

El Sol i la seva activitat

Àngels Aran
Universitat de Barcelona

Astronomia: Un viatge des del Sol fins als límits de l'univers

Universitat Catalana d'Estiu

Prada, Conflent, 17 d'agost de 2022

ADVERTIMENT. Tot el material baixat del Campus Virtual d'aquest és propietat dels professors del curs. Només se'n permet l'ús per al seguiment del curs. No és permesa cap distribució fora del context d'aquest curs.

AUTORIA. El material d'aquest curs en powerpoint ha estat realitzat/recopilat pels professors Blai Sanahuja, Àngels Aran, Marc Ribó i Carme Jordi, del departament de Física Quàntica i Astrofísica de la Universitat de Barcelona.

Contingut:

1. Introducció
2. Propietats bàsiques i estructura del Sol
3. Atmosfera solar
4. Activitat solar i Tempestes Solars




Temps espacial: (*Space weather)

És l'estat físic dels entorns
espacials naturals

La disciplina científica associada
— la **Meteorologia espacial** —
pretén, mitjançant l'observació,
l'anàlisi i la modelització

- Comprendre i **predir** l'estat de l'activitat solar, dels entorns interplanetari i planetaris, i de les pertorbacions que els afecten, i
- Analitzar en temps real i **preveure** els possibles efectes en els sistemes biològics i tecnològics

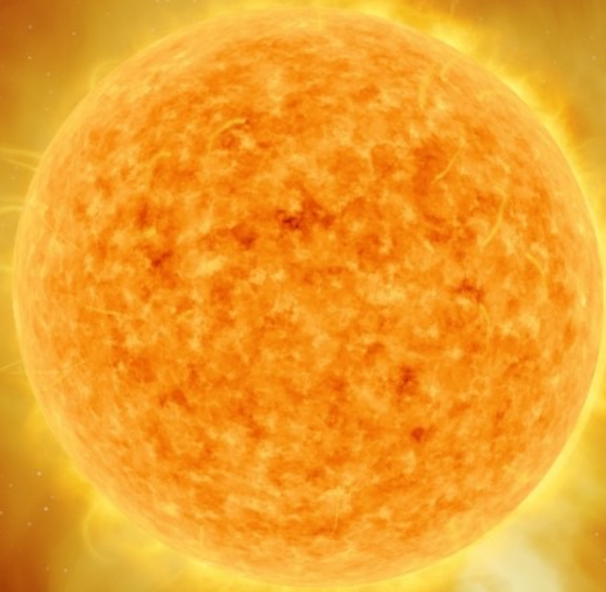


Física Solar : És la branca de la física que estudia el Sol

Física Helioesfèrica o Heliofísica: És la branca de la física que estudia l'activitat del Sol i com afecta a l'heliosfera (la part de l'espai dominada pel Sol)

Física de l'espai (*space physics*): És la branca de la física que estudia el medi interplanetari.

L'escenari Sol – Terra



Activitat solar

Espai interplanetari

Magnetosfera
de la Terra



$1 R_{\oplus} = 6371 \text{ km}$

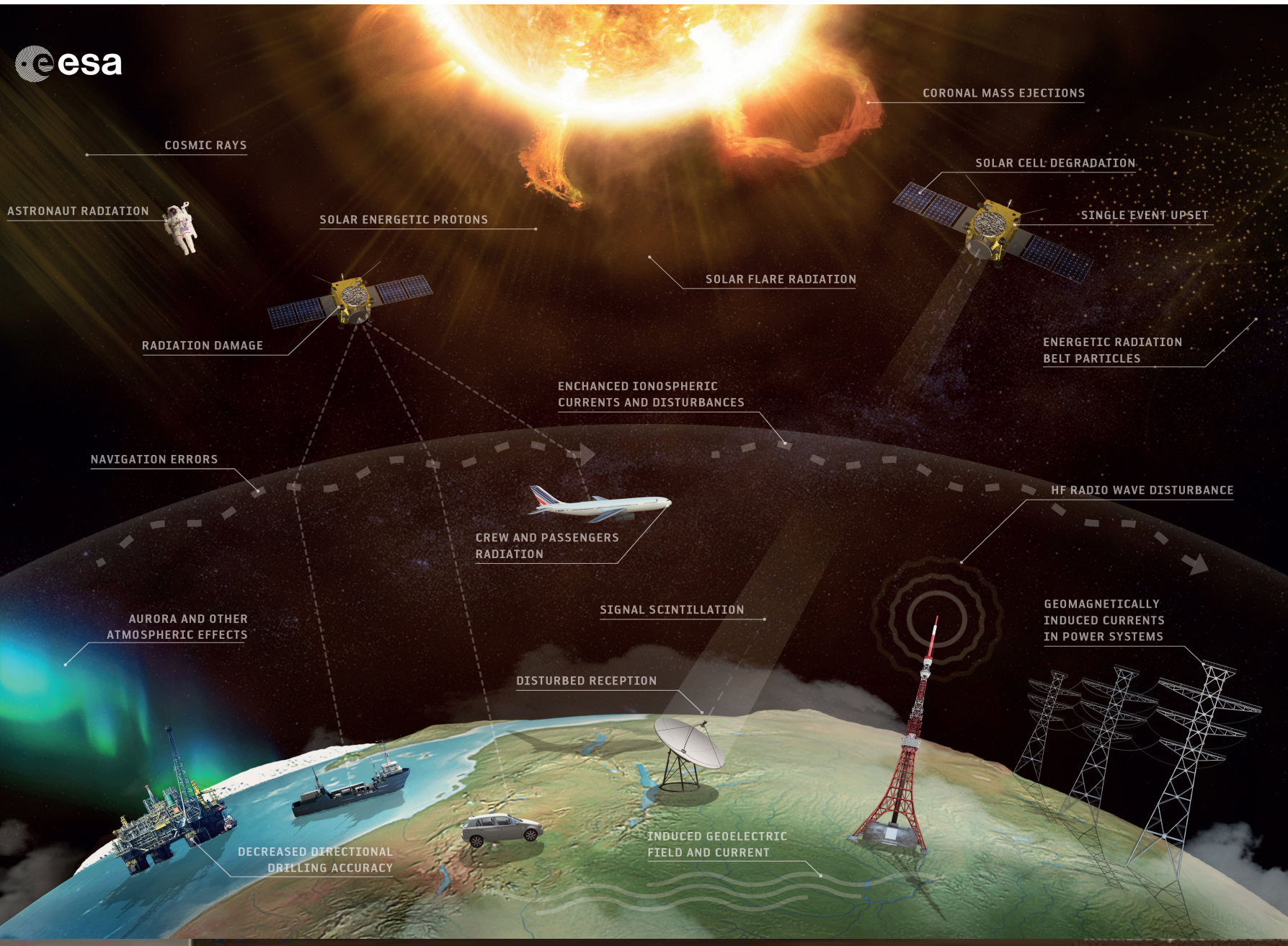
$1 R_{\odot} = 109 R_{\oplus}$

$1 \text{ au} = 215 R_{\odot} (149,6 \cdot 10^6 \text{ km})$

Si la Terra fos un pèsol, el Sol seria una esfera d'1 metre a 220 metres (unès dues vegades el costat d'una illa de l'Eixample)

Elements més rellevants de l'escenari Sol-Terra

- Entorn magnètic de la Terra (magnetosfera)
- Atmosfera solar i camp magnètic solar
- Vent solar i camp magnètic interplanetari
- **Activitat solar** (la que *més afecta* al temps espacial)
 - **Fulguracions**
 - **Ejeccions de massa coronal (CME)**
 - **Partícules energètiques (SEP)**Durada: d'unes hores a uns quants dies
- Efectes: apagades radio, tempestes geomagnètiques i radiació de partícules



CORONAL MASS EJECTIONS

COSMIC RAYS

ASTRONAUT RADIATION



SOLAR ENERGETIC PROTONS

SOLAR CELL DEGRADATION

SINGLE EVENT UPSET

SOLAR FLARE RADIATION

RADIATION DAMAGE

ENERGETIC RADIATION
BELT PARTICLES

ENHANCED IONOSPHERIC
CURRENTS AND DISTURBANCES

NAVIGATION ERRORS

HF RADIO WAVE DISTURBANCE

CREW AND PASSENGERS
RADIATION

AURORA AND OTHER
ATMOSPHERIC EFFECTS

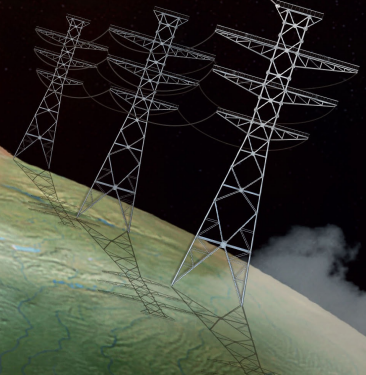
SIGNAL SCINTILLATION

GEOMAGNETICALLY
INDUCED CURRENTS
IN POWER SYSTEMS

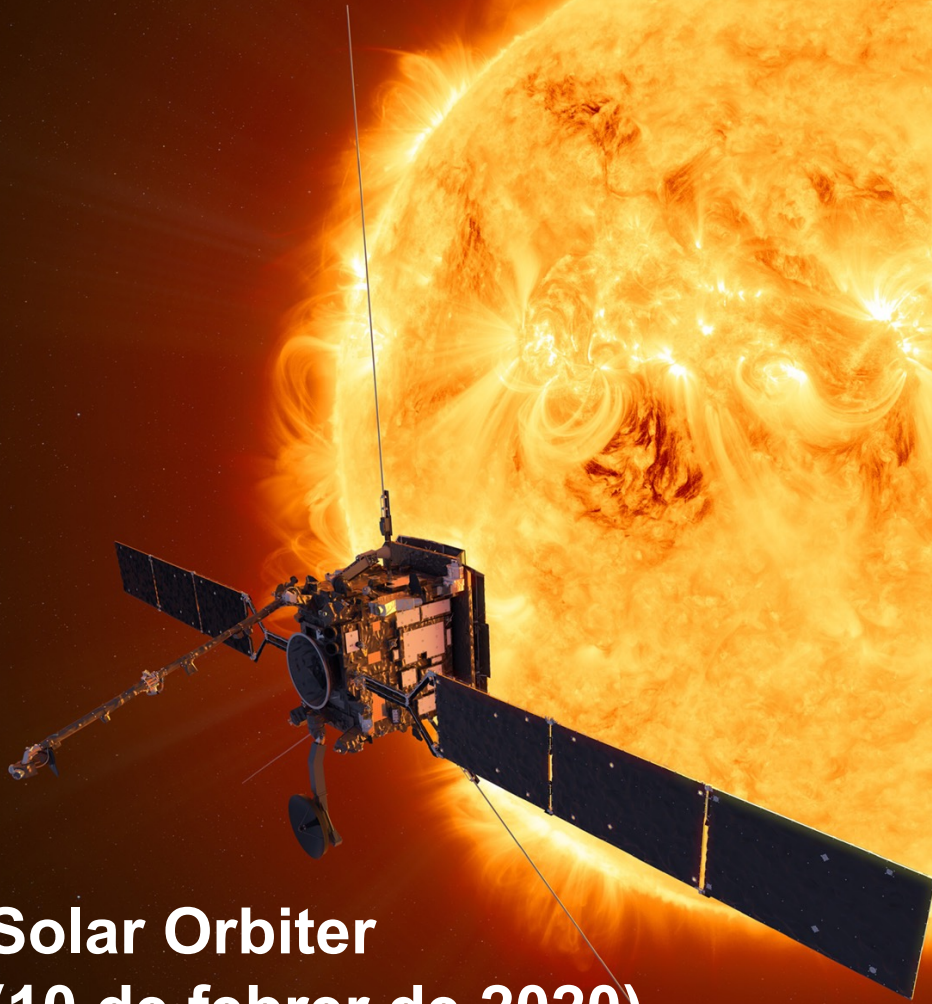
DISTURBED RECEPTION

DECREASED DIRECTIONAL
DRILLING ACCURACY

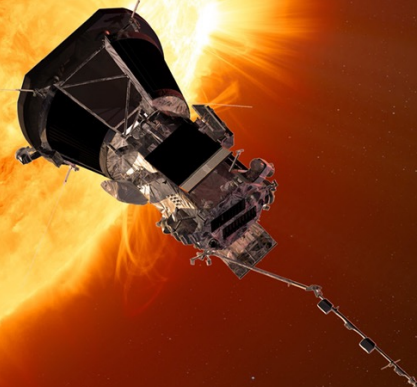
INDUCED GEOELECTRIC
FIELD AND CURRENT



Estudi de l'entorn solar



Solar Orbiter
(10 de febrer de 2020)



Parker Solar Probe
(12 d'agost de 2018)

El Sol

Es tracta d'una esfera de gas en rotació autogravitant i termoregulada

$$1 M_{\odot} = 1,99 \times 10^{30} \text{ kg}$$

($1 M_{\odot} \sim 333\,000 M_{\text{T}}$)

$$1 R_{\odot} = 6,96 \times 10^8 \text{ m} \sim 700\,000 \text{ km}$$

($1 R_{\odot} \sim 109 R_{\text{T}}$)

$$1 L_{\odot} = 3,84 \times 10^{26} \text{ W}$$

Tots els reactors nuclears existents: $<10^{12} \text{ W}$
Cada segon consumeix 600 000 000 000 kg d'hidrogen i emet 10 000 vegades la reserva d'energia en combustibles fòssils existents a la Terra (2010)

Pèrdua de massa (vent solar): $1,5 \times 10^9 \text{ kg s}^{-1}$
 $2 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ any}^{-1}$

Gravetat superficial: 274 m s^{-2} (27g terrestres)

Distància mitjana Sol - Terra, 1 au:

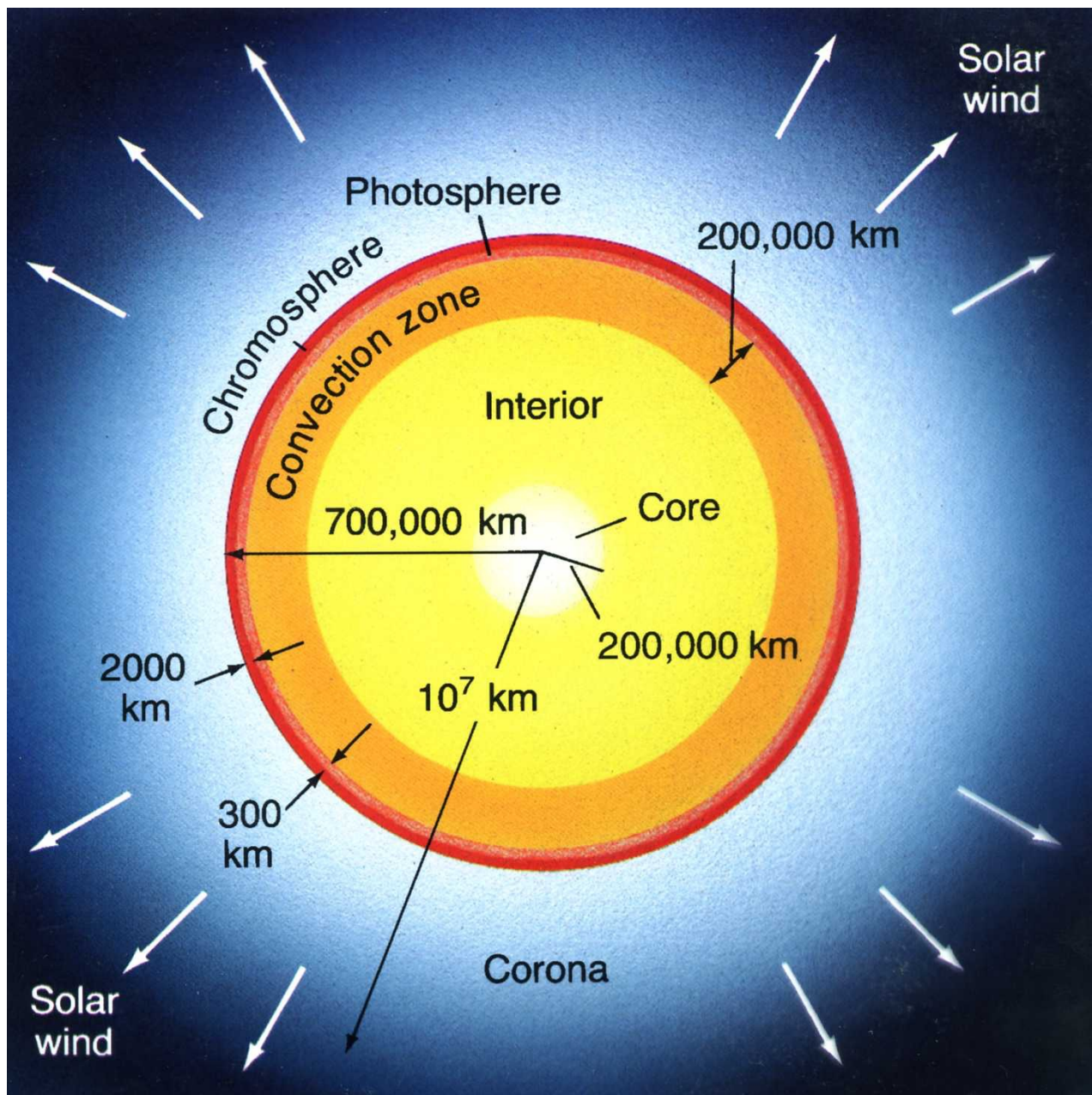
$149\,597\,870,7 \text{ km}$ (uns 8 minuts-llum) Entre 147,1 i 152,1 milions de quilòmetres

Ens proporciona 1361 W/m^2 a 1 au

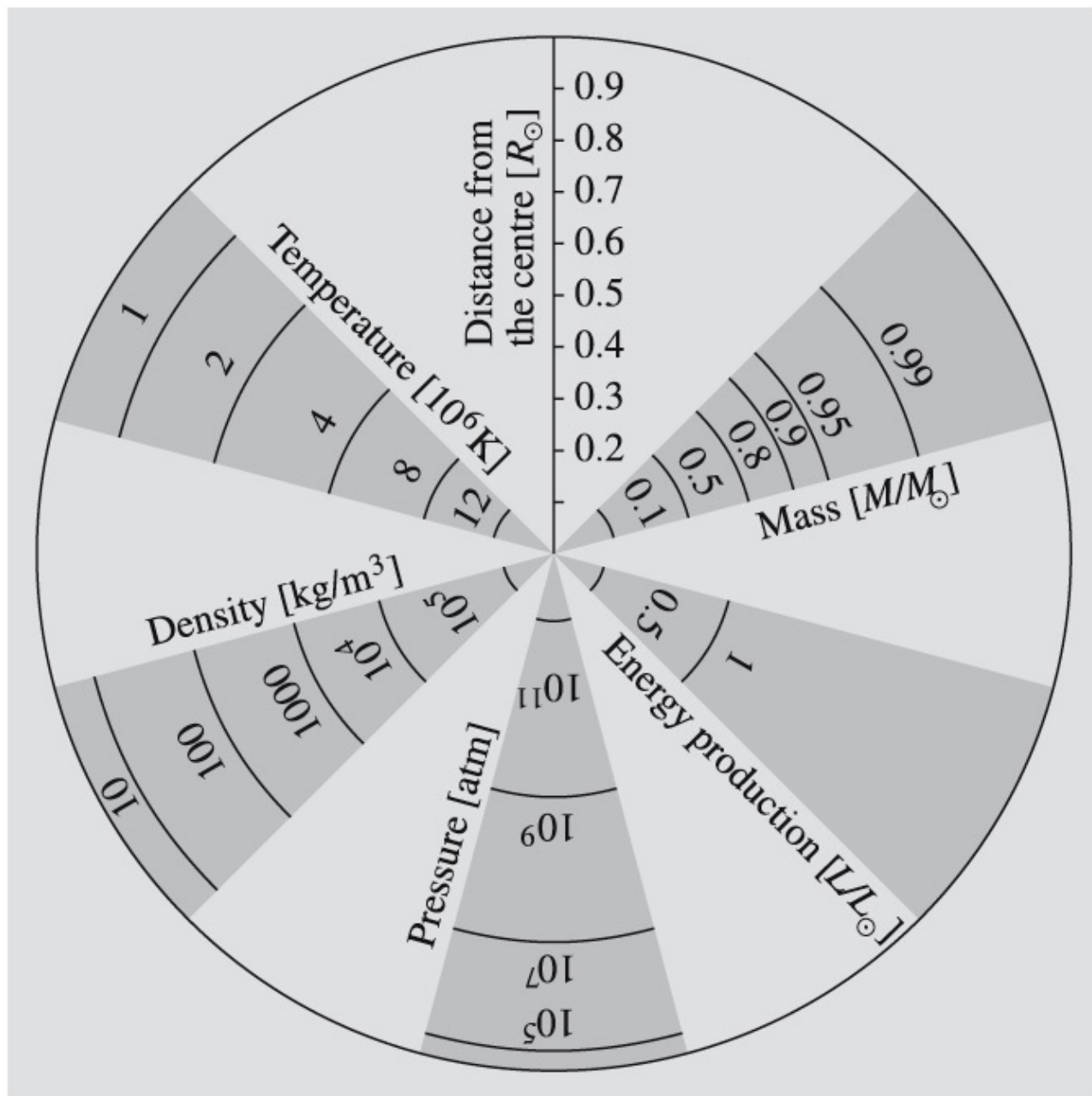
Temperatura superfície visible (la fotosfera): 5780 K ($5507 \text{ }^{\circ}\text{C}$)



ESTRUCTURA SOLAR




ESTRUCTURA SOLAR



El nucli del Sol

- *Reactor* de fusió nuclear que:
 - al seu centre **converteix hidrogen en heli, a 15 700 000 K**
 - “funciona” **molt tranquil·lament des de fa 4500 milions d’anys**

- I ho sabem per què:
 - és un estructura gasosa que (com les altres ) **obeeix les lleis de la física**
 - les observacions del seu interior confirmen **al 99,9 % les prediccions del Model Solar Estàndard**

