

# Il Sole e l'attività solare

**Alessandro Bemporad**

**INAF - Osservatorio Astrofisico di Torino**

# Introduzione

---

- **Perché studiare il Sole?**
- **Cosa conosciamo del Sole?**
  - L'interno del Sole: produzione e trasporto dell'energia
  - L'esterno del Sole: struttura ed attività dell'atmosfera
- **Effetti dell'attività solare sulla Terra**
  - Magnetosfera terrestre e Aurore
  - Tempeste Geomagnetiche
  - Sole e climatologia terrestre
- **Sfide future per l'astrofisica**
  - Solar Orbiter
  - Altri progetti a Torino

---

# Perché studiare il Sole?

# Perché studiare il Sole?

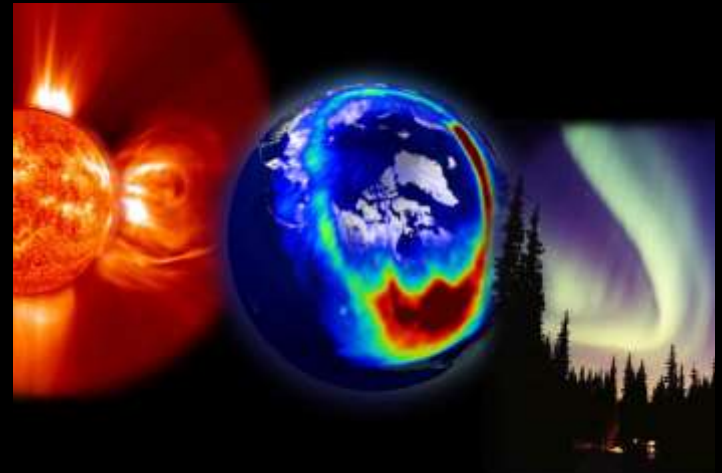
Relazione con il clima terrestre



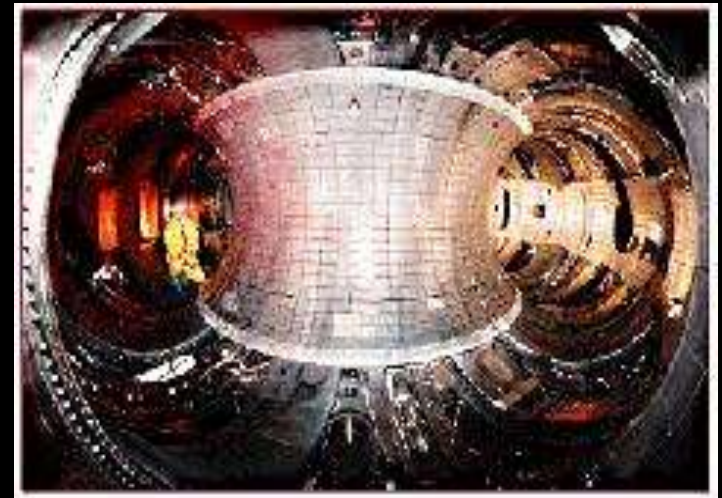
Il Sole come una stella



Meteorologia spaziale



Il Sole come laboratorio di fisica

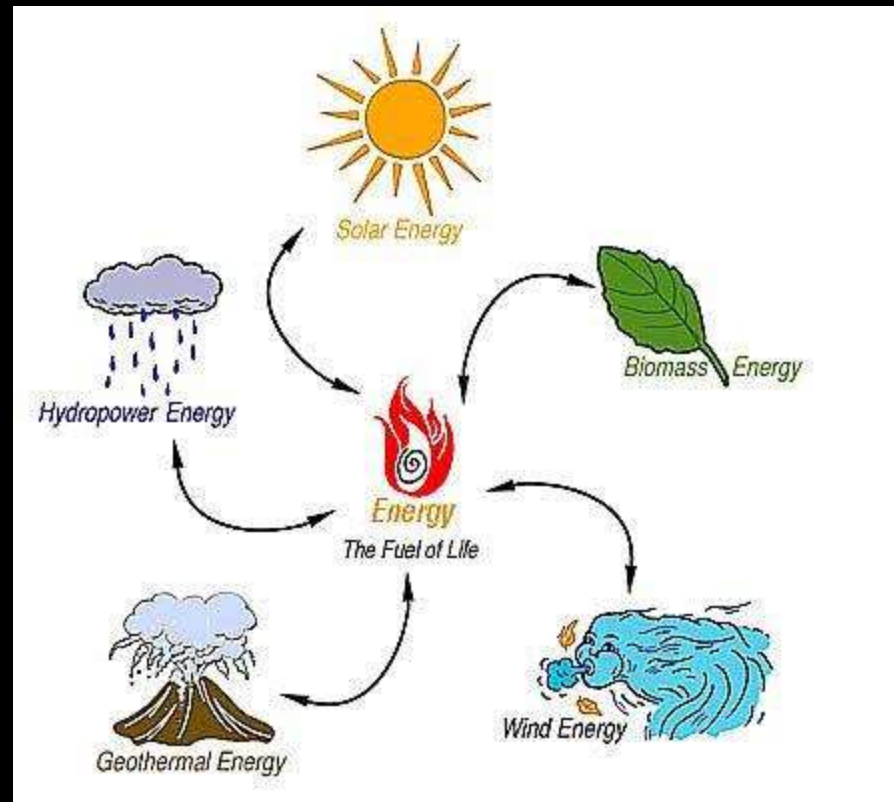




# Perché studiare il Sole?

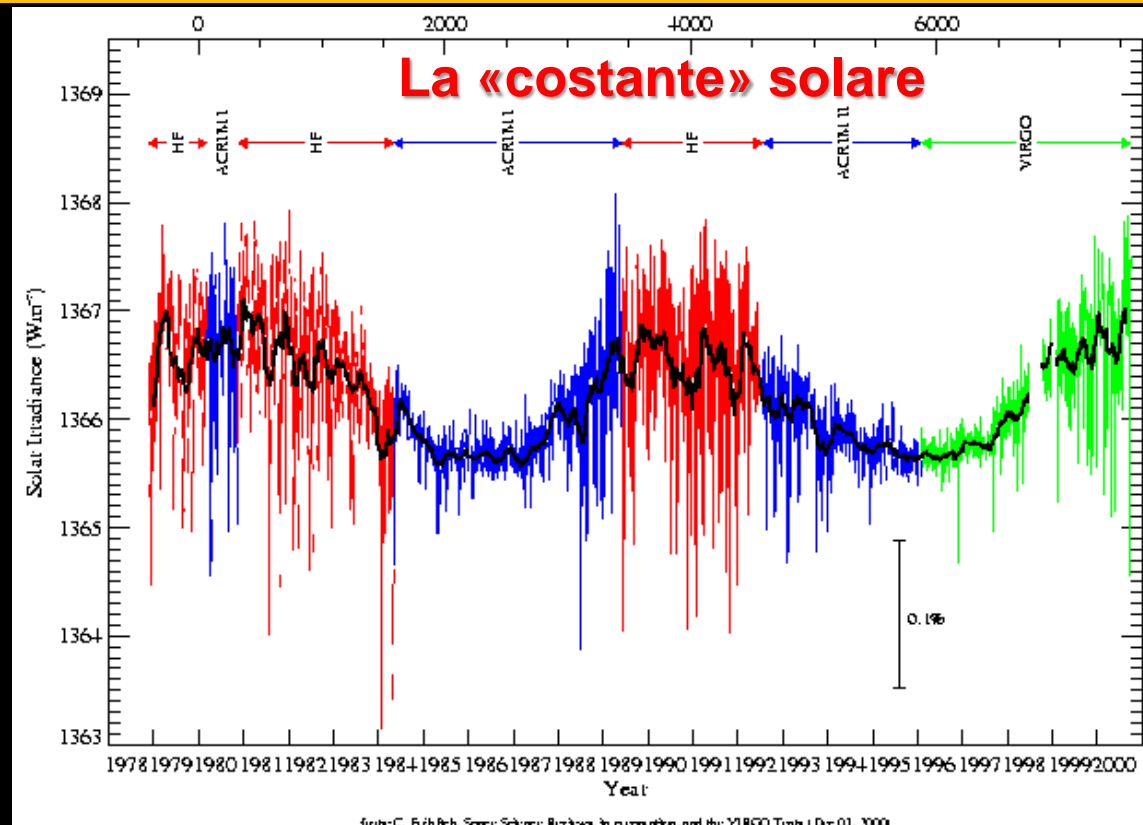
- **Sole come fonte di energia**

- 1) **direttamente** sotto forma di radiazione elettromagnetica,
- 2) **indirettamente** sotto forma di combustibili fossili (petrolio, carbone), energia eolica (vento), idroelettrica, da biomassa.



