



# Le esplosioni solari e il loro effetto sull'ambiente terrestre: la nuova disciplina della "meteorologia spaziale"

Igino Coco

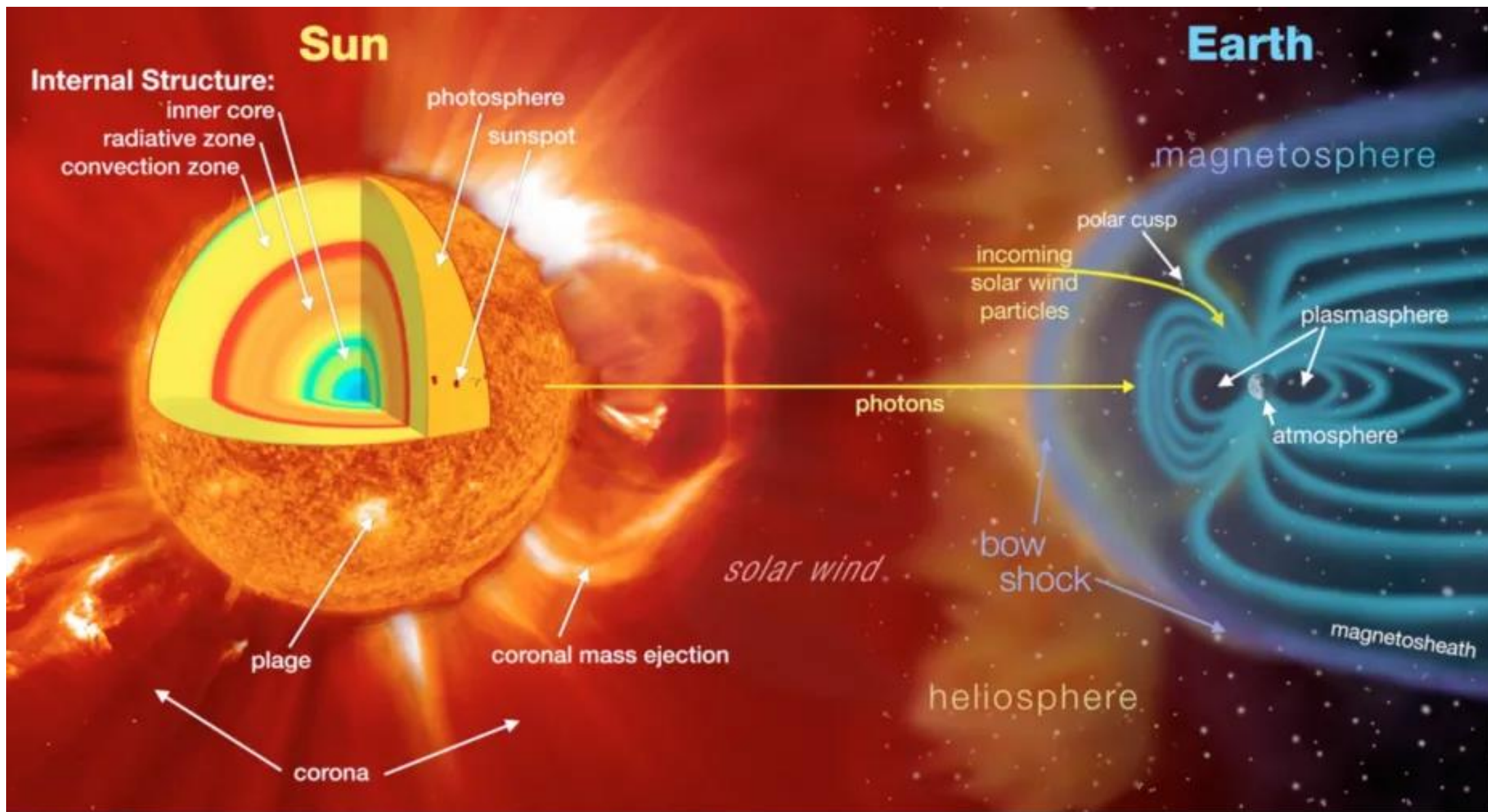
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

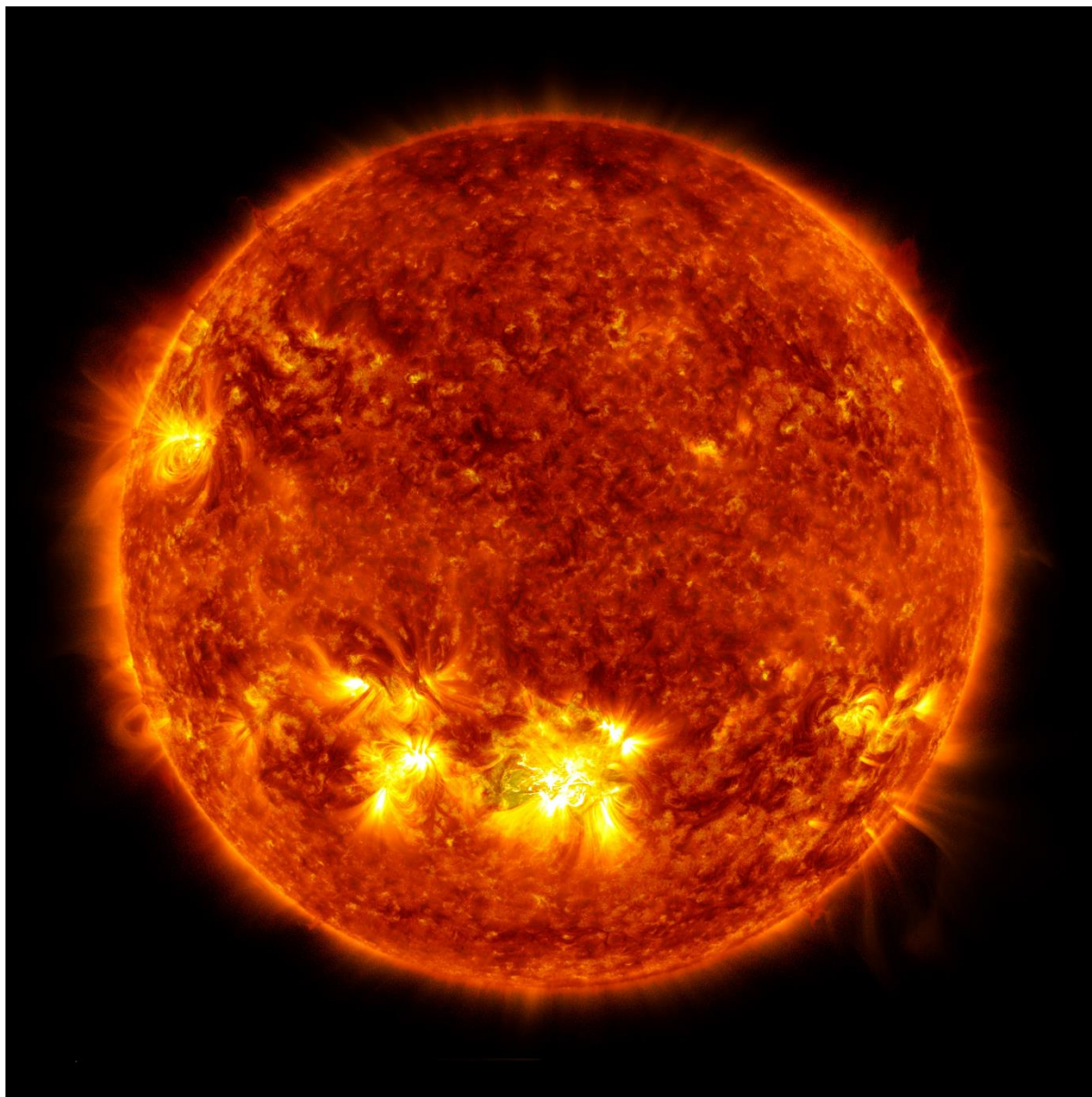
Sezione Roma 2

[igino.coco@ingv.it](mailto:igino.coco@ingv.it)

International Cosmic Day 2024

INFN - Laboratori Nazionali di Legnaro





Partiamo dal Sole...

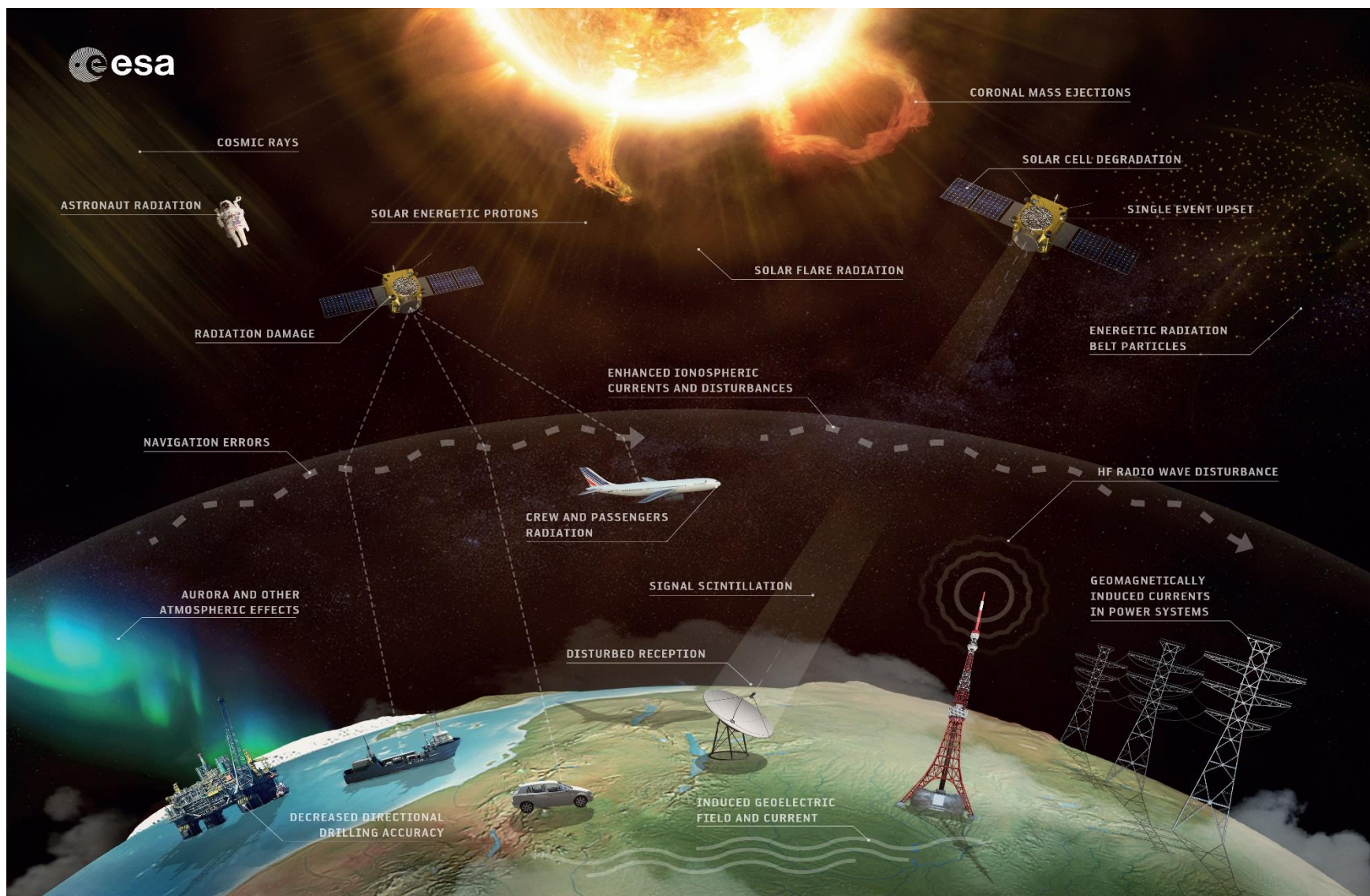
Perché è importante studiare il  
Sole?



## Perché è la nostra stella!

Quasi tutta l'**energia** che investe la Terra dallo spazio sotto forma di radiazione e particelle e che la tiene viva proviene dal Sole.

Il Sole ci dà la vita ma ci mette anche un po' in pericolo...





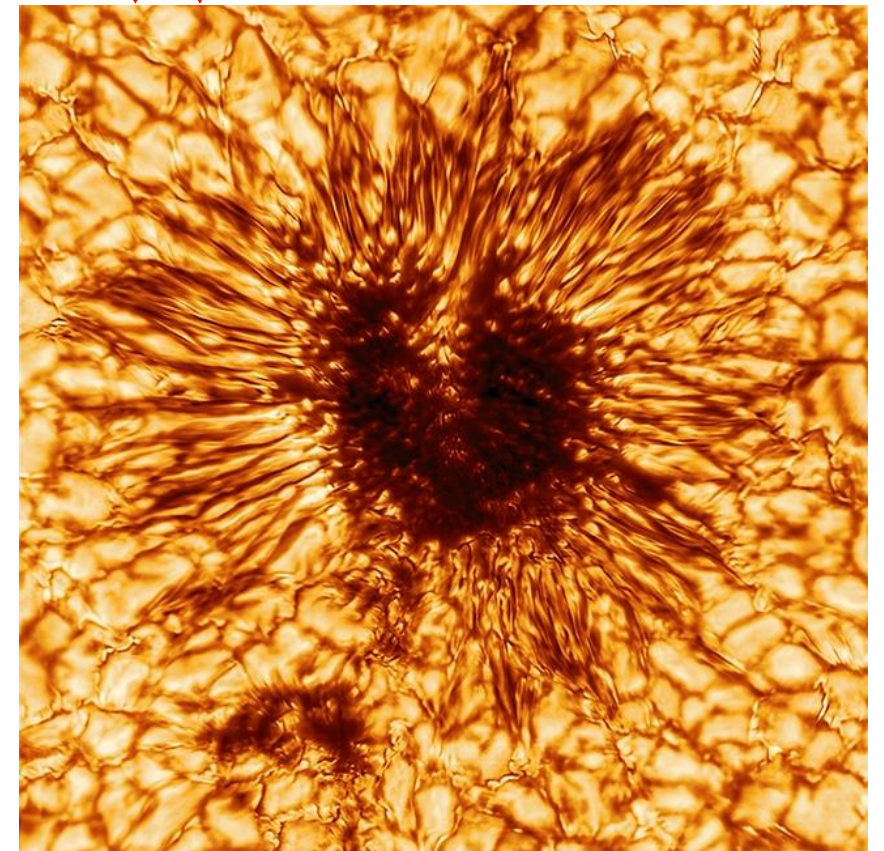
## Perché è vicino!

Dista «soltanto» **150 milioni di chilometri**...I più moderni **telescopi solari** sono in grado, anche da questa distanza, di osservare strutture sull'atmosfera del Sole distanti tra loro poche decine di chilometri.



