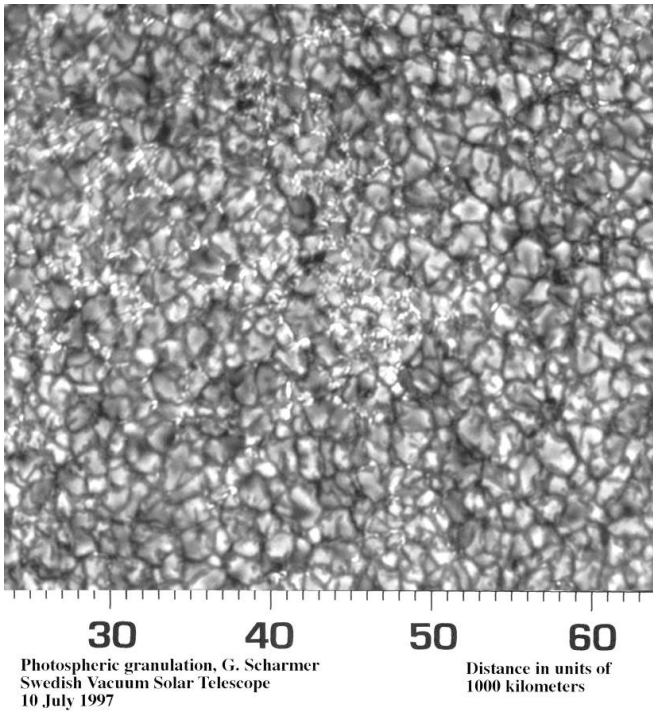
$$l_f\odot = 2 \text{ cm}$$

Mivel e zóna vastagsága $\approx$ 300.000 km, ezért a fotonok több tízezer évnyi ide-oda ütközés után jutnak ki a sugárzási zónából.
Diffúziós folyamat

Belseje – konvekciós zóna



(Irsp, 2009)

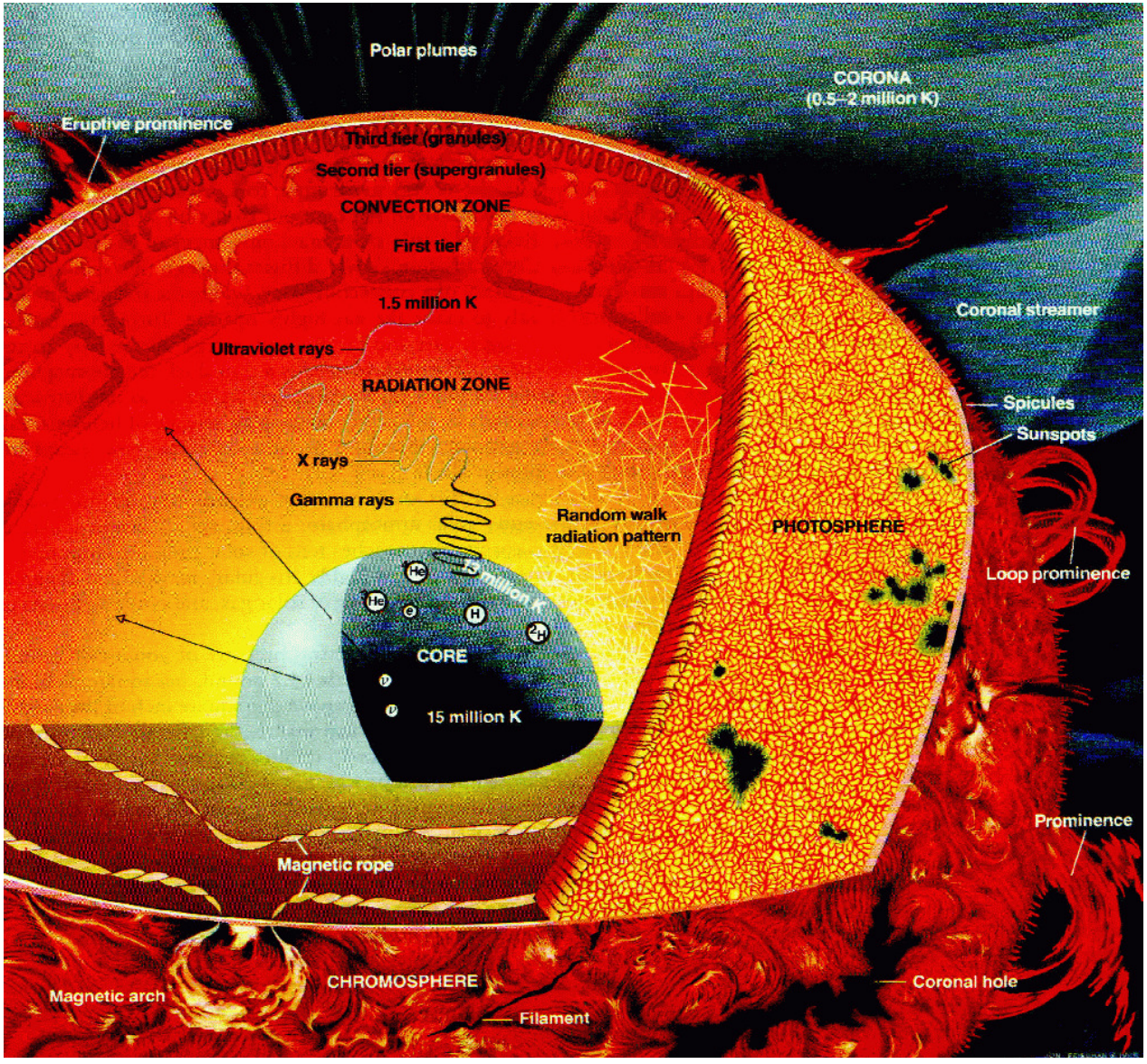


A sugárzás többé nem képes elszállítani a megtermelt energiát. Itt a diffúziót már az gátolja, hogy az e^--ok és p^+-ok rekombinációja során annyi H atom keletkezik, hogy a fotonok többé nem csak szóródnak, hanem elnyelődnek. Ez akadályt képez a diffúzió előtt.

A forró cellára felhajtóerő hat –> a felszínen lehűl –> visszasüllyed

A felszínen granulációs mintázat, de van szuper-, illetve mezogranulációs mintázat is

Légköre



– fotoszféra
(4500-6000 K)
granulák, napfoltok, fáklyák

– kromoszféra
(10000 km, 4300 K)
protuberanciák, flerek

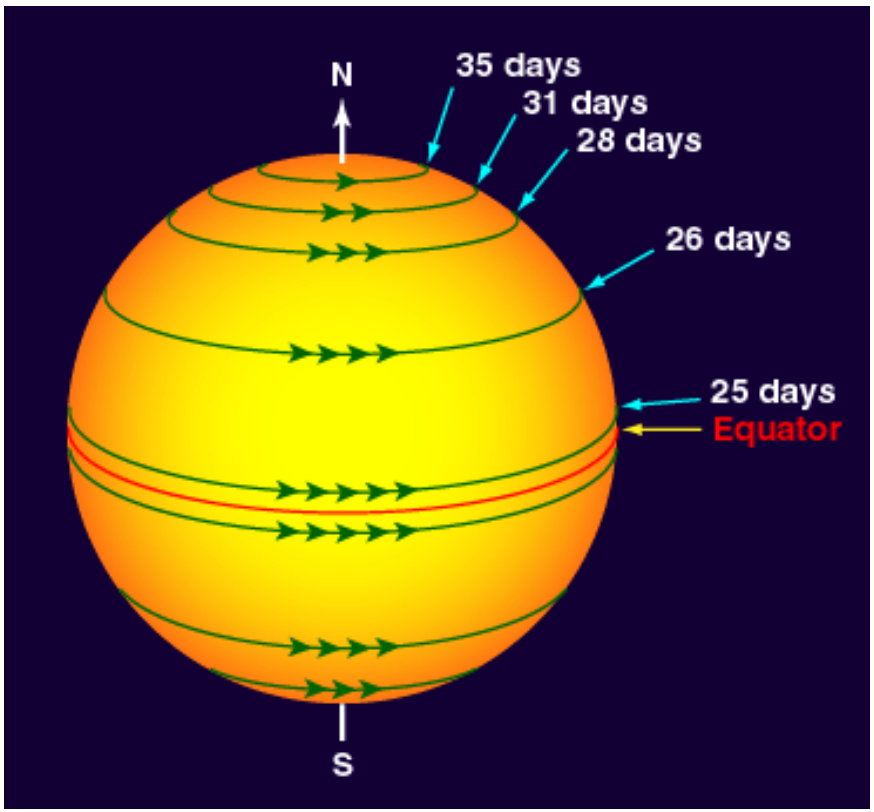
– korona
(több napsugár, 1–5 millió K, kis sűrűségű gázfelhő)

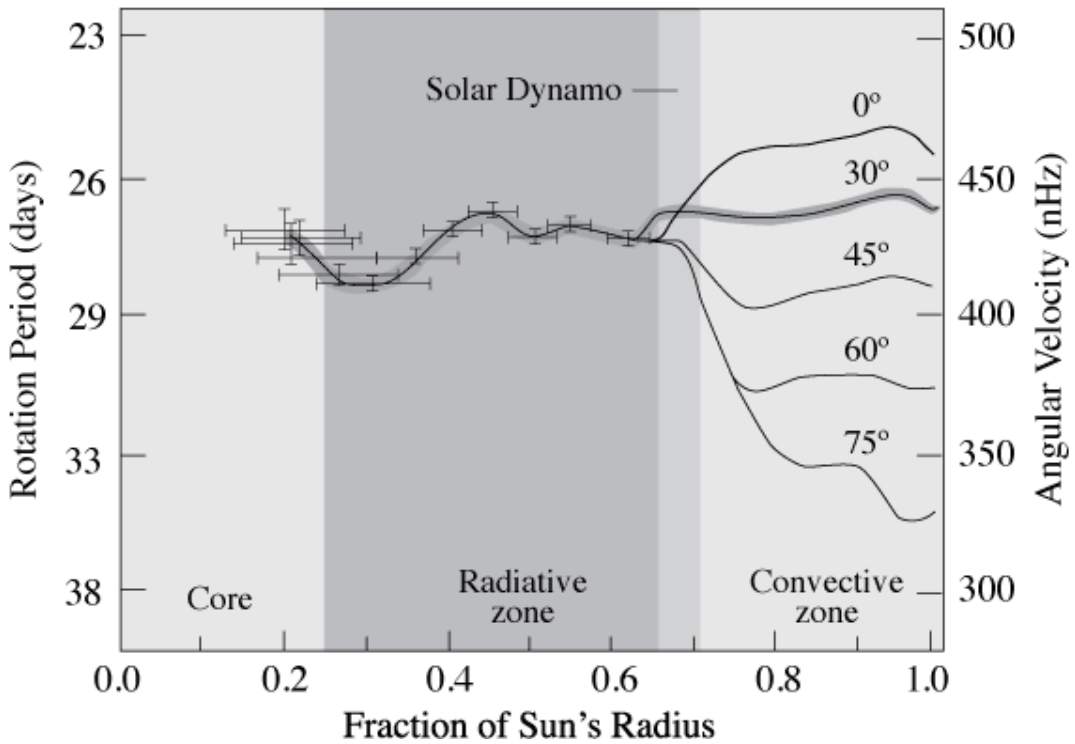
Rotációja

Differenciális rotáció:

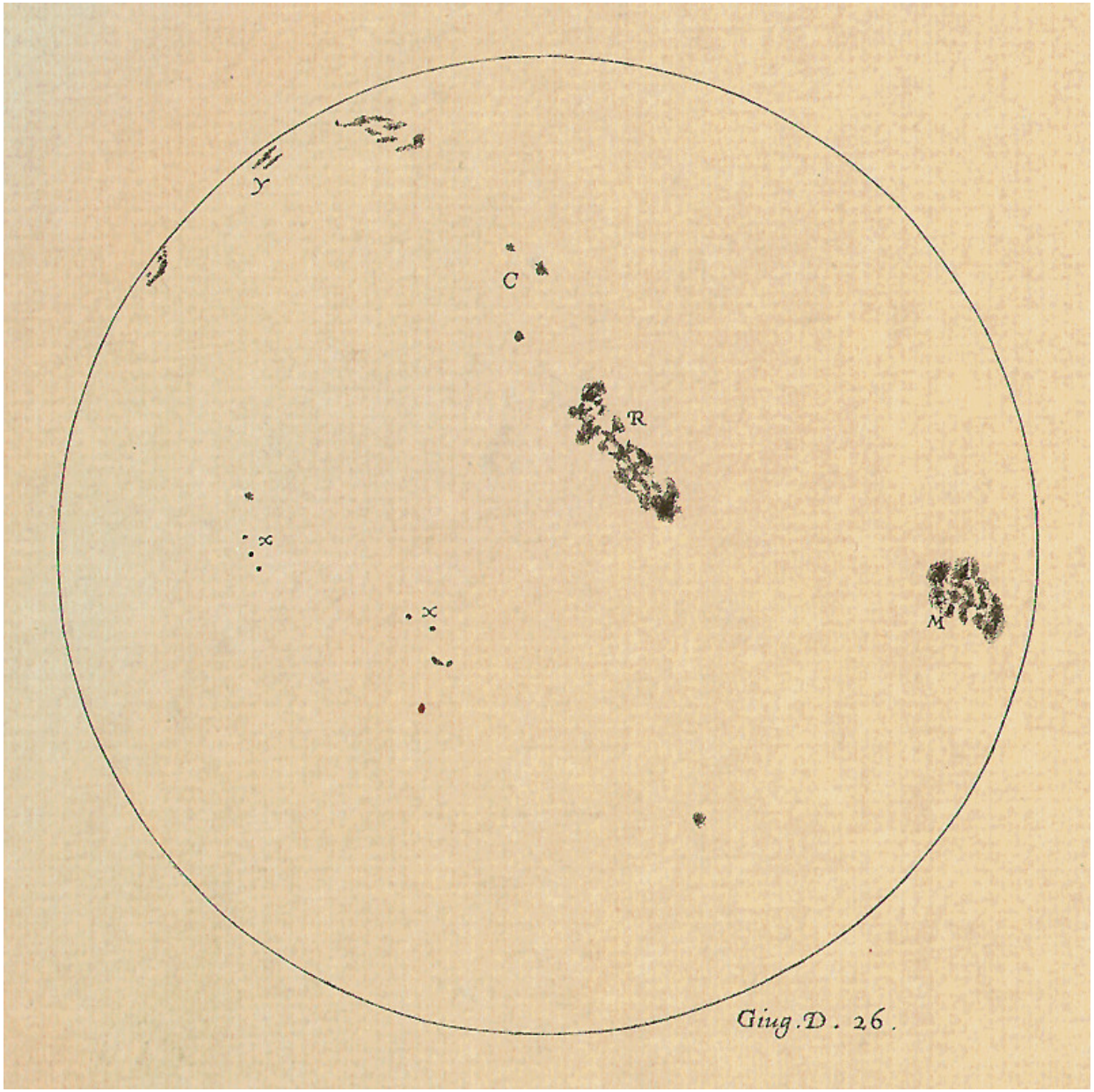
$$\omega = A + B \cdot sin^2\phi \tag{5}$$

ahol ϕ a naprajzi szélesség, és *A*=14.37° / *nap*, ill. B=-2.69° / *nap*.



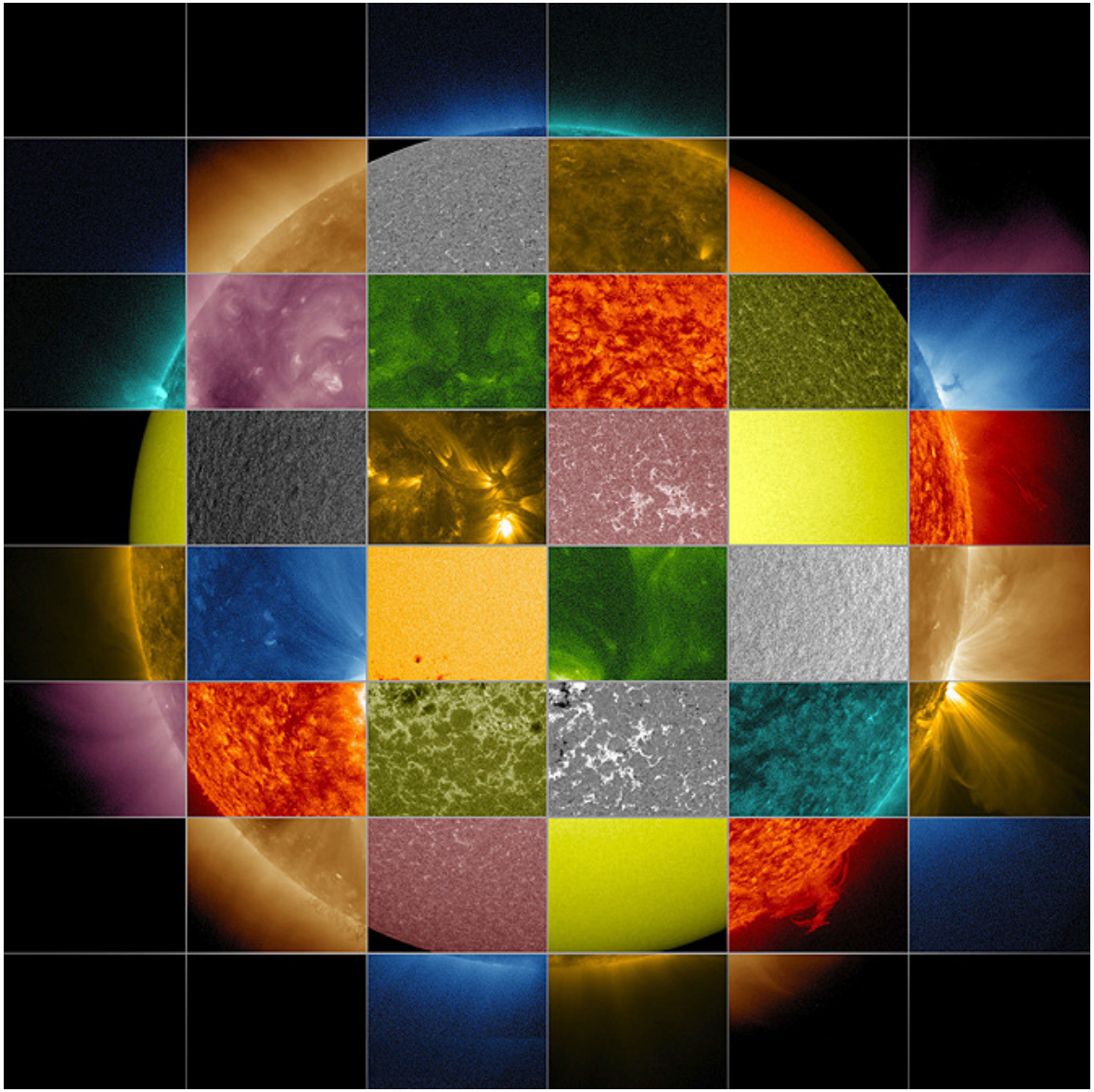


Megfigyelés – régen



Galileo Galilei rajza
(1613.06.26.)