L'unica forma di energia non di origine solare è quella geotermica.

# Perché studiare il Sole?



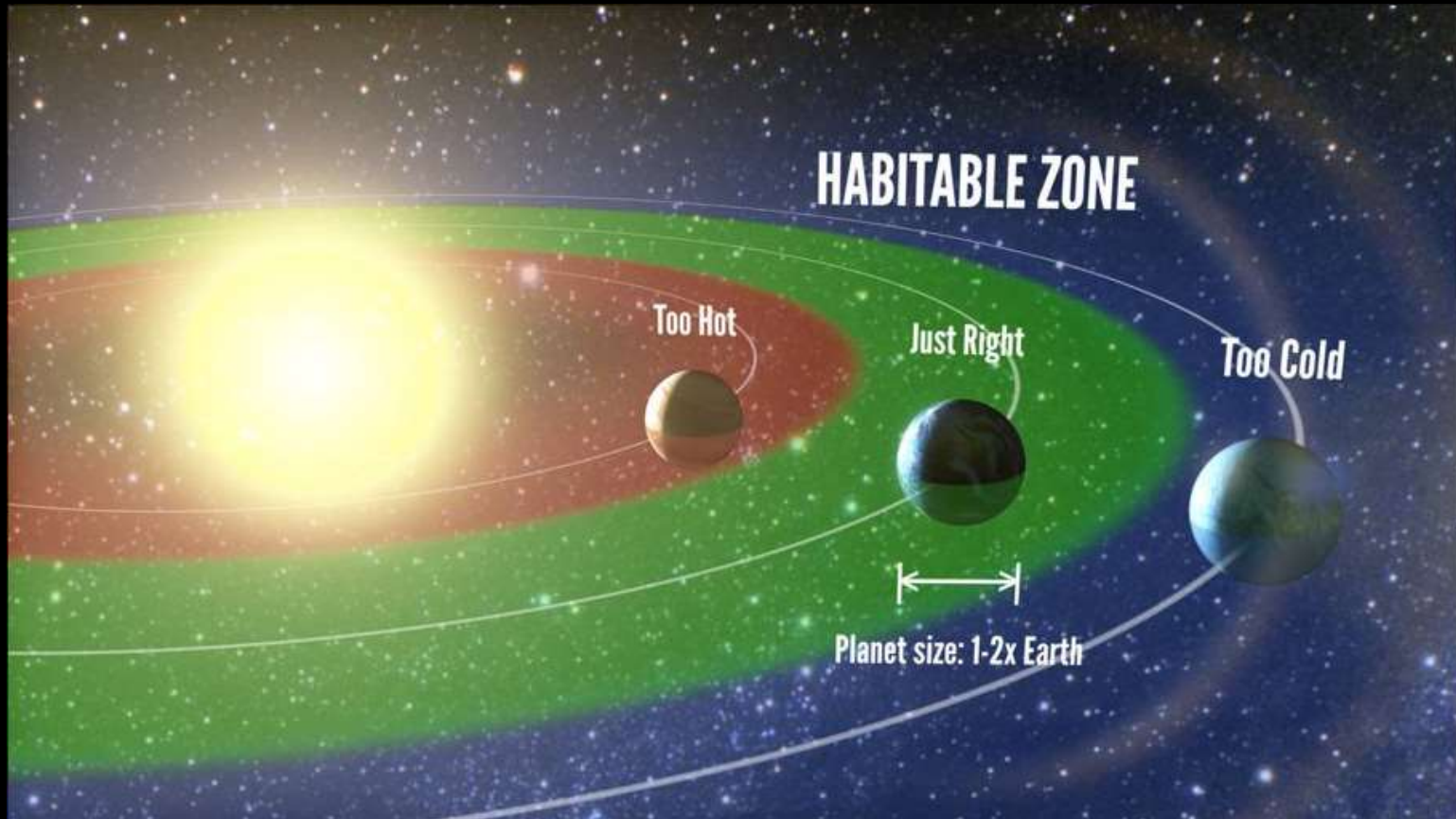
Il Sole fornisce il 99.998% dell'energia al clima terrestre (il resto viene dalle sorgenti geotermiche). Questa energia arriva soprattutto come radiazione.