*Inouye Solar Telescope, isola di Maui, Hawaii (US National Science Foundation)*

Ca. 1000 km

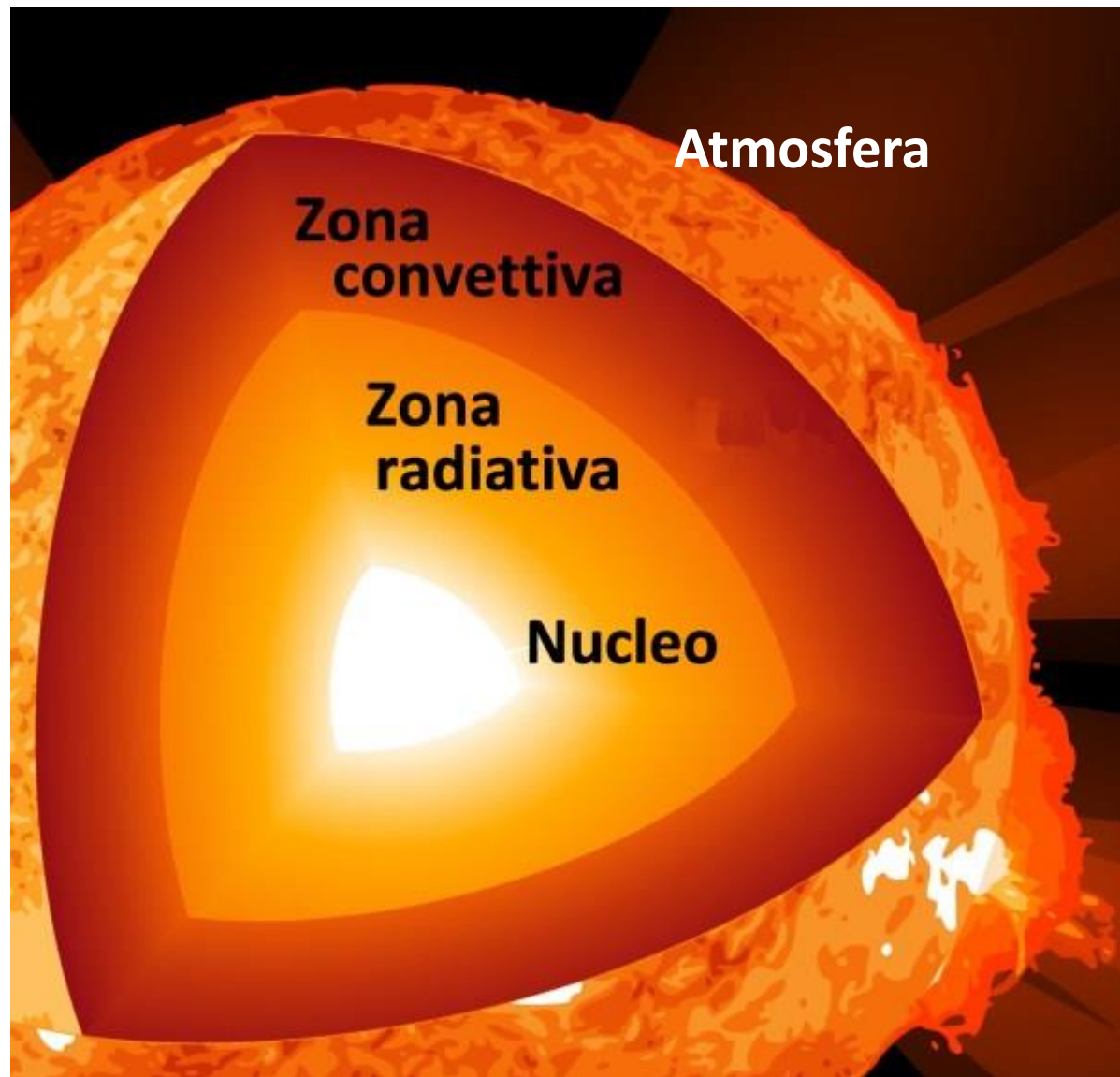




## Perché è un laboratorio naturale

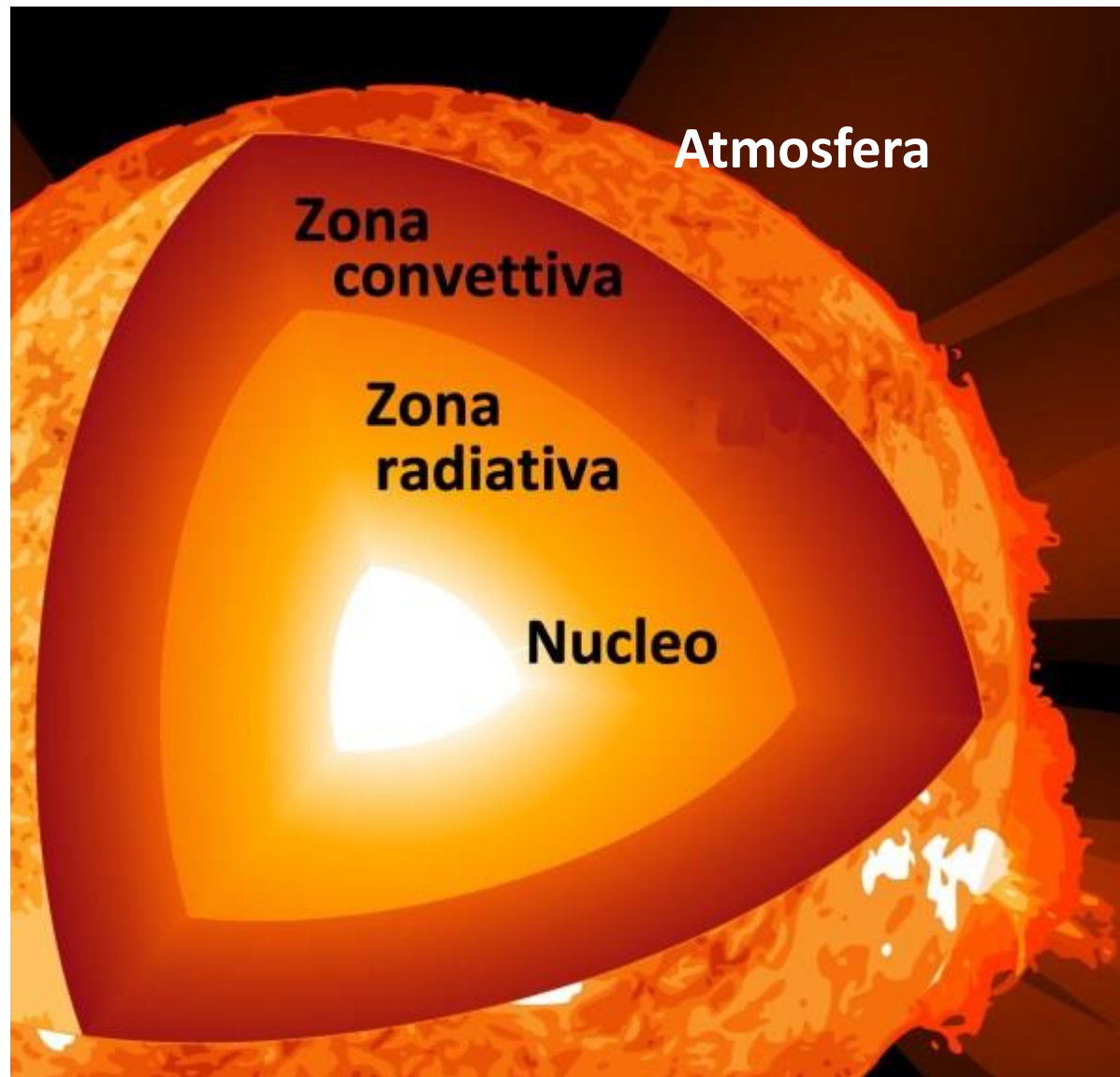
Non è possibile infatti realizzare esperimenti sulla Terra che possano caratterizzare il comportamento di un corpo rotante, magnetizzato, con un'atmosfera e un interno stratificati e il sovrapporsi di dinamiche complesse e con parametri fisici estremi come quelli associati al Sole



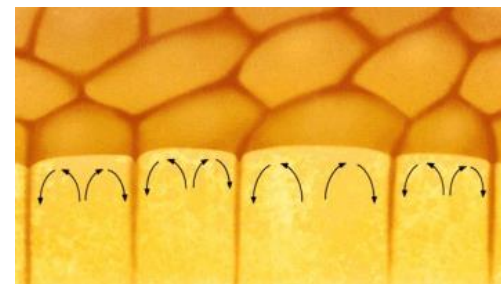


## Come è fatto il Sole?

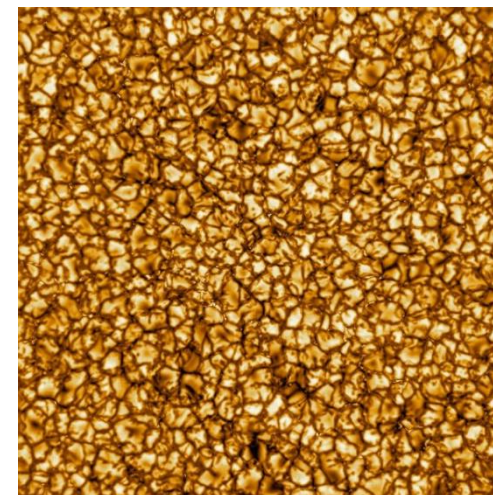
- ❑ 2000 miliardi di miliardi di miliardi di chilogrammi, cioè 2 seguito da 30 zeri. Quasi un milione di volte la massa della Terra.
- ❑ 71% Idrogeno, 27% Elio, 2% tutto il resto...
- ❑ **Raggio: 696340 Km**, circa 100 volte il raggio della Terra.
- ❑ **Nucleo: il «motore» del Sole.** Grande 20 volte la Terra, ha una temperatura di 10 milioni di gradi e una pressione di 250 atmosfere. Qui le reazioni nucleari trasformano l'idrogeno in elio e viene liberata energia che «evapora» attraverso la **regione radiativa**.



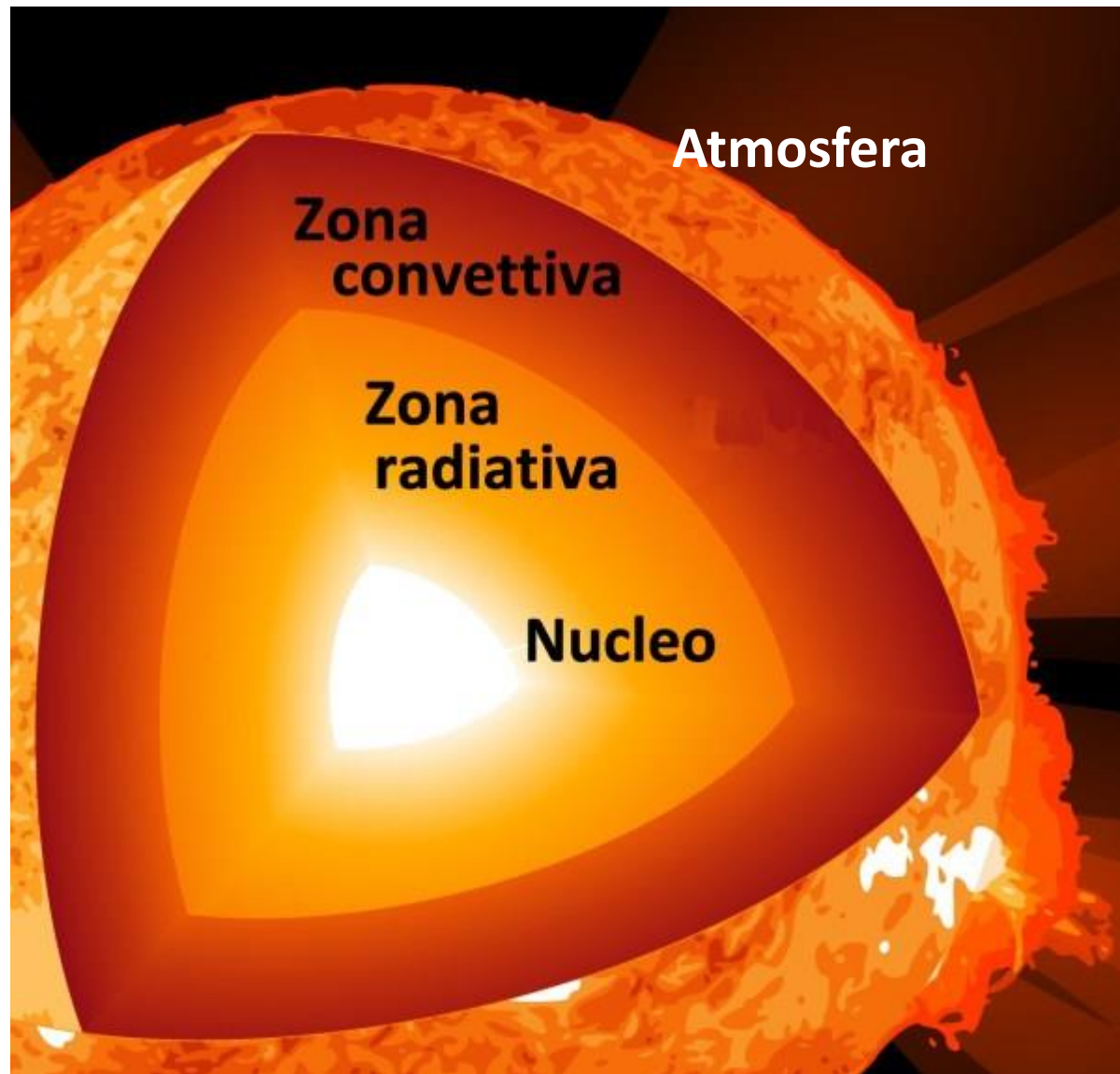
## Come è fatto il Sole?



**Zona Convettiva:** qui il «plasma» (gas di particelle cariche) sale e scende, come una pentola che bolle, **raffreddandosi** da circa un milione di gradi ai 5500 gradi della superficie.

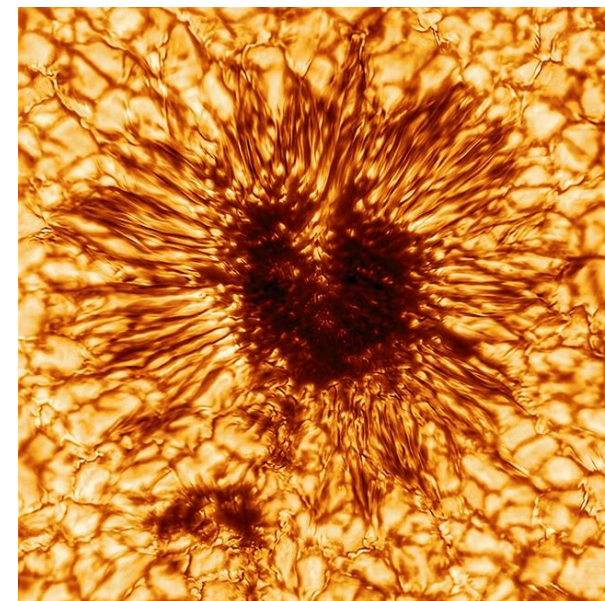


Sulla superficie del Sole ecco la traccia ben visibile della convezione: **la granulazione**. Osservando con un telescopio abbastanza potente ci accorgiamo che appaiono strutture brillanti simili a mattonelle, i *granuli* (plasma caldo che sale), circondati da corridoi scuri, i *corridoi intergranulari* (plasma più freddo che scende).