Megfigyelés – most



kollázs

SDO

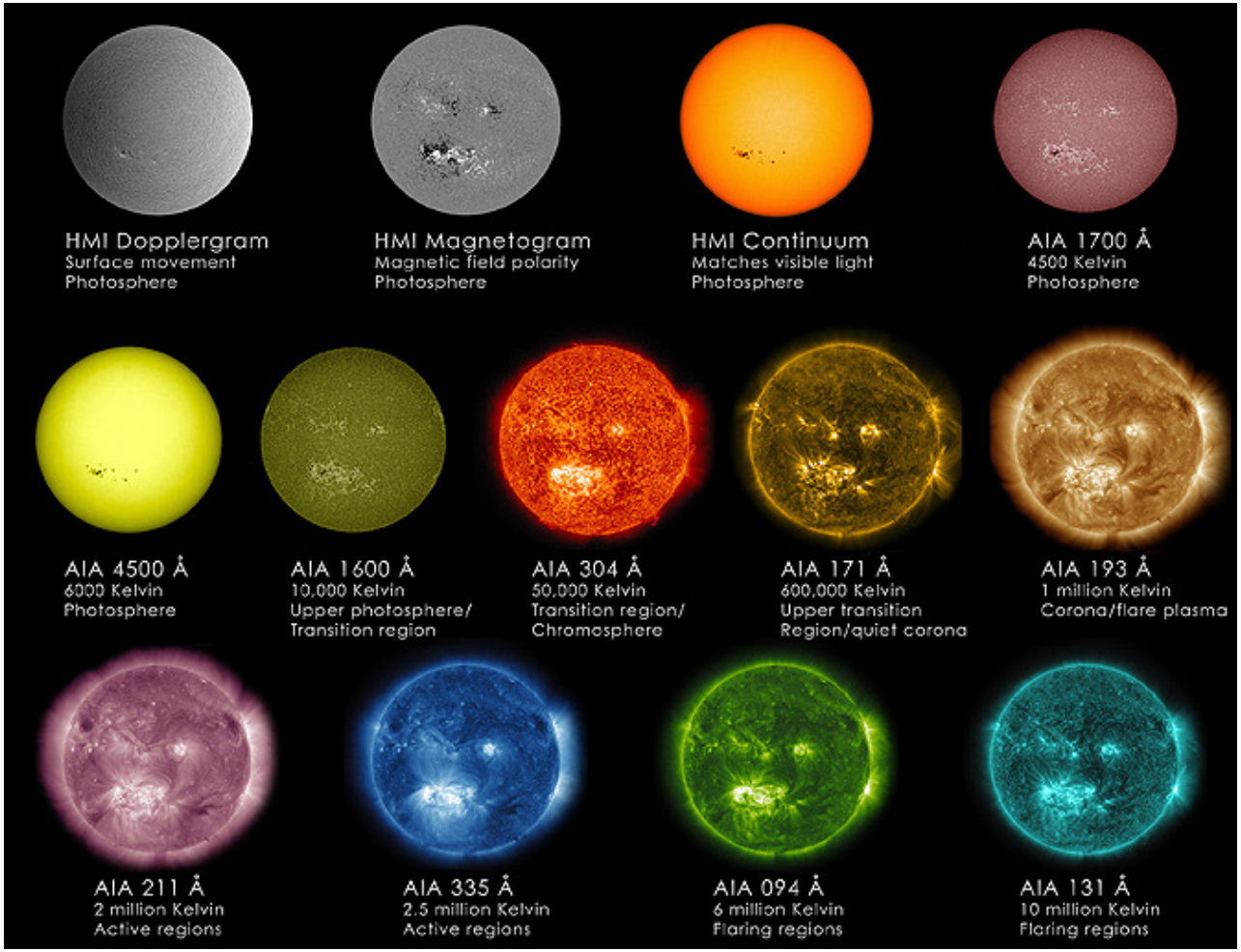
már nem csak a fotoszférát

észlelések különböző hullámhosszakon

földi megfigyelés

űreszközök (SoHO, SDO, STEREO) észlelései

Megfigyelés – most



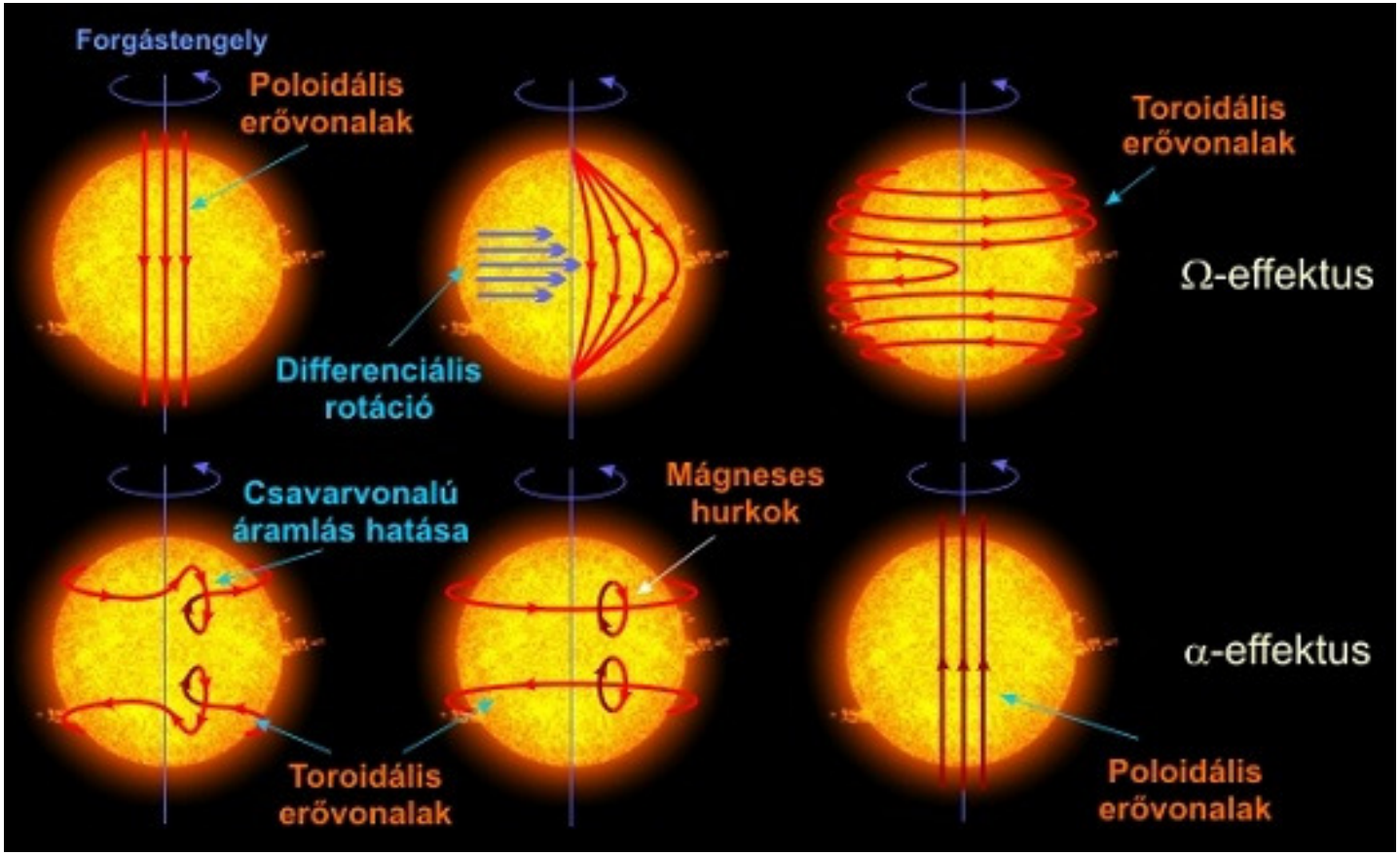
mágneses terek, kontinuum kép

fotoszféra és korona észlelések

alacsonyabb T: fotoszféra

magasabb T: korona

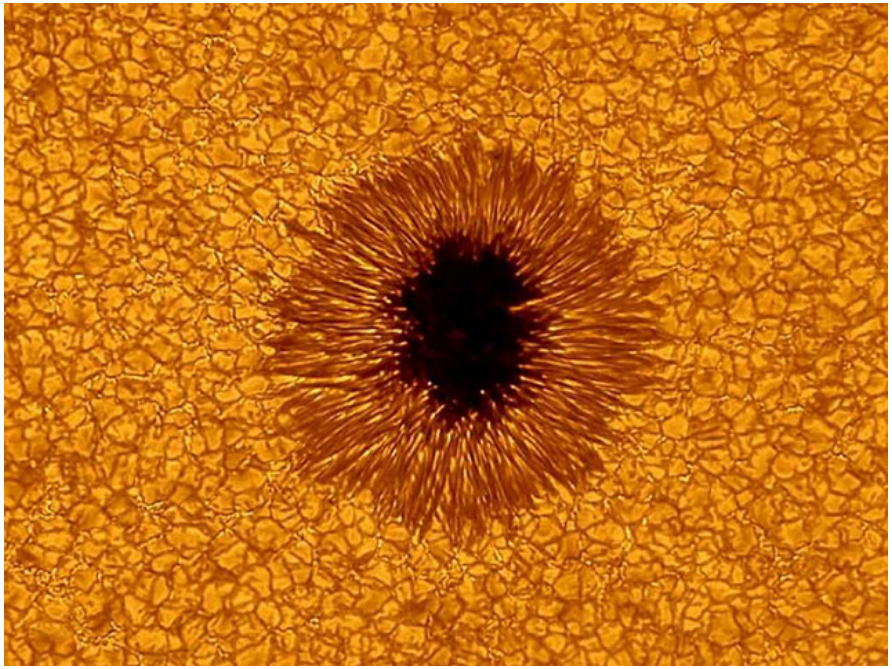
Dinamó



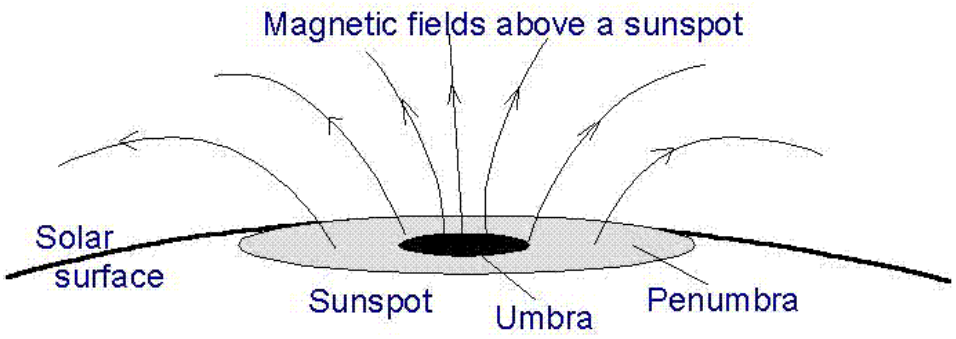
Cowling-tétel: stacionárius mágneses teret egyenletes forgás nem hozhat létre különböző sebességterek alakítják a folyamatot:

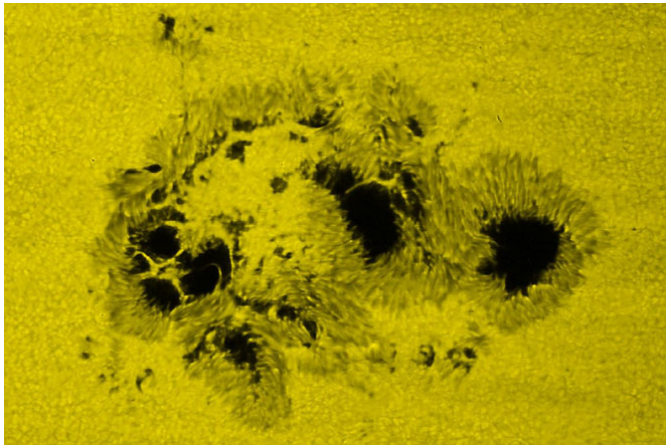
poloidális erővonalak $\xrightarrow{\text{diff. rotáció}}$ feltekeredés $\Rightarrow$ toroidális erővonalköteg

Napfoltok

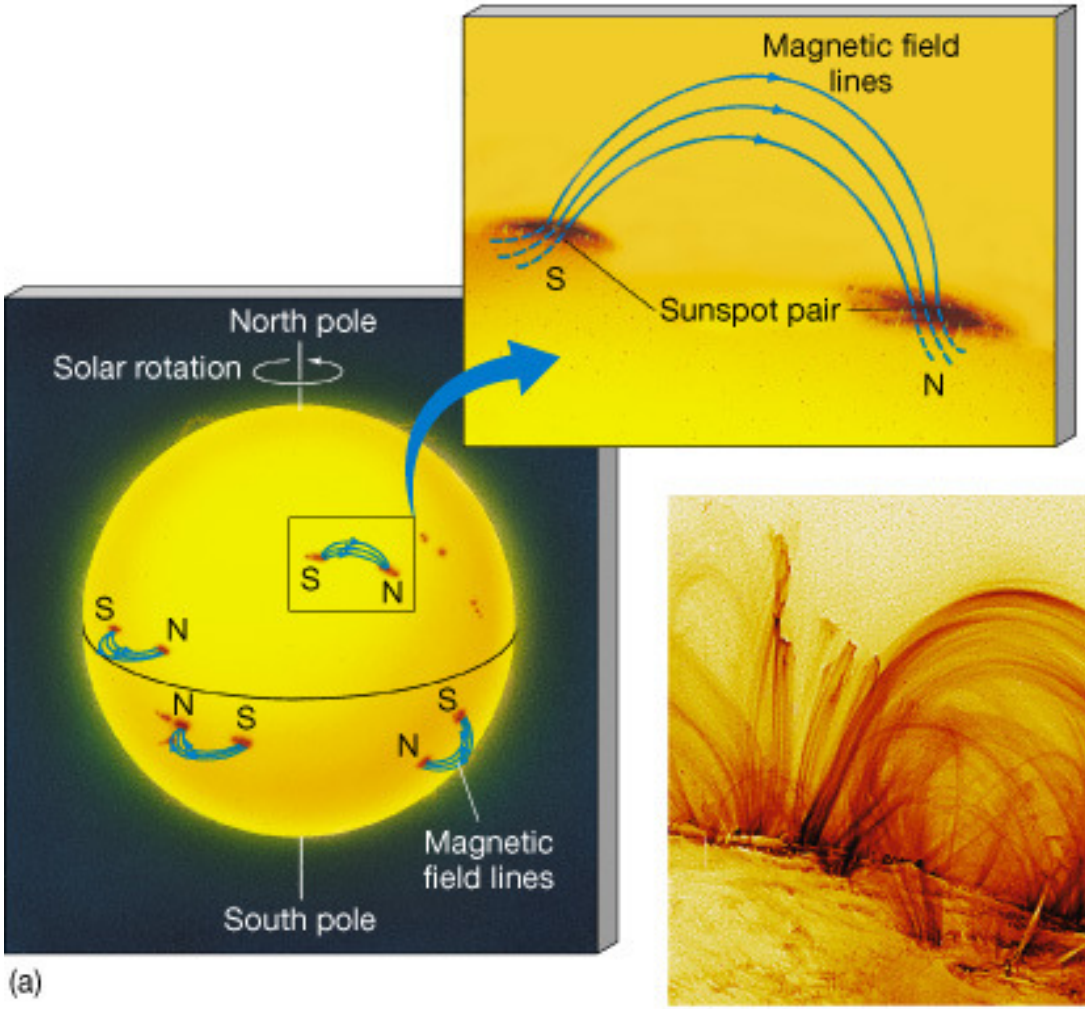


– mágneses erővonalkötegek
– részei: umbra, penumbra (szálas szerkezet)
– T_U=4300 K, míg T_{PU}=5500 K
– általában foltcsoportokba rendeződnek