Cadena protó-protó

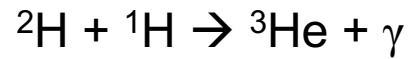
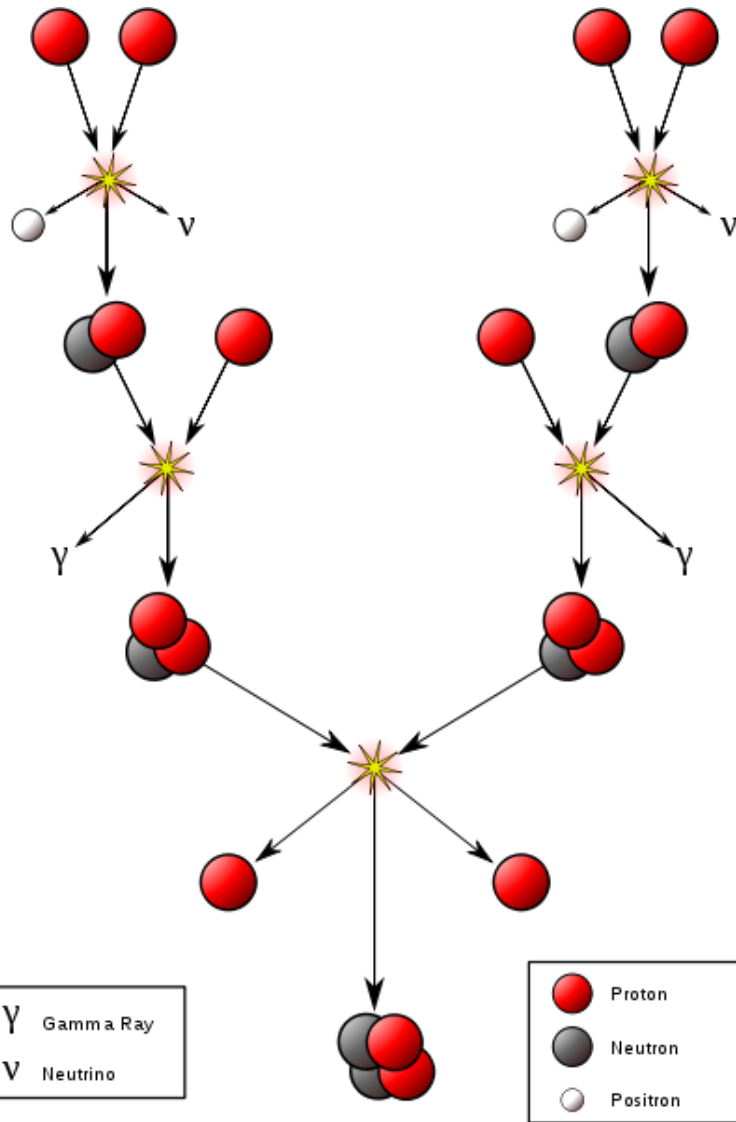


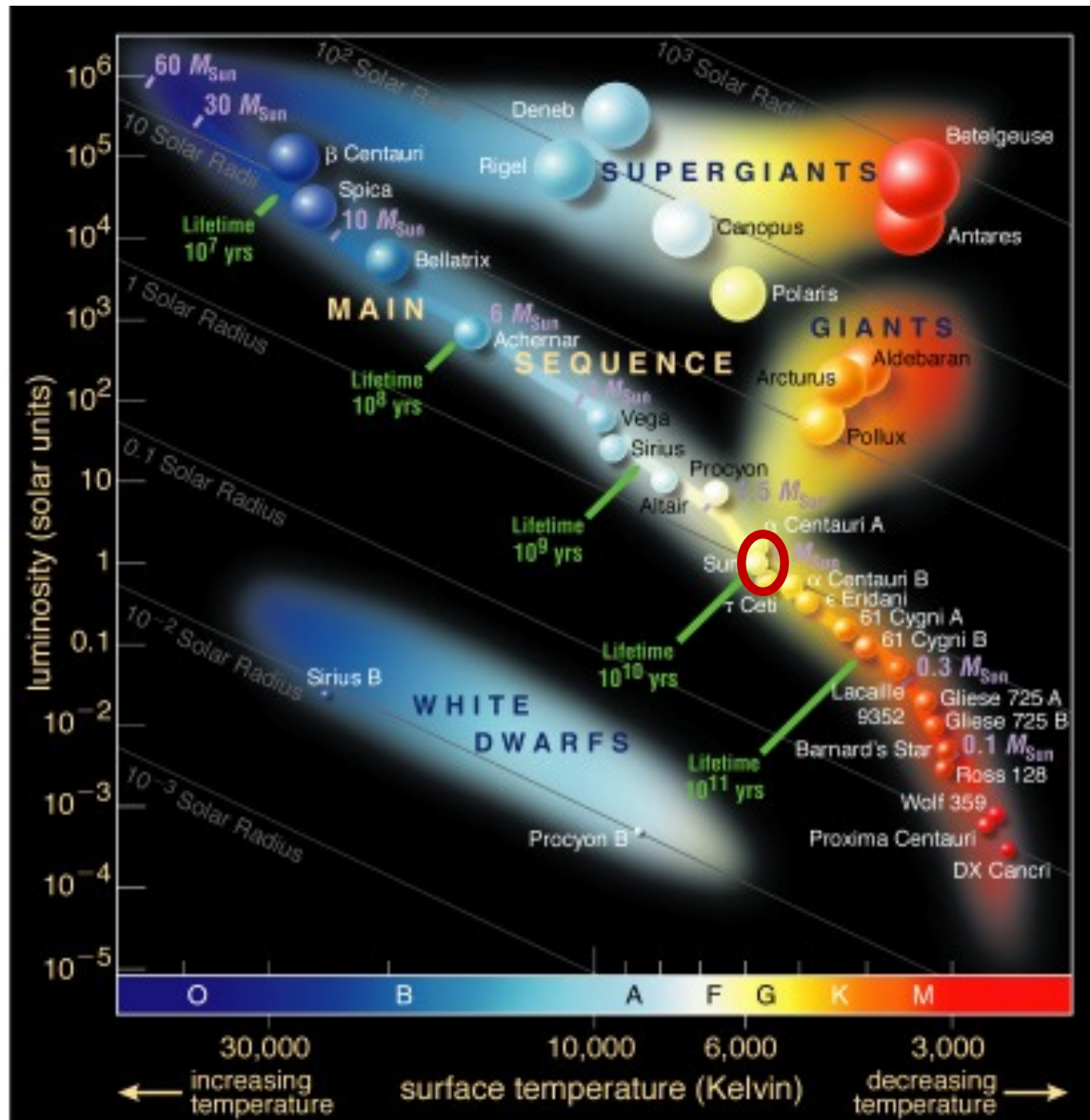
Diagrama Hertzsprung-Russell

Diagrama H-R

1910: Ejnar Hertzsprung i Henry Norris Russell

**El Sol
(G2V)**

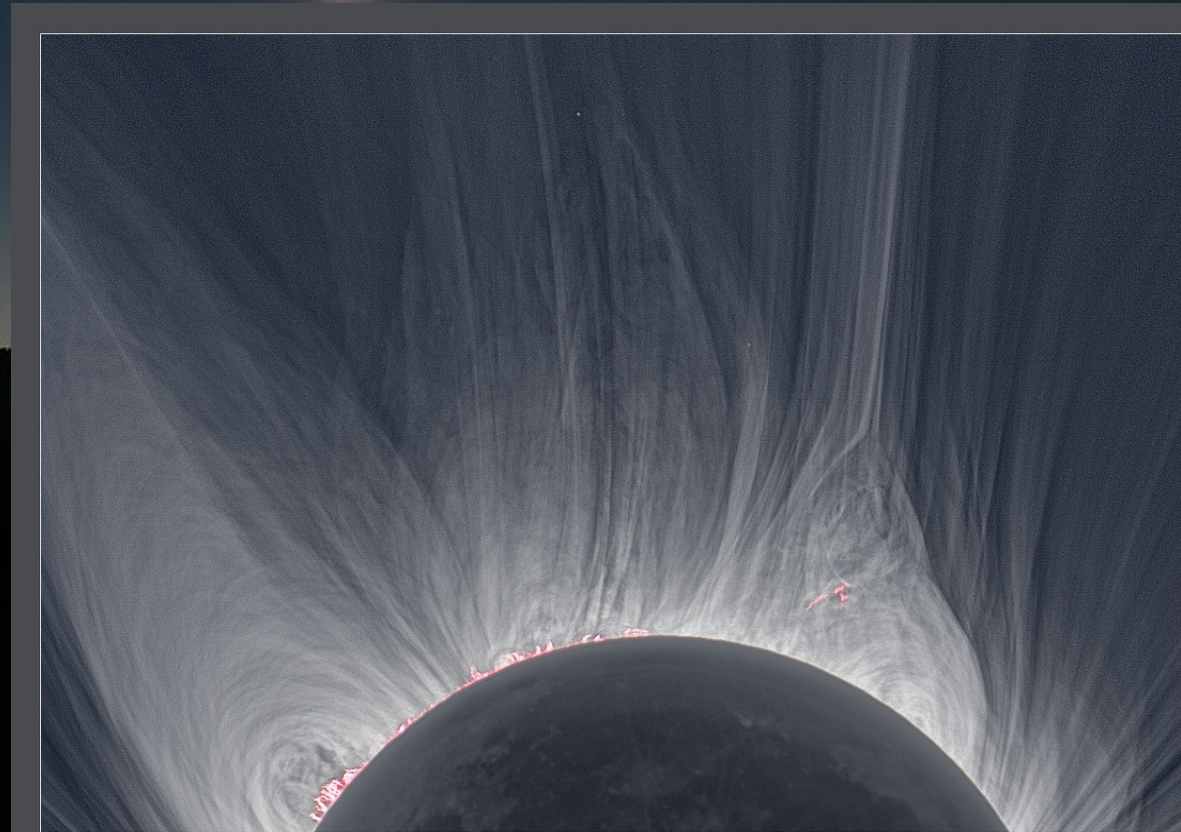
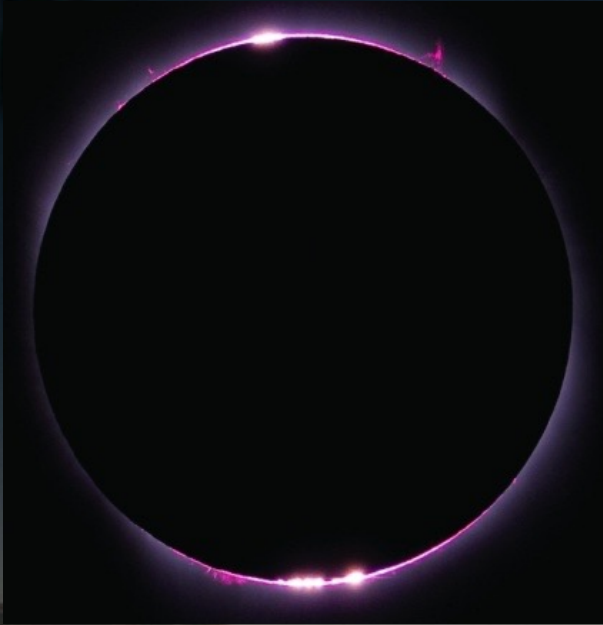
eix y: qualsevol variable
relacionada amb la lluminositat

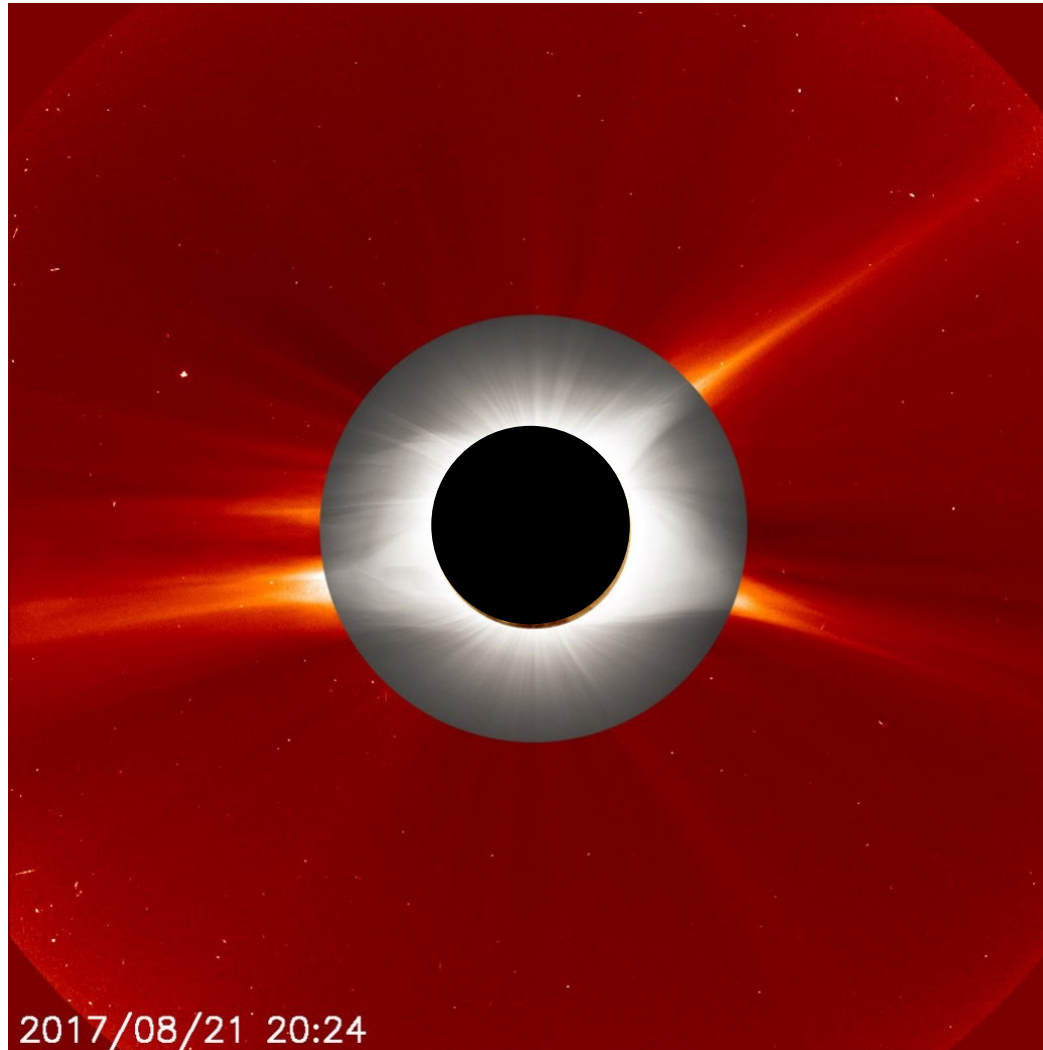


eix x: qualsevol variable relacionada amb la temperatura

Eclipsi total de Sol, 1 d'agost 2008

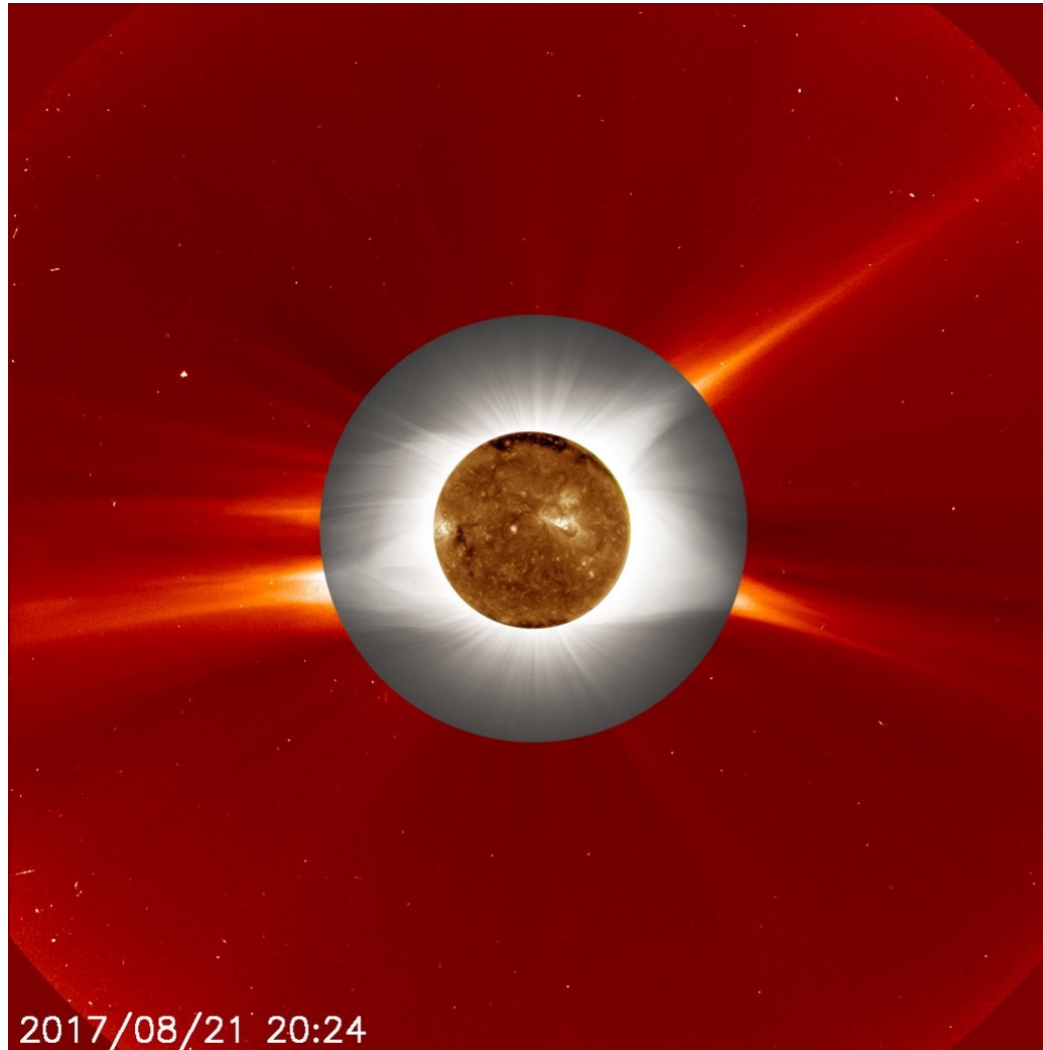
L'atmosfera solar





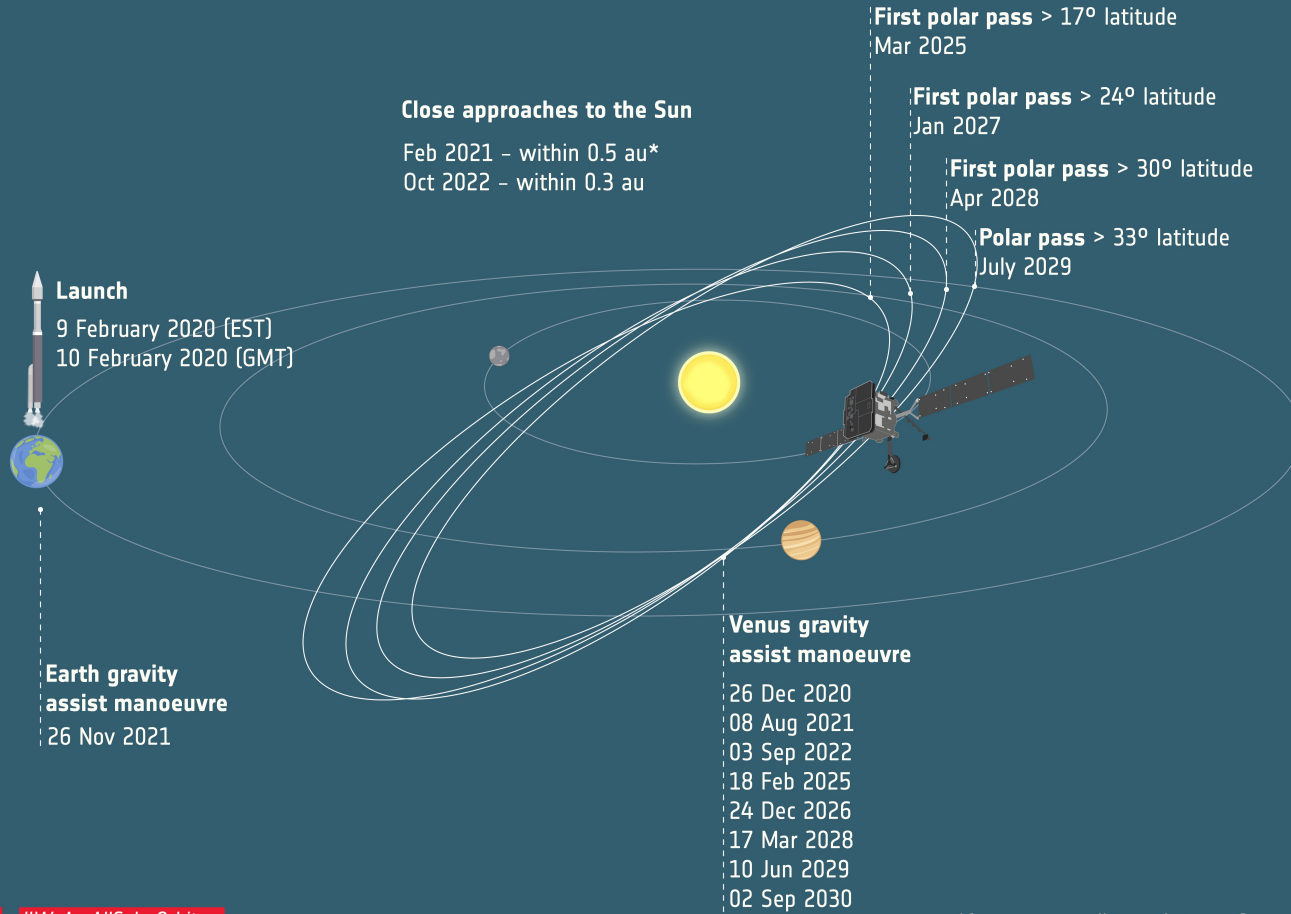
2017/08/21 20:24

NASA/ESA Solar and Heliospheric Observatory (SOHO).
At center is an image of the sun's surface as seen by
the Solar Dynamics Observatory in extreme UV light.



2017/08/21 20:24
NASA/ESA Solar and Heliospheric Observatory (SOHO).
At center is an image of the sun's surface as seen by
the Solar Dynamics Observatory in extreme UV light.