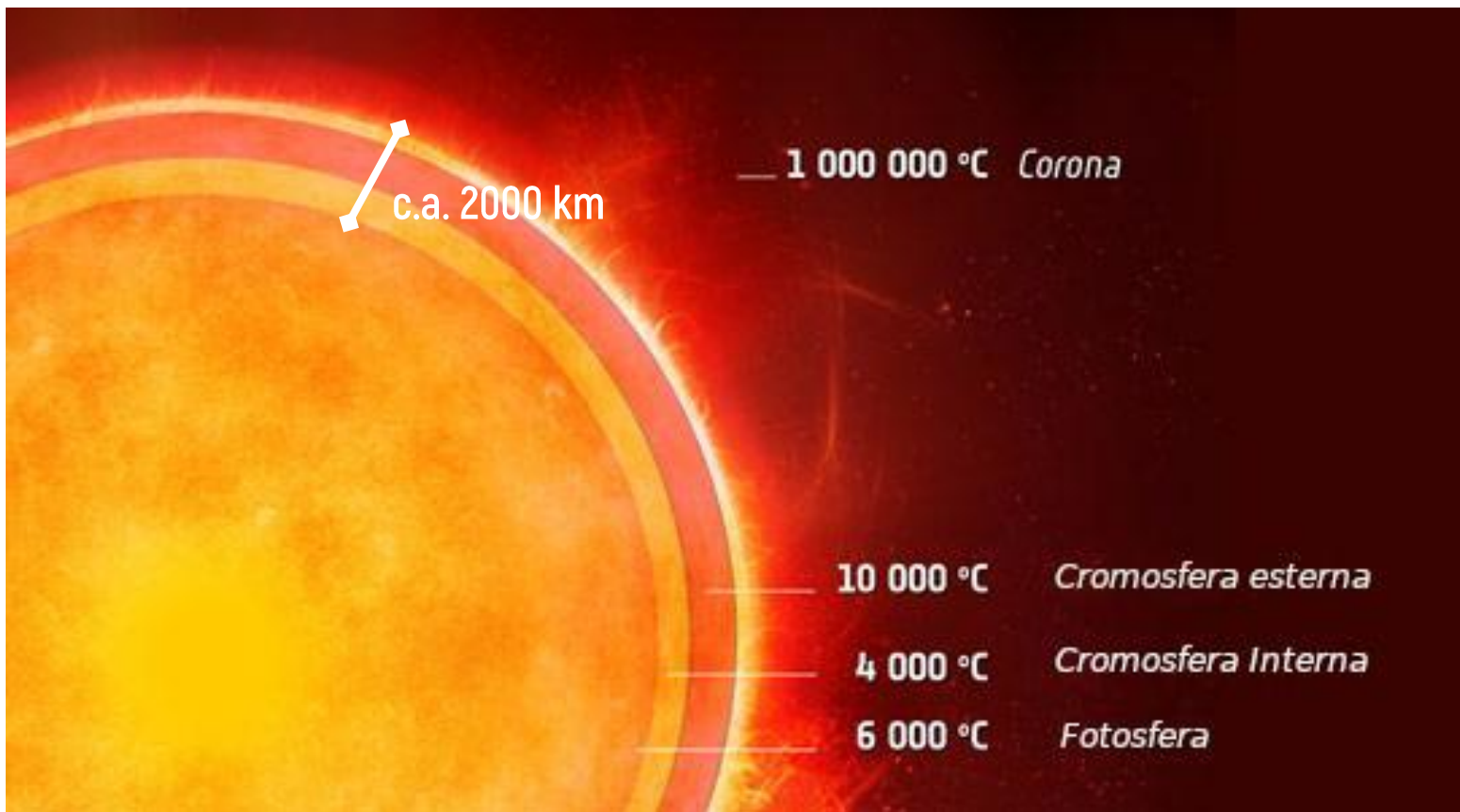


## Come è fatto il Sole?

La **regione convettiva** è davvero importante, perché il continuo movimento del plasma instaura **correnti elettriche molto intense**. Queste a loro volta generano **intensi campi magnetici**, che originati alla base della zona convettiva, tendono a risalire per "galleggiamento" verso la superficie ed emergere in forma di tubi di flusso magnetico in corrispondenza delle *macchie solari*.

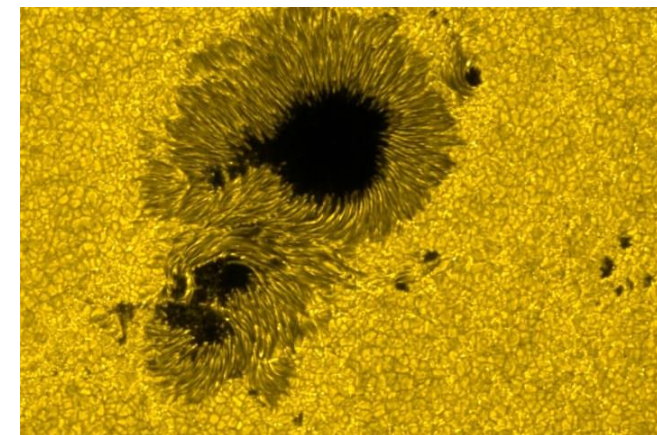


# L'atmosfera del Sole

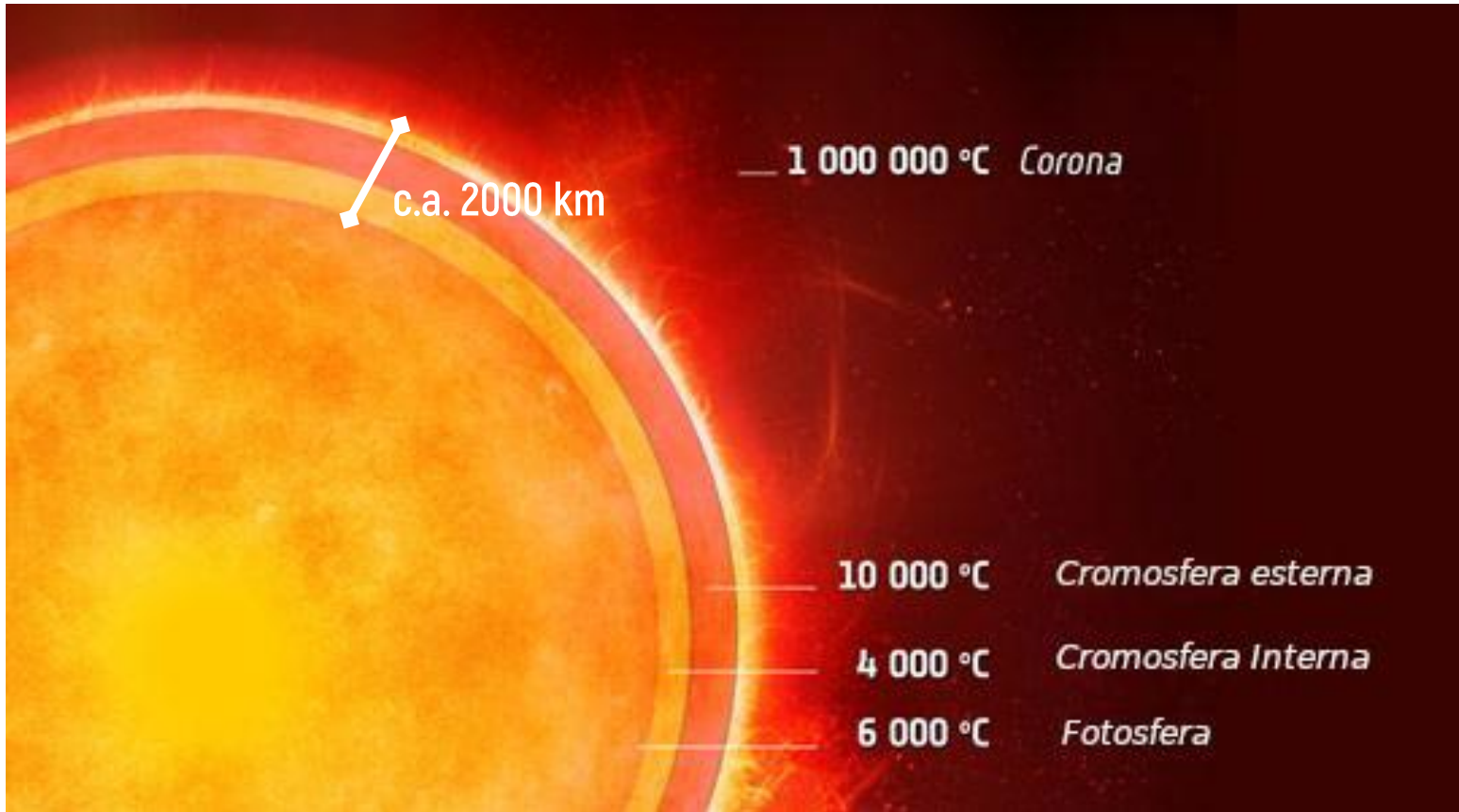


## 1. Fotosfera:

E' la «superficie visibile» del Sole. Spessa circa 500 km, temperatura che scende da 6000 a 4000 °C, è praticamente il Sole così come lo vediamo.



# L'atmosfera del Sole

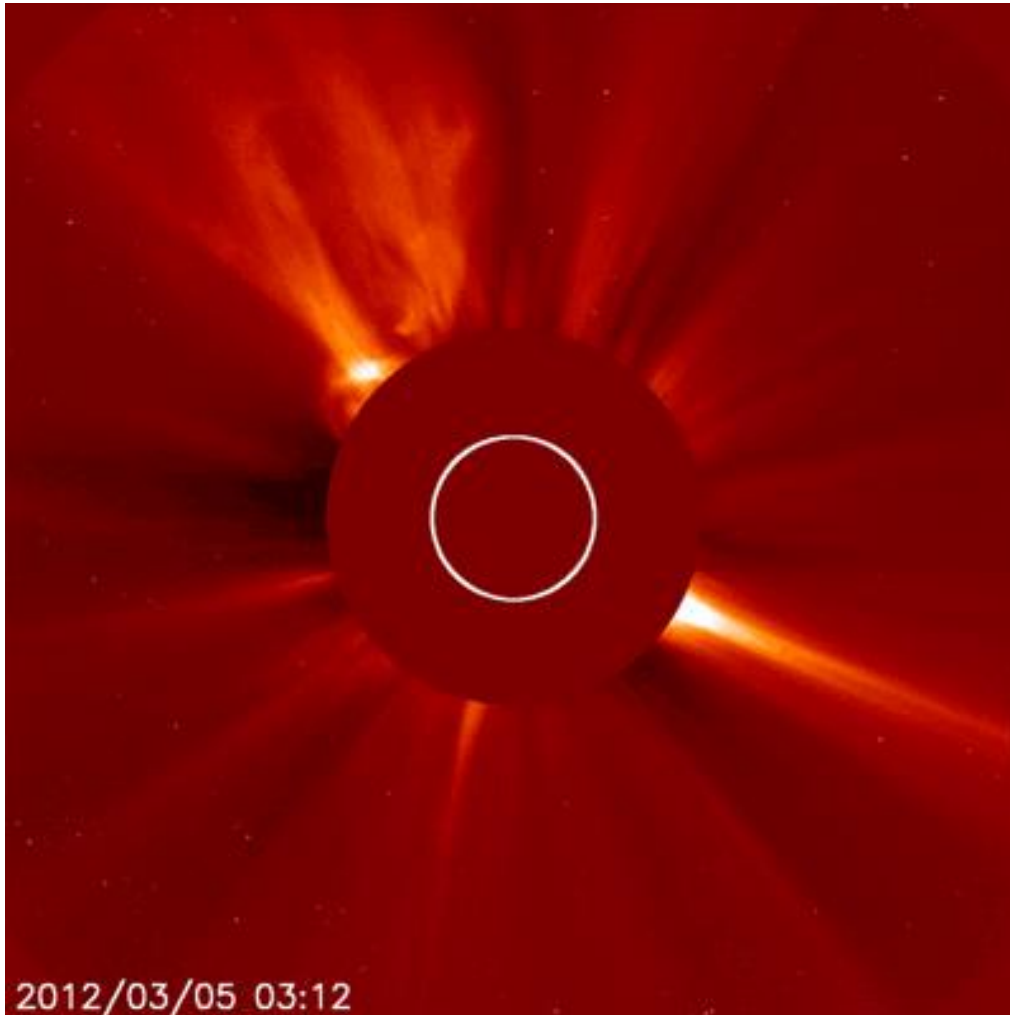


## 2. Cromosfera

Si estende fino a 2000 km, la densità continua a diminuire ma la temperatura **aumenta!** La materia inizia quindi ad acquistare energia...

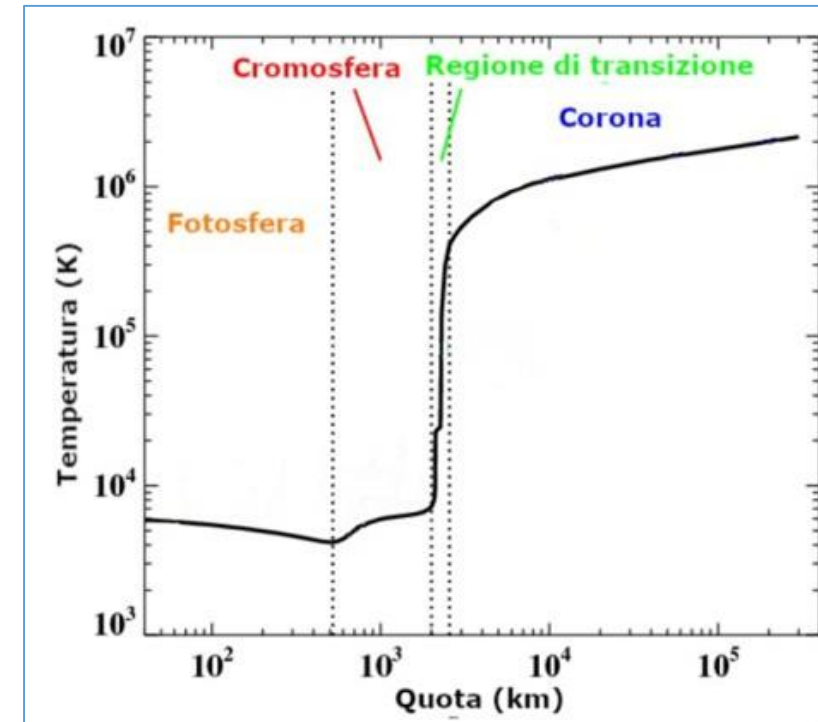


# L'atmosfera del Sole

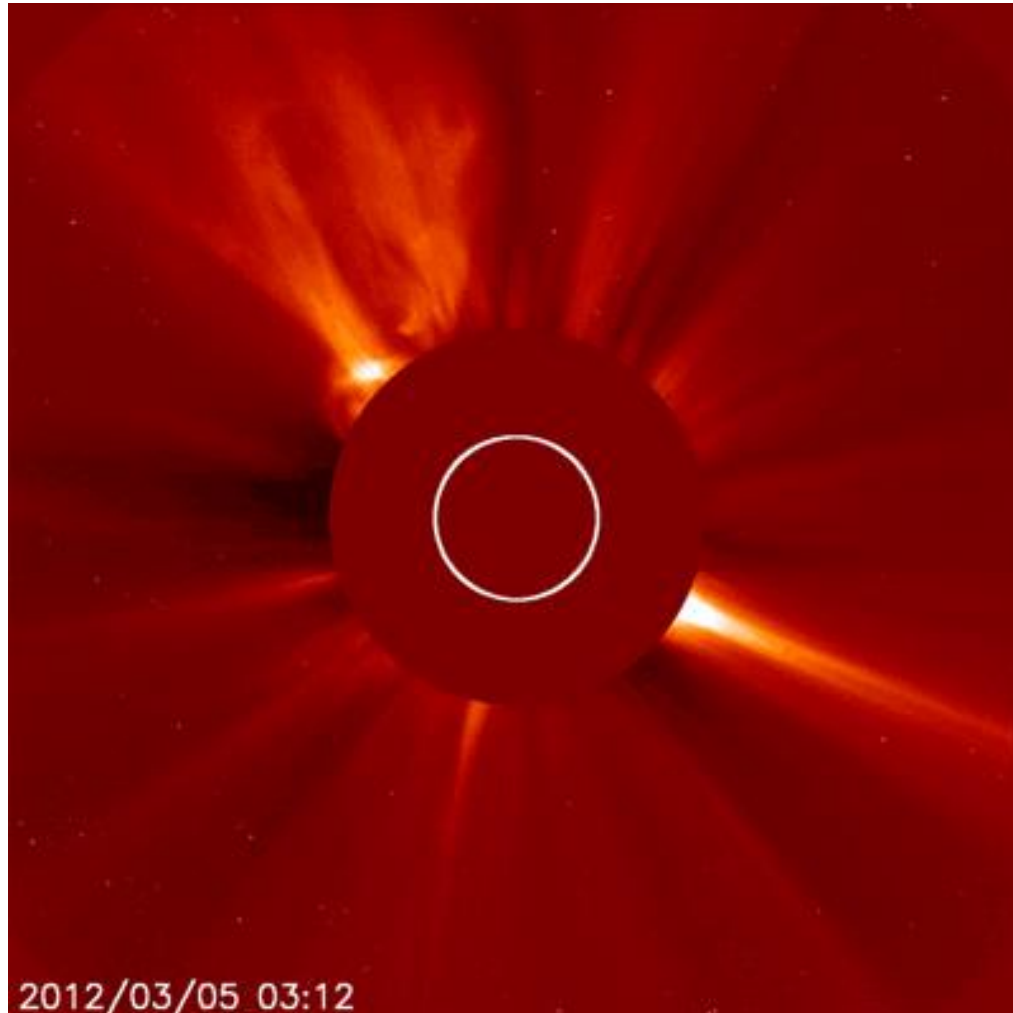


## 3. Regione di Transizione

Strato sottilissimo (poche centinaia di km), dove il plasma viene scaldato (energizzato) fino a 1,000,000 °C!