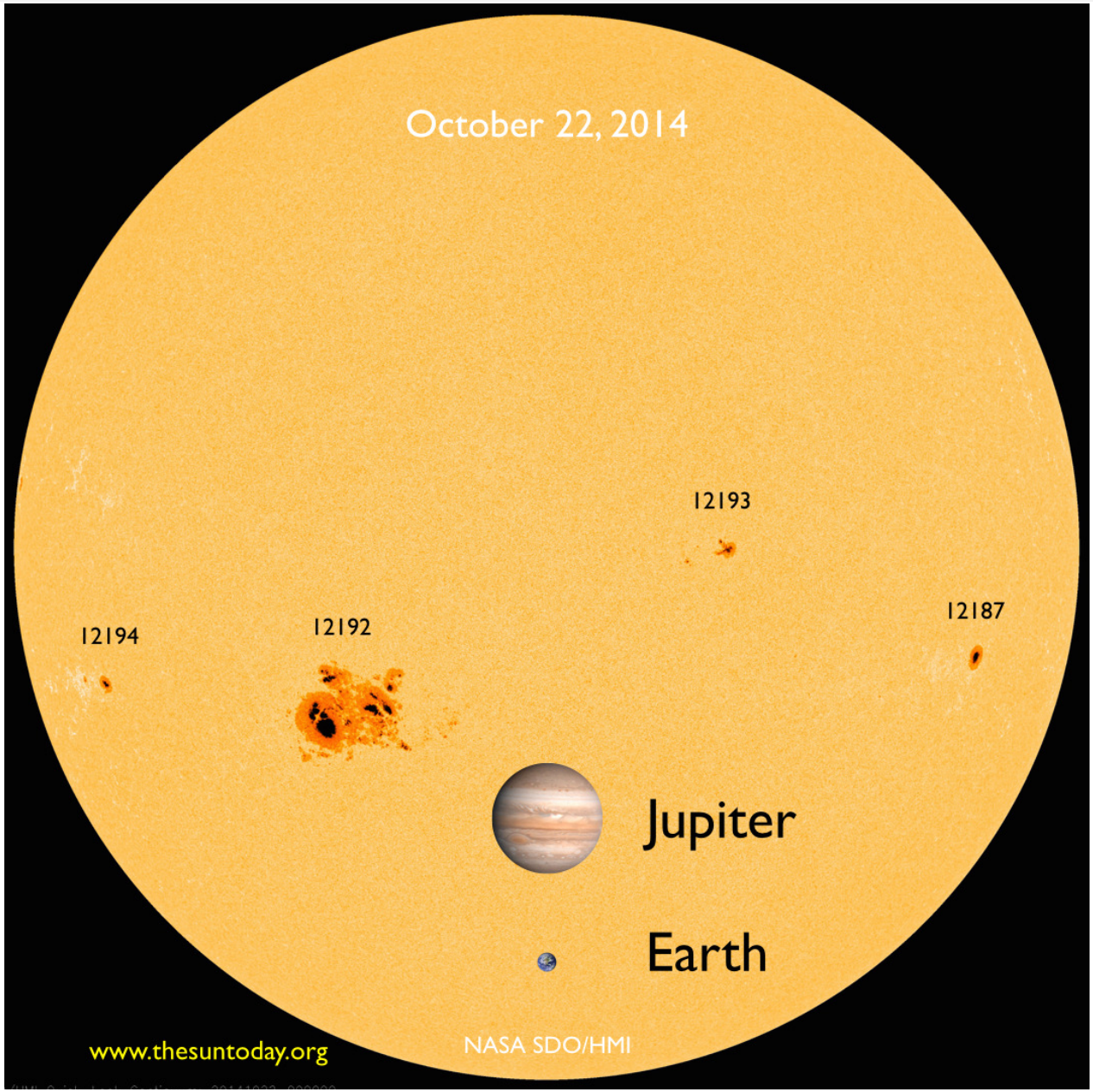
Napfoltcsoportok



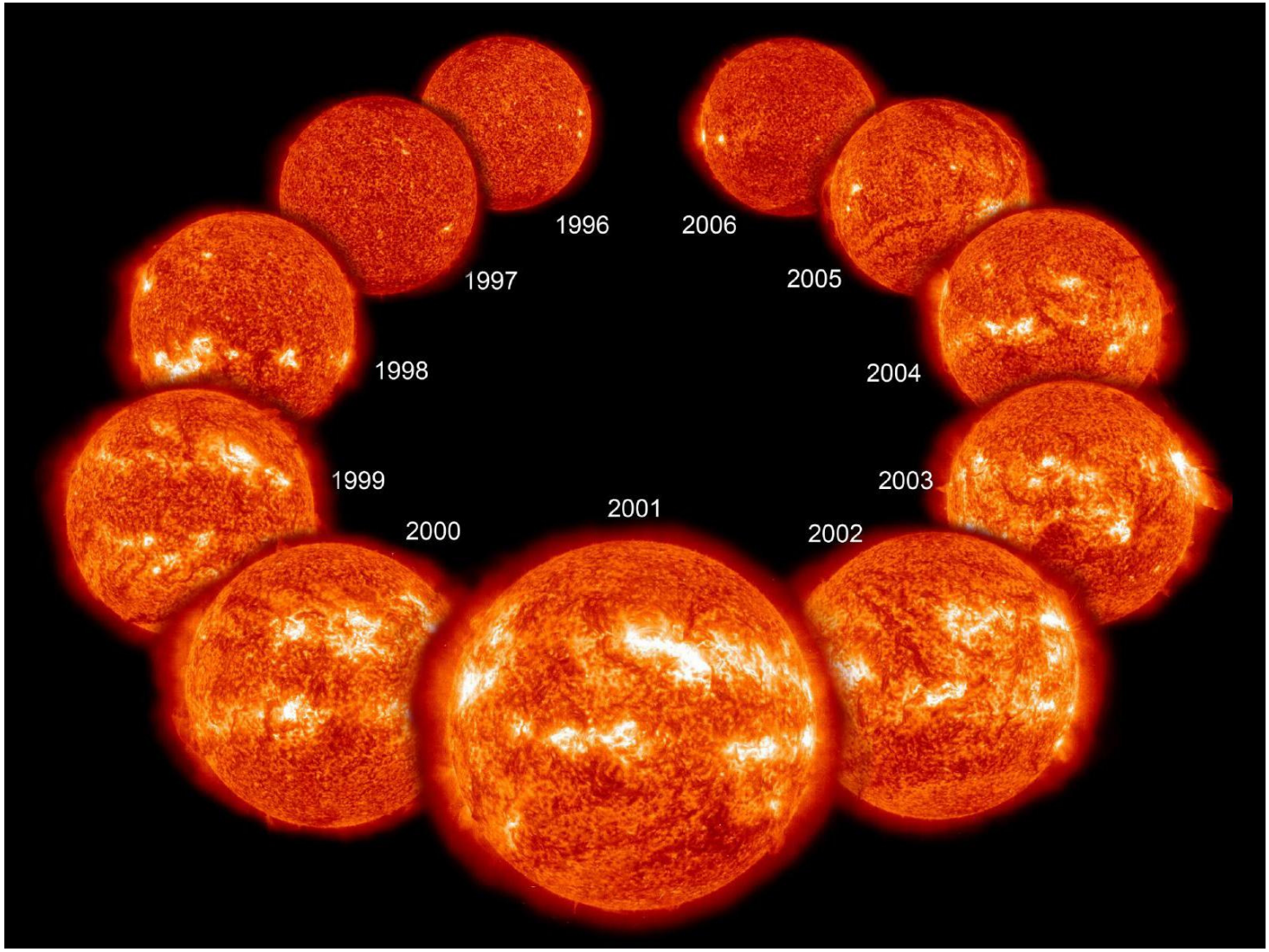
Hale-szabály:

- – ellentétes polaritású vezető–követő rész
- – egy ciklusban az egyik félgömbön az egyik polaritás vezet, a másik félgömbön az ellenkező
- – következő ciklusban a polaritásviszonyok megfordulnak

Napfoltcsoportok

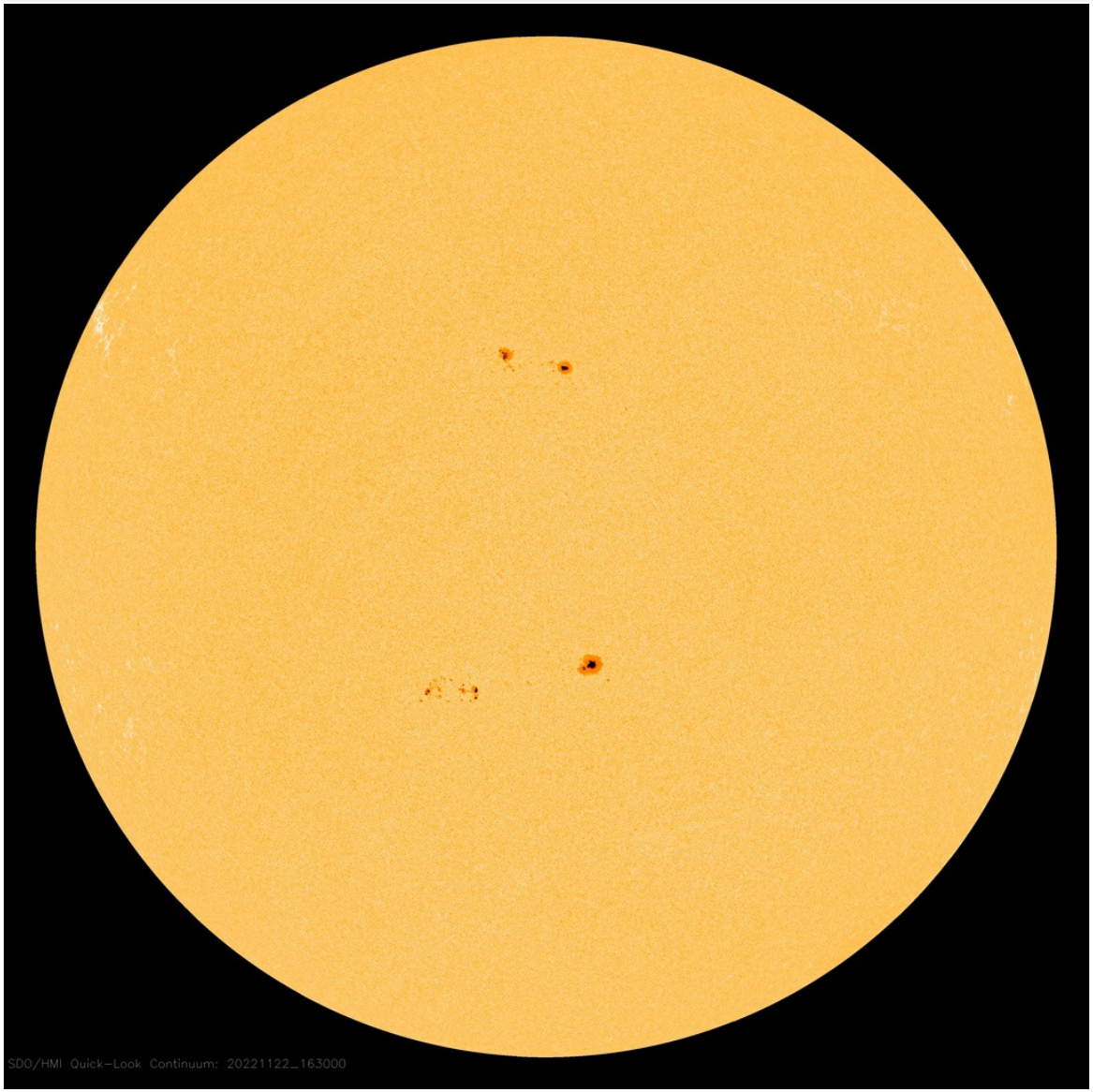


Napciklus



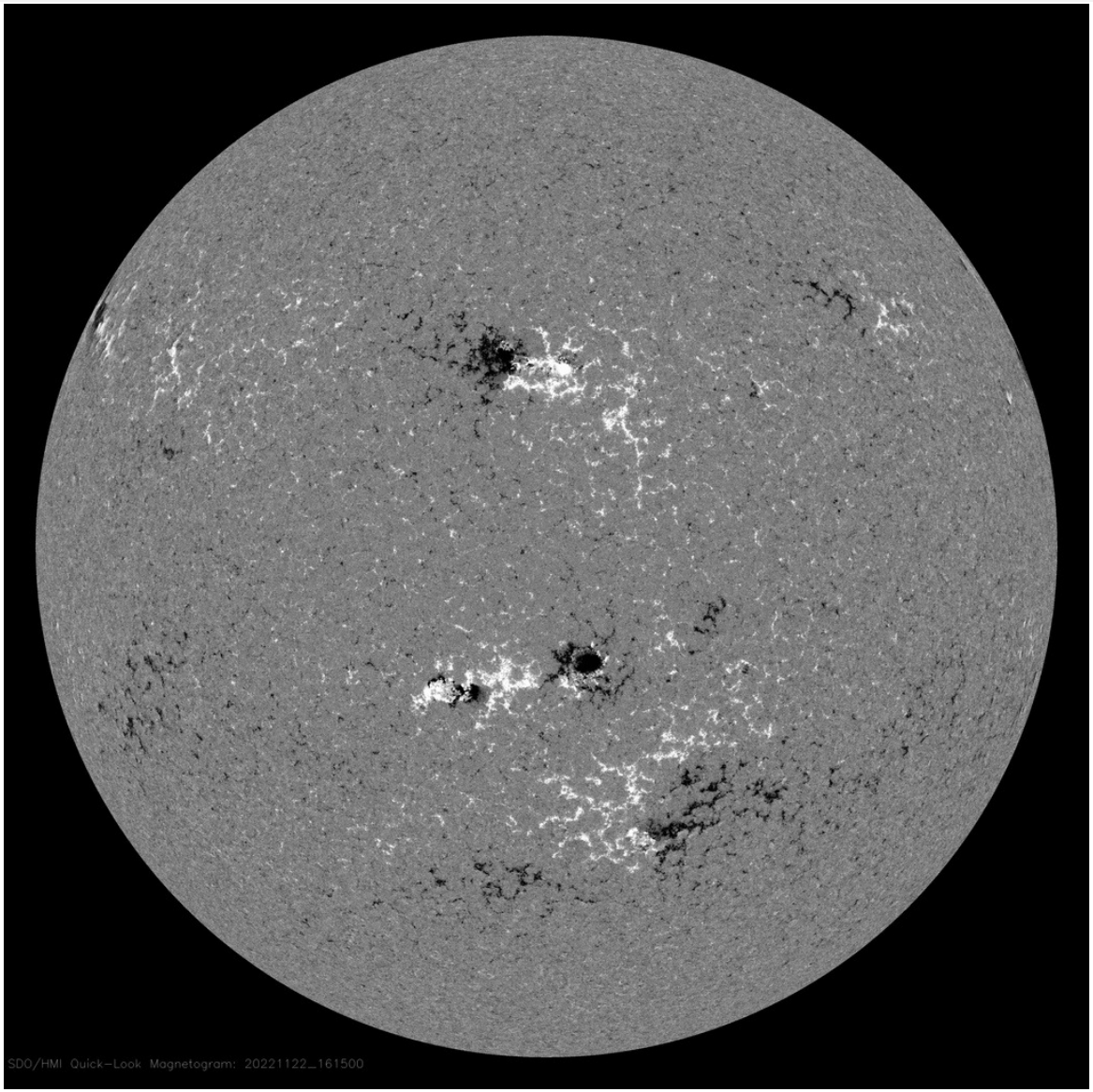
Átlag 11 éves naptevékenységi ciklus (min. $\longrightarrow$ max).