SOLAR ORBITER JOURNEY AROUND THE SUN



300 million km

Maximum distance between Earth and Solar Orbiter

16.5 min

Maximum time for a radio signal to travel one way between Earth and Solar Orbiter

22 orbits

around the Sun

Nov 2021

Start of main mission

Dec 2026

Expected start of extended mission

#SolarOrbiter #WeAreAllSolarOrbiters

*1 au = average distance between Sun and Earth (149 597 870 700 m)



El Sol a l'ultraviolat llunyà i en alta resolució

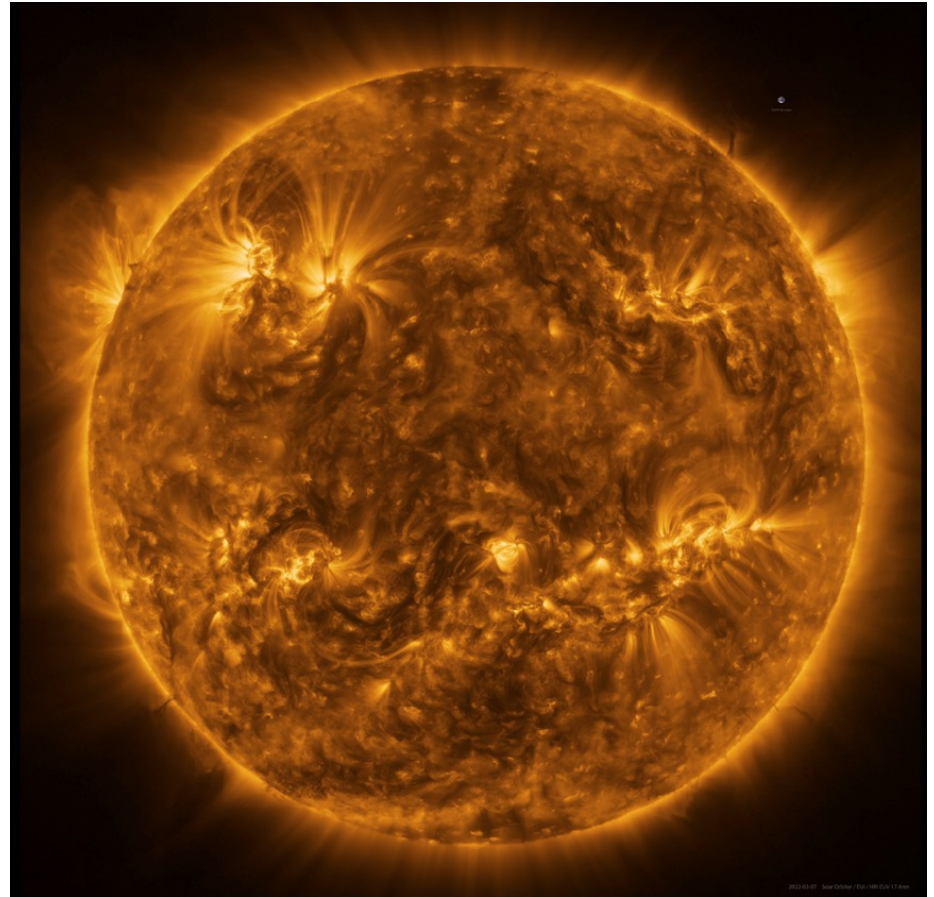
Mosaic de 25 imatges preses el 7 de març de 2022 per l'instrument EUI (Extreme Ultraviolet Imager) de Solar Orbiter, des d'uns 75 milions de quilòmetres (~0,5 au) del Sol.

Longitud d'ona: 17,4 nm, que correspon a la emissió dels ions Fe IX i Fe X, de la regió de la corona solar corona a ~1 milió K

És la imatge de més alta resolució del tot el disc solar i de la corona obtinguda fins ara (conté 83 milions de píxels).

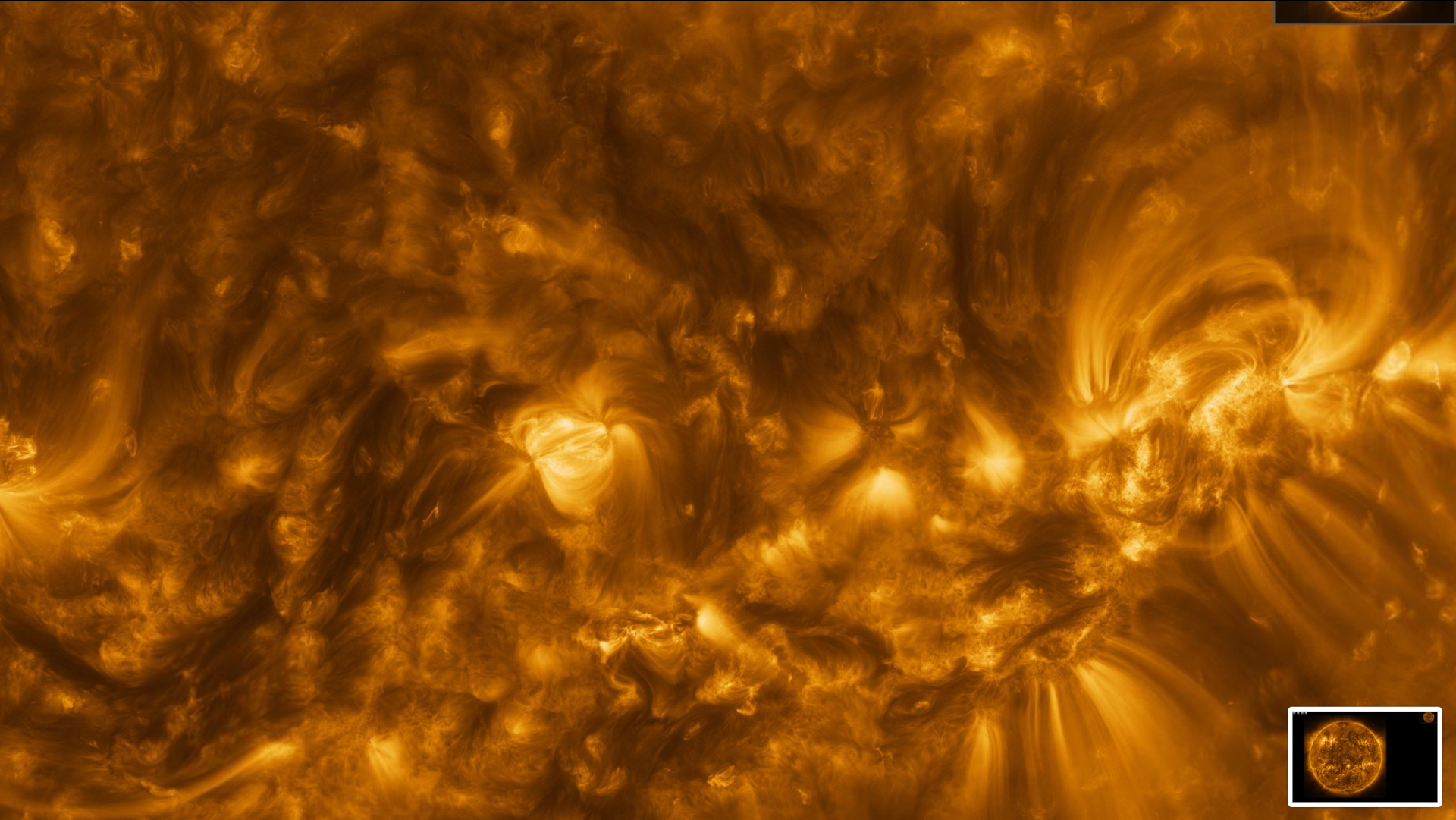
Cada imatge: 10 minuts, total: 4 hores

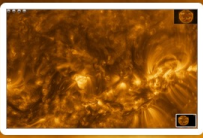
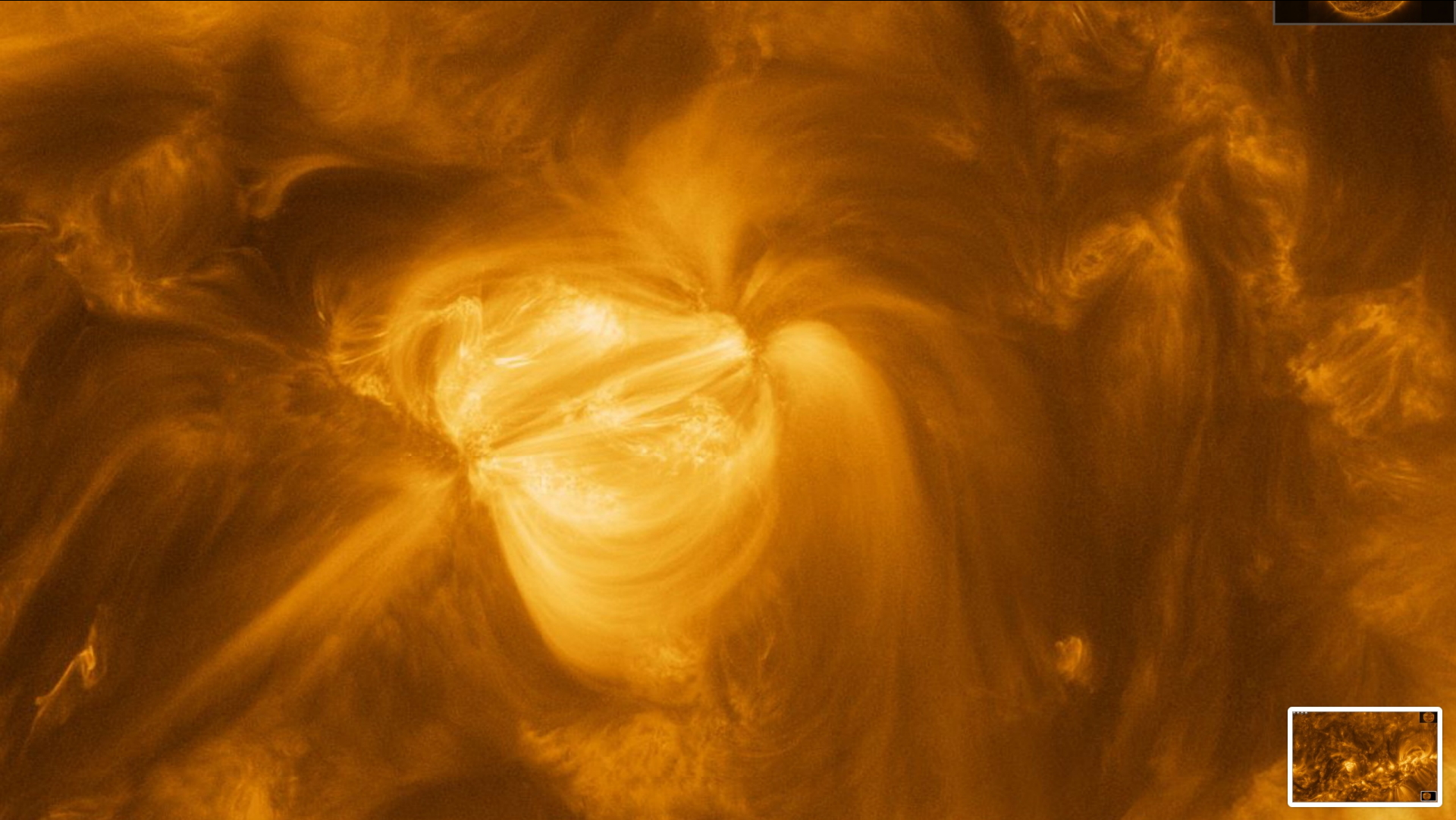
[ESA & NASA/Solar Orbiter/EUI team;
Data processing: E. Kraaikamp, ROB]

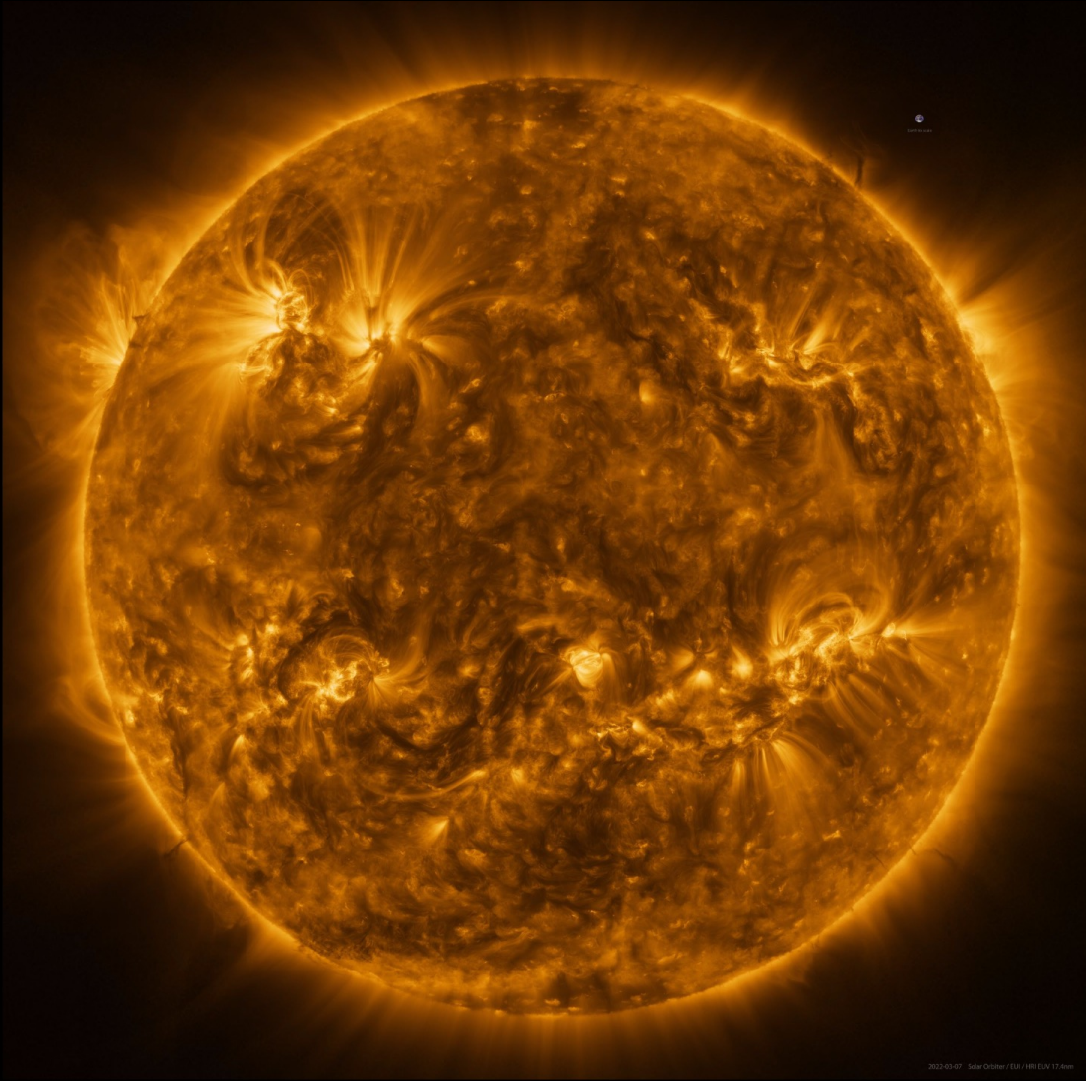


https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Zooming_into_the_Sun_with_Solar_Orbiter

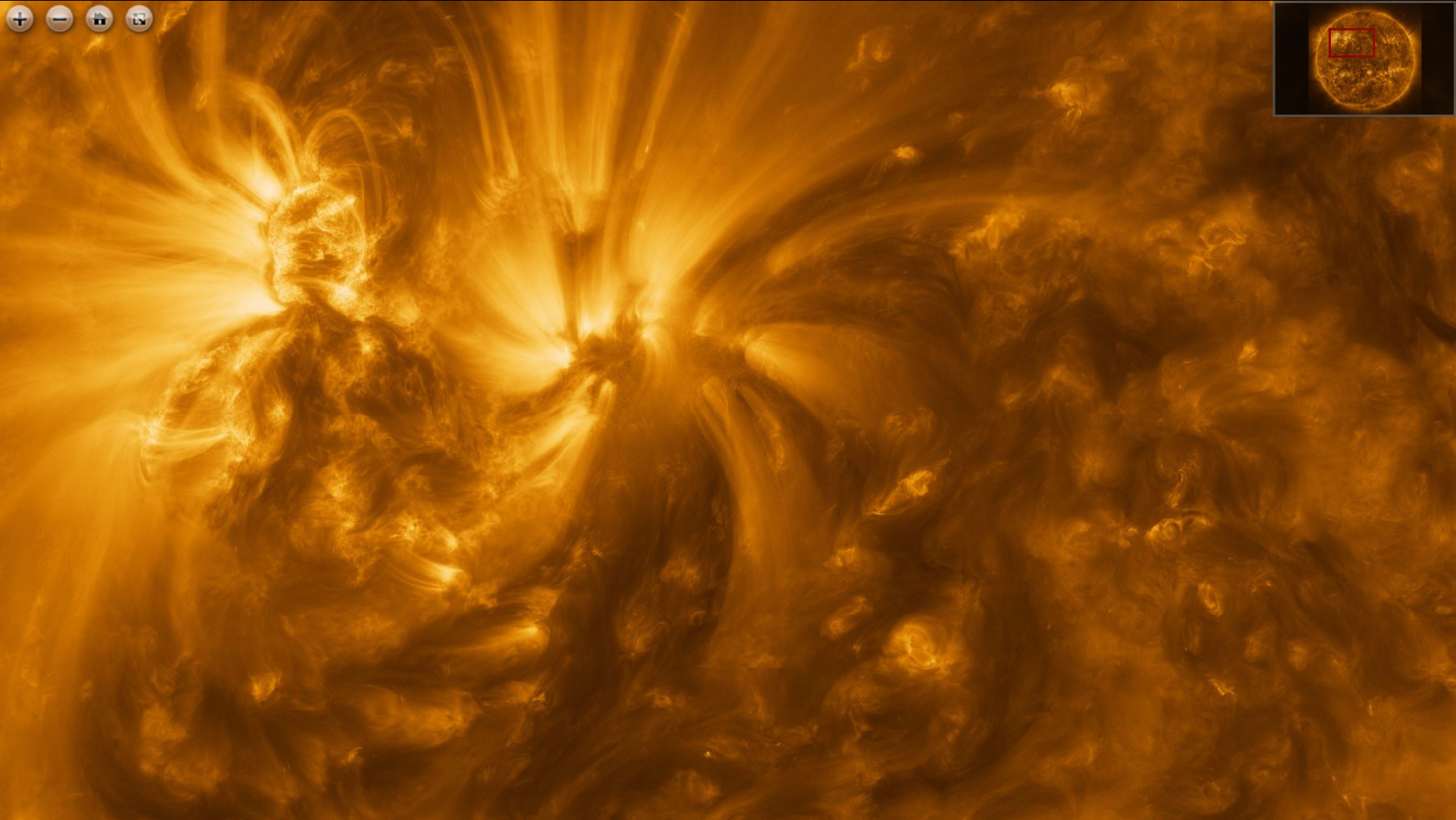
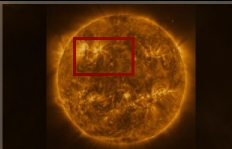
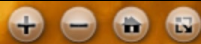
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/Giant_solar_eruption_seen_by_Solar_Orbiter
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Solar_Orbiter/The_Sun_as_you_ve_never_seen_it_before

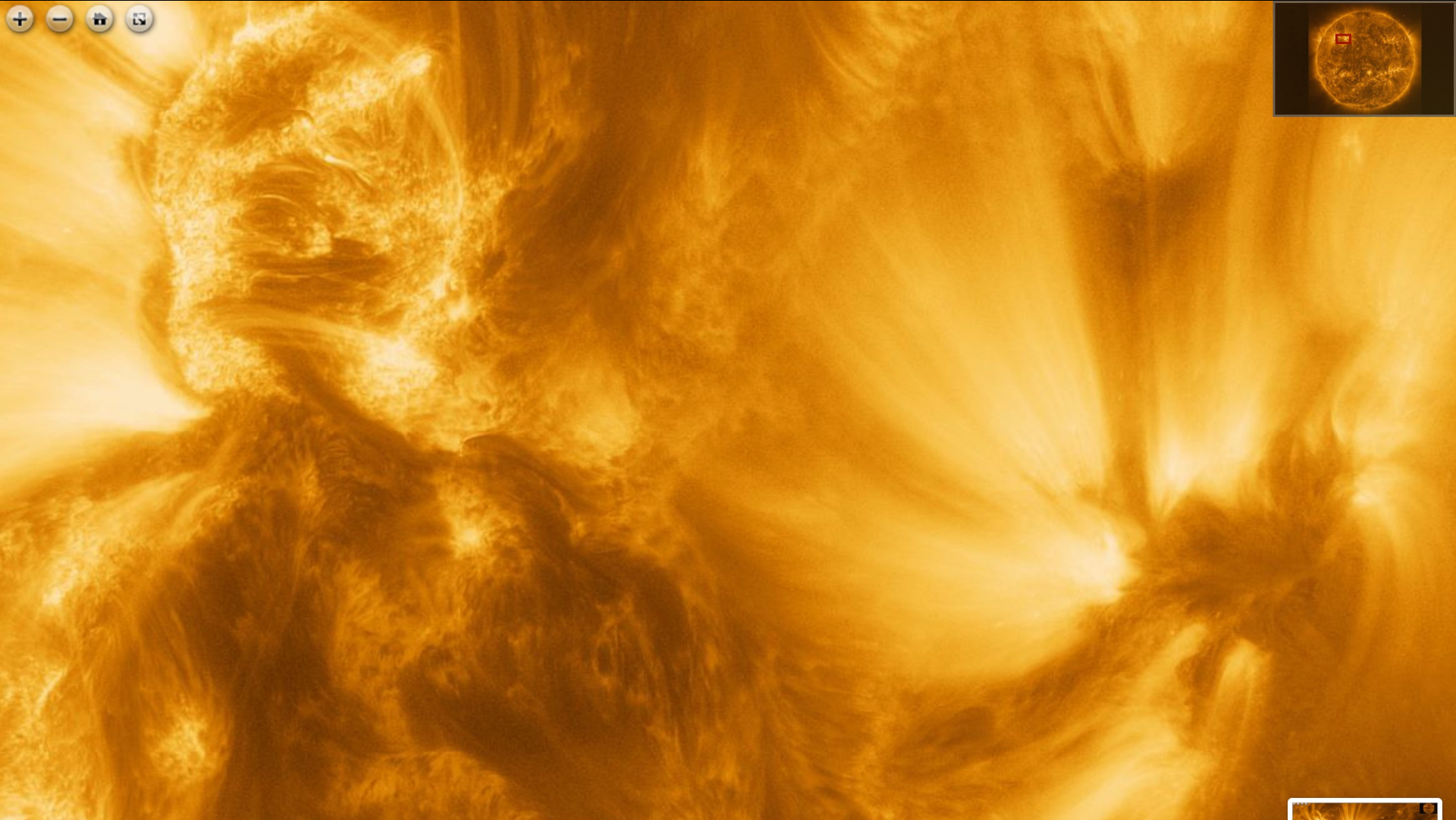
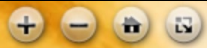




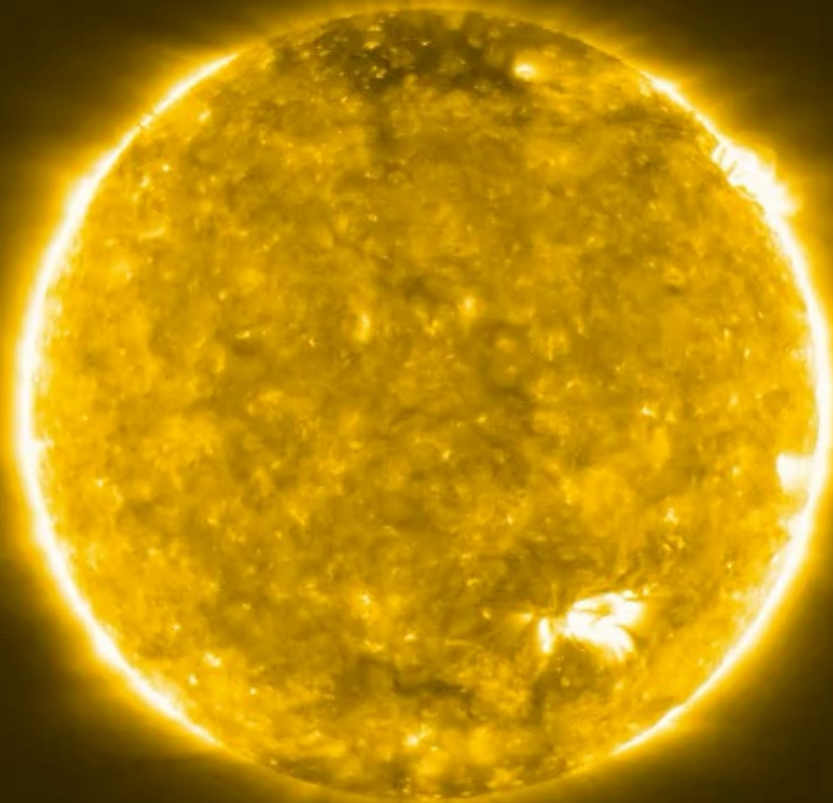


2024107_Sun_October_18_1800W_17.6km





Solar Orbiter's Extreme Ultraviolet Imager (EUI):



FeIX & FeX, 17.4 nm

0.5 au, Solar Minimum, 17/06/2020

Aran et al. (A&A, 656, L10, 2021)



Corona Solar

L'atmosfera solar

- **Fotosfera:** “Superfície” visible del Sol

Gruix: 400 – 600 km

Temperatura: 5780 K

Densitat: 0,000 002 g/cm³

unes 10¹⁶ partícules/cm³

[Recordem: “a terra” en tenim unes 10¹⁹!]