# L'atmosfera del Sole



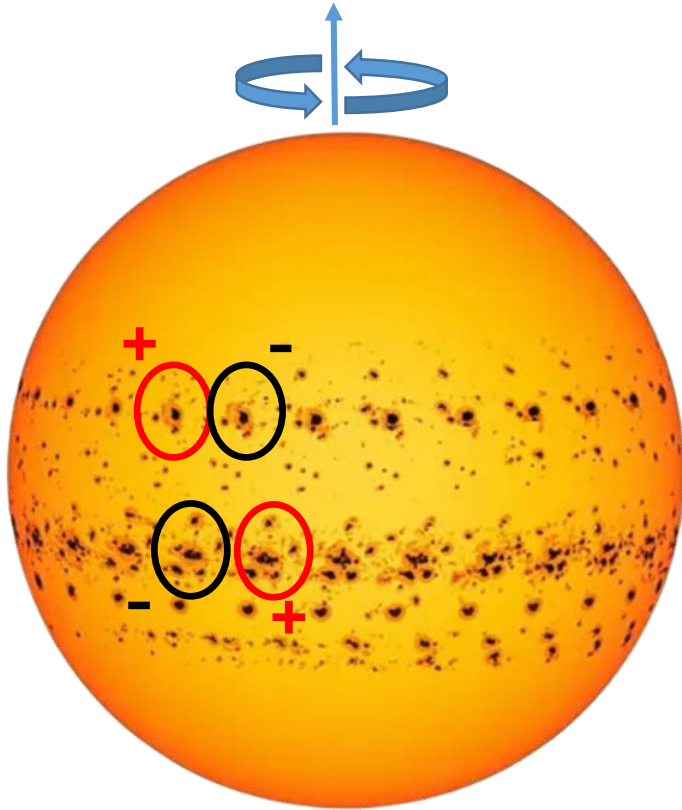
## 4. Corona solare

Strato più esterno dell'atmosfera solare, visibile solo durante le eclissi. Essa non ha un vero e proprio confine, si espande in tutto lo spazio, diventando sempre più tenue, finché non diventa quello che chiamiamo:

### Vento solare

- Flusso costante di ioni di idrogeno e di elio e di elettroni che può variare tra 5 e 50 particelle/cm<sup>3</sup>
- Ha una componente «lenta» di particelle che vengono dall'evaporazione della corona (300-400 km/s)
- Ha una componente «veloce» di particelle che provengono dai poli del Sole e dai **buchi coronali** (700-800 km/s)

## L'attività del Sole



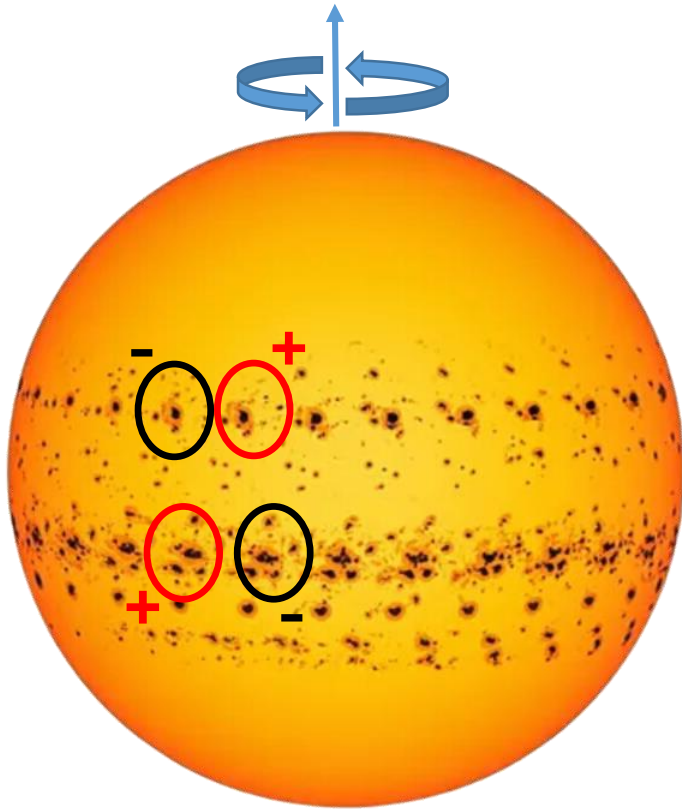
- Le dinamiche del **Campo Magnetico del Sole** guidano il ciclo della sua attività. **Leggi di Hale** sulla polarità delle macchie:

1) In un dato istante di tempo, le macchie che **precedono** hanno polarità magnetica opposta rispetto a quelle che **seguono** in entrambi gli emisferi. E fra coppie di macchie che precedono, le polarità sono opposte nei due emisferi.

*Macchie solari durante il mese di agosto 2024 (NASA SDO)*



# L'attività del Sole

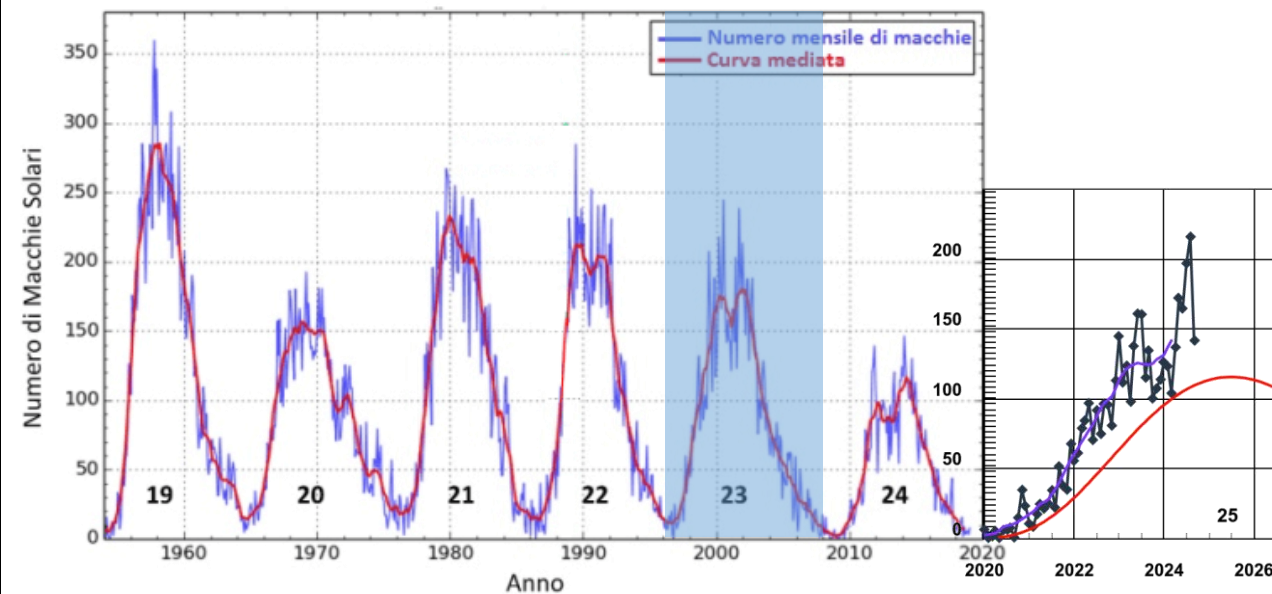
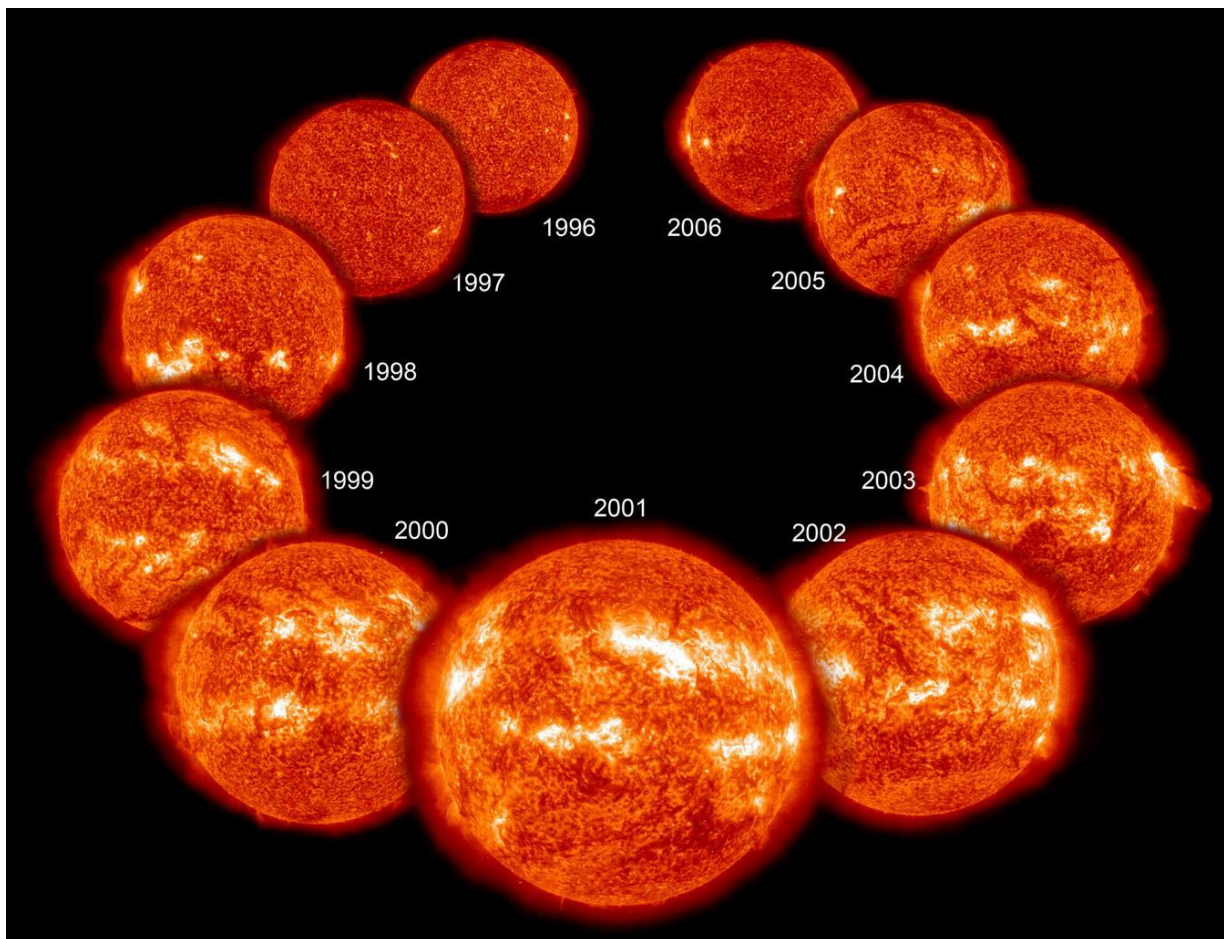


- Le dinamiche del **Campo Magnetico del Sole** guidano il ciclo della sua attività. **Leggi di Hale** sulla polarità delle macchie:

2) I campi magnetici che danno origine alle macchie si affievoliscono e aumentano di intensità nel tempo dando origine a un **ciclo di circa 11 anni** durante il quale le macchie diminuiscono e aumentano di numero. Un dato ciclo sviluppa macchie **con polarità magnetiche opposte** rispetto al ciclo precedente (per questo si dice che il ciclo solare «vero» dura 22 anni).

*Macchie solari durante il mese di agosto 2024 (NASA SDO)*

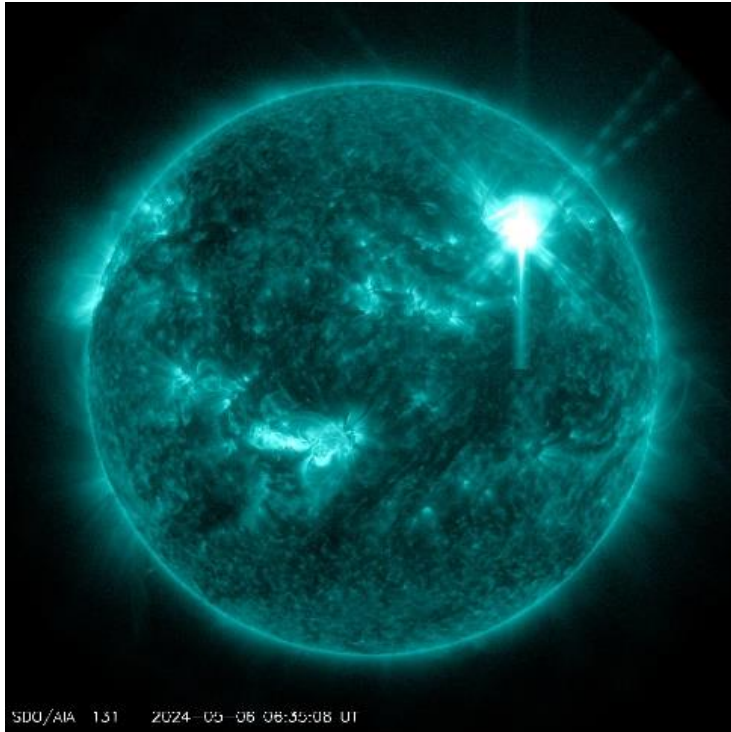
# L'attività del Sole



Il Sole quindi passa da momenti in cui è un po' «spento» ad altri in cui è molto attivo. **Dove siamo oggi?**

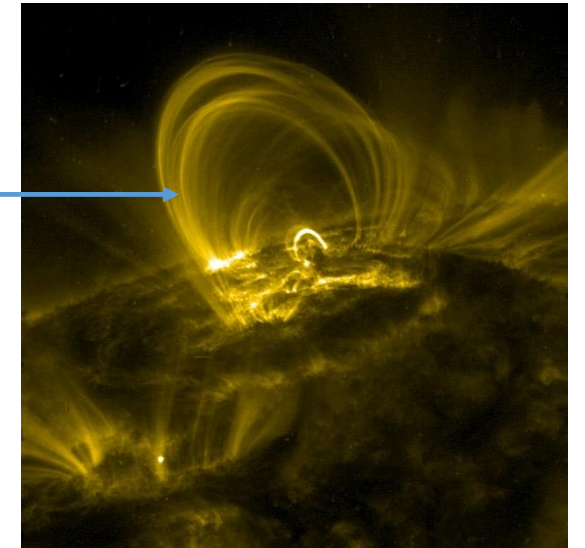
**Siamo vicini al massimo del ciclo 25!**

## Cosa succede quando il Sole è molto attivo?



**Brillamenti solari (Solar Flares):** violente esplosioni sulla superficie del Sole associate a massiccia emissione di radiazione elettromagnetica nello spettro di lunghezze d'onda dall'ultravioletto ai raggi X.