Napciklus



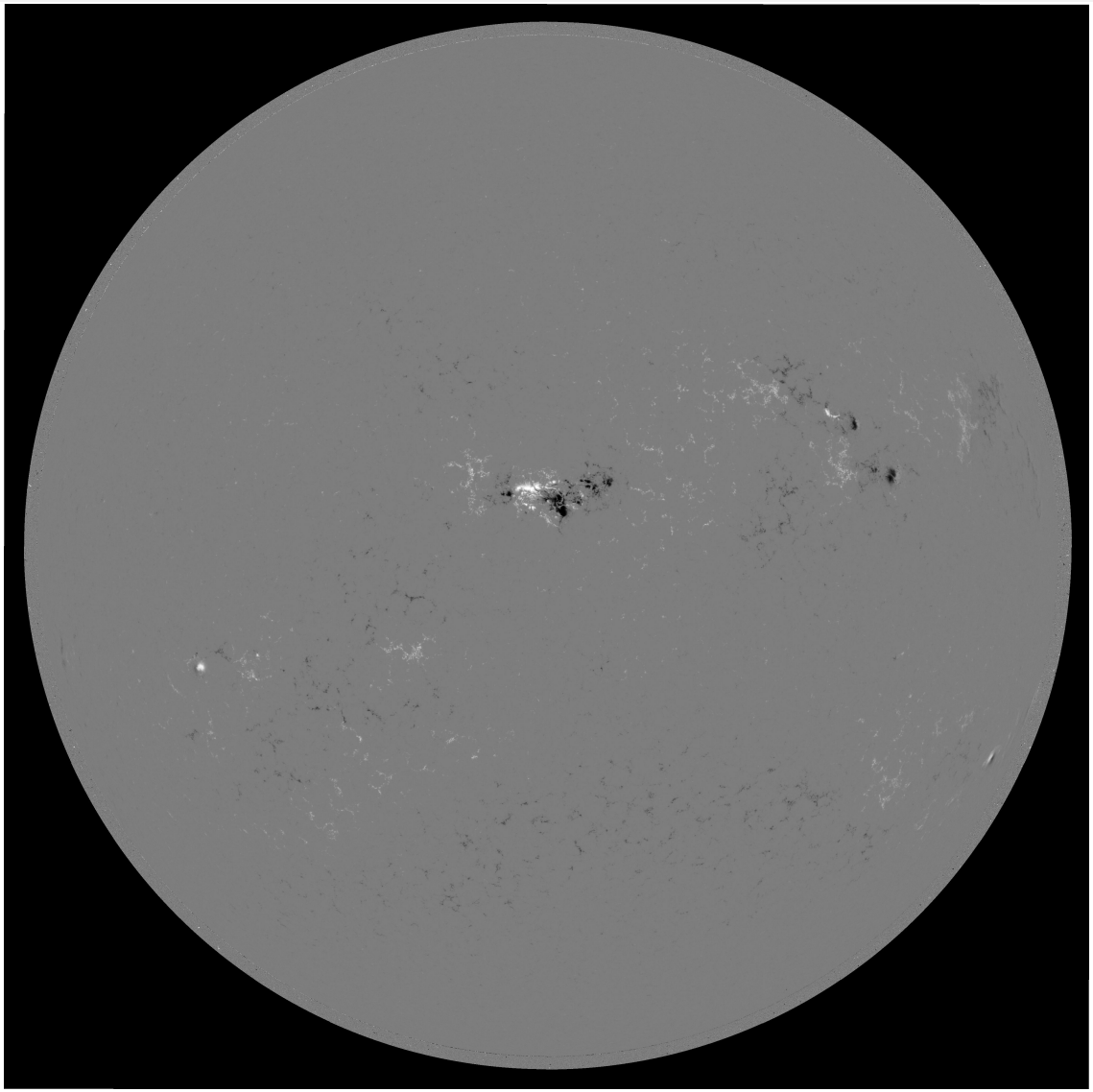
2022.11.22.

Napciklus



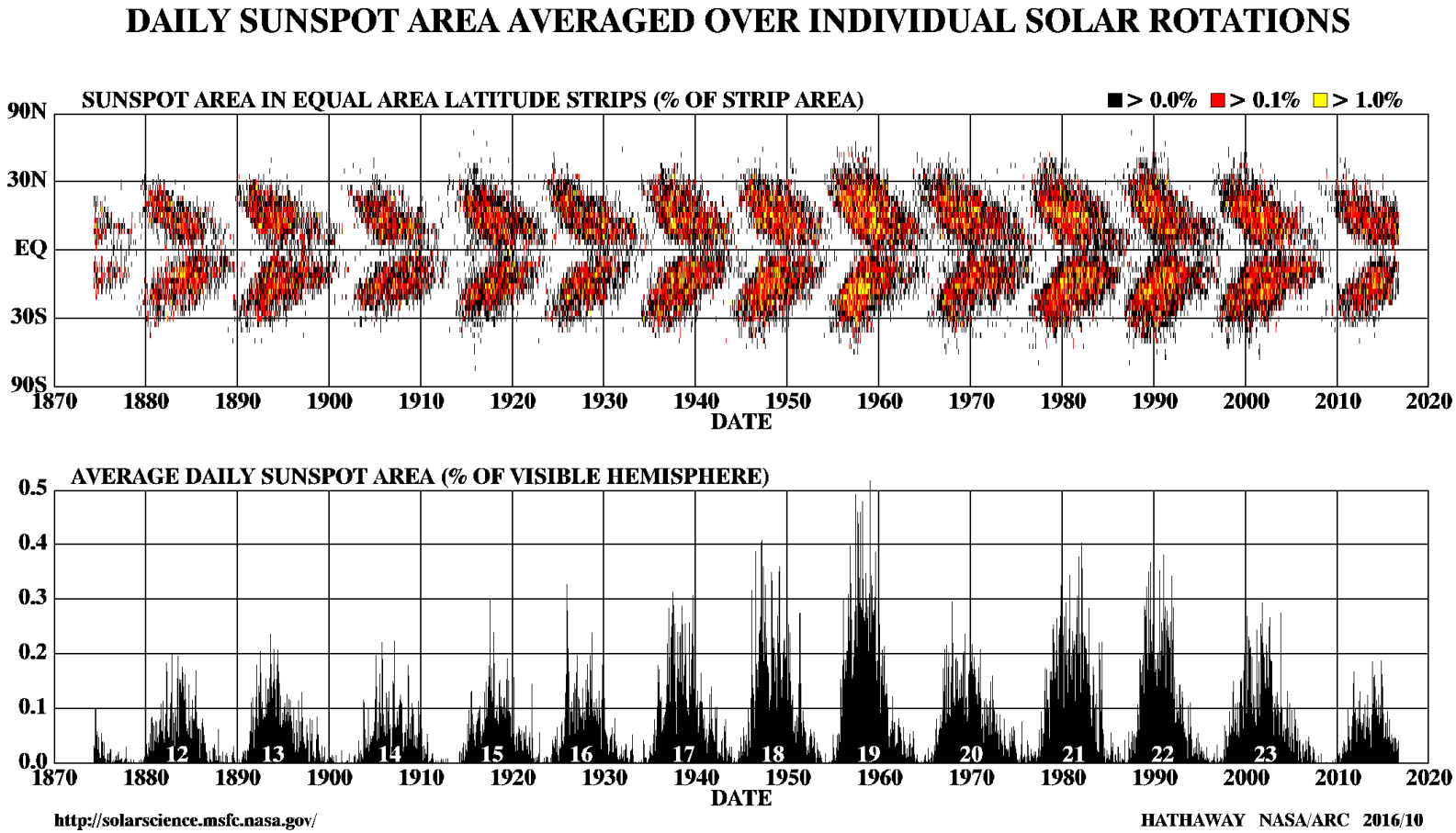
2022.11.22. (25. ciklus)

Napciklus



2012.11.22. (24. ciklus)

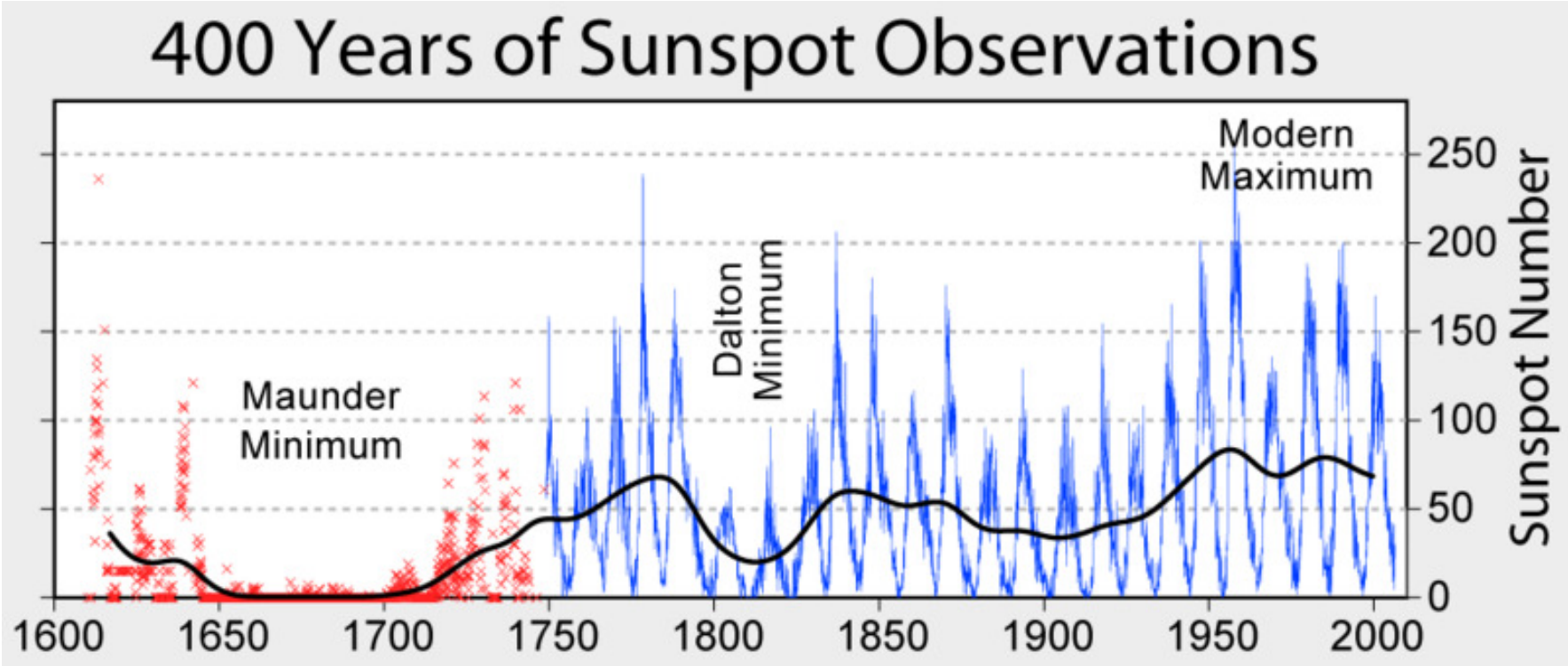
Napciklus



Változó ciklushosszak és erősségek, de mindig magasabb szélességekről az egyenlítő felé (Spörer-szabály).

Mágneses értelemben 22 éves ciklusok.

Napciklus



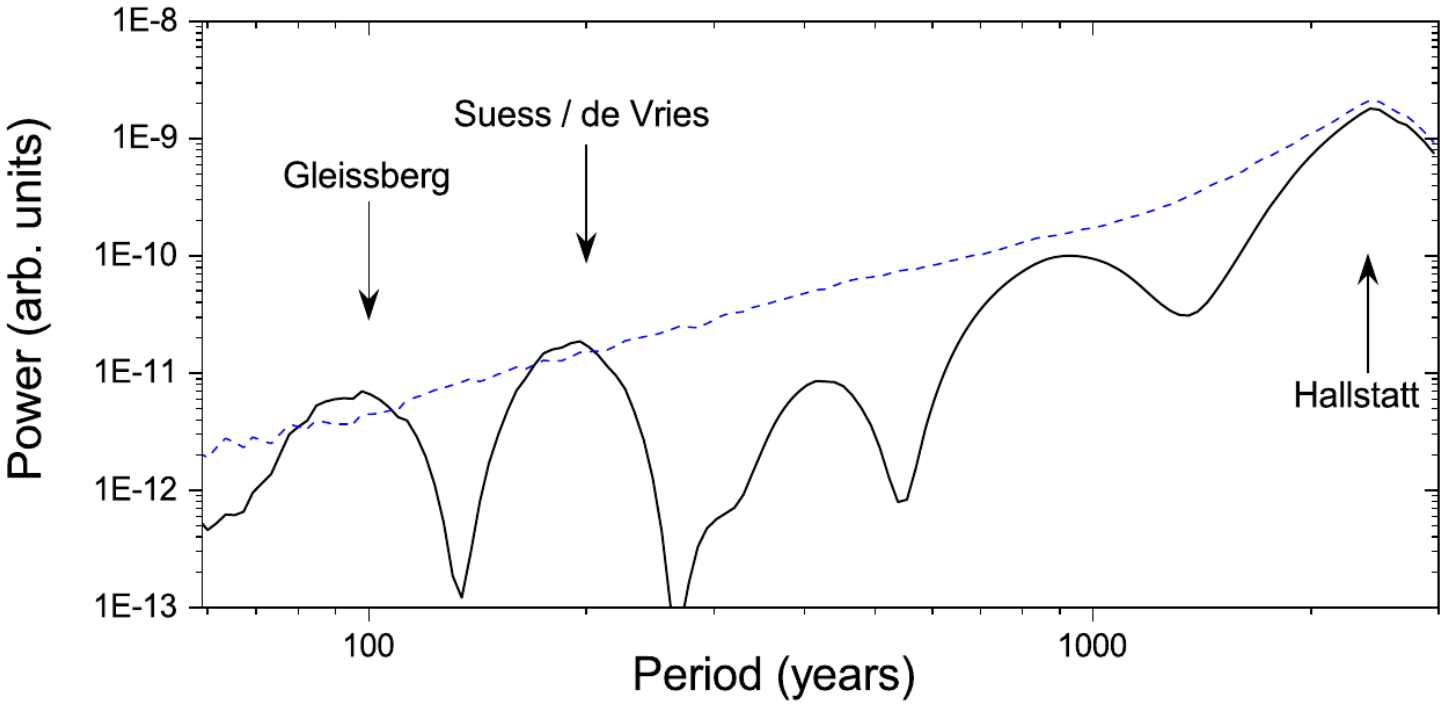
Napfolt relatívszám (Wolf-szám):

$$R = k(10g + f)$$

g: foltcsoportok száma, f:foltok száma, k: korrekciós faktor

Kis jégkorszak (Maunder-minimum)