La cromosfera i la corona només són visibles durant els eclipsis solars, emprant filtres o telescopis coronogràfics, o des de l'espai:

- **Cromosfera:** Gruix: 2500 km

Temperatura: puja fins uns 20 000 K

- **Corona:**

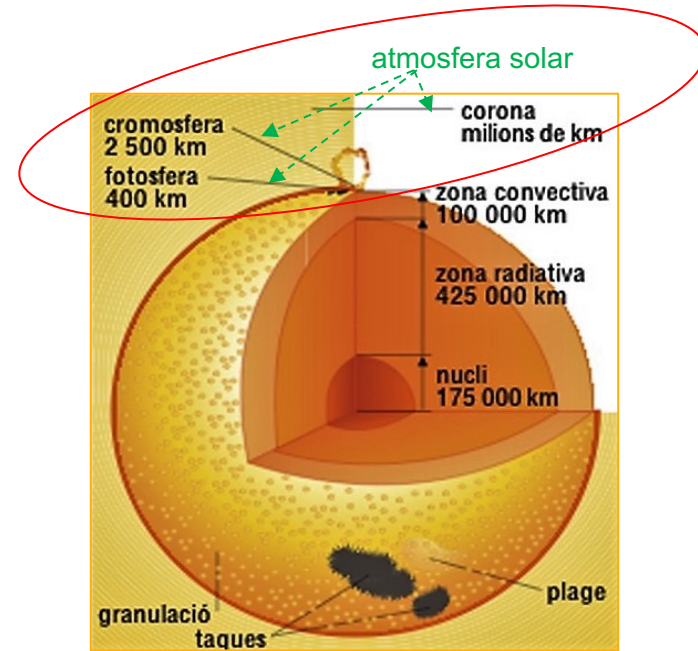
Brillant en l'ultraviolat (UV) i en raigs X (→ cal sortir a l'espai!)

S'estén fins 6 – 9 R_☉

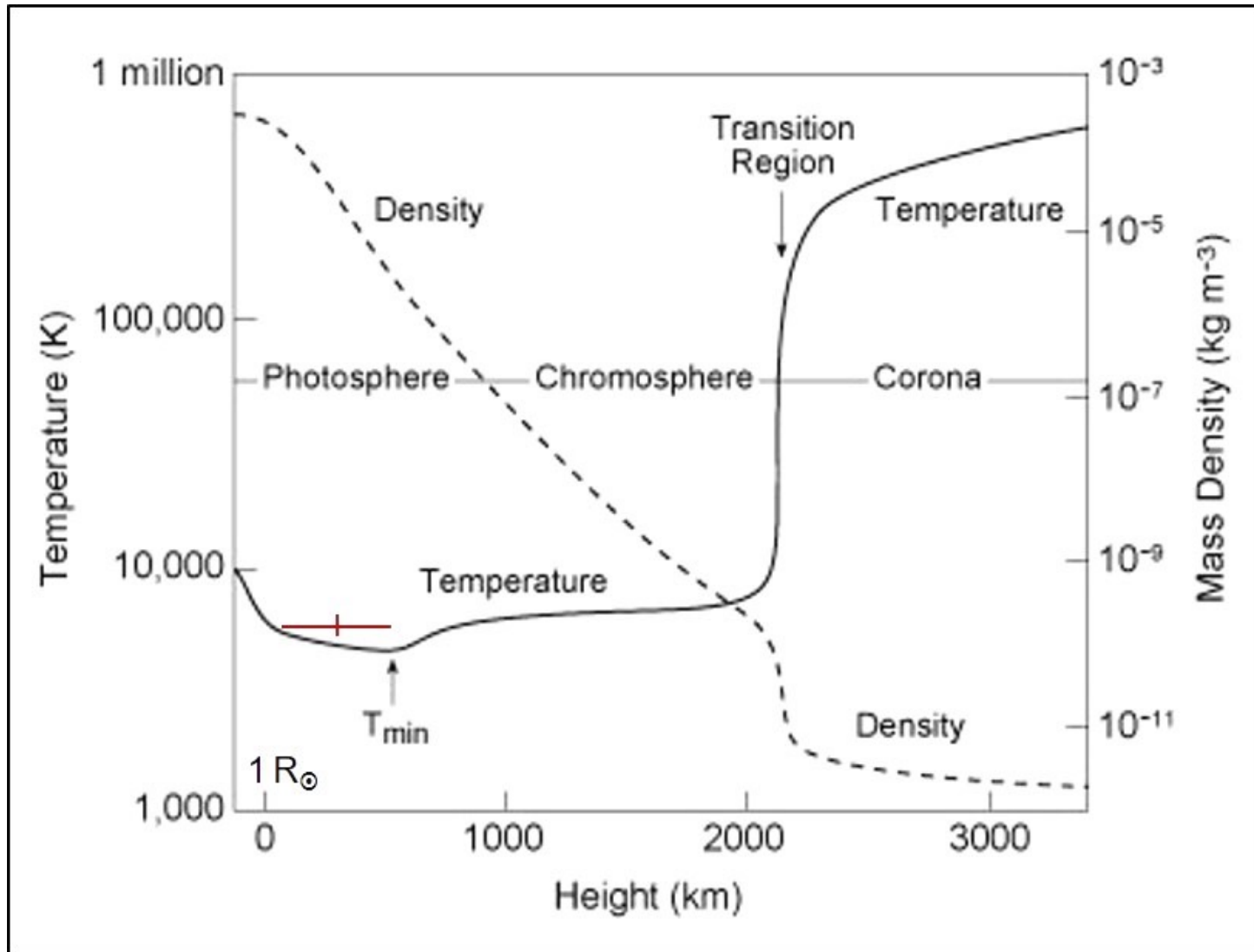
(uns 6 milions de quilòmetres)

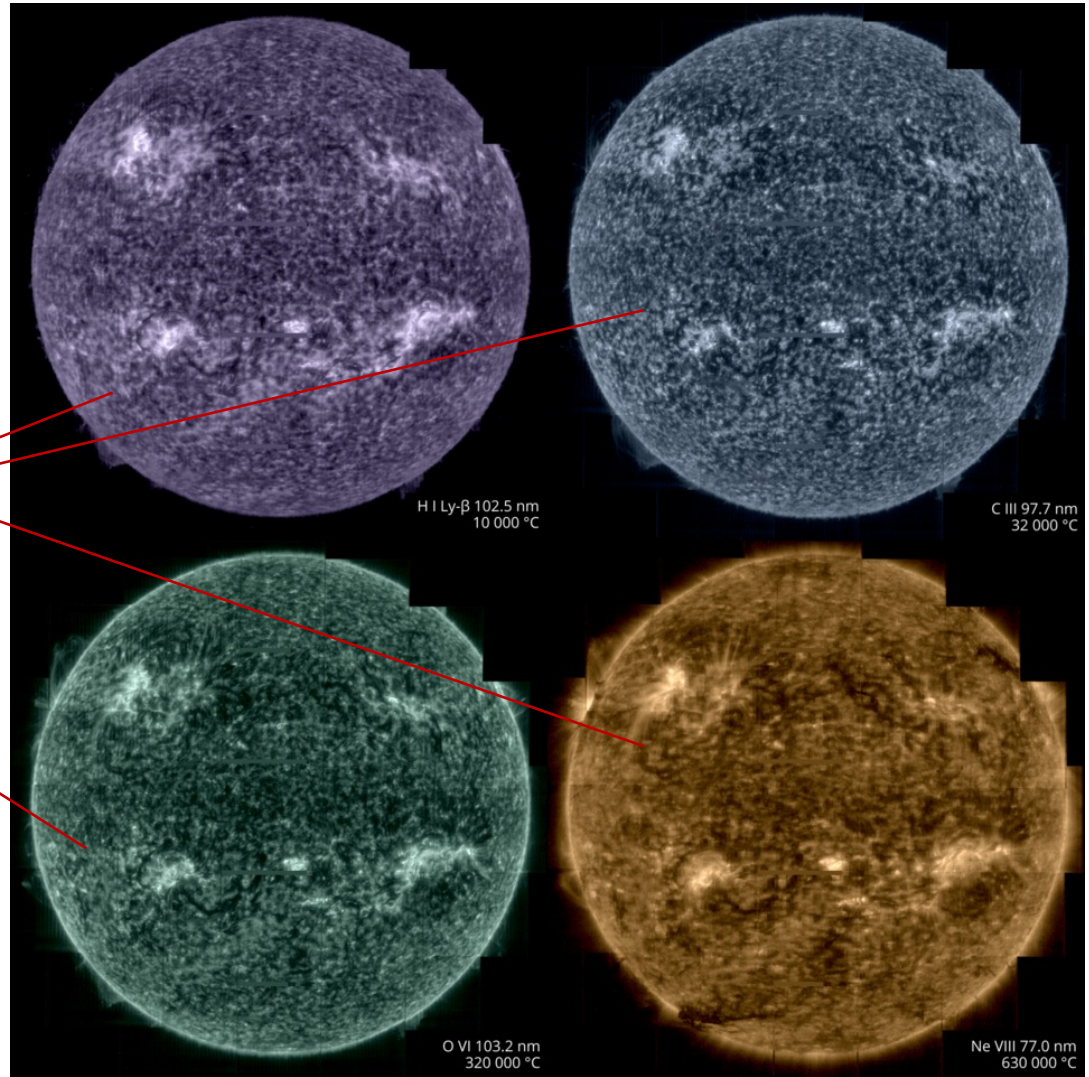
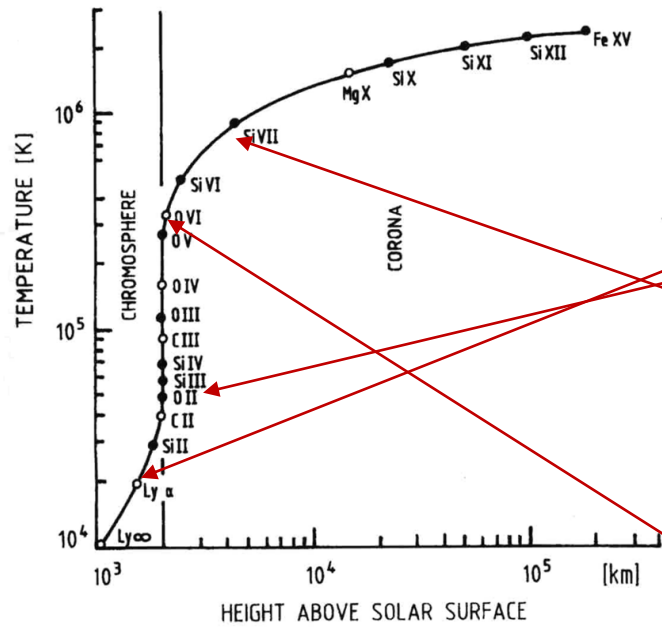
La “temperatura” pot enfilem-se

fins a 2 000 000 K



Resum: La atmosfera solar





ESA & NASA/Solar Orbiter/SPICE team. Data processing: G. Pelouze (IAS)

Un primer resultat important de Solar Orbiter: campfires

- Maig 2020. Descobriments dels focs de camp a la cromosfera i baixa corona

Minúscules fulguracions coronals arrelades a la cromosfera

- Extreme Ultraviolet Imager (EUI i HRI)

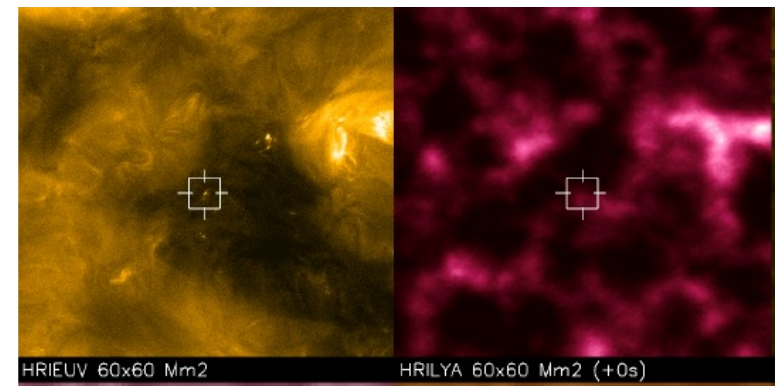
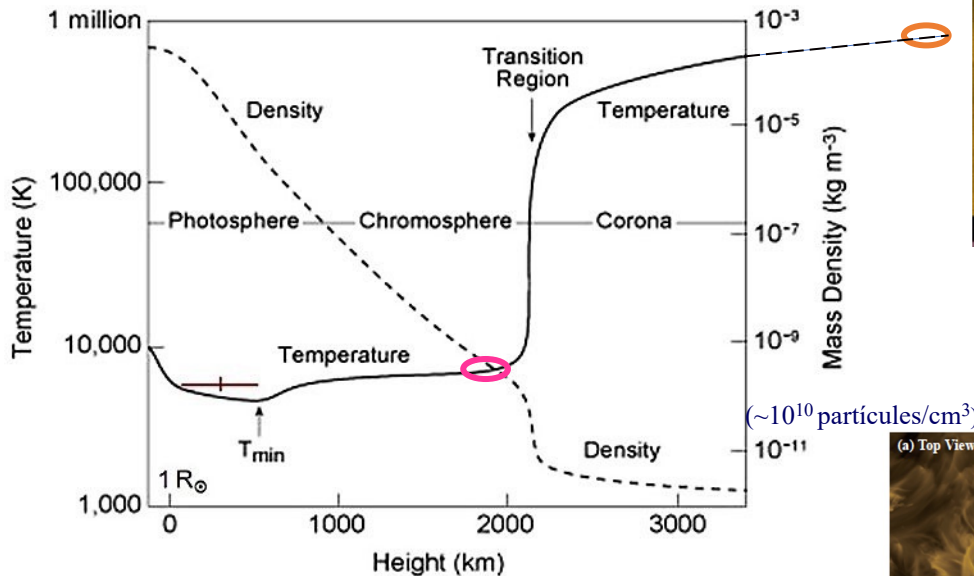
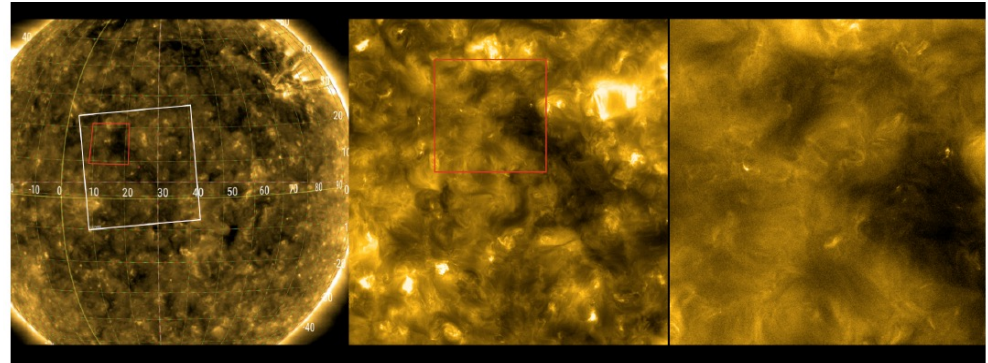
Aspecte del Sol a les línies de emissió:

- 17,4 nm (marró) del Fe IX i Fe X, a la baixa corona ($T \sim 1\,000\,000\text{ K}$)
- 121,6 nm (Ly- α H, rosa), alta cromosfera

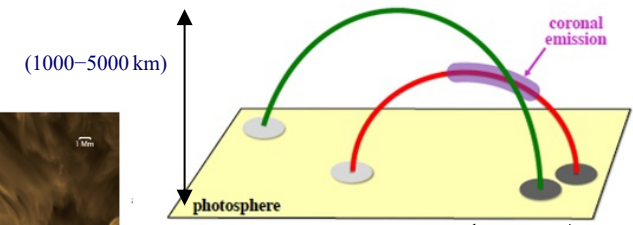
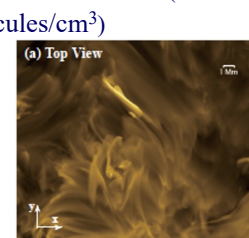
- Distància: $\sim 0,55\text{ au}$ ($\sim 80\,000\,000\text{ km}$)

Resolució: 400 km; cadència: ~ 10 imatges/segon

Berghmans+ (2021)



(<https://sci.esa.int/web/solar-orbiter/-/solar-orbiter-first-images-and-data>)

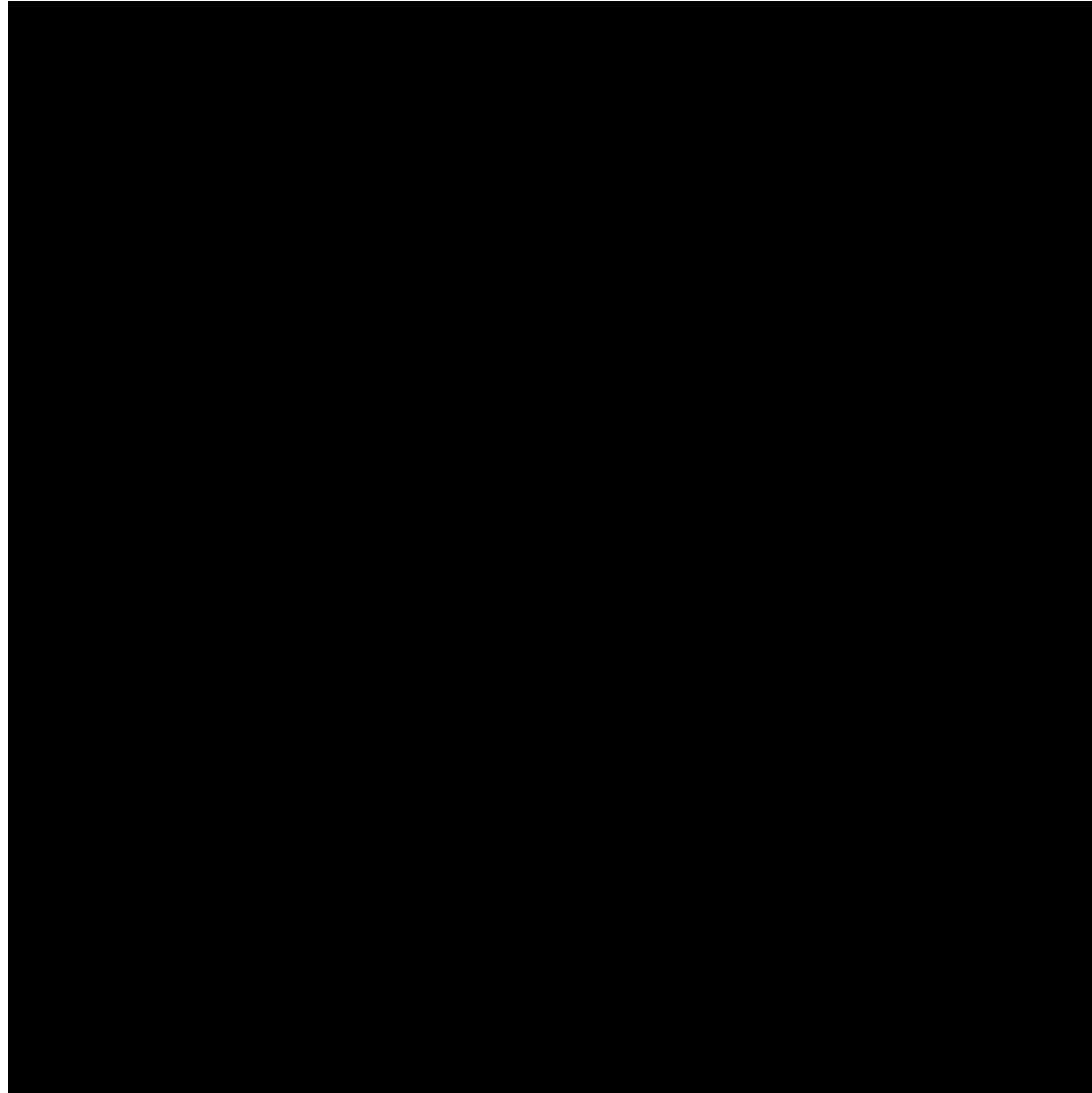


Durada: de 10 a 200 segons

Chen+ (2021)