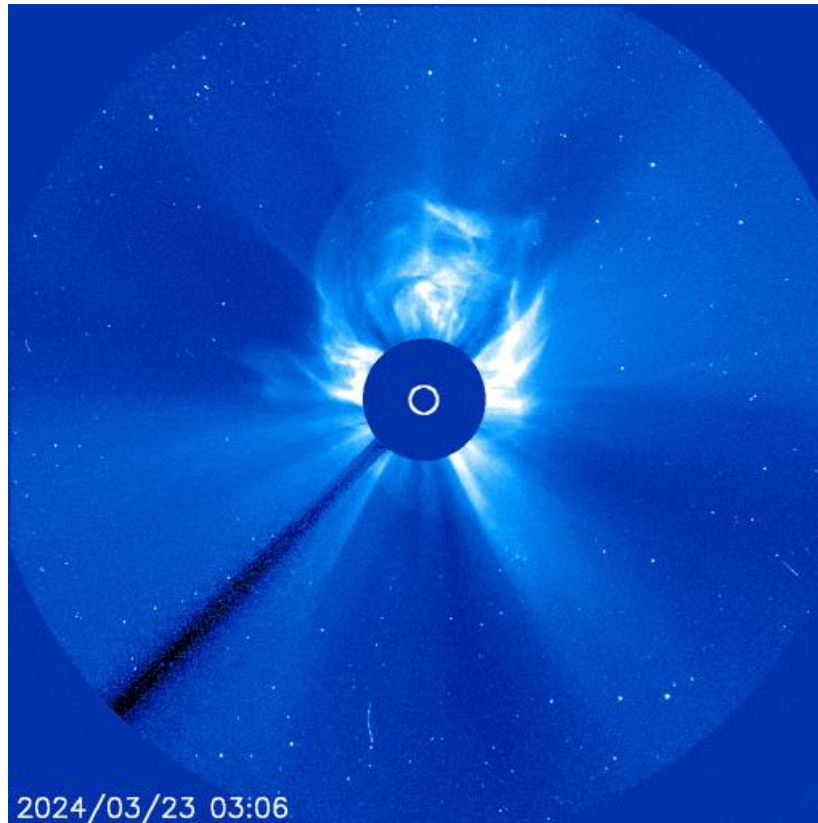
Le «**arcate magnetiche**» nelle regioni attive accelerano e riscaldano il plasma



La radiazione elettromagnetica viaggia alla velocità della luce e arriva sulla Terra in circa **8 minuti**.

## Cosa succede quando il Sole è molto attivo?

In concomitanza coi brillamenti, oltre a radiazione, può essere emesso anche un flusso di materia...

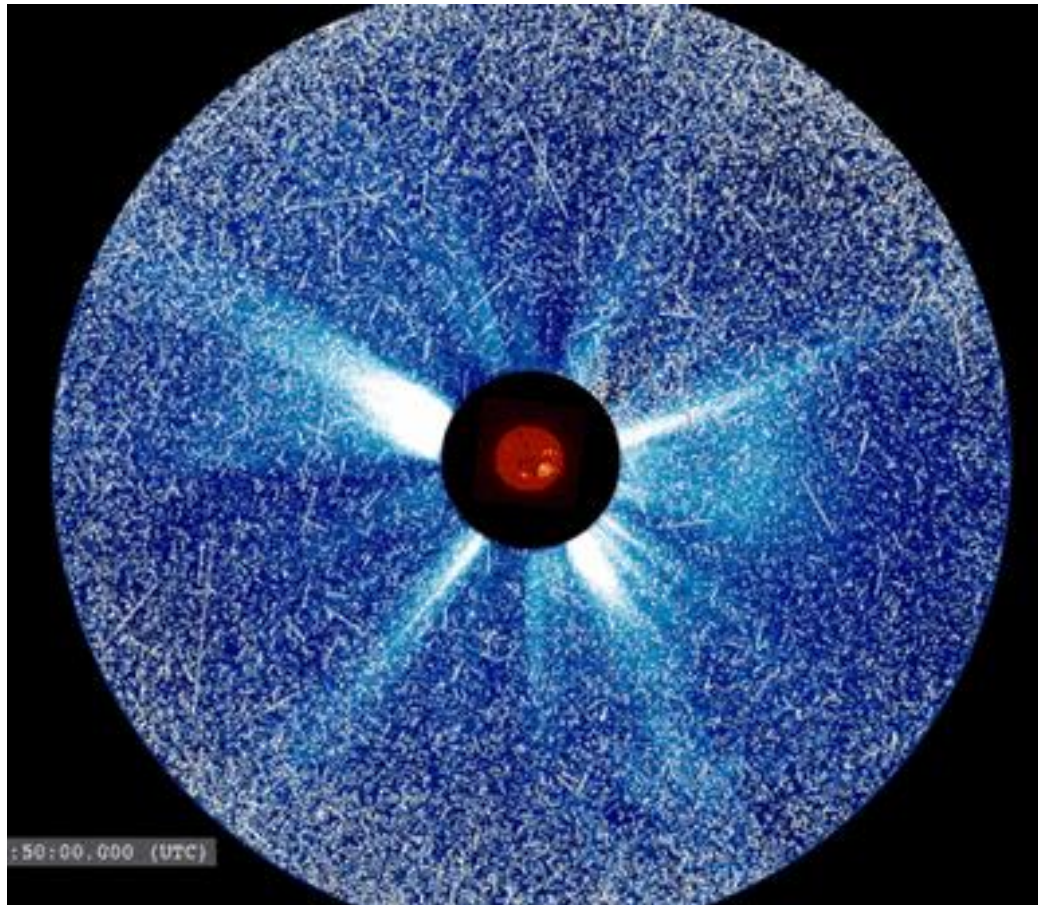


- Di «bassa» energia → **Espulsioni di massa coronale** (Coronal Mass Ejections, CME): decine di miliardi di tonnellate di particelle espulse nello spazio con velocità fino a 3000 km/s (~10 KeV). L'onda d'urto della CME può raggiungere la Terra in un tempo che varia **da circa 12 a 48 ore**.

- Di alta energia → Solar Energetic Particles (SEP), o **raggi cosmici solari**: eventi meno frequenti ma di grande impatto. Flussi di particelle molto variabili in energia (dal centinaio di KeV ad alcuni GeV), possono viaggiare nello spazio a velocità prossime alla velocità della luce e arrivare sulla Terra **in poche decine di minuti**.

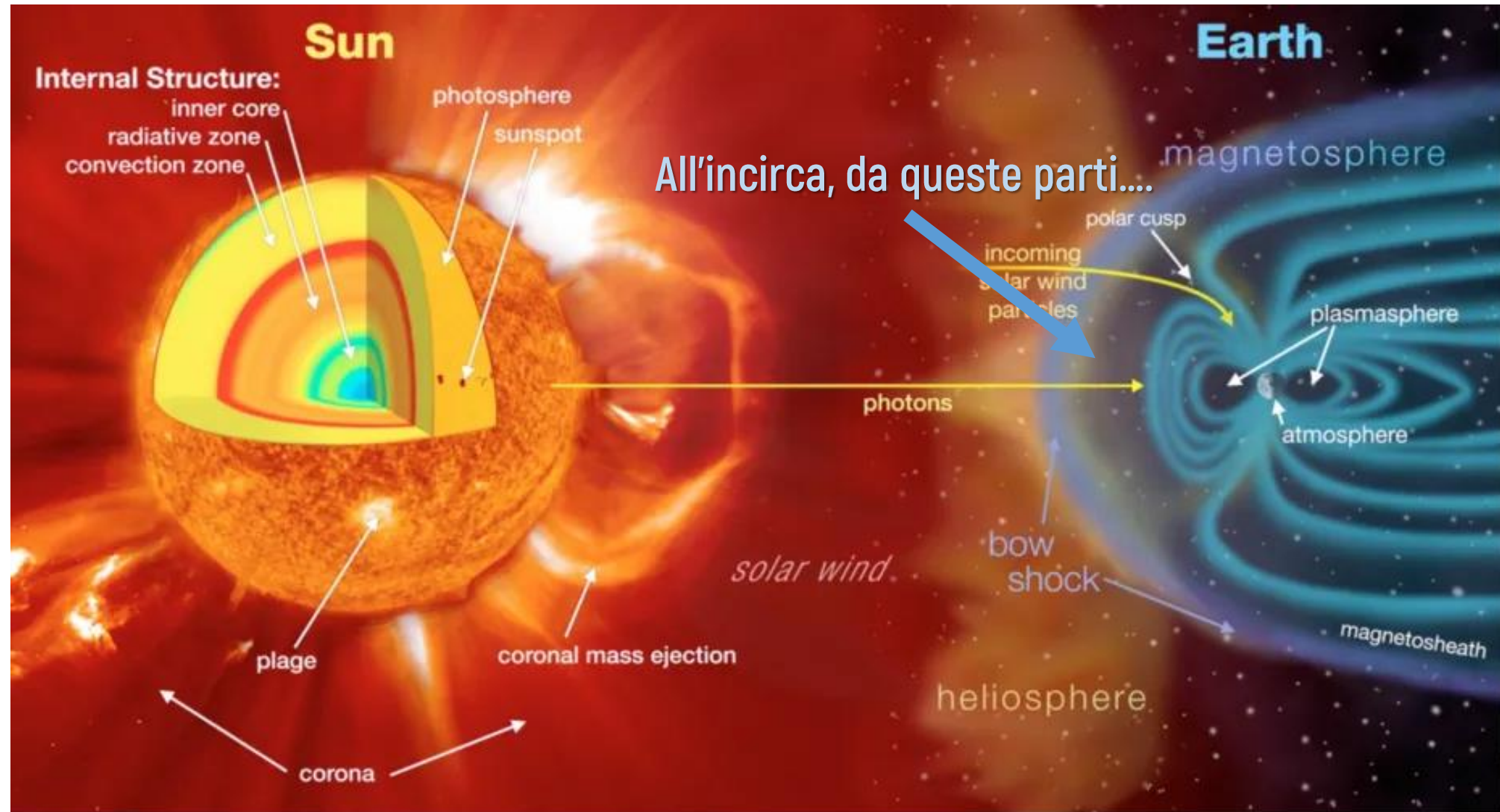
## Cosa succede quando il Sole è molto attivo?

A volte SEP e CME vengono emessi insieme...

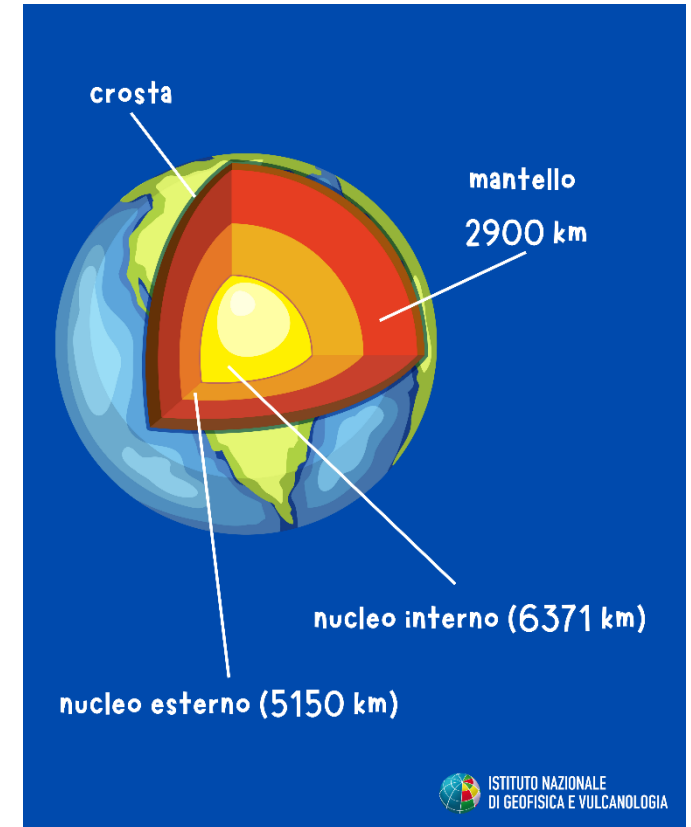
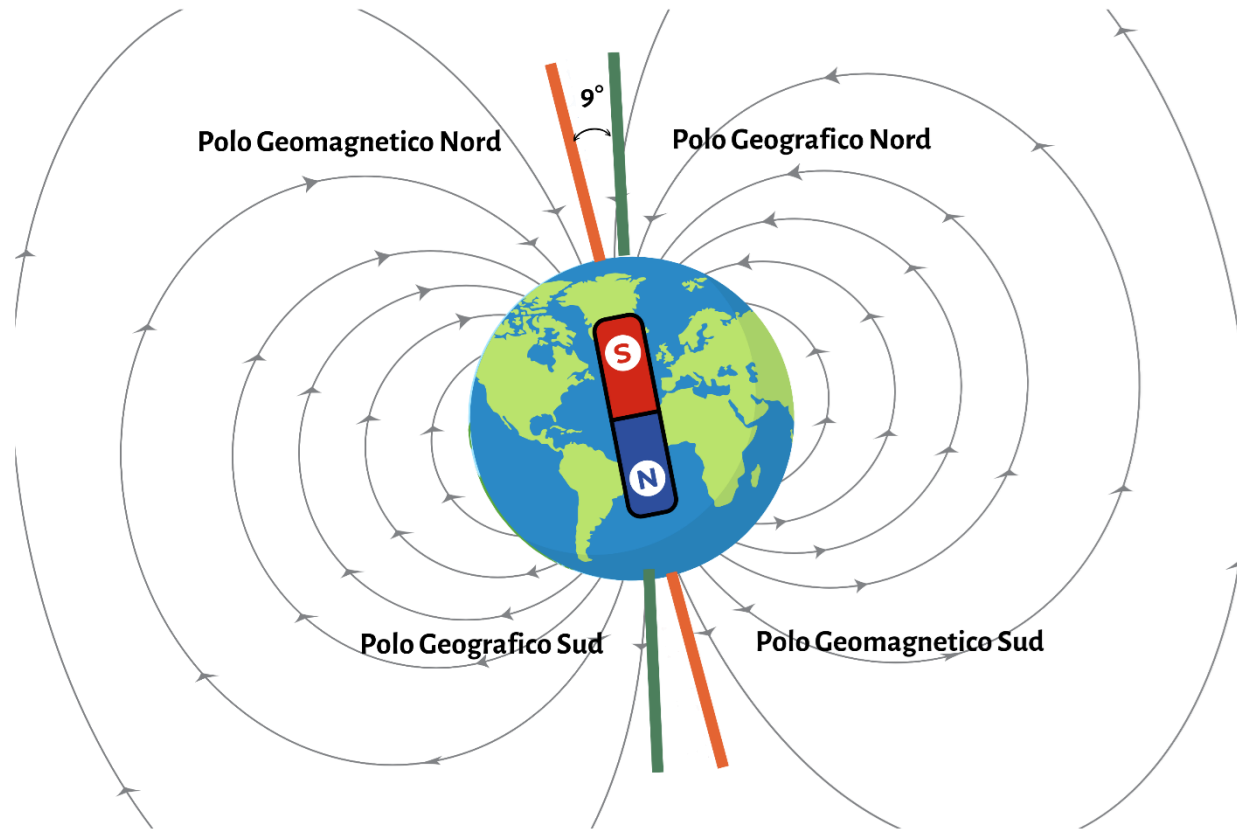


L'effetto «**tempesta di neve**» che si vede in figura sono le particelle energetiche (raggi cosmici) che colpiscono i rivelatori del coronografo.