Napciklusok – hosszabb távúak



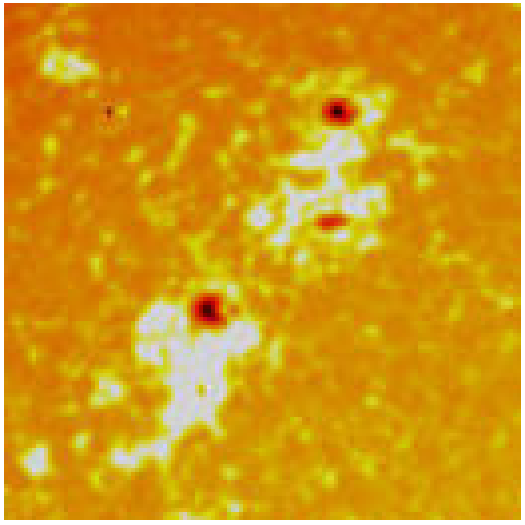
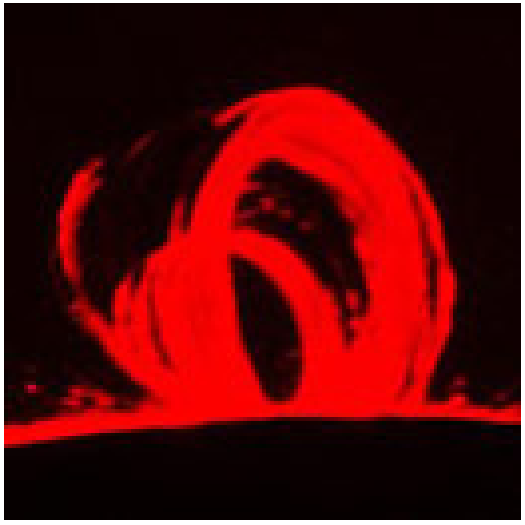
(Biswas et al., 2023, *Space Sci. Rev.*, **219**, 19)

Gleissberg: 60–140 éves periódus

Suess/ de Vries: a nagy minimumok periódusa, magasabb aktivitás idején lehetetlen kimutatni

Hallstatt: tulajdonságai ismeretlenek, eredete: Nap, habár geomágneses eredet sem kizárt

Fáklyák, protuberanciák


Fáklyák:

– a mágneses fluxuscsövek laza, fényes szerkezetté állnak összea szupergranulációs cellák határán

– megfigyelhetők: a fotoszférában (fototszférikus fáklyák), a napperem környékén látszanak fényesebbnek

Protuberanciák:

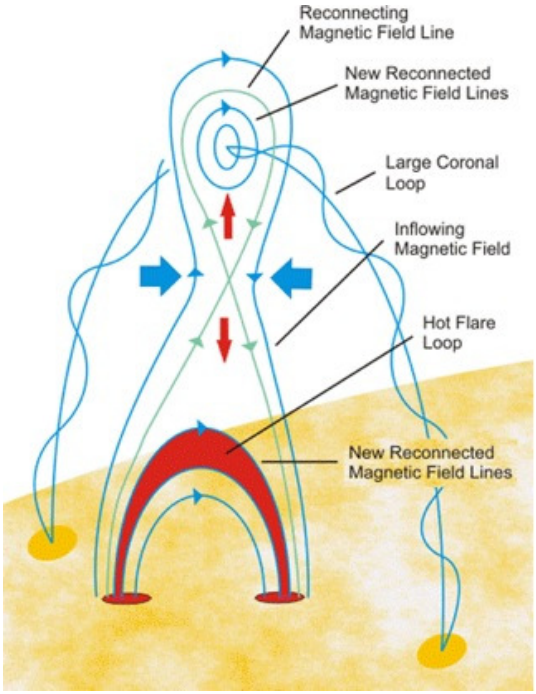
– hídszerű alakzatok a koronában: a mágneses tér megtartja a plazmát, mely láthatóvá teszi a mágneses teret

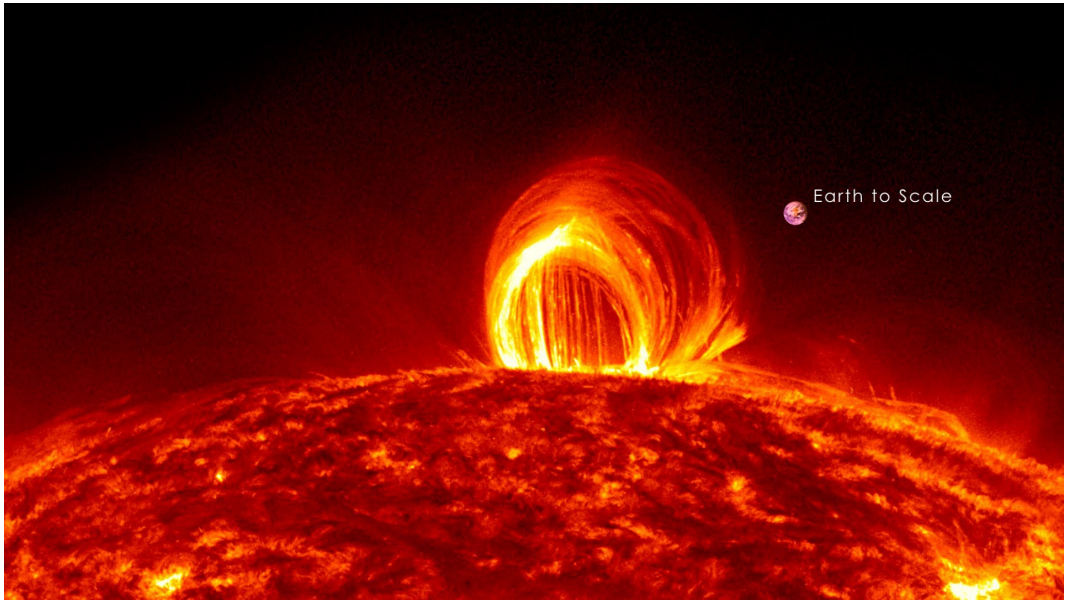
– nyugodt alakzatok (hetekig is élhetnek), de vannak robbanó protuberanciák (ha a stac. állapot megszakad) is

– a korongon sötétebbek = filament (pl. zéró filament: különböző mágneses terek határán)

– megfigyelhetők: a koronában (adott hullámhosszon)

Flerek





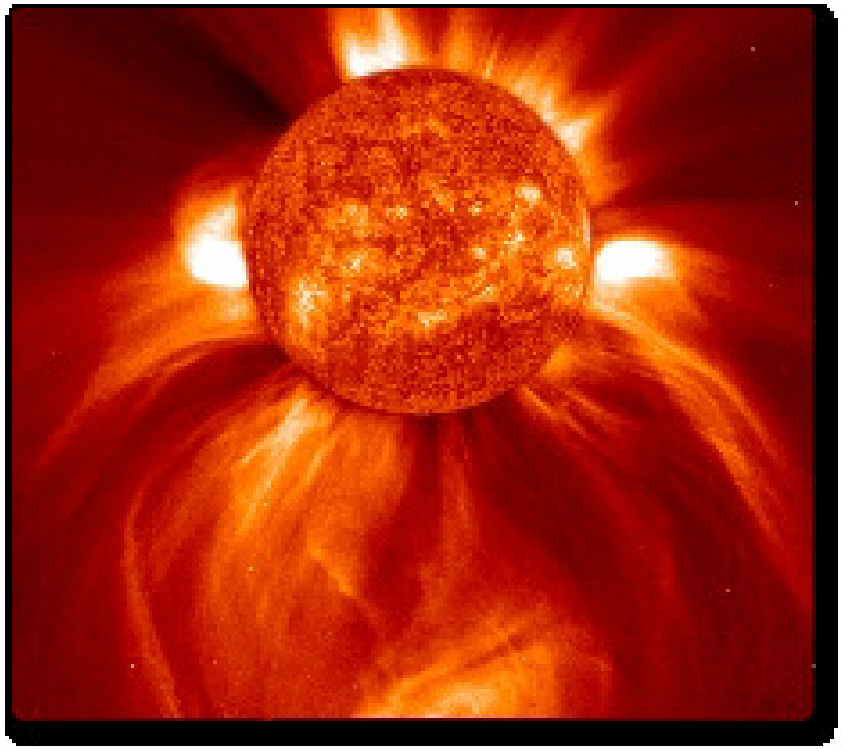
– aktív vidékek fölött a kromoszférában

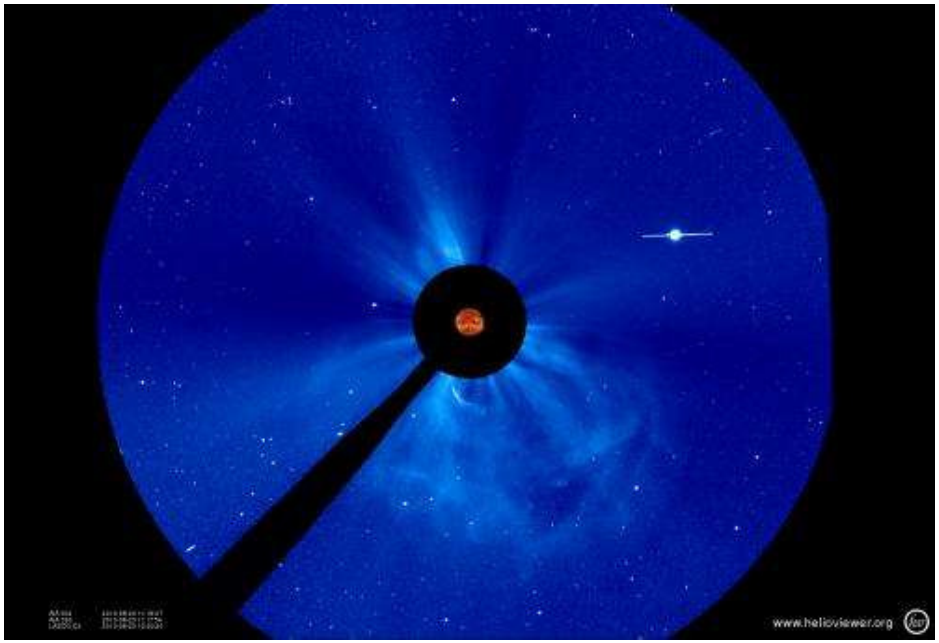
– explozív esemény ($10^{21} - 10^{26}$ J energia)

– instabil mágneses konfiguráció $\longrightarrow$ energiafelszabadulás, részecskék mozgási energiája, alsó atmoszféra felfűtése: felfénylés, sugárzás
– ellentétes irányú, egymáshoz nagyon közel kerülő mágneses erővonalak rekonnekciója,

– két fajta kidobott plazma: szoláris kozmikus részecskék (órák alatt elérhetik a Földet) & CME (korona-anyagkidobódás)
– osztályozásuk energiájuk alapján (X, M, C, B) 1 CsE-re mért intenzitás alapján