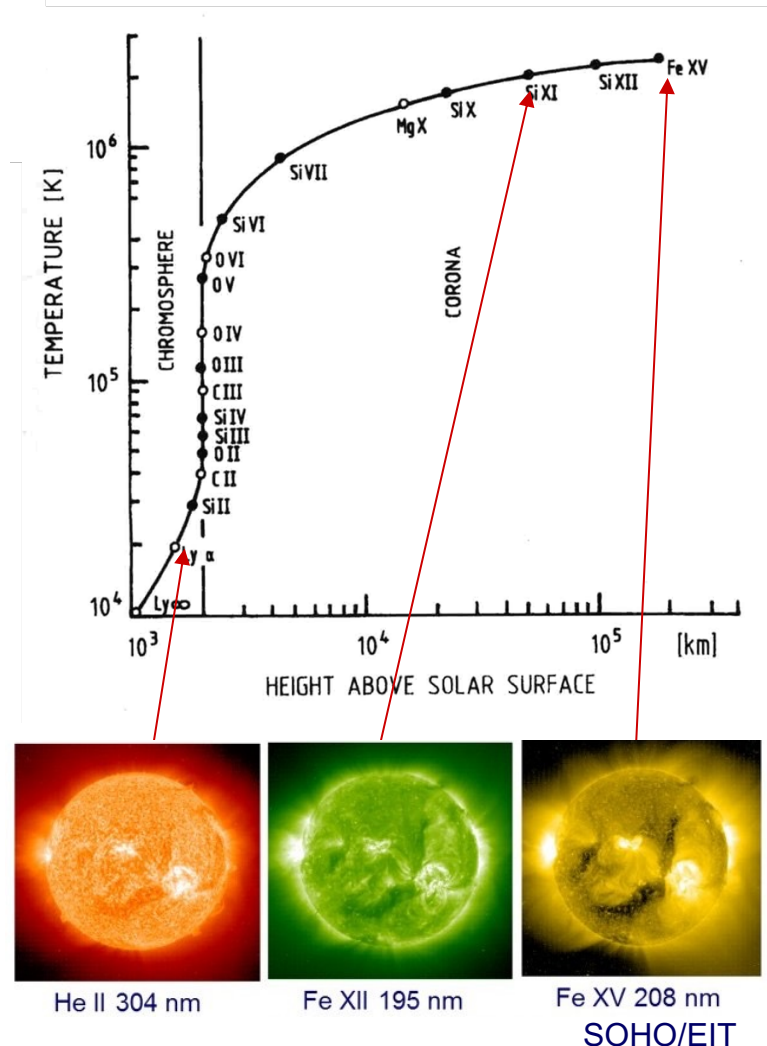
La cromoesfera vista per Solar Orbiter (gener-abril 2022)

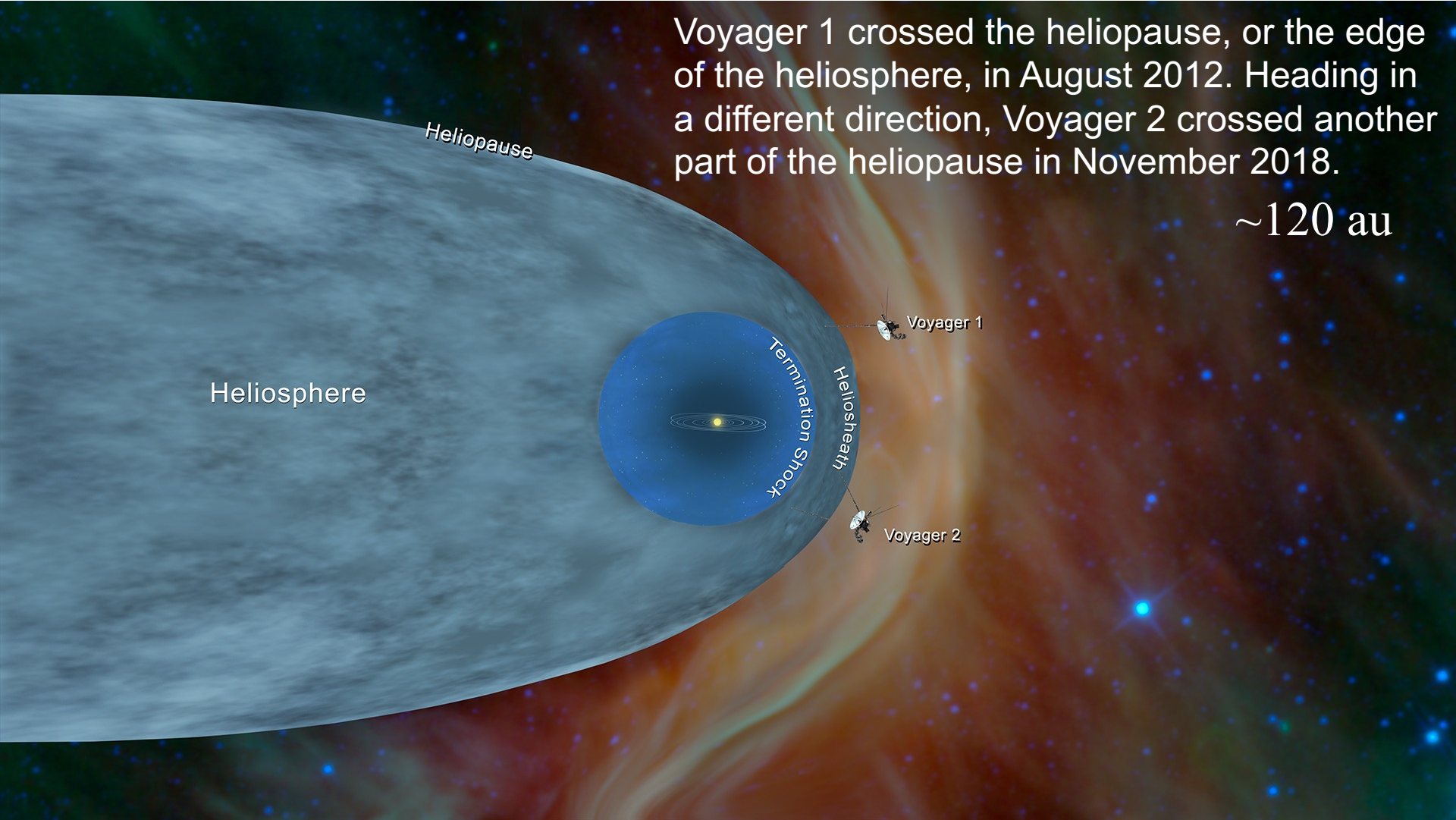
Màxima
aproximació
al Sol fins
ara:
0.32 au,
26 de març



Resum: La atmosfera solar

- **Fotosfera:** “superfície” visible.
T = 5780 K, gruix: ~400 km.
Només visible durant els eclipses, emprant filtres, coronògrafs o des de l'espai:
- **Cromosfera:** Gruix: ~2000 km.
T creix de 6000 a 20000 K.
- **Corona:** Brilla en raigs X degut a la seva elevada T (~1 – 2 10⁶ K).
S'estén de <10000 km fins ~7 R_⊙
- A partir de 5 – 8 R_⊙ el gas coronal flueix lliurement per l'espai i es transforma en el **vent solar**, el qual s'estén fins ~130 AU (la **heliosfera**).





Voyager 1 crossed the heliopause, or the edge of the heliosphere, in August 2012. Heading in a different direction, Voyager 2 crossed another part of the heliopause in November 2018.

~120 au

Heliosphere

Heliopause

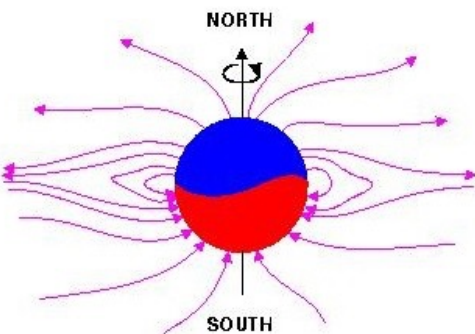
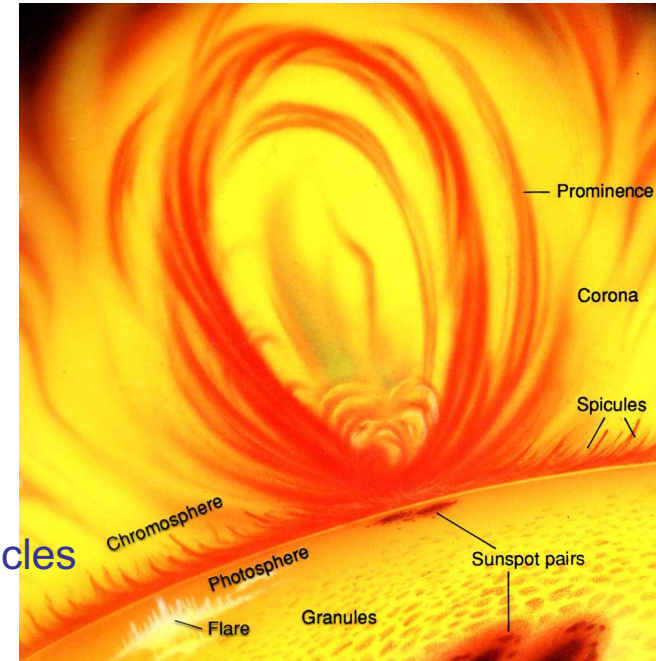
Termination Shock
Heliosheath

Voyager 1

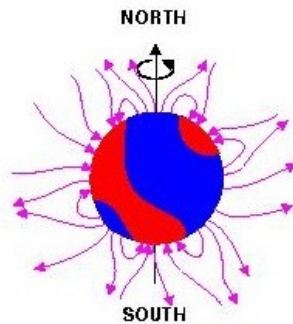
Voyager 2

Activitat Solar

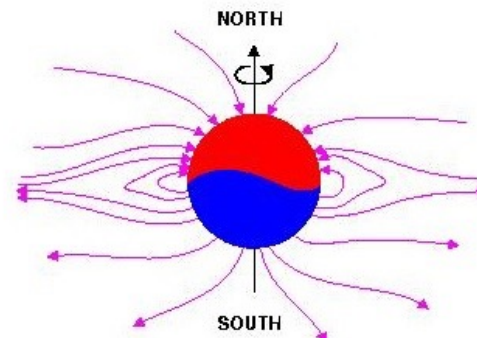
- El Sol no és un objecte estàtic ni invariant, sinó que té un seguit de processos associats que anomenem activitat solar
- Els fenòmens més destacats són:
 - Taques solars
 - Protuberàncies o prominències
 - Fàcules
 - **Fulguracions o erupcions cromosfèriques**
 - **Ejeccions de massa coronal**
- L'activitat solar ve condicionada per l'efecte dels camps magnètics en el plasma que constitueix el Sol
- Aquest camp magnètic no és constant sinó que varia en cicles d'aproximadament 22 anys. Aquests 22 anys es poden dividir en dos semiperíodes de polaritat inversa



CORONAL MAGNETIC FIELD LINES AT SOLAR MINIMUM ACTIVITY



CORONAL MAGNETIC FIELD LINES AT SOLAR MAXIMUM ACTIVITY

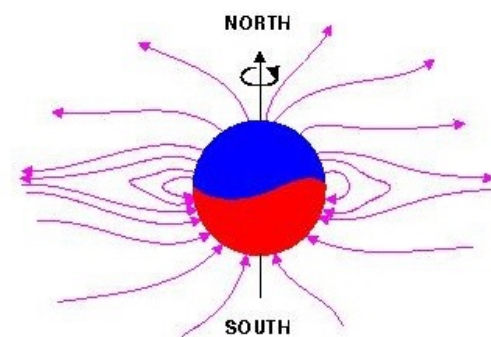
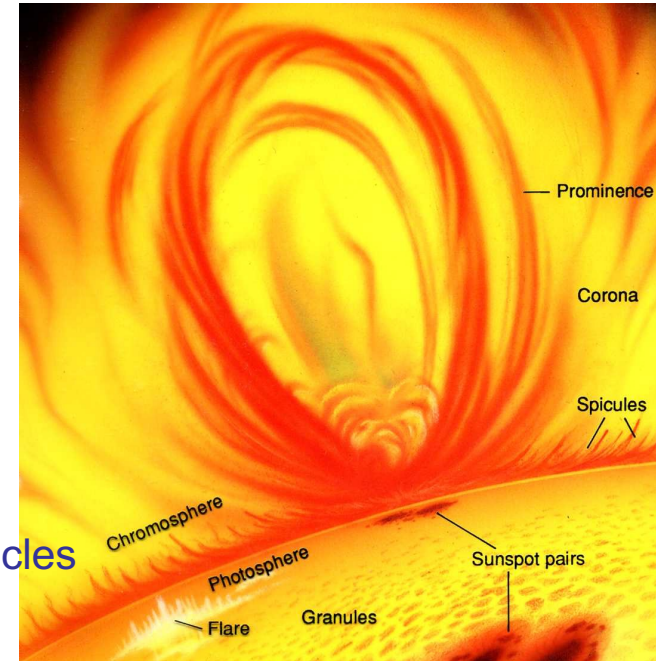
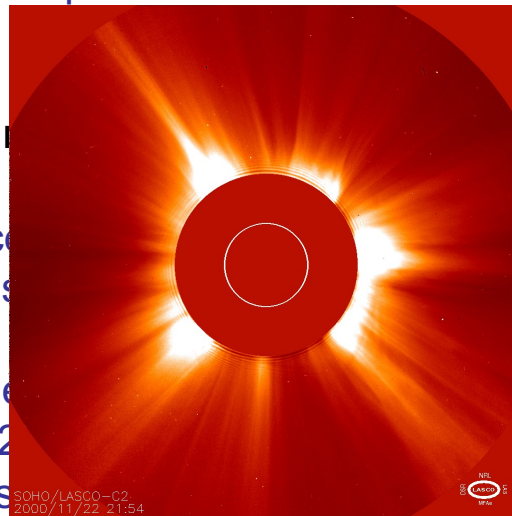
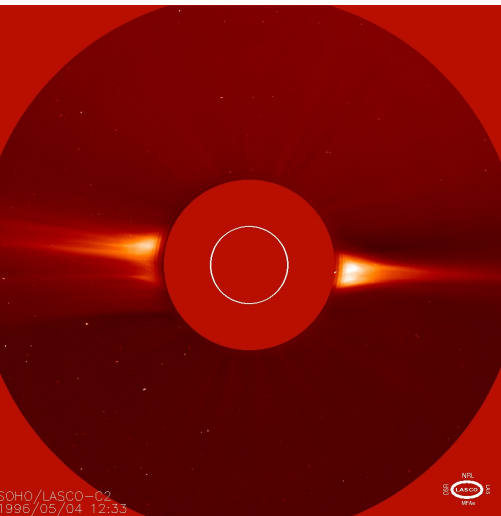


CORONAL MAGNETIC FIELD LINES AT NEXT SOLAR MINIMUM

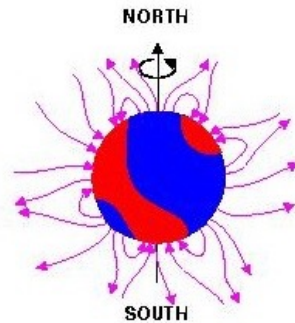
Mesures de B realitzades per la sonda Ulysses el 1994 i el 2000 confirmen aquest escenari.

Activitat Solar

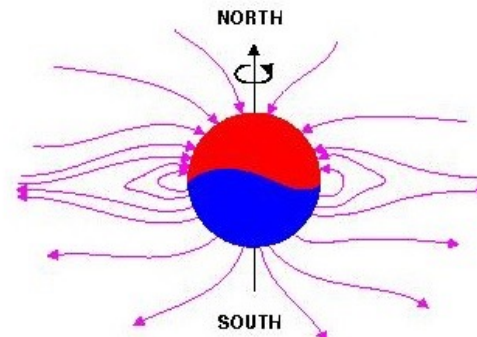
- El Sol no és un objecte estàtic ni invariant, sinó que té un seguit de processos associats que anomenem activitat solar
- Els fenòmens més destacats són:
 - Taques solars
 - Protuberàncies o prominències



CORONAL MAGNETIC FIELD LINES AT SOLAR MINIMUM ACTIVITY



CORONAL MAGNETIC FIELD LINES AT SOLAR MAXIMUM ACTIVITY



CORONAL MAGNETIC FIELD LINES AT NEXT SOLAR MINIMUM

Mesures de B realitzades per la sonda Ulysses el 1994 i el 2000 confirmen aquest escenari.

Taques solars

- 1610 – 1611 Thomas Harriot, Johannes Fabricius, Galileo Galilei, Christoph Scheiner, ...

- **Taques solars**

Regions de la atmosfera

uns mil dos cents graus

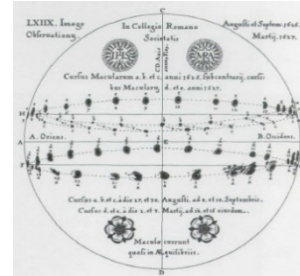
més fredes que el seu entorn

- Camp magnètic molt intens (<5000 G) que emergeix de l'interior del Sol
- Canvien de forma i de posició
- Vida: d'uns dies a un parell de mesos

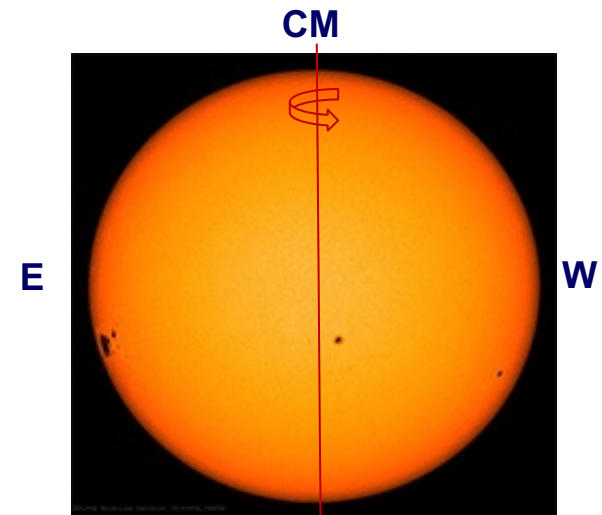
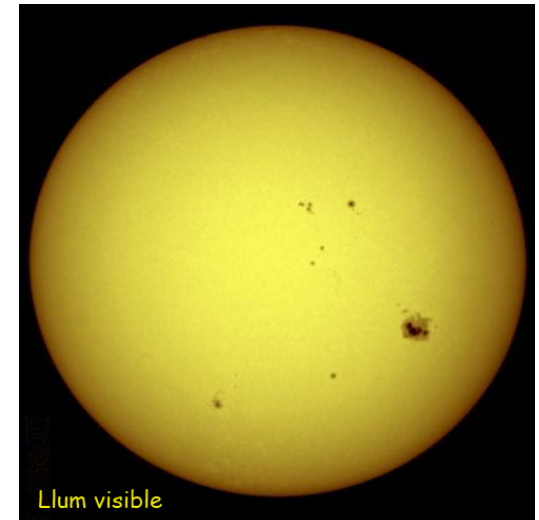
- Període mitjà de **rotació** del Sol: **27,3 dies**

[període sideri: 25,38 dies]

El seu nombre i extensió varia amb el cicle solar: **la atmosfera solar té una estructura molt canviant**



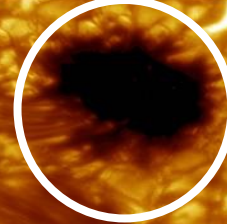
C. Scheiner (1626). *Rosa Ursina sive Sol, ex admirando facularum & macularum suarum phoenomeno varius*



Solar Dynamic Observatory (SDO) NASA. 17–20 octubre 2014

Per els humans, el que diferencia el **Sol** de les altres  és que

- està **molt a prop!**
- la **activitat solar** ens afecta! 