# Dove siamo arrivati?

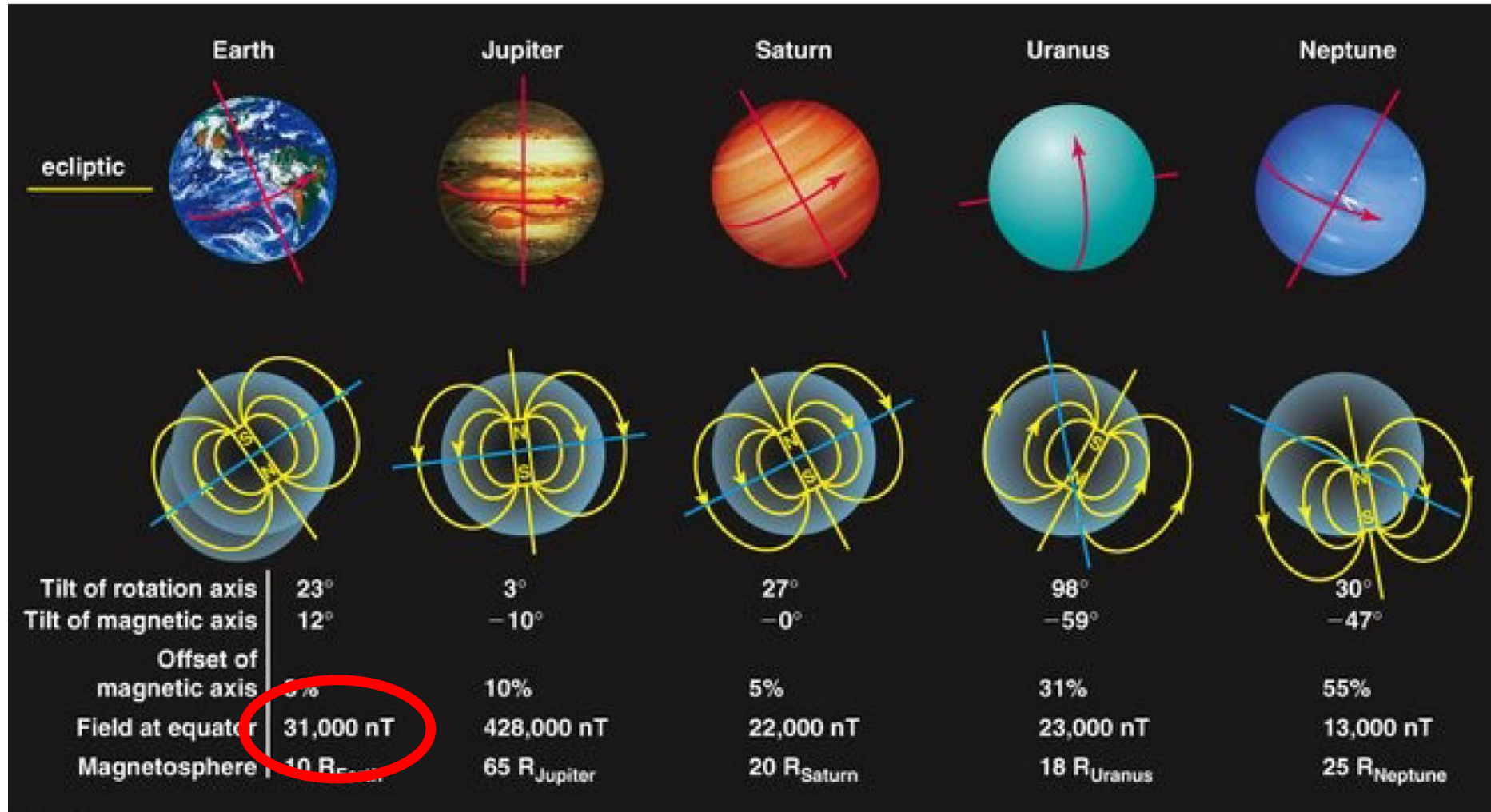


# La Terra ha un suo campo magnetico



Esso deriva dalla frizione dovuta alla rotazione del nucleo esterno semifluido intorno nucleo interno solido.

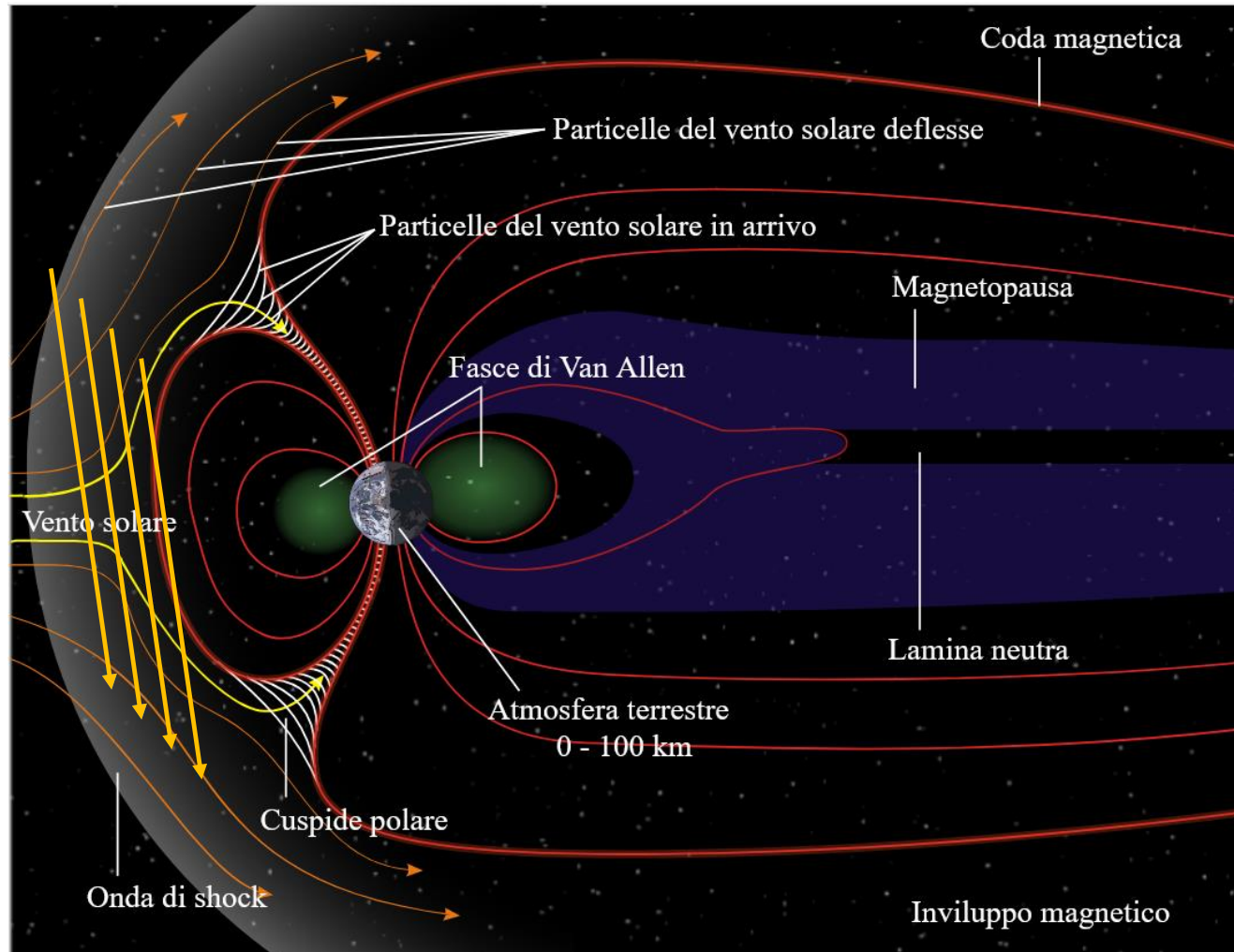
# La Terra ha un suo campo magnetico: grande o piccolo?



**Grande!**

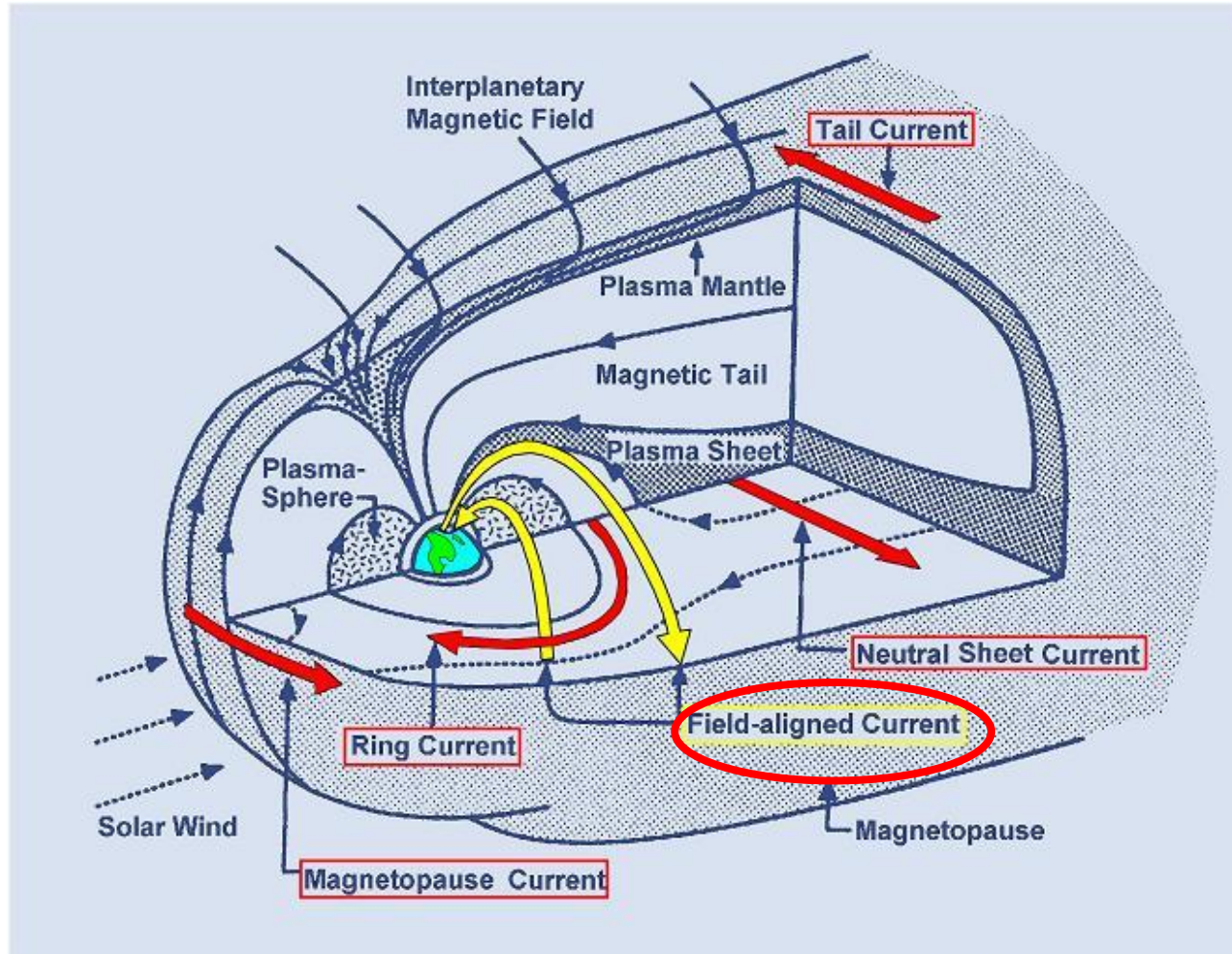


# La Terra ha un suo campo magnetico: cosa succede quando arriva il vento solare?

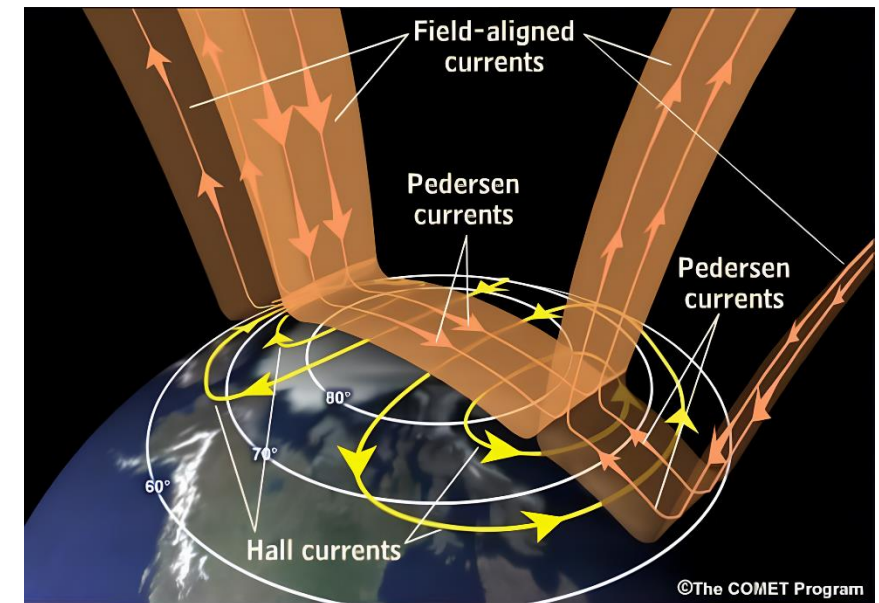


- La «**Magnetosfera**» è la regione di spazio in cui il vento solare comprime il campo magnetico terrestre.
- Il campo magnetico terrestre **deflette la maggior parte del vento solare**, costituito da particelle con carica elettrica.
- Il vento solare, a sua volta, porta con sé un **campo magnetico interplanetario**, molto più debole di quello terrestre, ma i due campi tra loro interagiscono...
- Quando i due campi si «**riconnettono**» una parte del vento solare può penetrare all'interno della magnetosfera...

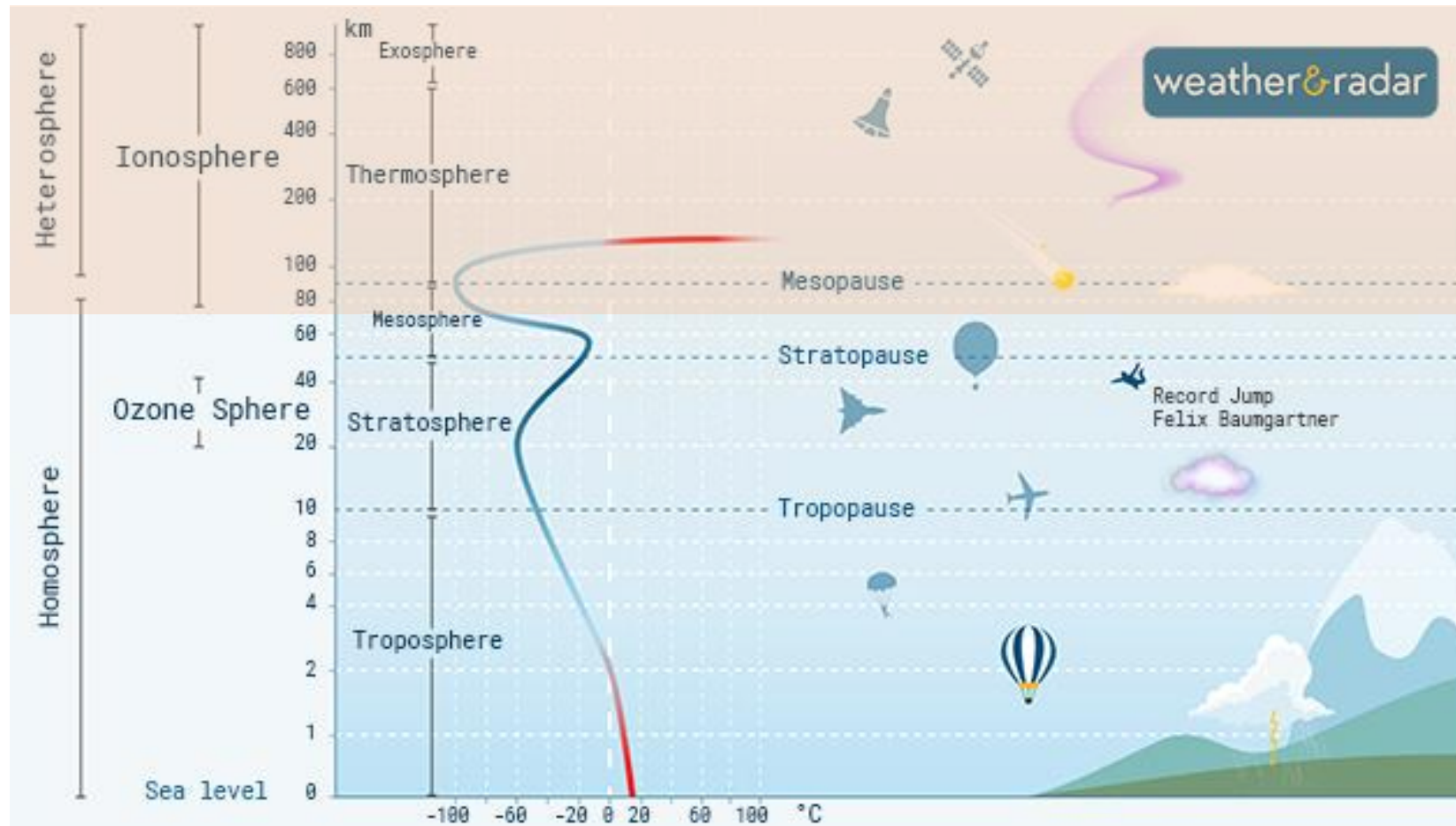
# La Terra ha un suo campo magnetico: cosa succede quando arriva il vento solare?