CME (Coronal Mass Ejection) - Korona-anyagkidobódás



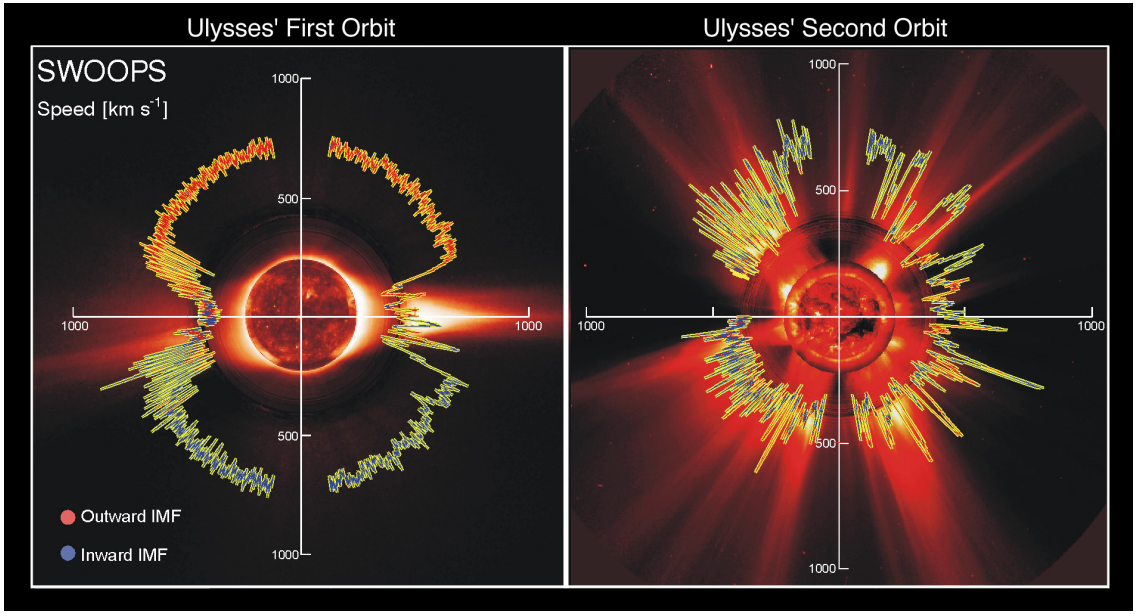


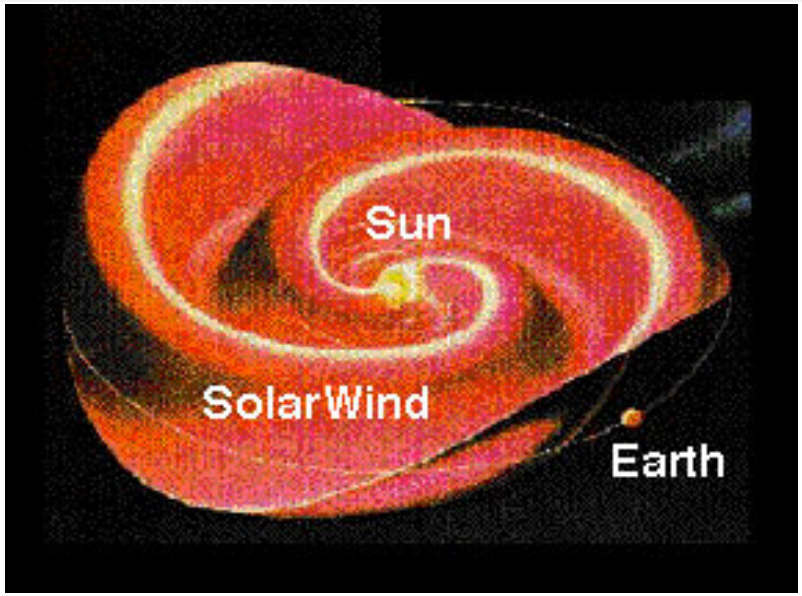
– a flerek kísérőjelenségei (a Lorentz erővel már semmi sem tart egyensúlyt)
– a mágneses fluxuskötegek elszakadnak, majd óriásira fúvódva távoznak a Naptól (legnagyobb összefüggő alakzatok)
–összetartó erő: nem a felületi feszültség, hanem a mágneses tér

– átlagos CME: kb. 1 milliárd tonna anyag kidobódása

– sebessége: kb. 20–1200 km/s

Napszél



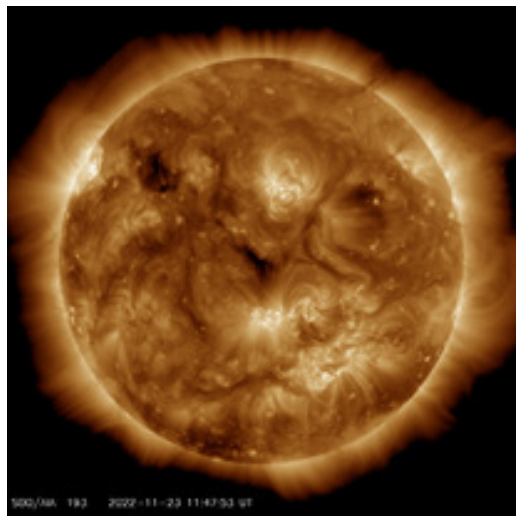


– a koronából távozó plazmaáram

– főként protonok, elektronok, de ionizált He is (a magas T miatt)

– sebessége alacsony szélességeken 400 km/s, magasabb szélességeken nagyobb

– É-i – D-i mágneses erővonalak ellentétes irányba mutatnak, ezeket áramréteg (neutrális réteg) választja el, balerinaszoknya-alakzat

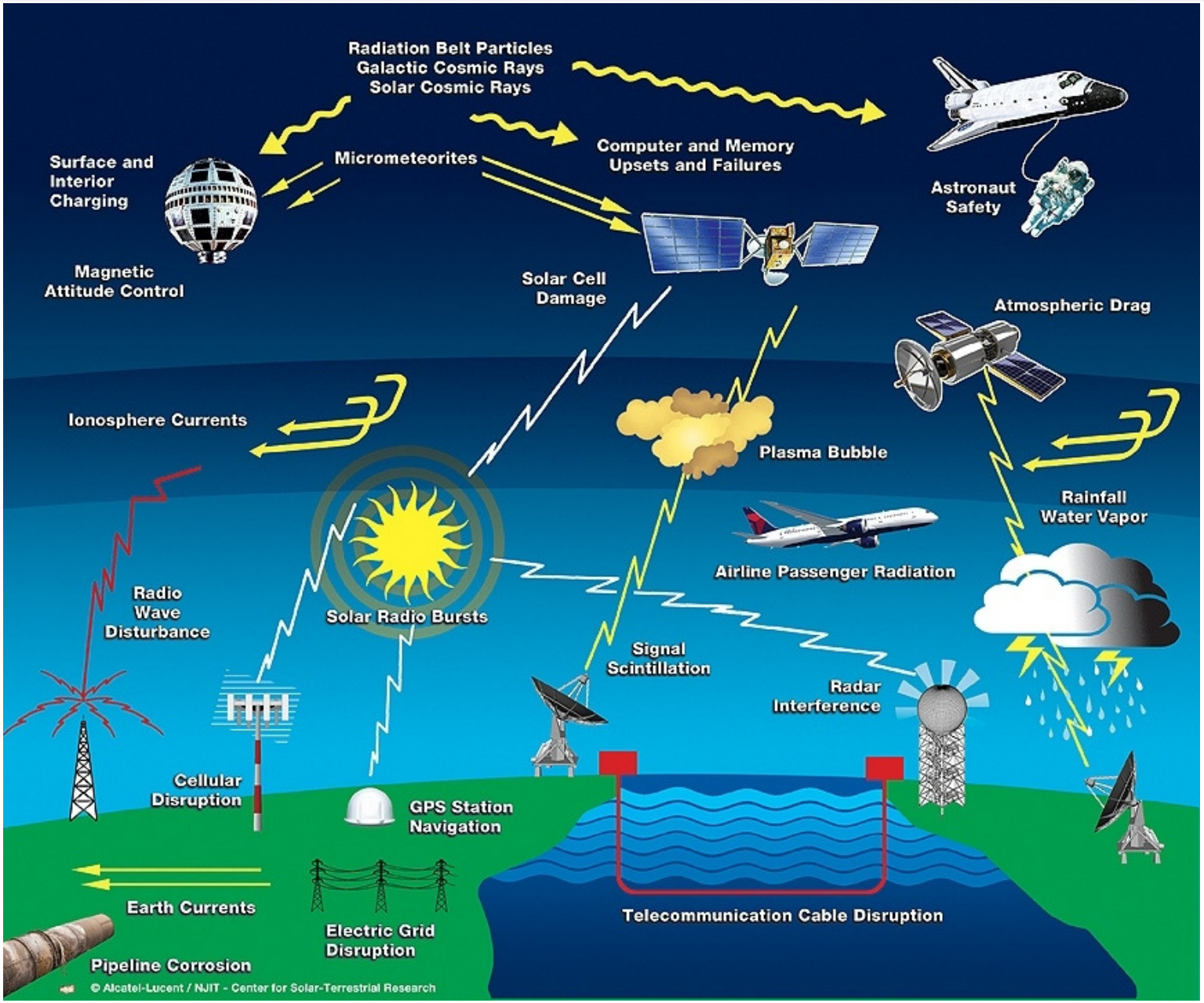


Poláris koronalyukak:

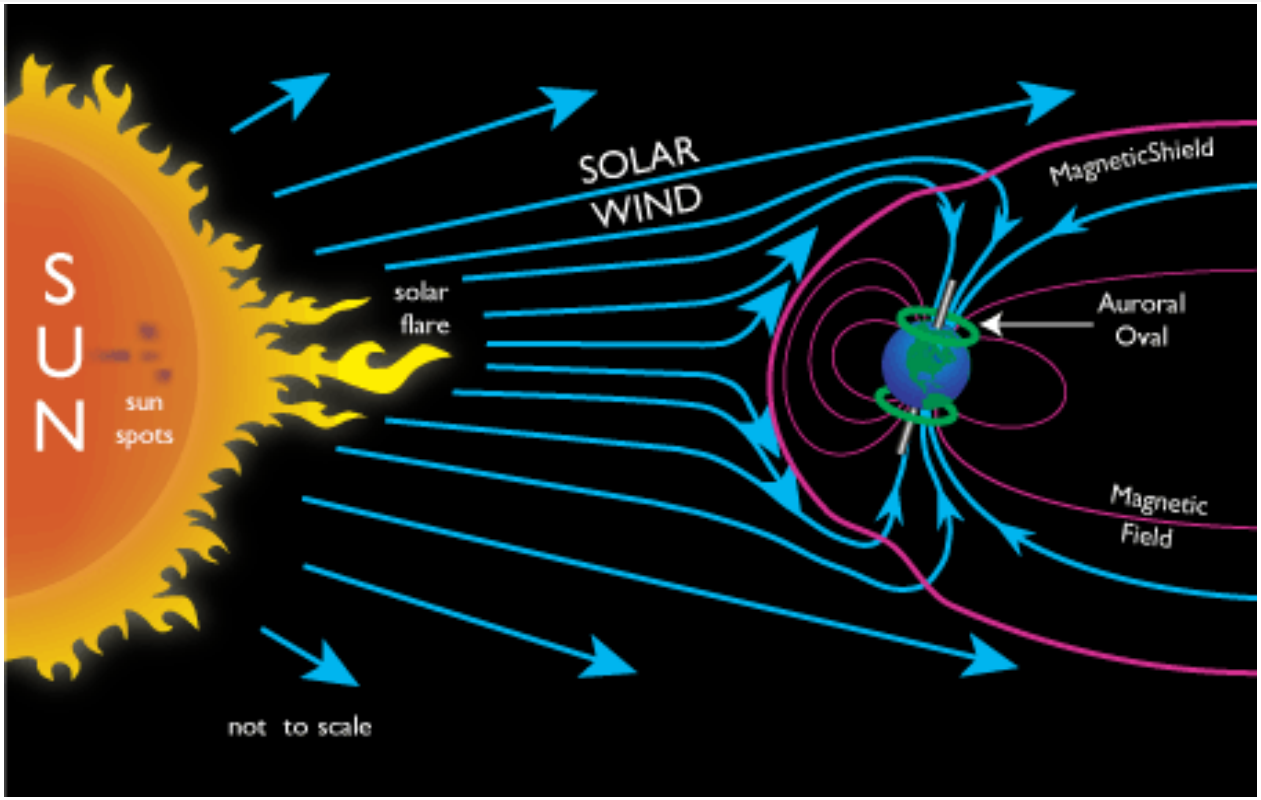
– nyílt mágneses tér nagy területen, a napszél akadálytalanul áramlik kifelé és a nyaláb együtt forog a Nappal (gyors együttforgó áramok)

– sebességük: 600 km/s

Napkitörések hatásai



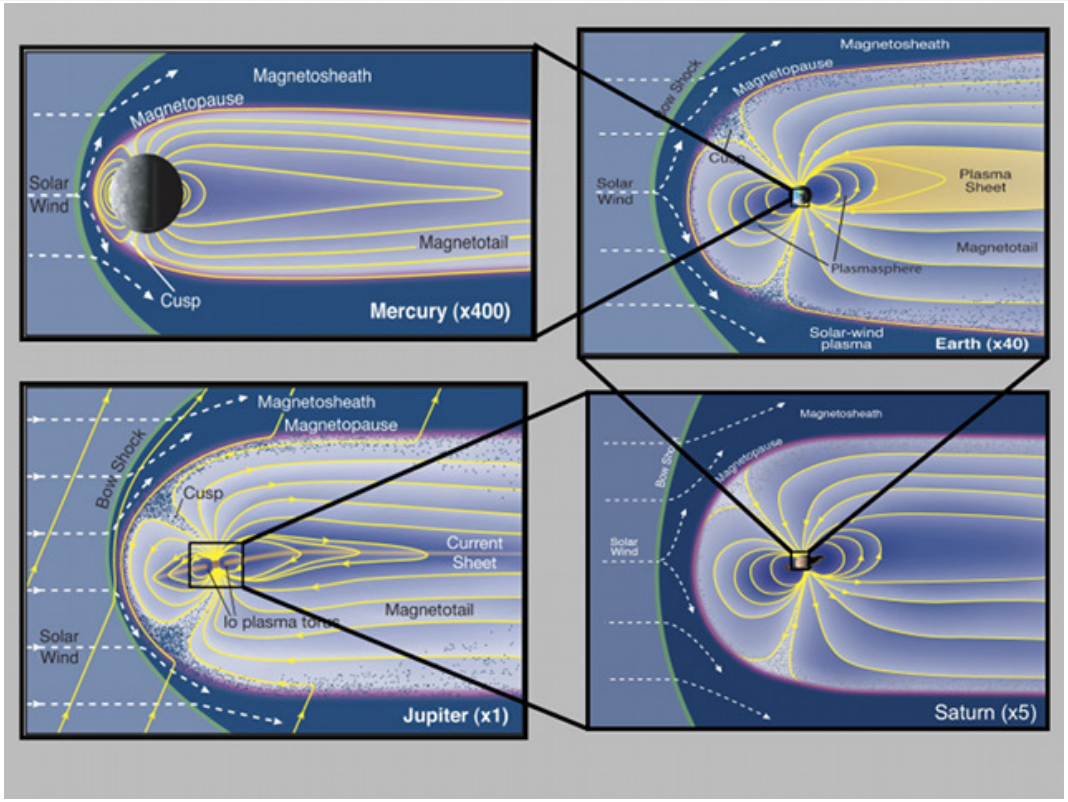
Magnetoszféra





– magnetopauza: magnetoszféra – interplanetáris tér elválasztója
– fejhullám, lökéshullám: lelassult napszél
– mágneses burok: fejhullám ̧magnetopauza között
– cusp: póluskörnyéki tölcsérszerű nyílás (auróra)
– plazmaszféra: közel dipól, a Földdel együtt forog
– plazmaréteg: a bekerült plazma egy része itt található
– mágneses csóva: Nappal ellentétes oldalon, elnyúló, lobogó alakzat