**Taca d'uns
16.000 km**

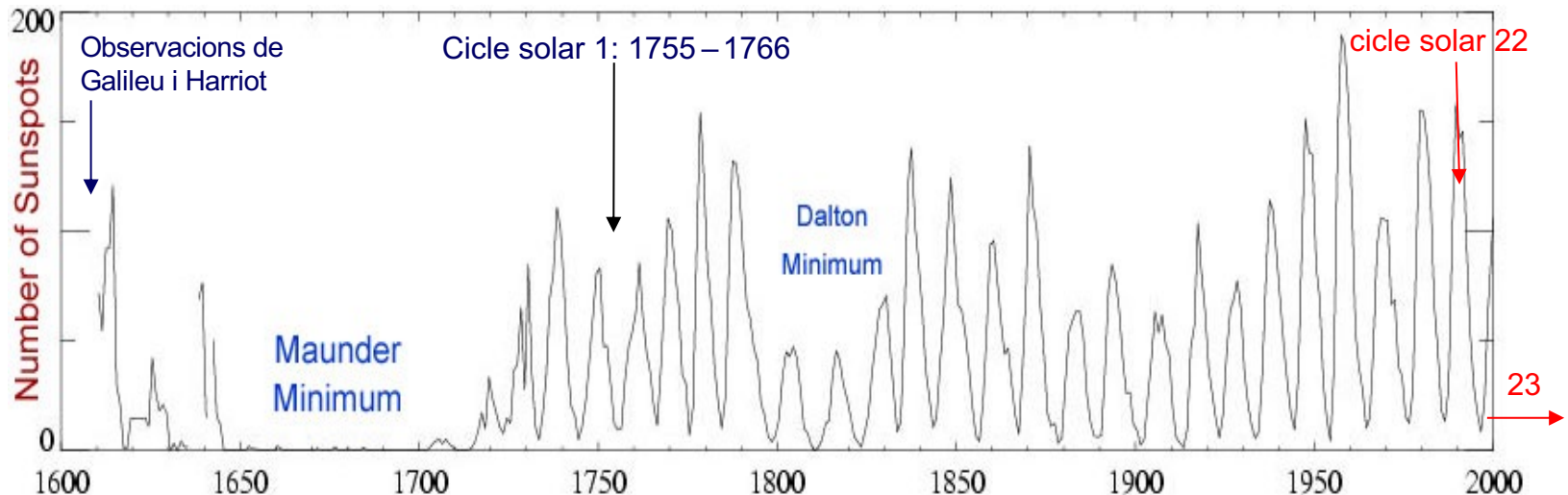
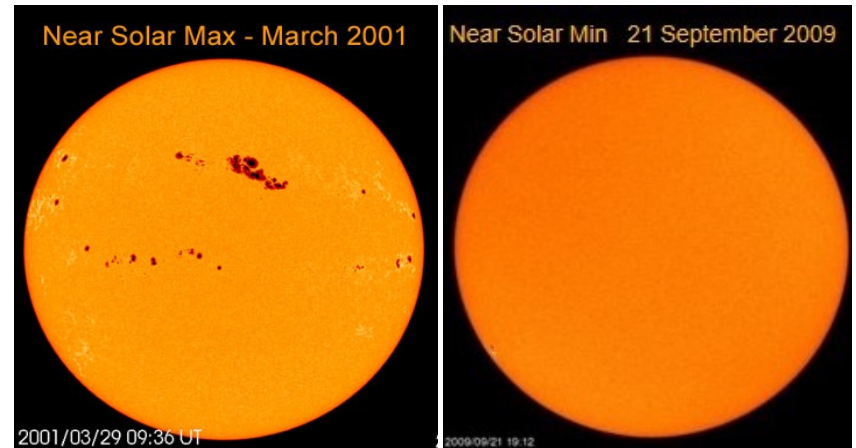


Torre solar sueca, telescopí al buit d'1 m de diàmetre. El Roque de los Muchachos (La Palma) Resolució : ~70 km

El cicle d'activitat solar

- 1843. S.H. Schwabe, comptant taques, descobreix el **cicle d'activitat solar**. R. Wolf (1848) n'estableix una durada d' **11,1 anys** (varia entre 9,6 i 14,1 anys)

[Nombre de Wolf o de taques, $R = k(f + 10g)$.
Des de juliol 2015: ISN (International Sunspot Number)]



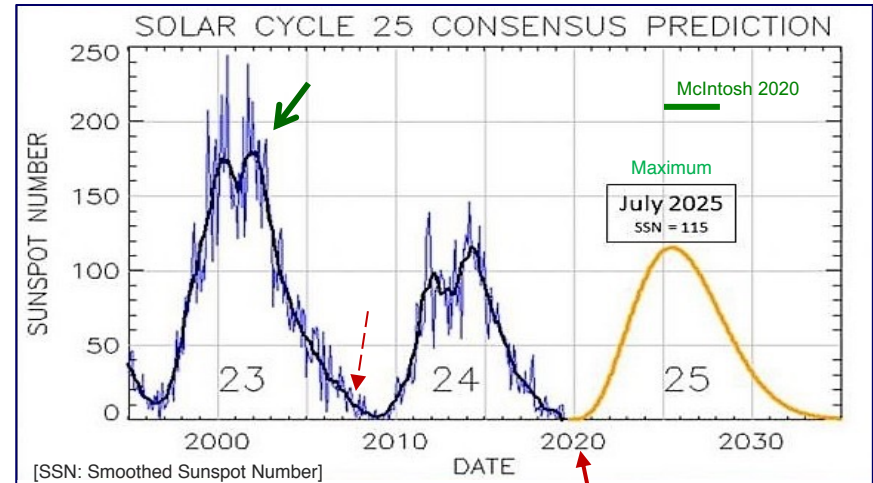
[Lista dels cicles solars. https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_cycles]

- Les **taques** són un aspecte rellevant de l'**activitat solar**: quan més taques, més activitat solar, però

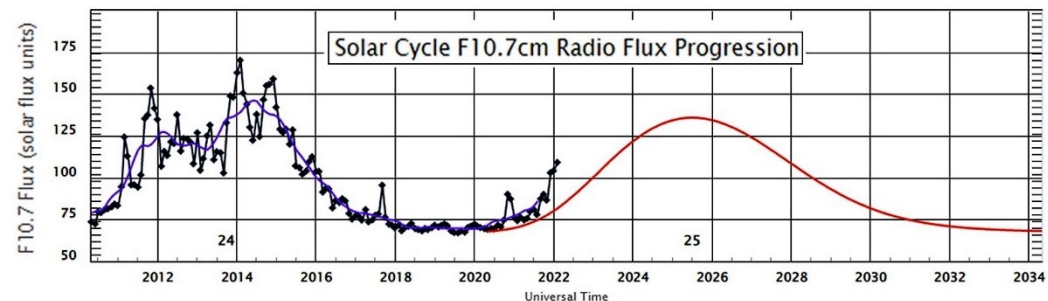
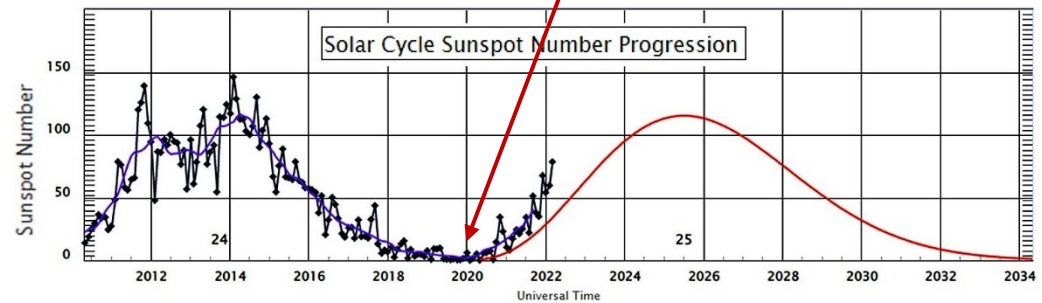
no en són la causa

- El nombre de taques és l'indicador més conegut de l'**activitat solar**, però

no és l'únic

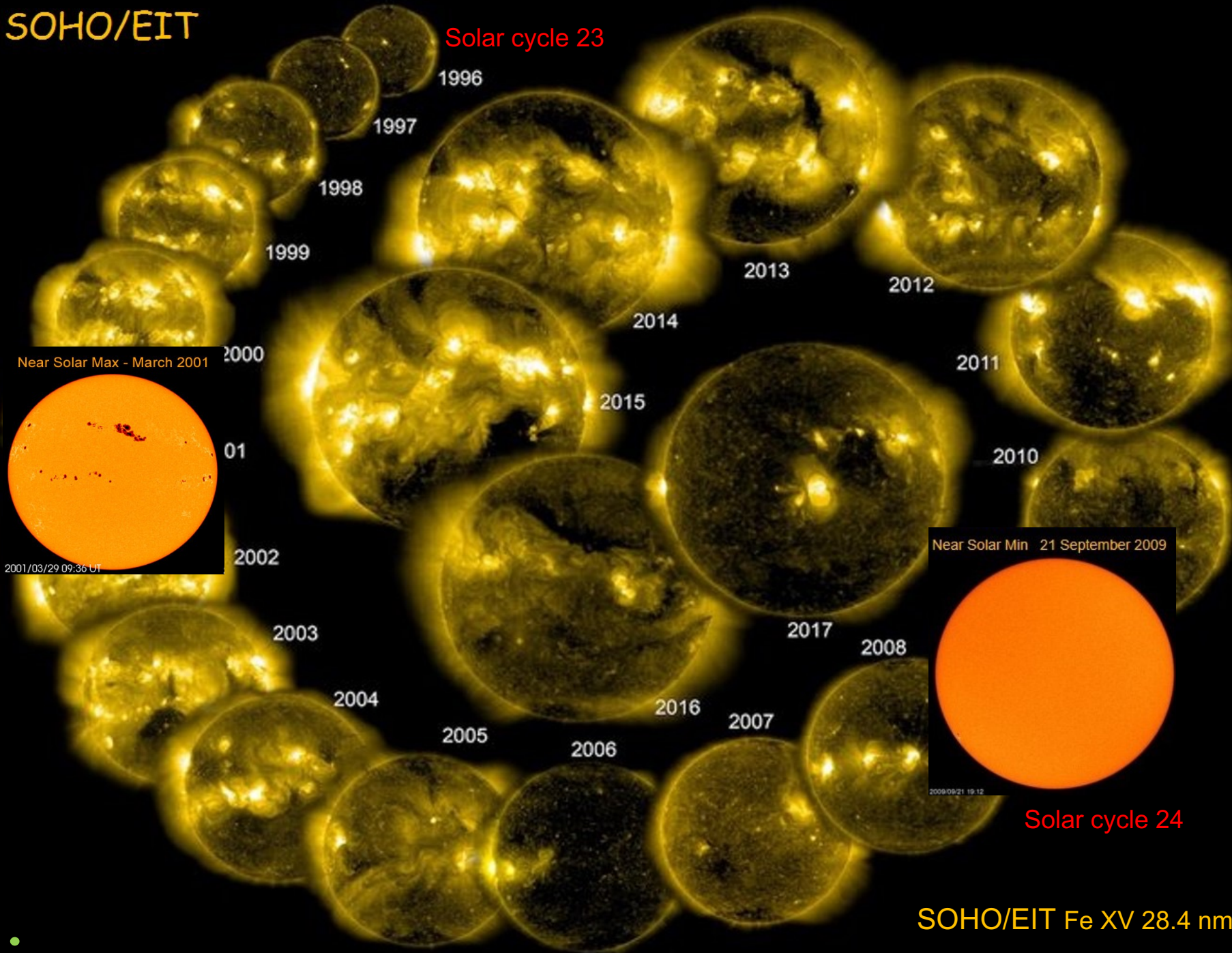


Minimum: Desembre 2019



SOHO/EIT

Solar cycle 23



Solar cycle 24

SOHO/EIT Fe XV 28.4 nm

Rotació i rotació diferencial del Sol

- 1854. Richard C. Carrington descobreix que la **rotació solar varia amb la latitud** heliogràfica

Període:

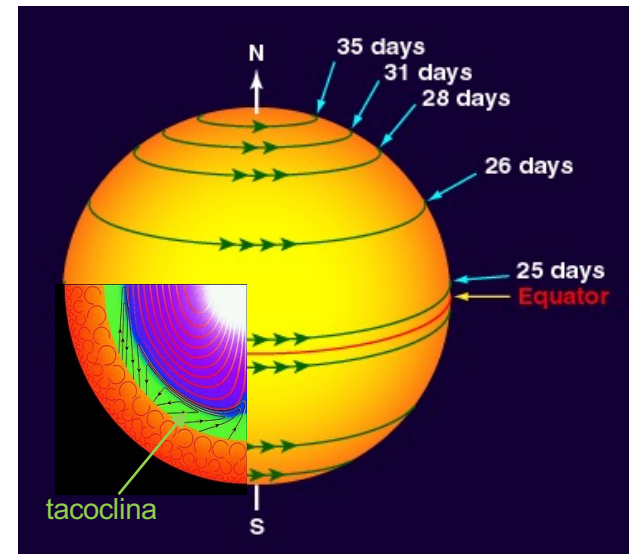
- a l'equador solar: **24,5 dies**
- a les regions polars: **34,5 dies**

- 1962. Les observacions mostren que la rotació solar és

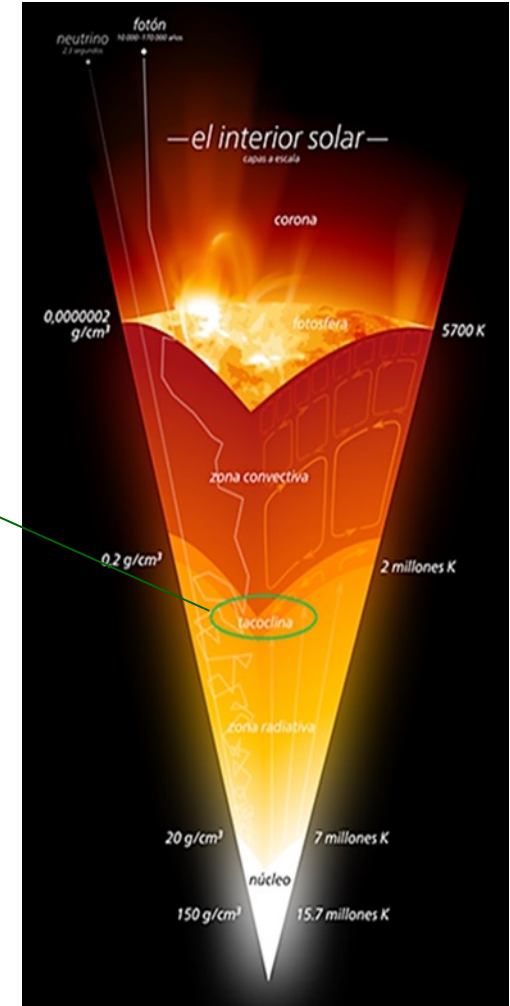
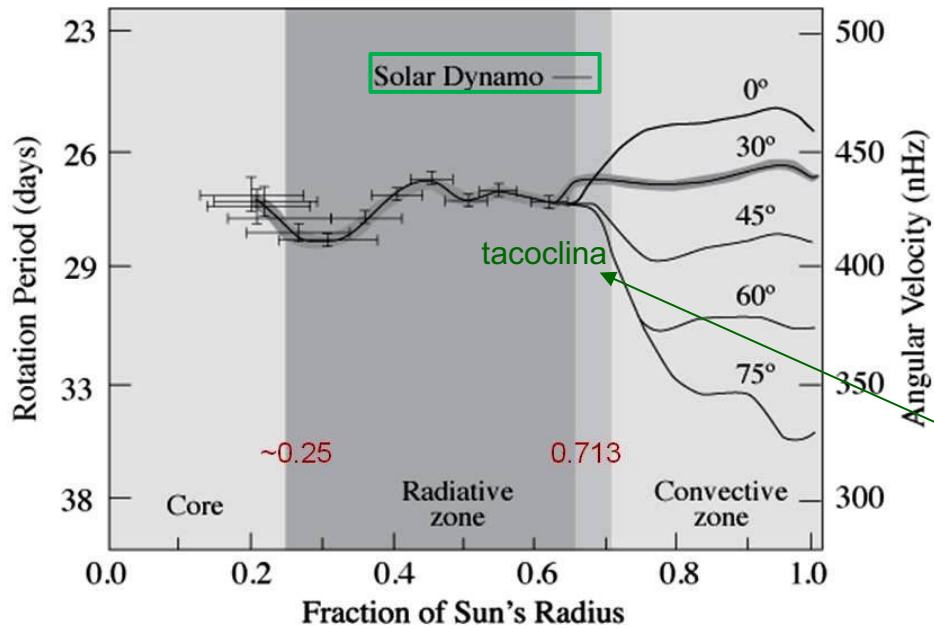
- **Uniforme** a la regió més interna (gira com un sòlid rígid)

Període: **uns 26 dies**

- **Variable** en profunditat, latitud a la regió convectiva externa i amb el cicle d'activitat solar



A la **tacoclina** és genera el **camp magnètic** del Sol que emergeix a l'atmosfera



El **lloc** d'aquest 'petit' desajust identifica on **s'origina** el camp magnètic solar

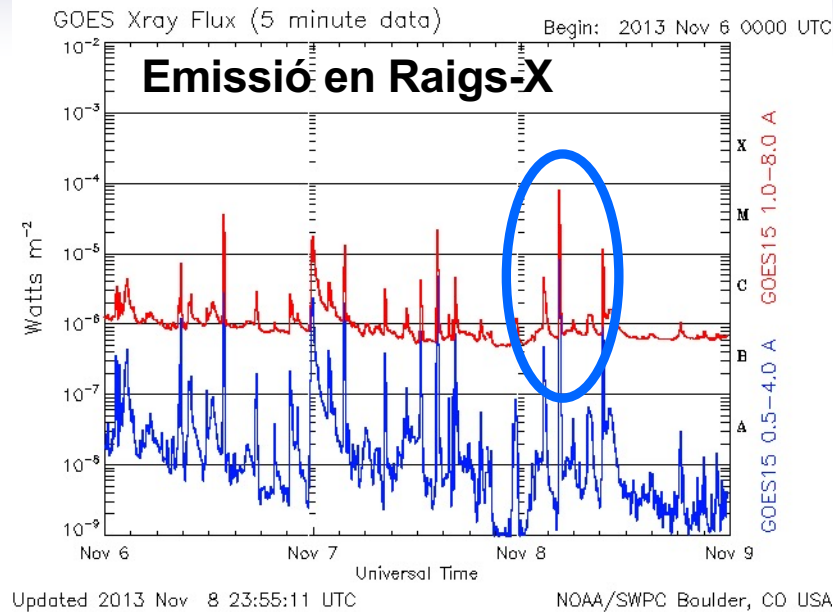
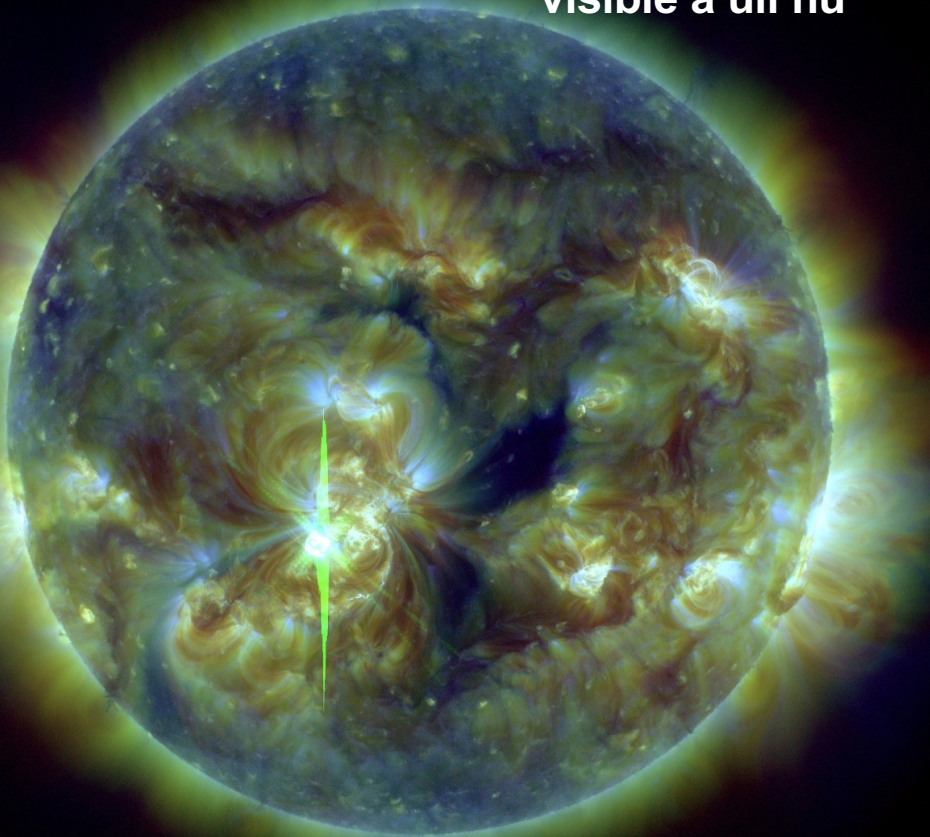
Fulguracions

2002-Apr-21
00:43:09

Les fulguracions solars: Exemple, 8 novembre 2013

SDO

Corona solar: no visible a ull nu



➤ Es classifiquen en tres tipus:
C, M, X; La de l'exemple M8.0

Energia emesa: $\sim 10^{23}$ J \rightarrow
100 Mil milions de kilotons
(1 kilotó \sim 1.2 milions de kWh)
1 mes a casa: 150 kWh llum
1 kilotó \sim 8000 mesos de llum
Rang energies: $10^{20} - 10^{25}$ J

SDO/AIA- 211 2013/11/08 04:25:27
SDO/AIA- 193 2013/11/08 04:25:30
SDO/AIA- 171 2013/11/08 04:25:35

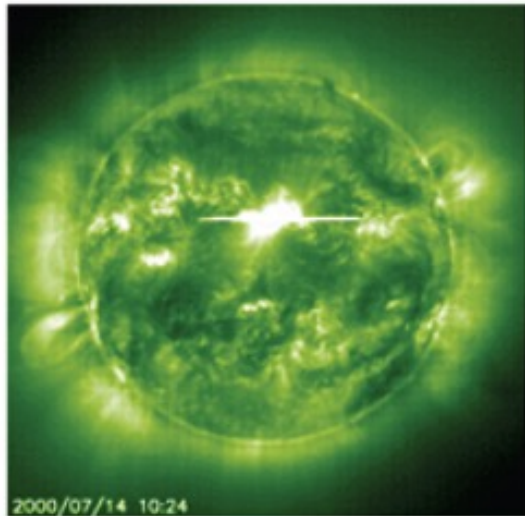
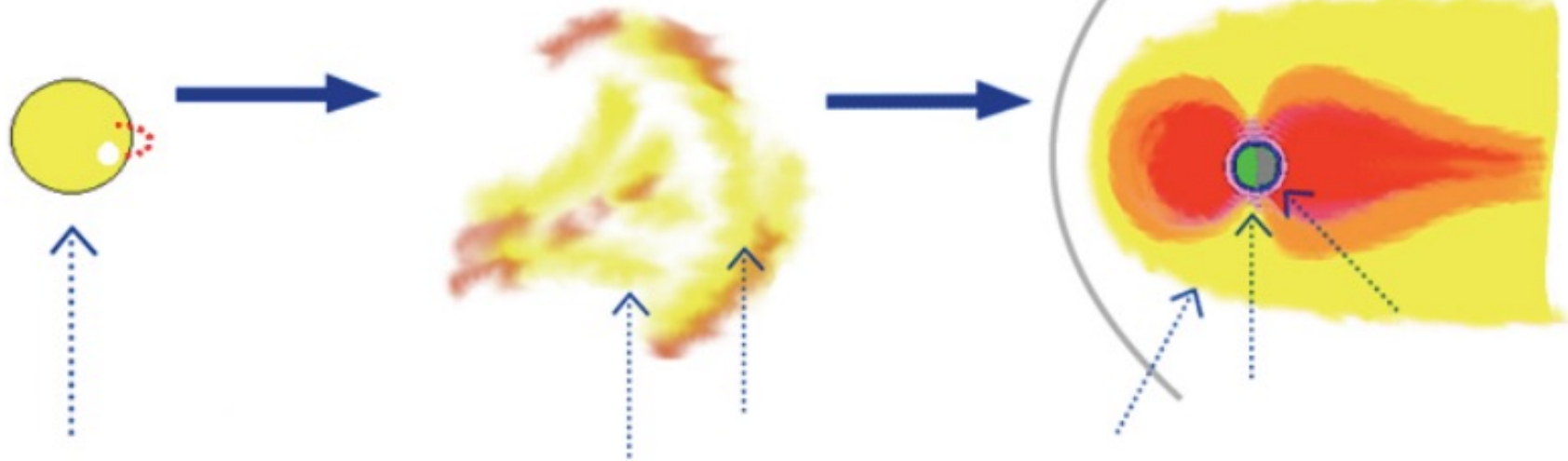
aia.lmsal.com



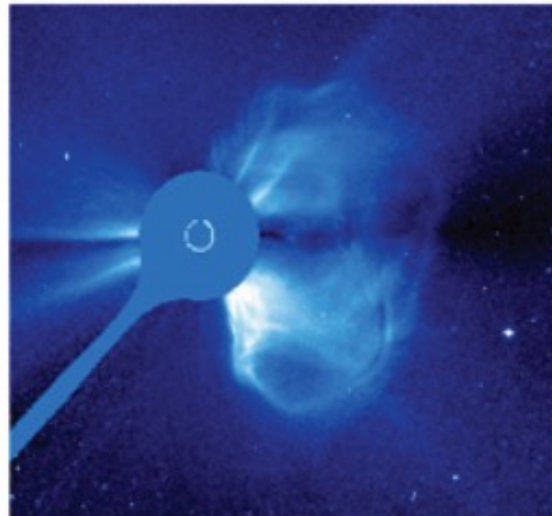
Imatge en l'ultraviolat extrem –Temperatura: 1-2 milions de graus

Ejeccions de matèria coronal (CMEs)

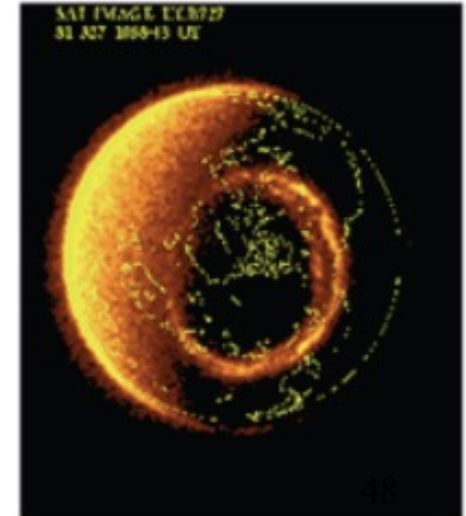
A mitjans de la dècada dels 80, el paradigma de les fulguracions solars és substituït pel de les ejeccions de matèria coronal. Són la principal causa de les aurores boreals, juntament amb els dols de vent solar ràpid provinents de forats coronals.