- La penetrazione del vento solare nella cavità magnetosferica ed anche il suo flusso lungo i perimetri esterni della magnetosfera generano **un complesso sistema di correnti elettriche**.



# La Terra ha una atmosfera: cosa succede quando il Sole è molto attivo?

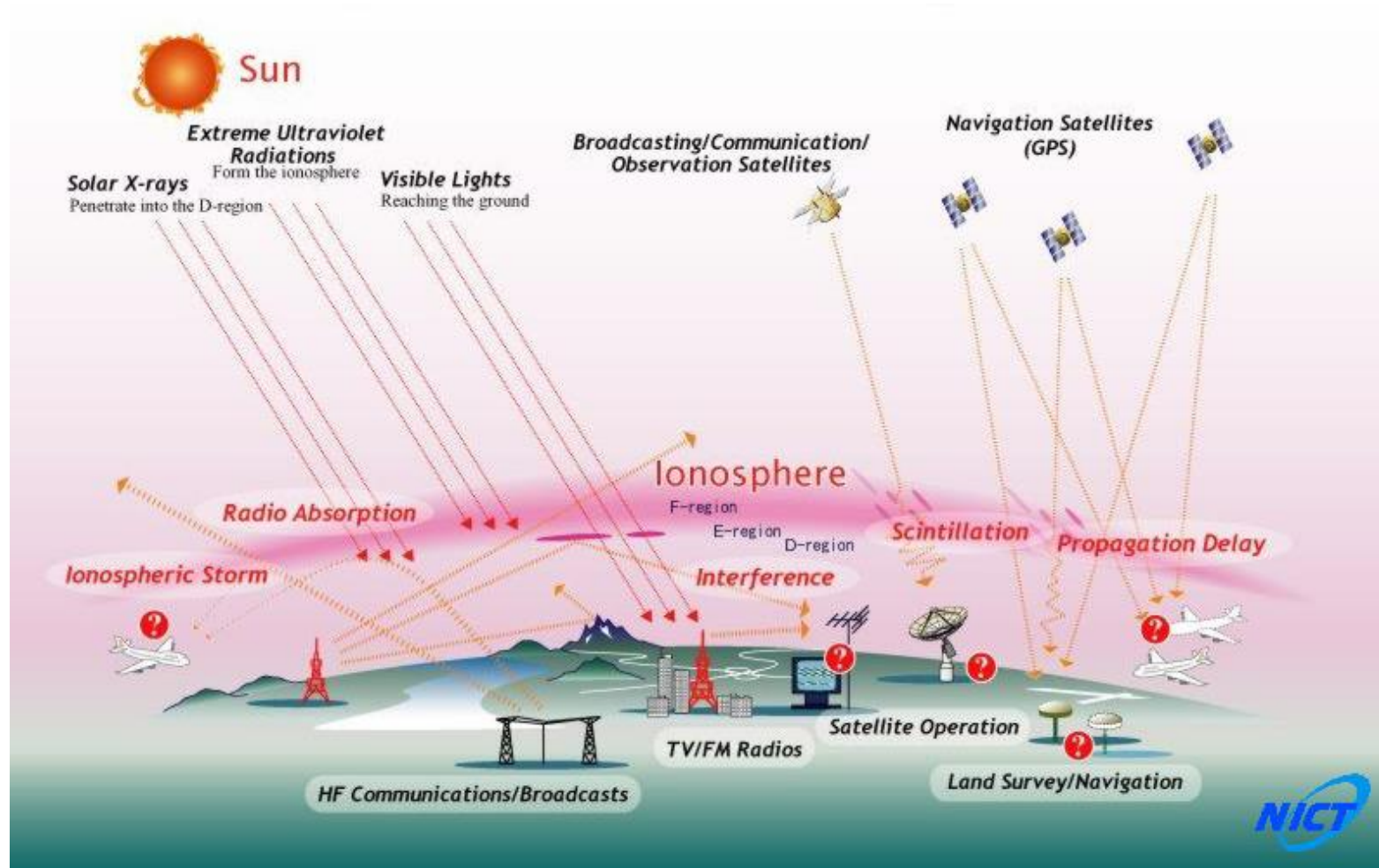


- Salendo di quota diminuiscono sia densità che temperatura, ma solo fino alla **Termosfera**. Qui la temperatura inizia ad aumentare. Perché?

- Perché la radiazione solare trasferisce molta energia agli atomi e alle molecole dell'aria e le ionizza. Siamo in **Ionosfera**.

- A 90-100 km di quota gli ioni liberi sono ancora pochi (rapporto ioni/neutri 1/10,000,000), salendo a 300 km aumentano molto (rapporto coi neutri 1/1000).

# La Terra ha una atmosfera: cosa succede quando il Sole è molto attivo?

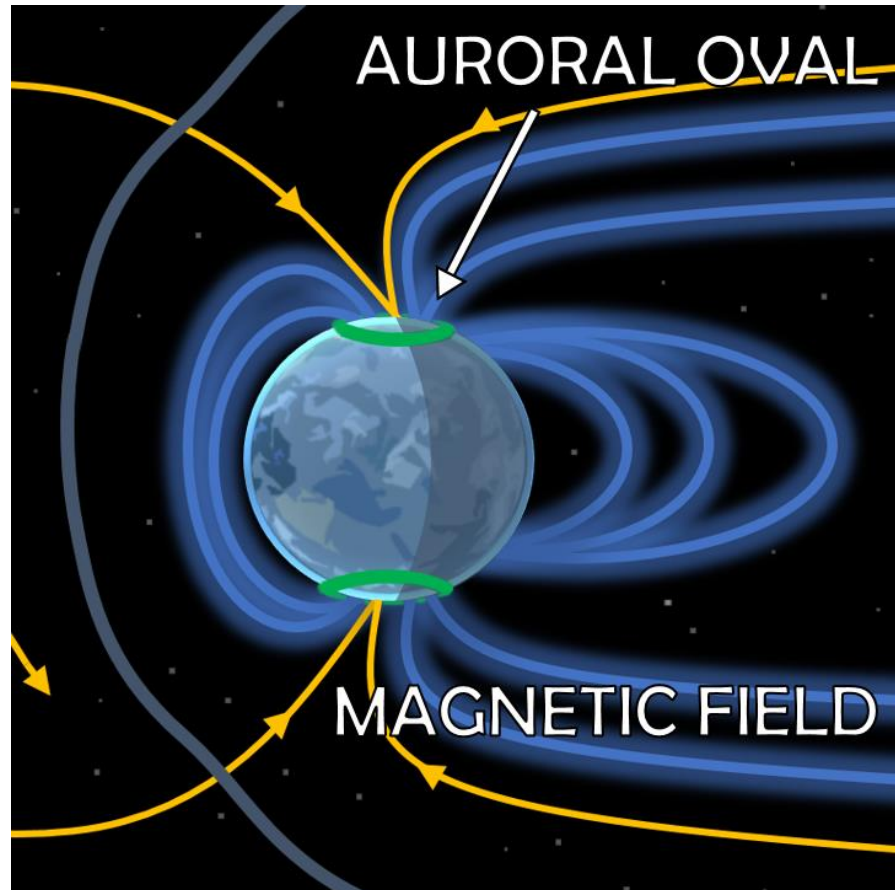


- La radiazione ultravioletta e i raggi X solari arrivano sempre, ma quando il Sole è al massimo della sua attività la ionizzazione è maggiore e si spinge più in profondità.

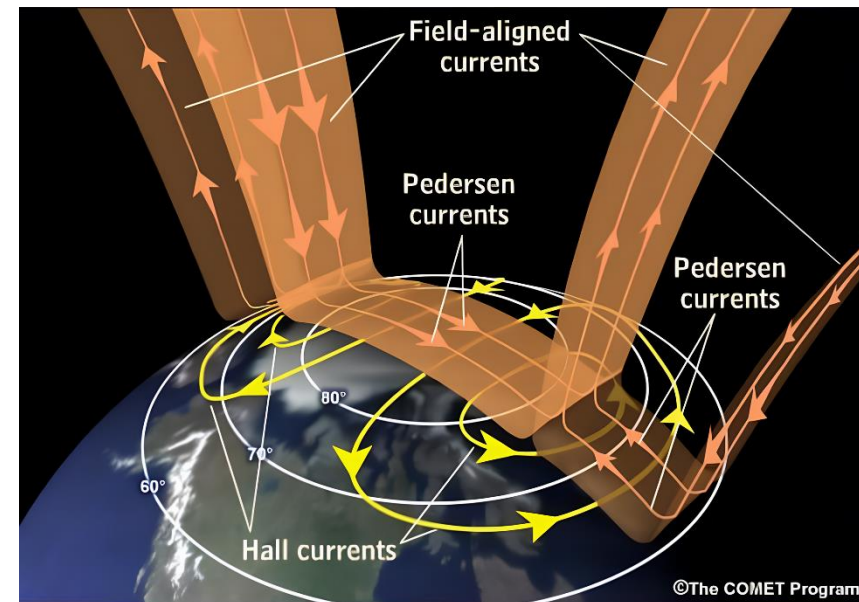
- La ionosfera è la regione che permette alle onde radio ad alta frequenza di propagarsi da un punto all'altro della Terra. **Ma troppi raggi X causano assorbimento delle onde radio e impediscono i collegamenti.**

- I segnali dei satelliti delle comunicazioni e quelli del GPS hanno frequenze molto più elevate e «bucano» la ionosfera, **ma una ionosfera disturbata causa interferenze e distorsioni di questi segnali.**

# La Terra ha una atmosfera: cosa succede quando il Sole è molto attivo?

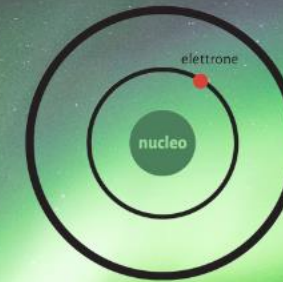


- La densità di ioni ed elettroni liberi nella ionosfera può aumentare per irraggiamento da radiazione solare ma, nelle regioni ad alta latitudine anche per **precipitazione diretta** di particelle cariche

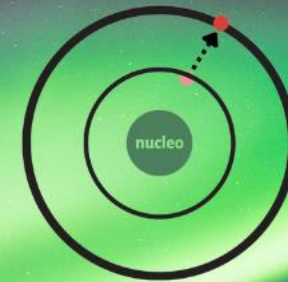




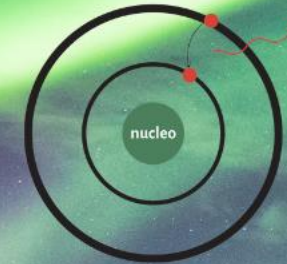
# Aurore polari!



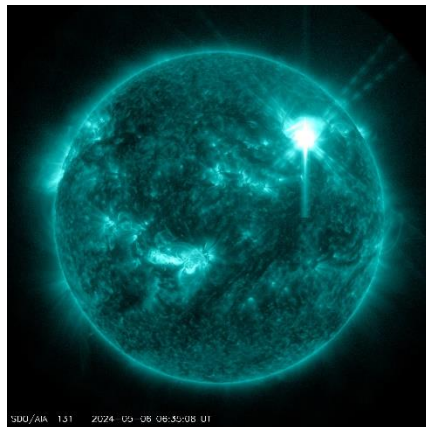
atomo nello  
stato fondamentale



atomo nello  
stato eccitato



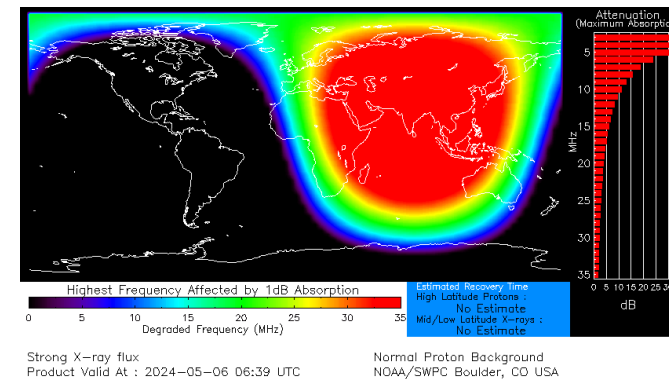
## Riassumiamo i principali effetti dell'attività del Sole



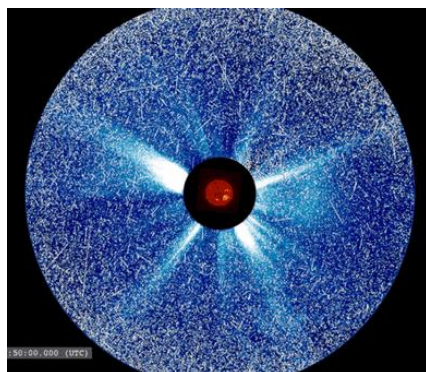
Brillamento solare



Radiazione elettromagnetica  
(raggi X) → Arriva nell'atmosfera  
in circa **8 minuti**.



- Radio Blackout localizzato
- Potenziali disturbi segnali comunicazioni e GPS
- Potenziali pericoli per astronauti



Raggi cosmici solari

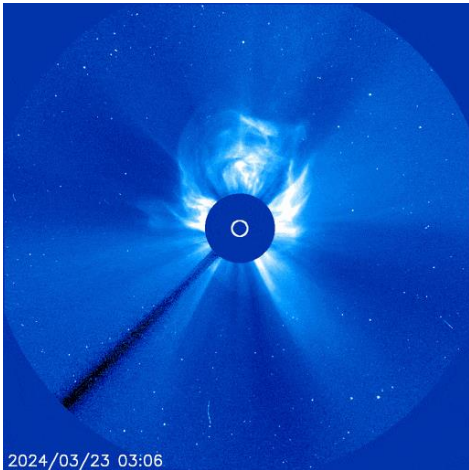


Flusso di protoni di alta energia  
→ Arrivano nell'atmosfera in  
**decine di minuti**.



- Potenziali pericoli per astronauti
- Possibili danni a satelliti
- Aumento rischio radiazioni per equipaggi aerei

# Riassumiamo i principali effetti dell'attività del Sole

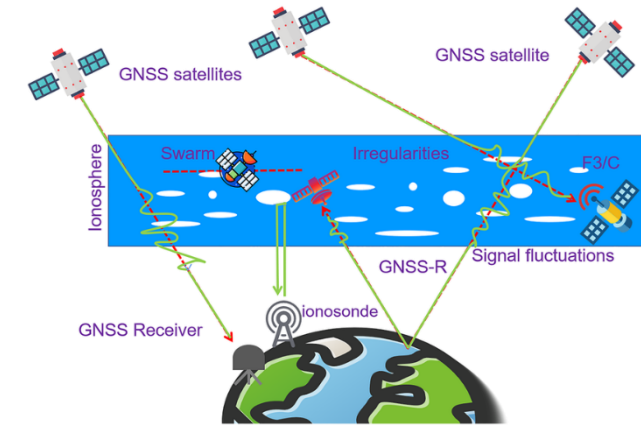


Espulsione di massa coronale



«Bolla» di particelle cariche (plasma) → Arriva presso la Terra in **12 - 48 ore**.