Bolygó magnetoszférák



Belső bolygók:

– Földé (olvadt mag): legjelentősebb mágneses tér

– Merkúr (ismeretlen eredet), Vénusz (indukált tér): gyenge mágneses tér

– Mars: nagyon gyenge terű

Külső bolygók:

– Jupiter: legjelentősebb mágneses tér (10 x földi mágn. tér)

– Szaturnusz, Uránusz: forgási & mágneses tengelyek iránya közel egybeesik, gyengébb mágneses tér

Kozmikus sugárzás

Nagyenergiájú részecskék fluxusa:

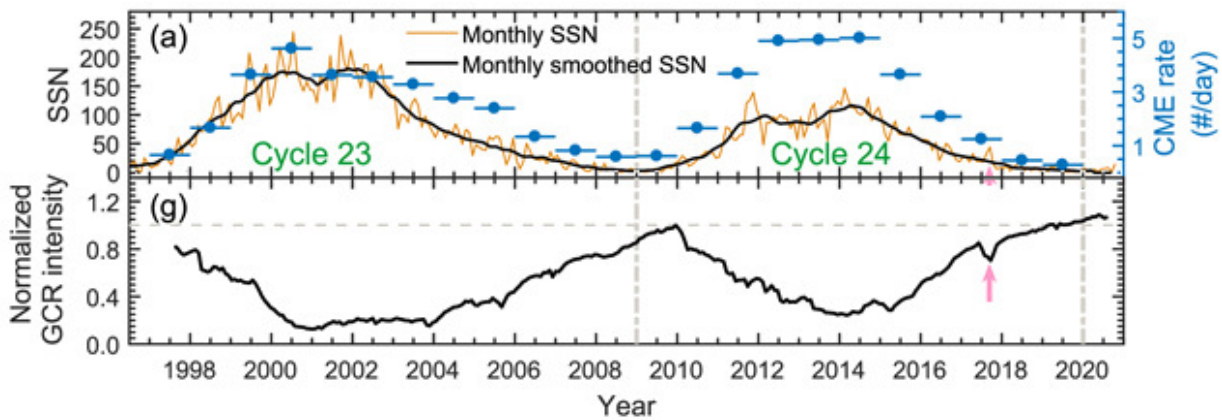
– **szoláris**: forrása: napkitörések, MeV-es vagy GeV-es tartomány

– **galaktikus**: protonok, elektronok, legnagyobb energiájú komponens

– **anomális**: az intersztelláris tér atomjai beszivárognak a helioszférába
a hélioszféra neutrális atomjai ionizálódnak, majd a napszél magával ragadja őket, melynek során felgyorsulnak és a napszél végződési frontján eltérítődnek, s visszatérnek a belső hélioszférába

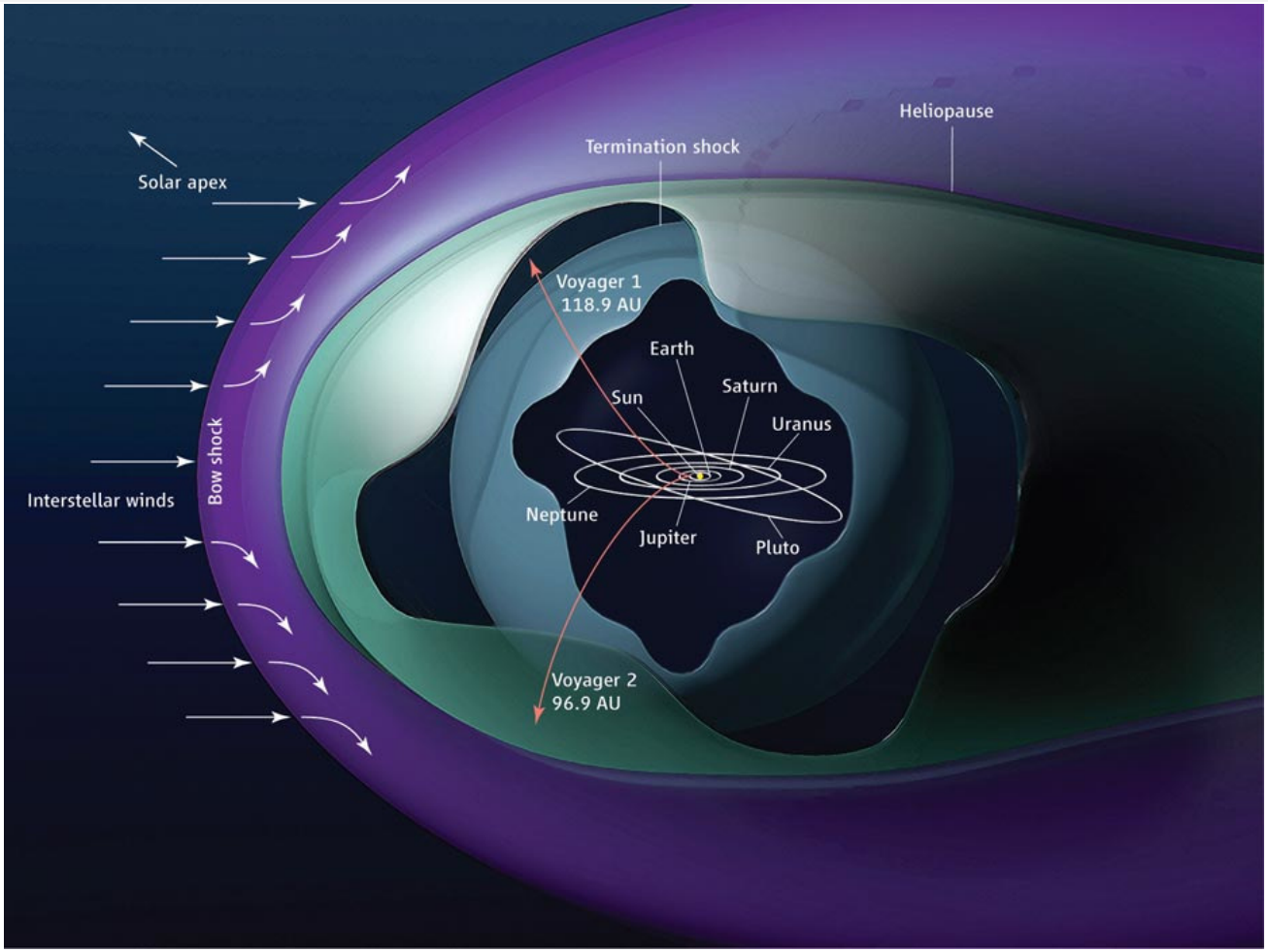
Forbush-effektus:

A napszél és a kozmikus sugárzás kölcsönhatásba lép egymással. A nagyobb intezitású kifelé irányuló plazmaáram hatékonyabban véd a kozmikus sugárzás ellen.



(Shuai Fu et al., 2021, *ApJS*, **254**, 37)

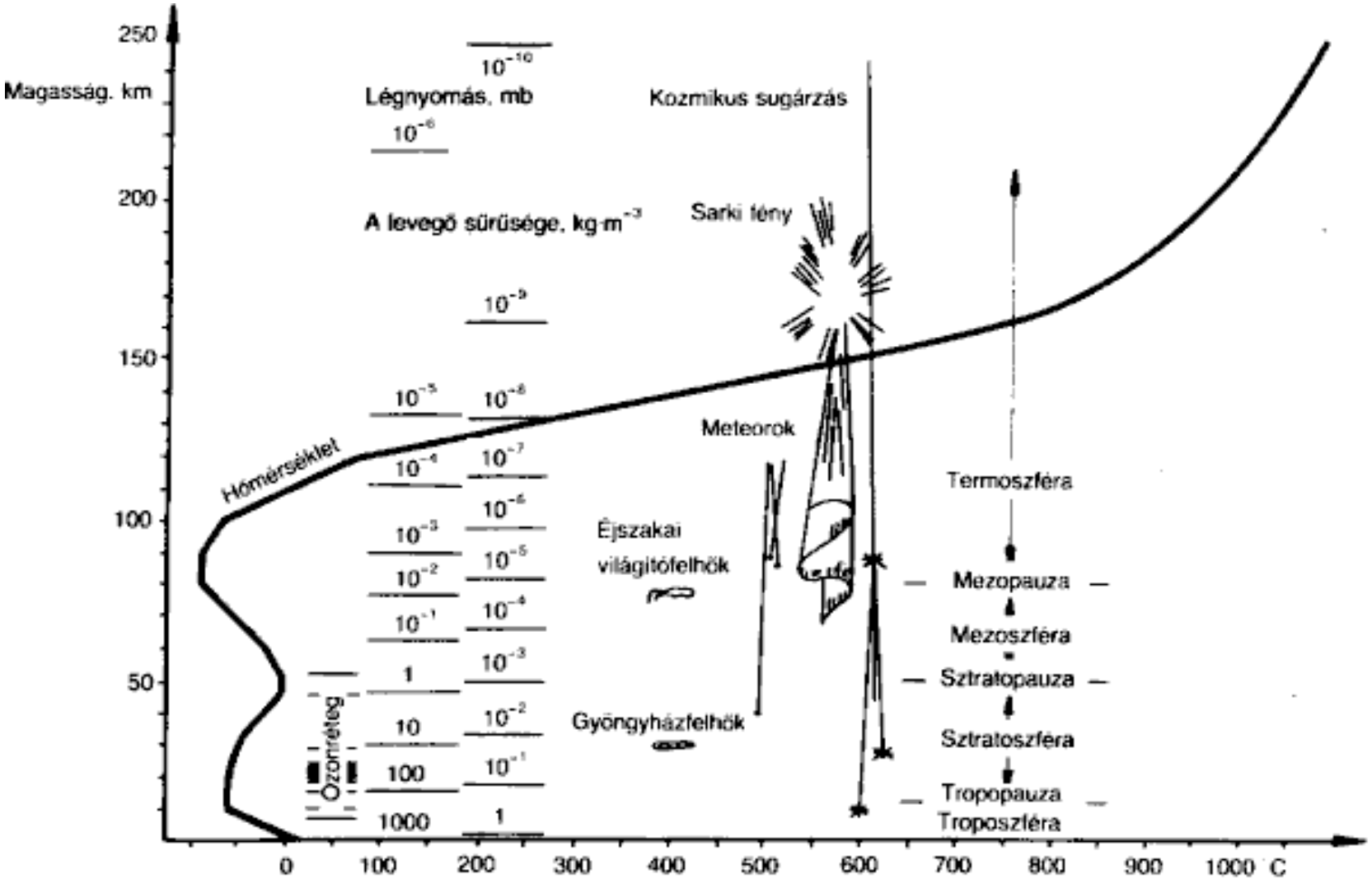
Hélioszféra



– kialakítója: a napszél & intersztelláris közeg kölcsönhatása
– héliopauza: elválasztja az intersztelláris gáztól a hélioszférát
– 121 CsE távolságra a Naptól: a Naprendszer plazmakörnyezetének határa

A Föld ionoszférája

az elektronsűrűség profilja:



70 km fölött inkább ionizált
vizsgálata: jobbára ionoszondával

Űridőjárás

a Nap hatásait és a bolygók azokra adott válaszait vizsgálja rövidtávon

(űrklíma): hosszútávon u.e.

Szoláris hatások:
TSI (Total Solar Irradiance) átlagértékei 1365-1367 W/m^2, értelemszerűen naptevékenységi maximum idején nagyobb
flerek, CME-k
napszél

Földi válaszok:
– Kp index (geomágneses aktivitás planetáris indexe)
– Dst index (gyűrűáram erősségét jellemzi – mely geomágneses vihar esetén megerősödik)

Néhány link

Angol nyelven:

http://www.spaceweather.com

http://sdo.gsfc.nasa.gov/

https://sohowww.nascom.nasa.gov

Magyar nyelven:

http://www.csillagaszat.hu/

http://www.mcse.hu/

http://fenyi.solarobs.csfk.mta.hu/

http://facebook.com/napkutatas

http://konkoly.hu/