Flares, Coronal Mass Ejections

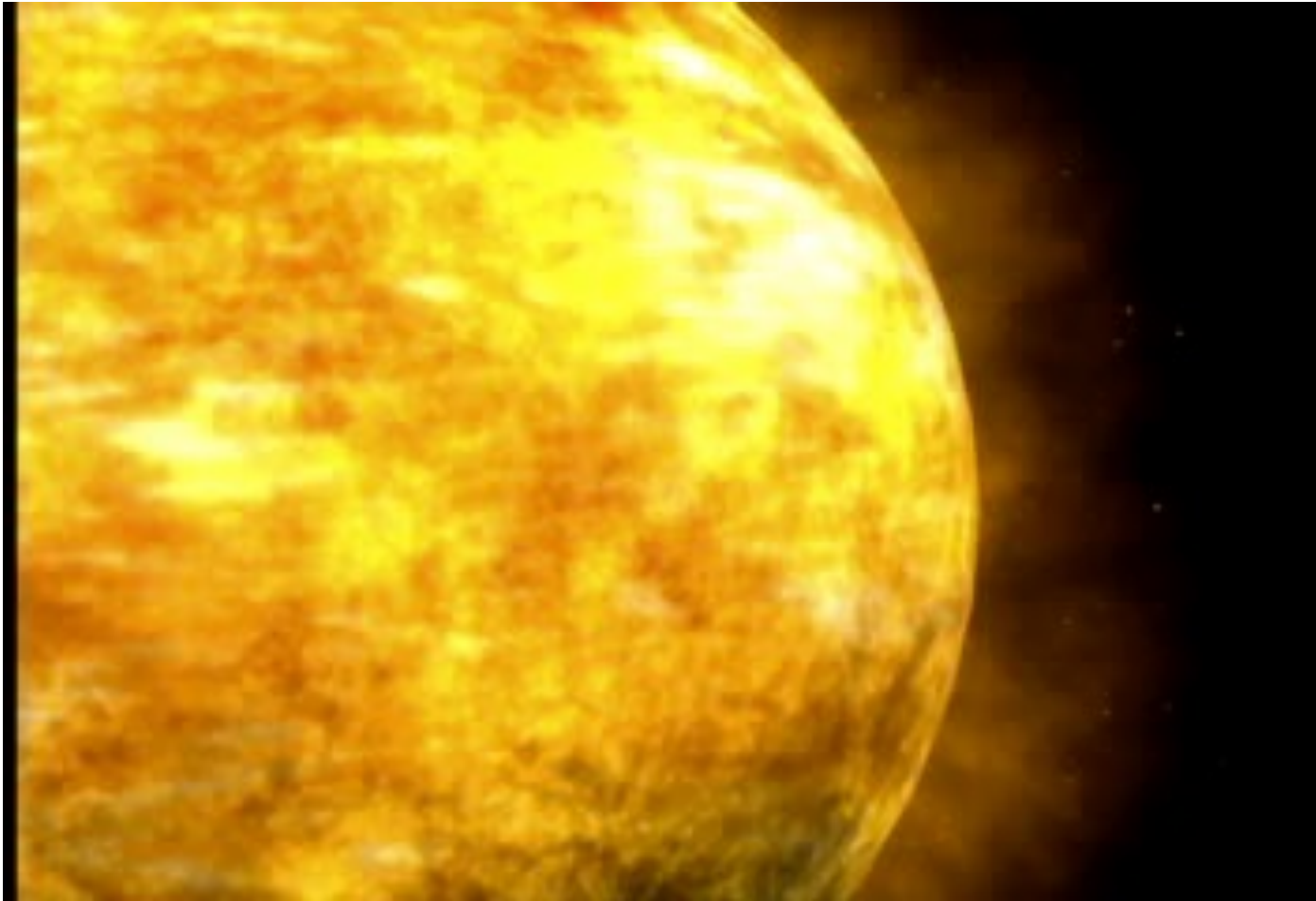


Coronal Mass Ejection, Solar Wind Shock

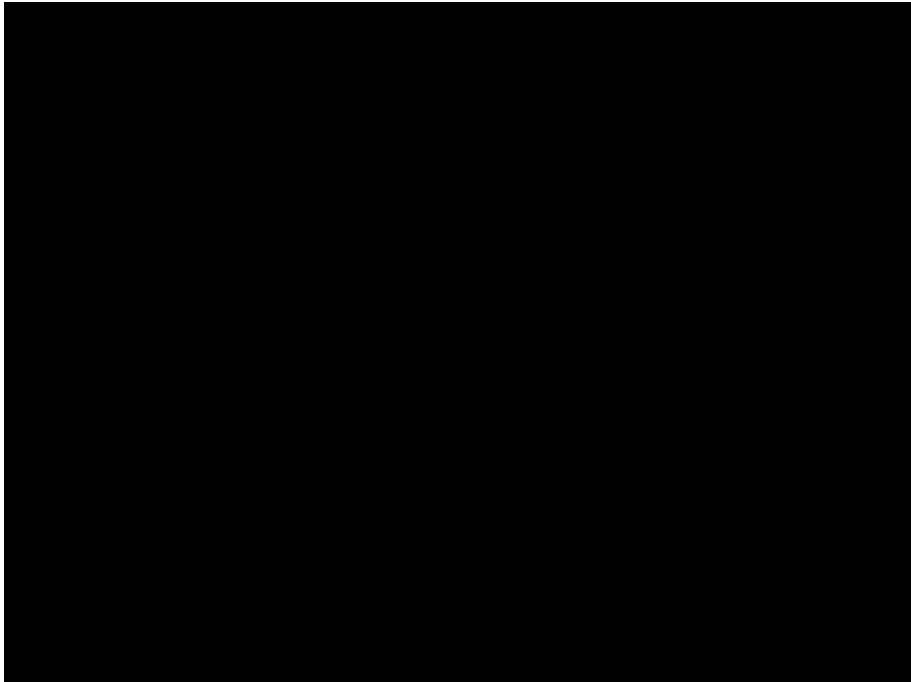


Magnetosphere ionosphere atmosphere

Ejeccions de massa coronal propagació:



Ejeccions de massa coronal (CMEs)



Característiques generals:

Massa ejectada: $< 150 \times 10^9$ tones
 $= 1.5 \times 10^{14}$ kg,

(plasma: protons, electron, and other ions)

Velocitats: 400 – 3000 km/s

Temps d'arribada a Terra: < 1 dia – 4 dies

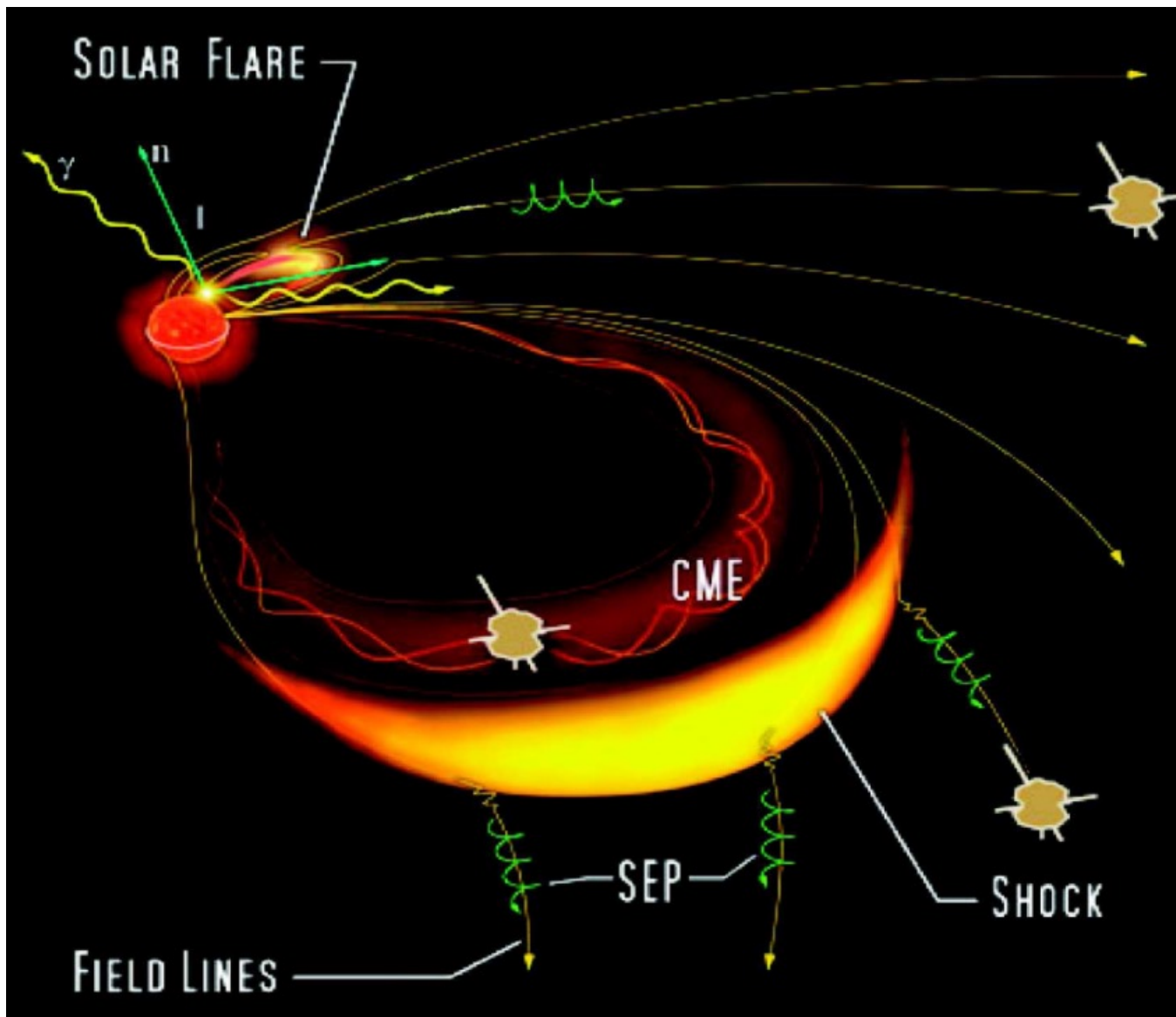
Temps d'arribada a Terra de les més ràpides: 21 hores, amb una velocitat de: 7×10^6 km/h (~ 1970 km/s) i energia emesa de 50×10^{12} kilotons ($\sim 5 \times 10^{25}$ J).

Fonts d'esdeveniments de partícules solars energètiques

Fulguracions

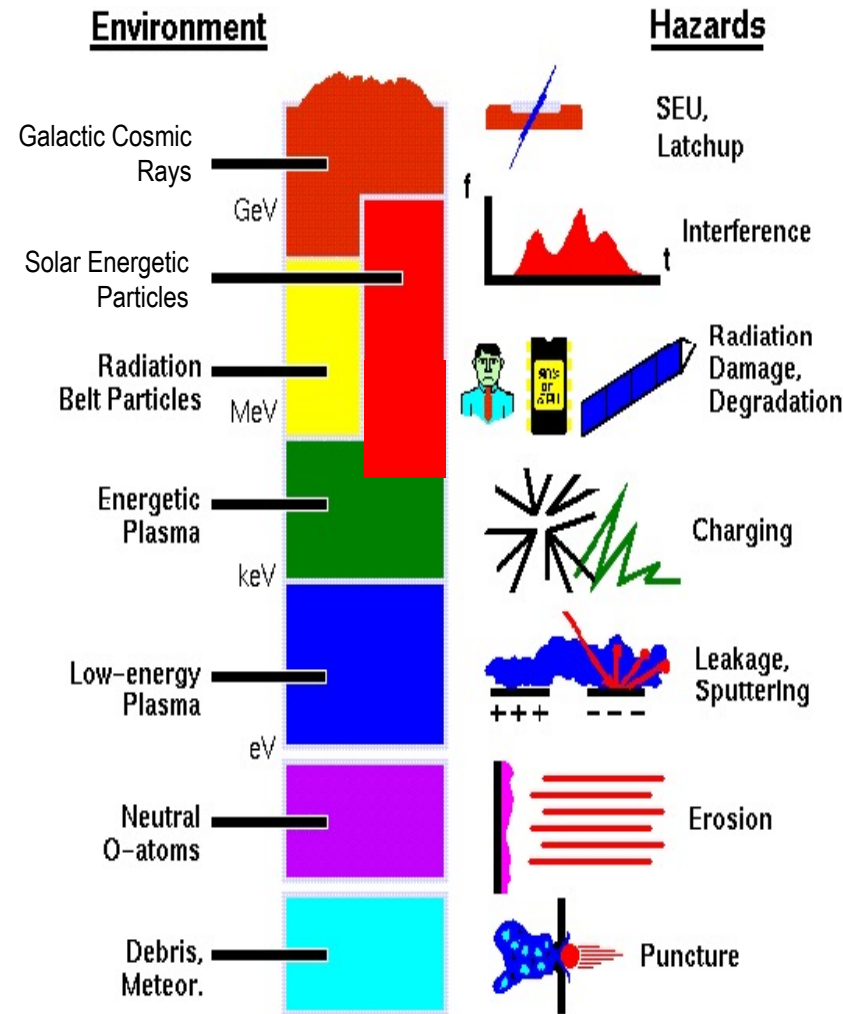
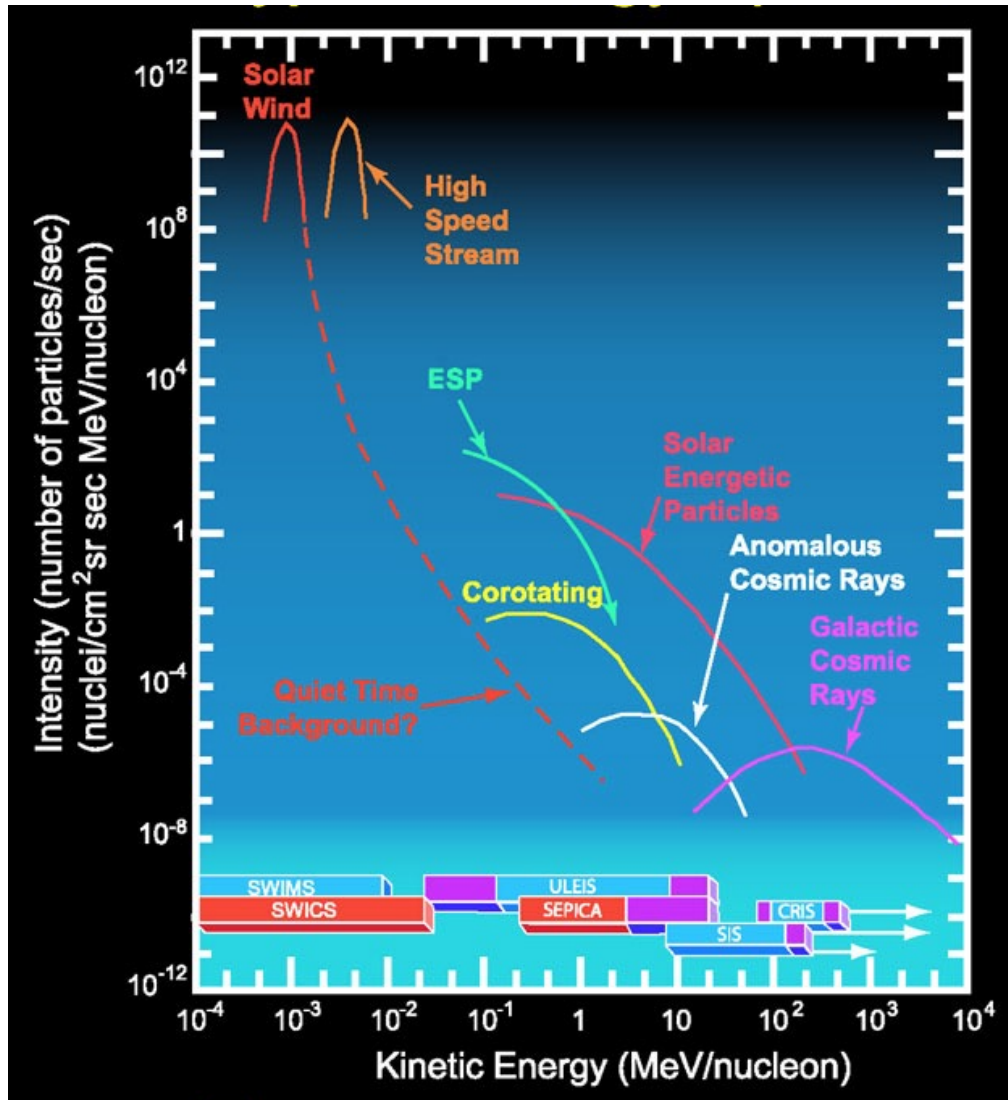
i

Xocs
associats a
ejeccions de
massa
coronal



Credit: Adapted from NASA's
Solar Sentinels STDT report
(2006)

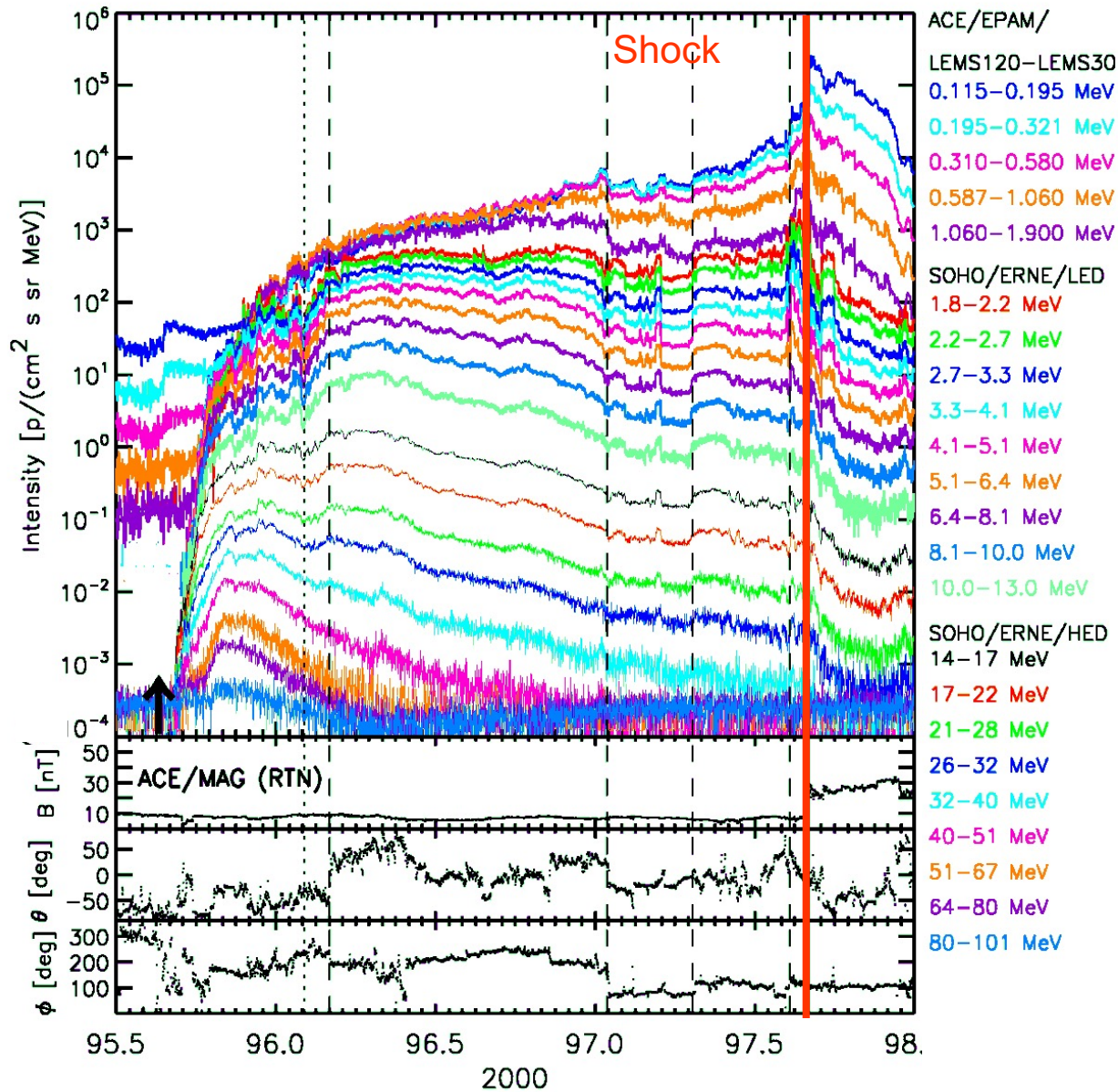
Particles in the Heliosphere



(Credit: TEC-EES <http://space-env.esa.int>)

Differential Intensity energy spectra for Oxygen Ions (from Lee, Mewaldt and Giacalone, 2012, Shock acceleration of Ions in the Heliosphere, Space Science Reviews, 173, 247-281)