Precipitazione di particelle; correnti elettriche ridistribuiscono il plasma nella ionosfera; aumentano densità e irregolarità...**Effetti globali**



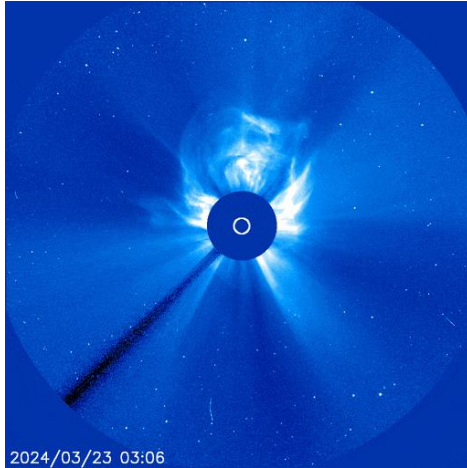
- Disturbi, interferenze o soppressione dei segnali GNSS e delle comunicazioni;
- Radio blackout globali;
- Aumento resistenza dell'aria incontrata dai satelliti in orbita bassa (air drag) e diminuzione del loro tempo di vita;



**3 febbraio 2022: «failure» dei satelliti Starlink**



# Riassumiamo i principali effetti dell'attività del Sole



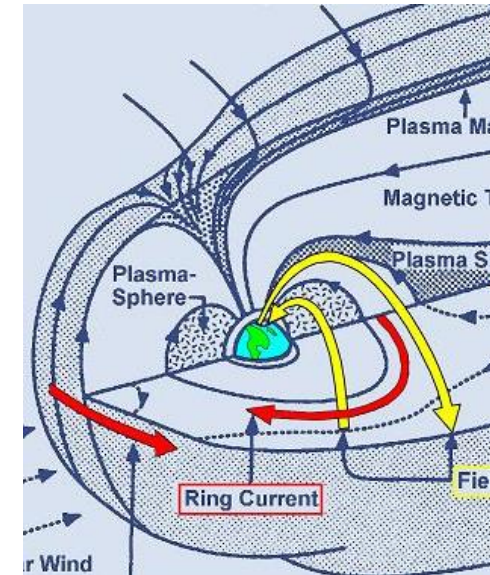
2024/03/23 03:06

Espulsione di massa coronale



«Bolla» di particelle cariche (plasma) → Arriva presso la Terra in **12 - 48 ore**.

Aumento corrente ad anello, per effetto induzione → brusca diminuzione campo magnetico terrestre → **Tempesta geomagnetica**

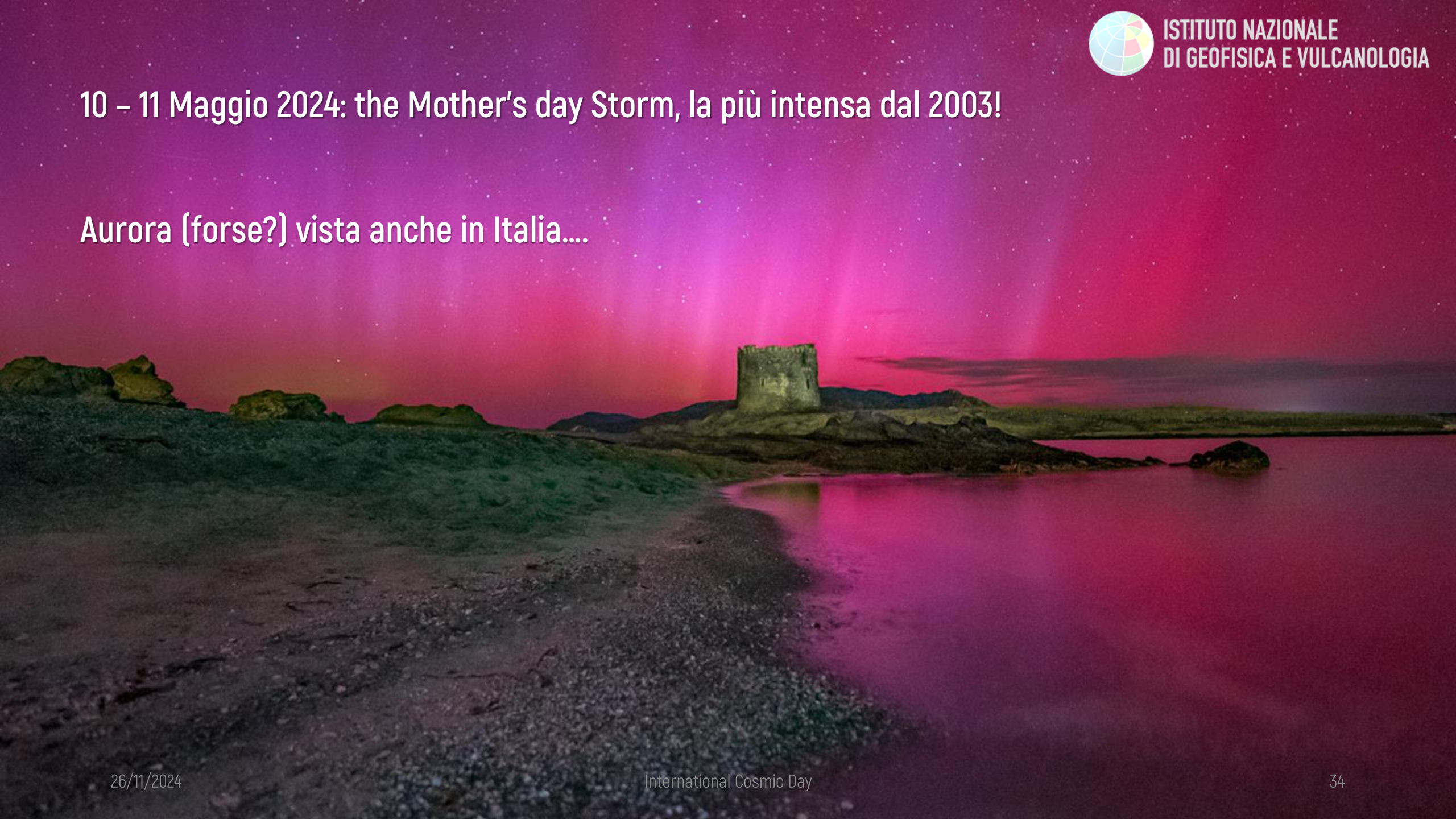


- Per effetto di induzione magnetica, correnti elettriche si possono generare al suolo e innestarsi nelle linee di alta tensione arrivando a provocare **vasti blackout!**
- Aurore polari o effetti simili si possono vedere anche alle nostre latitudini.

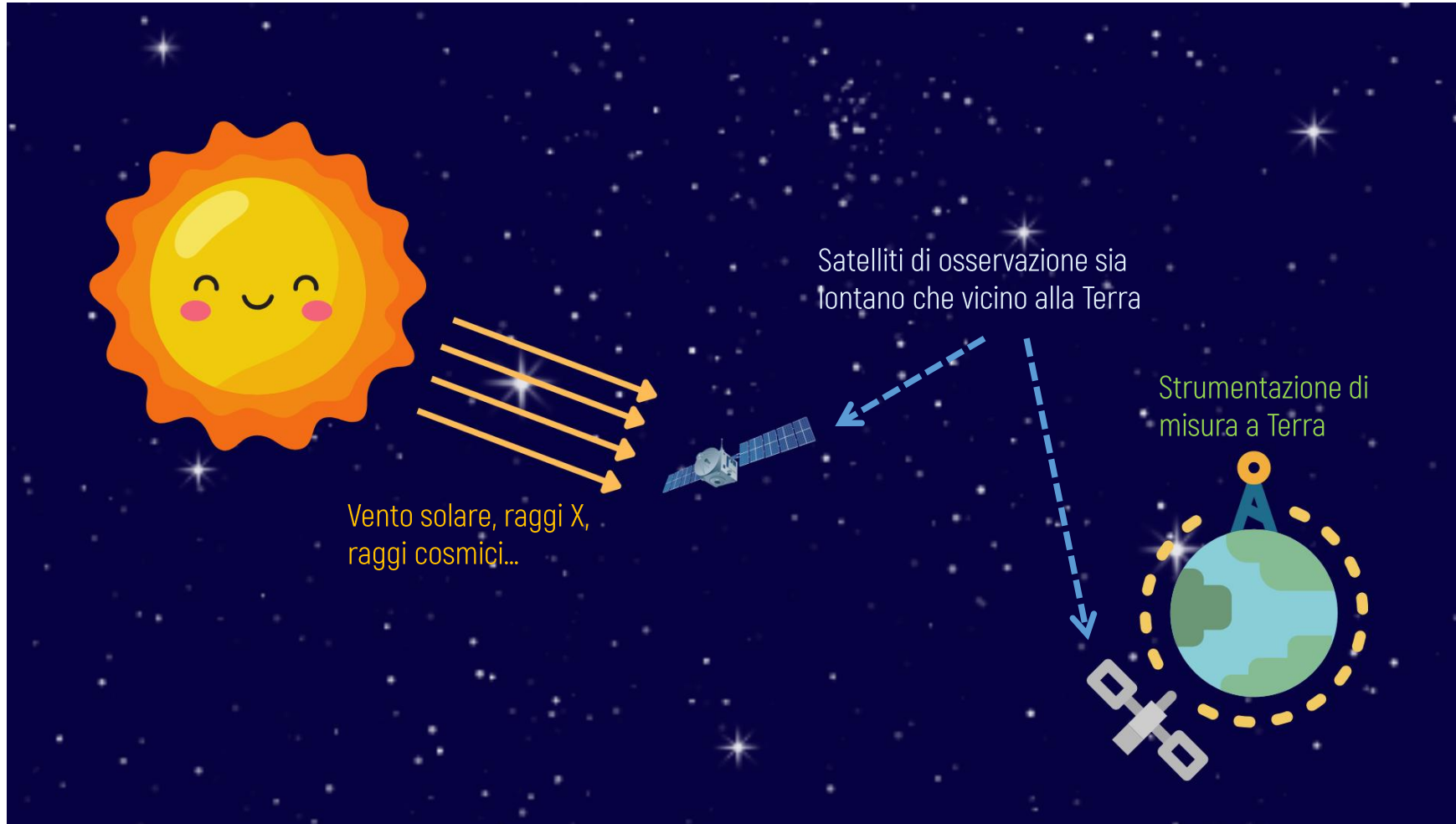


10 – 11 Maggio 2024: the Mother's day Storm, la più intensa dal 2003!

Aurora (forse?) vista anche in Italia....



# La Meteorologia spaziale



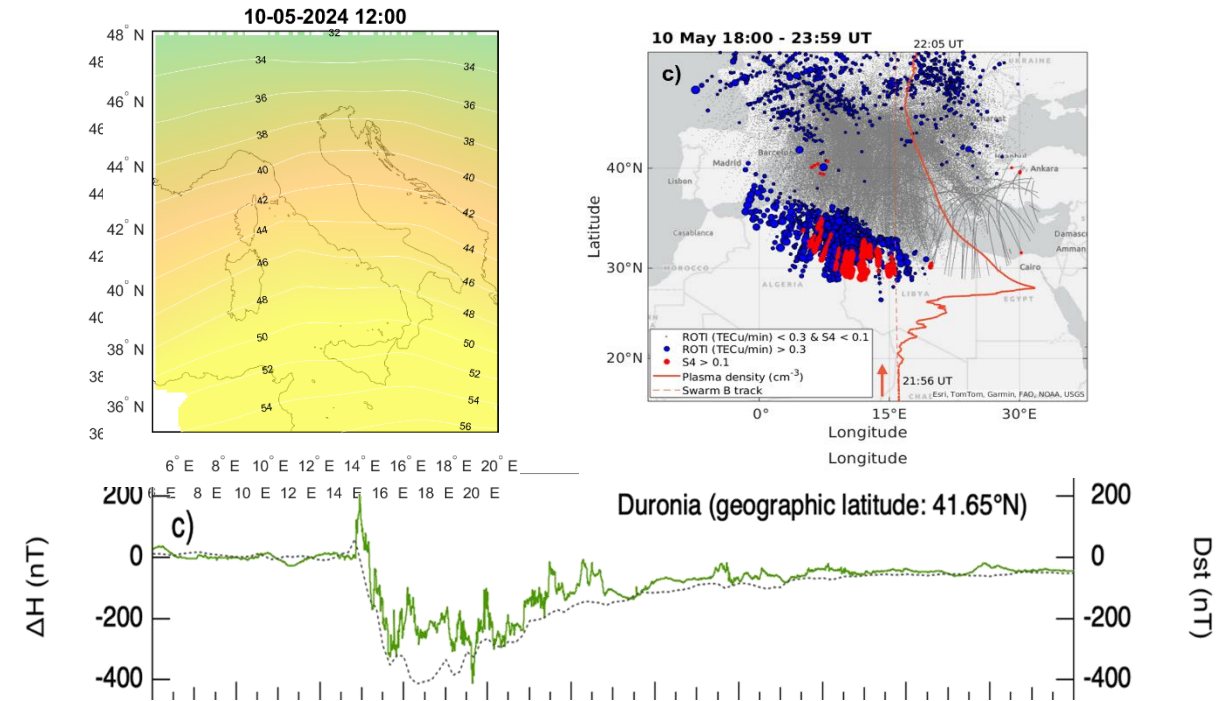
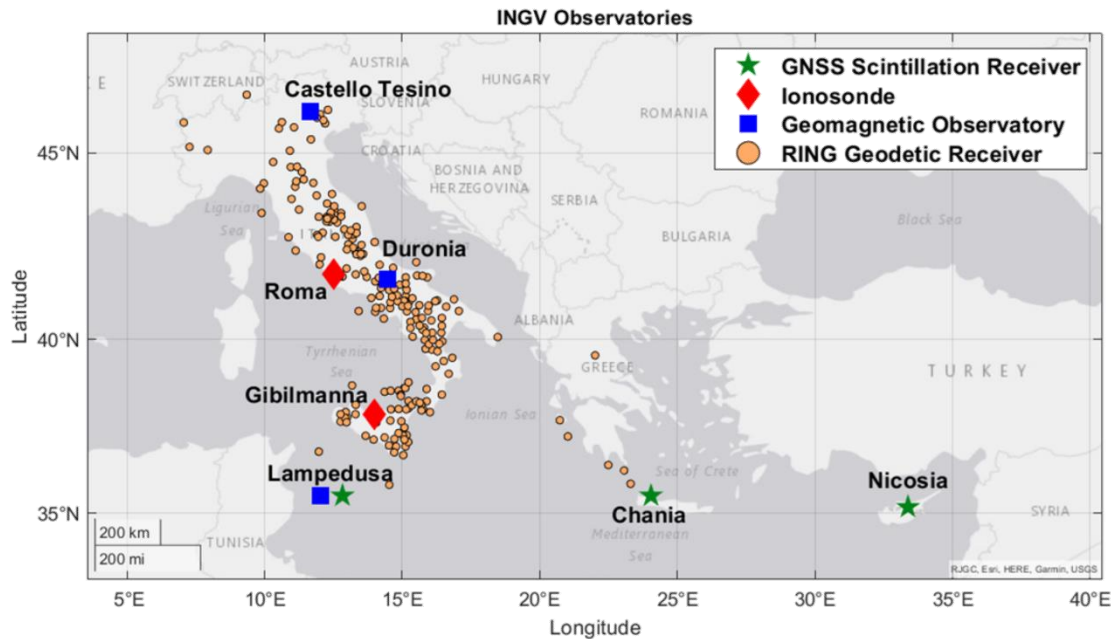
Così come la «meteorologia terrestre» cerca di prevedere il tempo meteorologico, la «**meteorologia spaziale**» (**Space Weather**) cerca di prevedere l'attività del Sole e i suoi effetti sulla Terra.

Le principali agenzie spaziali (ESA, NASA, NOAA) hanno programmi di Space Weather e combinano osservazioni dallo spazio e da Terra a modelli fisico-matematici per cercare di capire se un evento esplosivo sul Sole può essere «**geoeffettivo**» e in che misura.

Quasi tutte le nazioni avanzate del mondo hanno centri di ricerca che si occupano di Meteorologia spaziale.

# E in Italia?

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha una rete di strumenti per la Meteorologia spaziale e un gruppo di ricercatori molto attivo nel campo.



<https://roma2.ingv.it/index.php/monitoraggio-e-sorveglianza/prodotti-del-monitoraggio/bollettini-di-space-weather>

Molti altri istituti e università in Italia fanno studi e ricerche sulla meteorologia spaziale e sono riuniti nella **Space Weather Italian Community** (Swico)

# Seguiteci sul web e sui social!!!



<https://www.youtube.com/@INGVAmbiente/>



<https://www.facebook.com/INGVAmbiente/>



<https://www.instagram.com/ingvambiente/>



Presenti anche su X e Mastodon...