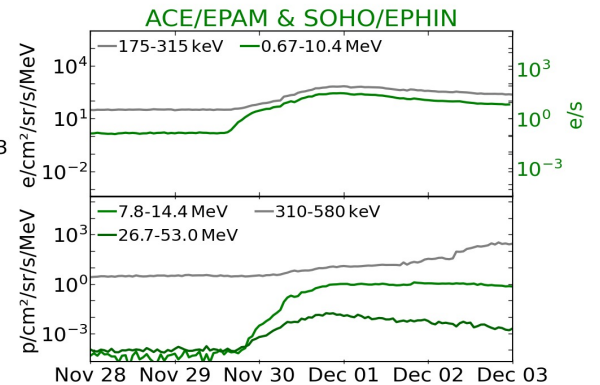
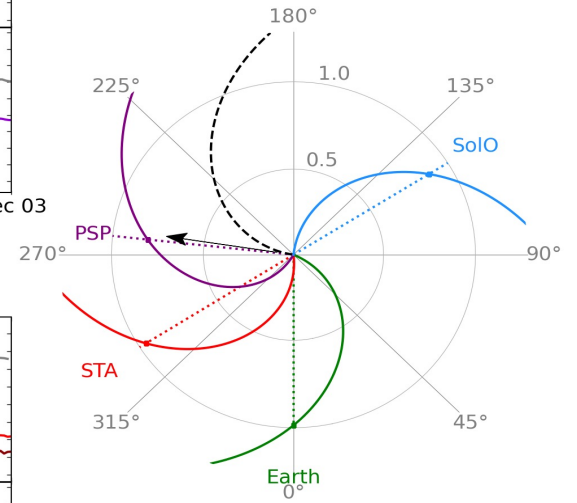
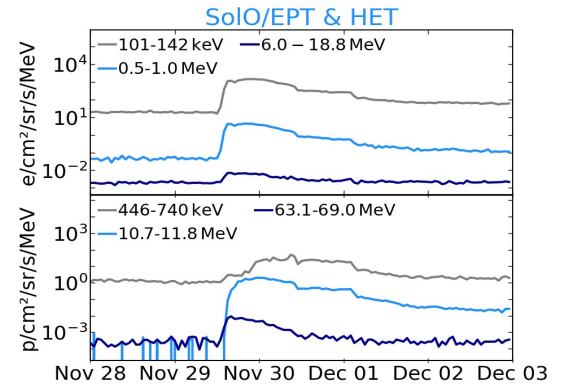
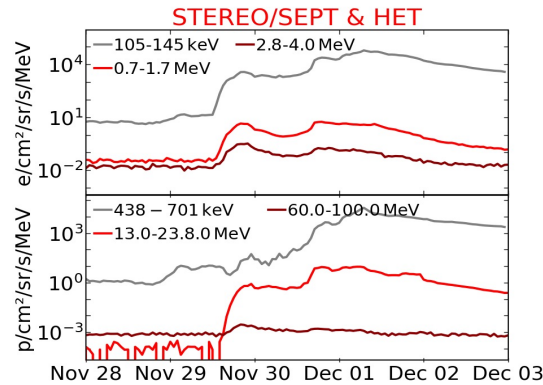
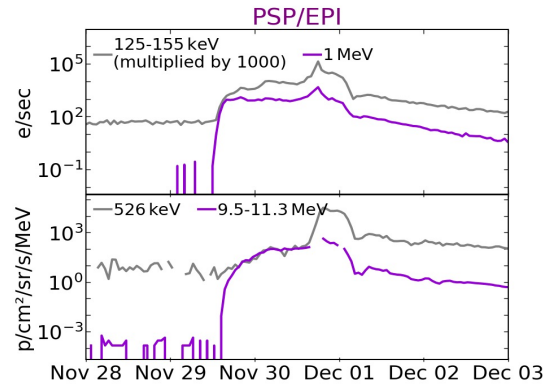
Esdeveniments de partícules solars energètiques



Observació d'un esdeveniment de partícules solars energètiques gran

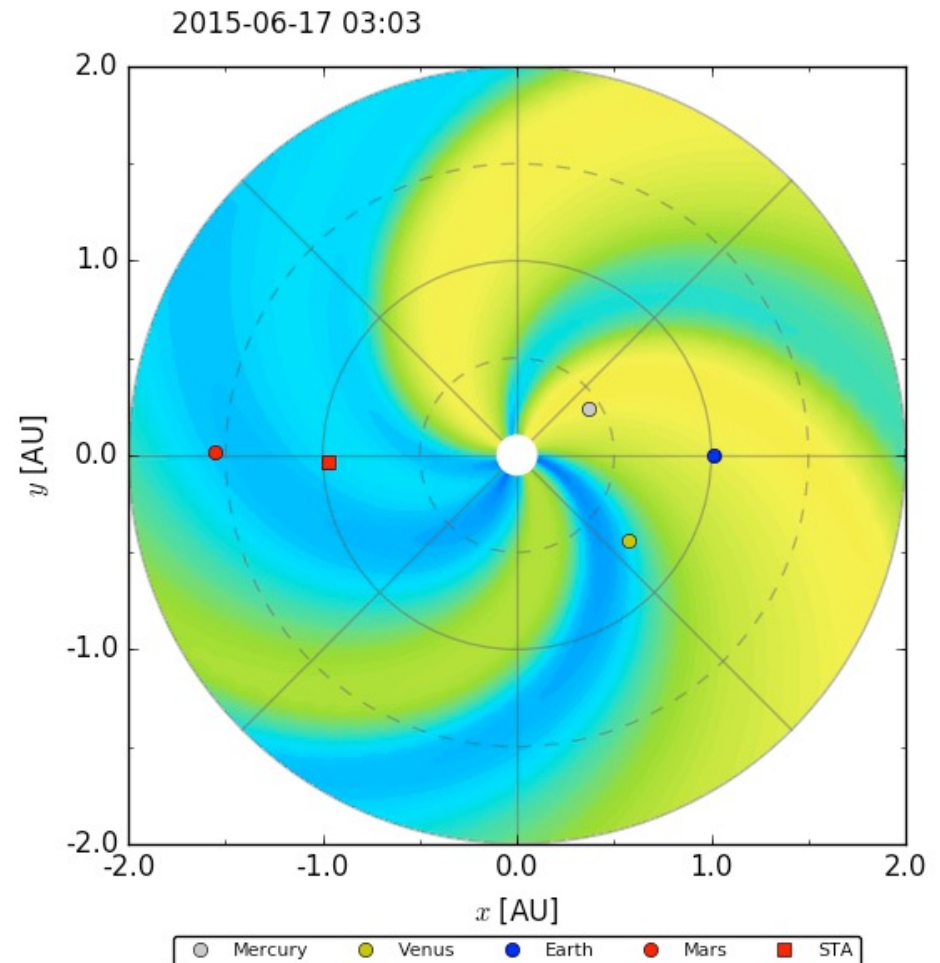
Primer esdeveniment de partícules solars vist per **Solar Orbiter** i **Parker Solar Probe** el 29 November 2020

Solo and PSP permeten observar esdeveniments com mai abans, perquè orbiten al voltant del Sol amb perihelis molt propers a l'estrella.

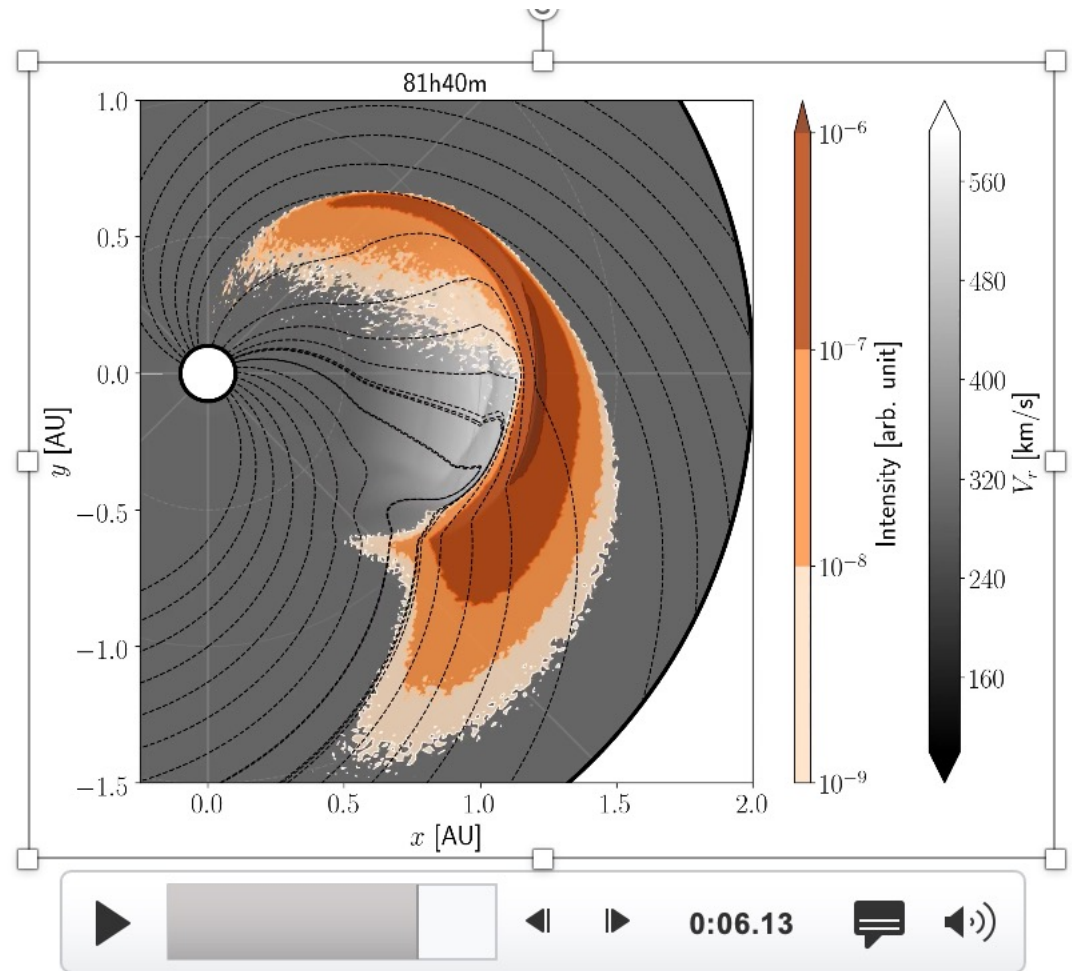


EUHFORIA: 3D MHD
solar wind model with
injected CMEs (Pomoell
& Poedts+18 JSWSC)

Simulacions magnetohidrodinàmiques tridimensionals de la propagació d'ejeccions de massa coronal. A la figura es veu en colors la velocitat del plasma vent solar (blau, lent, 300-400 km/s; verd-groc de 400 a 700 km/s i vermell > 800 km/s rapid).

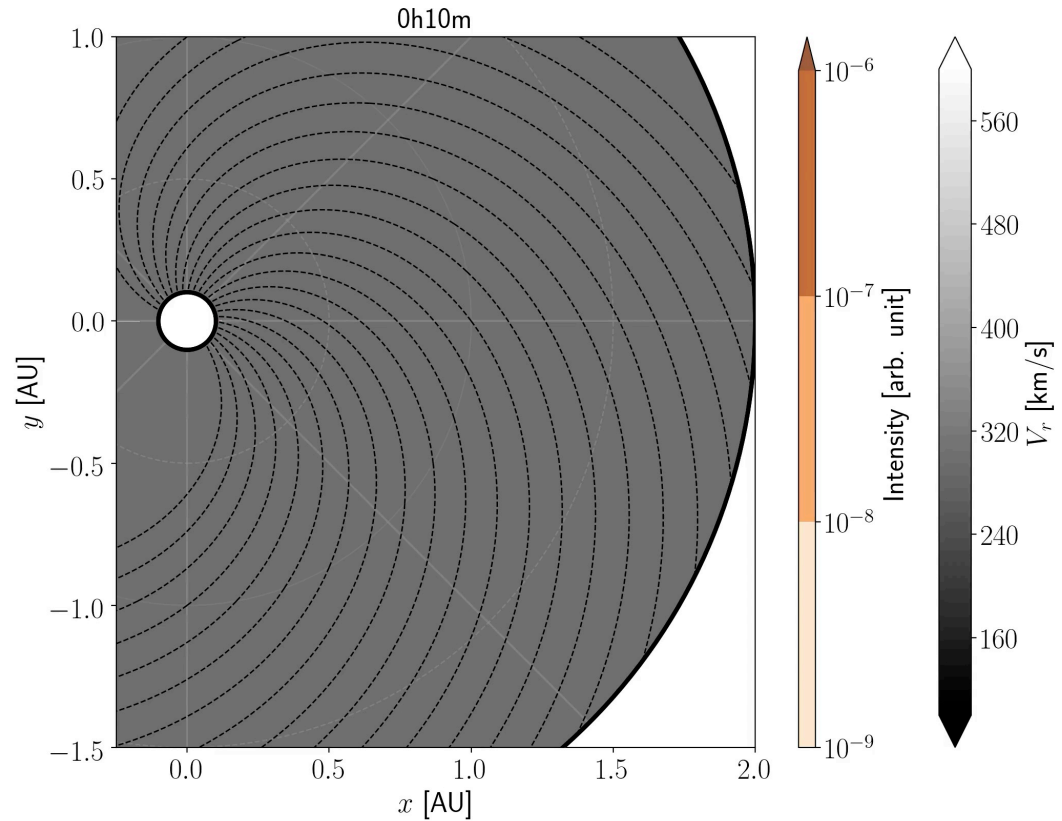


Exemple:
Simulació del
transport i
acceleració de
partícules
(Wijsen, 2020)



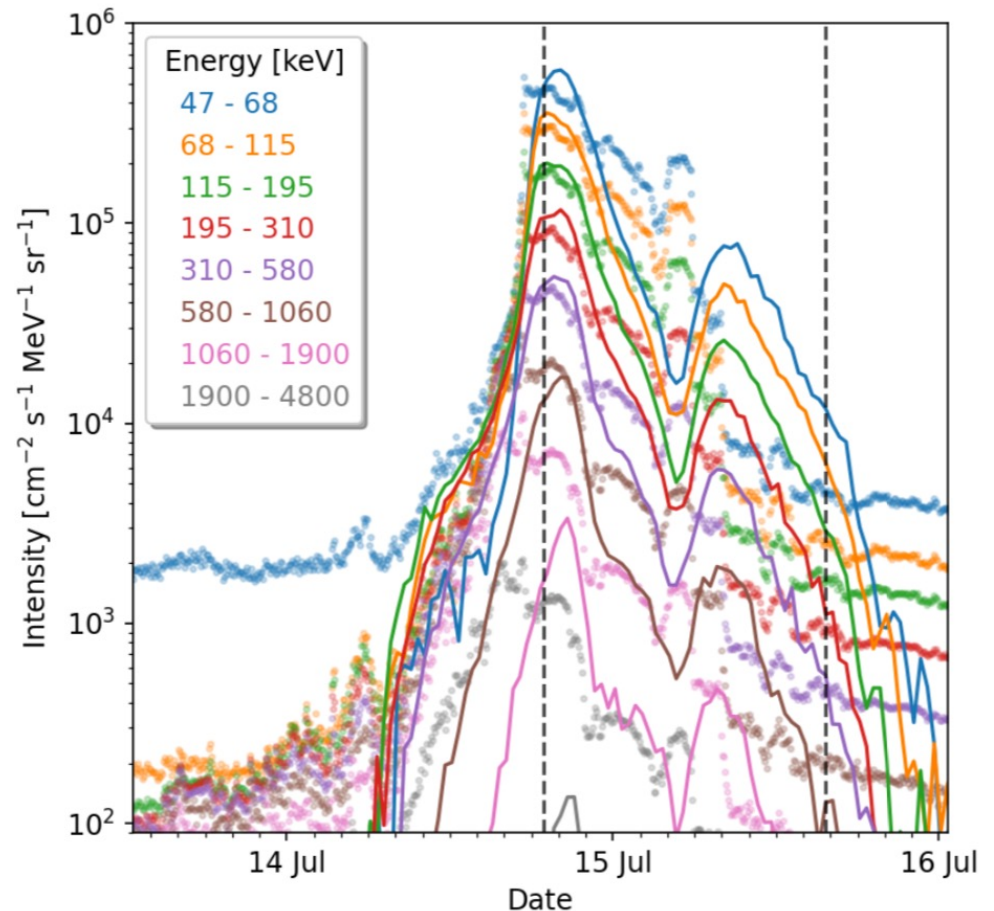
Sobre la simulació de la propagació de l'ejecció de massa coronal, es pot simular l'acceleració i el transport de protons > 30 keV

Exemple:
Simulació del
transport i
acceleració de
partícules
(Wijsen, 2020)



Sobre la simulació de la propagació de l'ejecció de massa coronal, es pot simular l'acceleració i el transport de protons > 30 keV

Exemple:
simulació de
l'esdeveniment
del 14 de Juliol
de 2012
(Wijsen+ A&A,
2022)



Les intensitats mostrades (punts) són fluxos diferencials de protons de diferents energies mesurats per SOHO a L1 (davant la Terra)

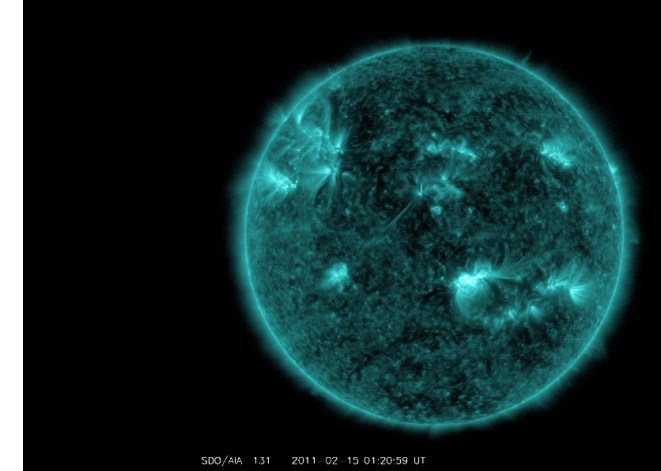
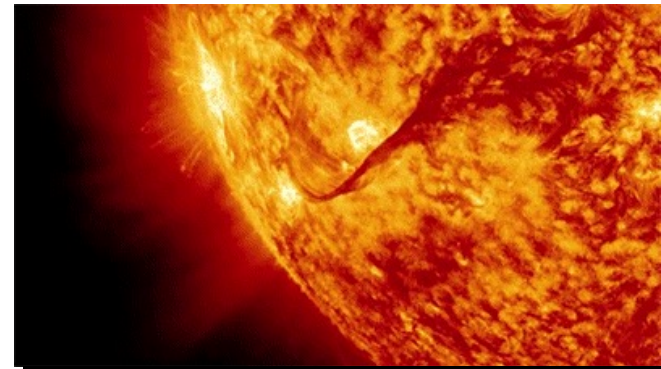
Tempesta Solar

Esdeveniments solars eruptius:

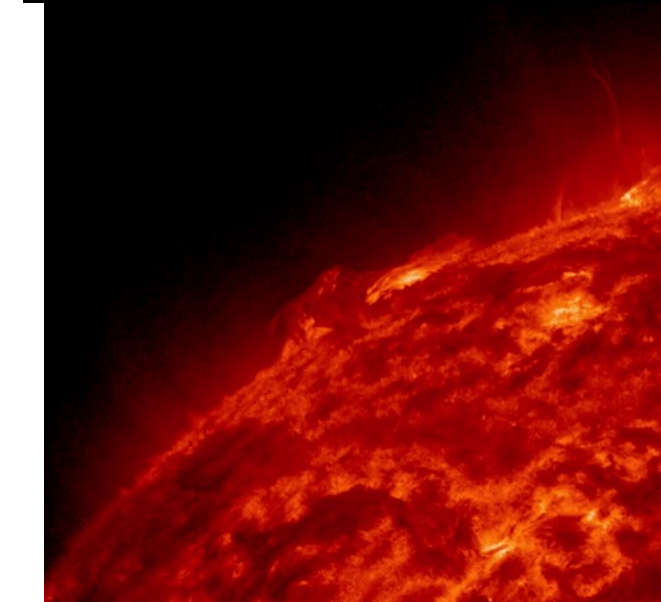
- Fulguracions
- Ejeccions de massa coronal (CME)

Timeline at Earth:

- **8 minutes:** EUV, X-ray emission reach earth.
- **20 min. - 1 hour:** solar energetic particle onset
- **1- 4 days:** CME arrives at earth and causes a geomagnetic storm



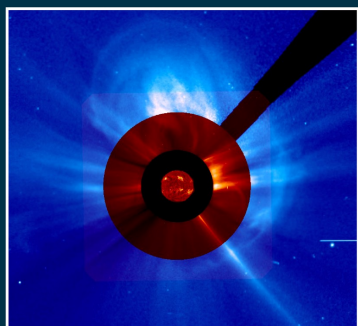
SDO/AIA 131 2011-02-15 01:20:59 UT



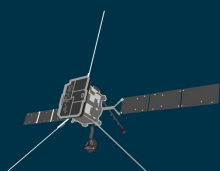
Com Solar Orbiter pot ajudar a predir tempestes solars que arribin a la Terra?

TRACKING SPACE WEATHER

Solar Orbiter felt a coronal mass ejection (CME) wash over it on 11 March 2022, predicting when it would hit Earth and allowing astronomers to capture its impact as aurora



10 March: CME observed on Sun by Solar Orbiter and Soho

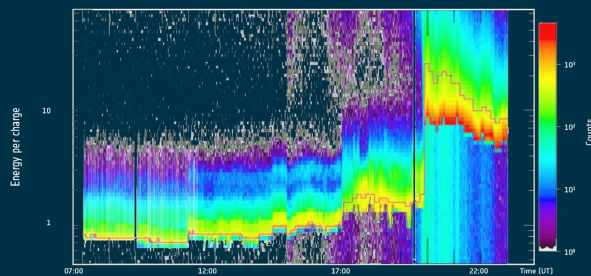


Solar Orbiter
67 million km from Sun

EUI: Extreme Ultraviolet Imager
MAG: Magnetometer
SWA: Solar Wind Analyser

Central Sun image: ESA & NASA/Solar Orbiter/EUI team; corona imagery: SOHO (ESA & NASA); Solar Orbiter data: ESA & NASA/Solar Orbiter/MAG & SWA Teams; Wind data: NASA/GSFC/Wind; Aurora: J Bant Sexson IV

11 March: Solar Orbiter SWA detects CME as a change in properties of the solar wind



11 March: Solar Orbiter MAG detects CME in magnetic field



13 March: CME reaches Earth; Wind detects CME in magnetic field



Wind

- 1.5 million km from Earth
- 150 million km from Sun



Soho



13 March:
Aurora triggered in Earth's atmosphere



La variació dels colors de l'aurora depèn de la seva altitud:

Per sota 100 km les emissions **blava** i **vermella** del nitrogen predominen.

De 100 a 250 km d'alçada, la línia **verda** – **groga** de l'oxigen és la que destaca.

Per sobre 250 km: la línia **vermella** de l'oxigen.