→ la «**costante**» solare ( $1.367 \text{ kW/m}^2$ ) varia dello 0.15 % con periodo di 11 anni, la misura della variabilità è stata possibile solo durante l'era spaziale.

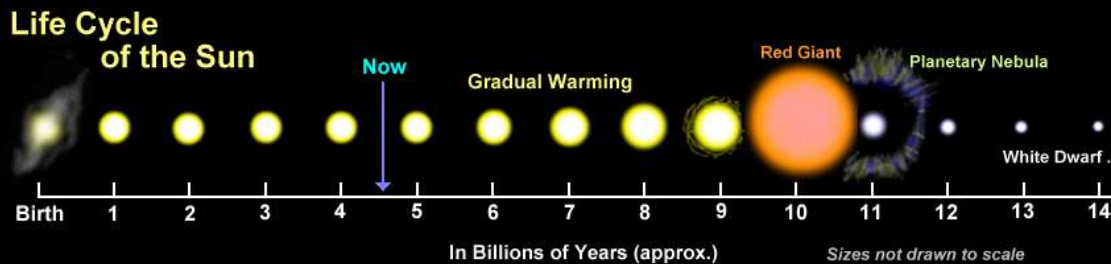
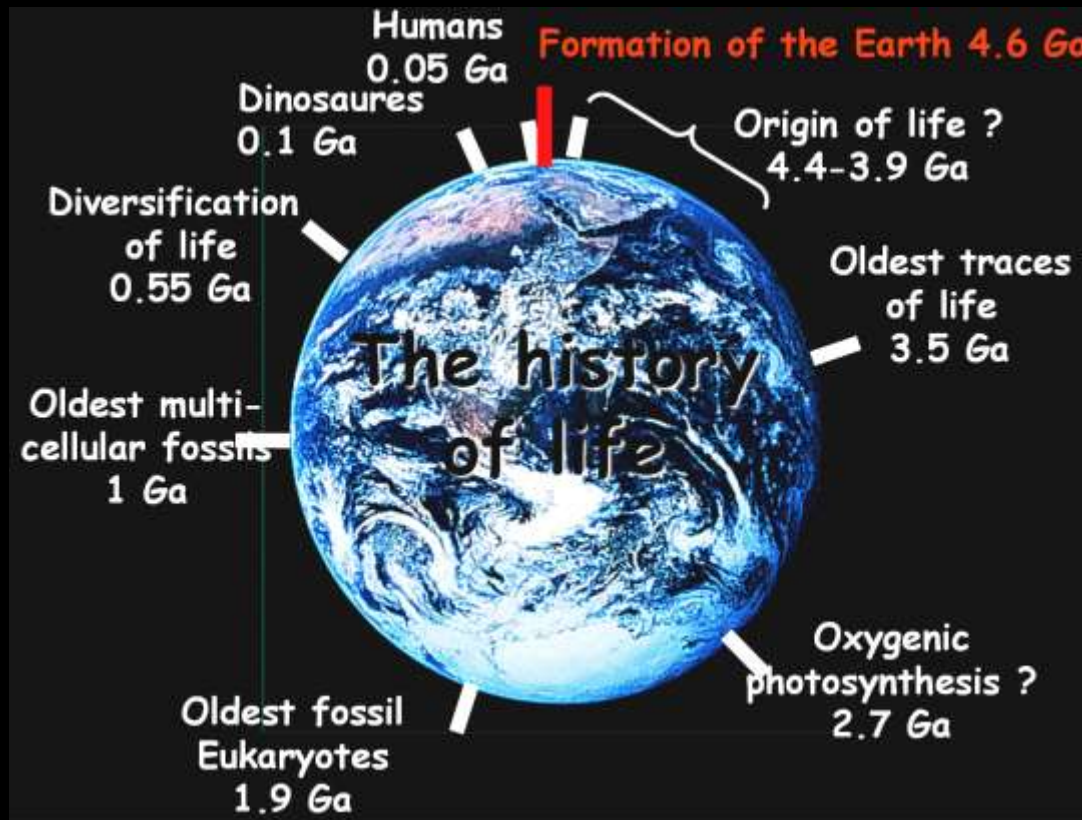
# Perché studiare il Sole?

- **Capire l'origine della vita e la sua sostenibilità**

Le caratteristiche del sole sono tali da permettere (unitamente alle caratteristiche del pianeta) la vita → **zone di abitabilità**



# Perché studiare il Sole?





# Perché studiare il Sole?

---



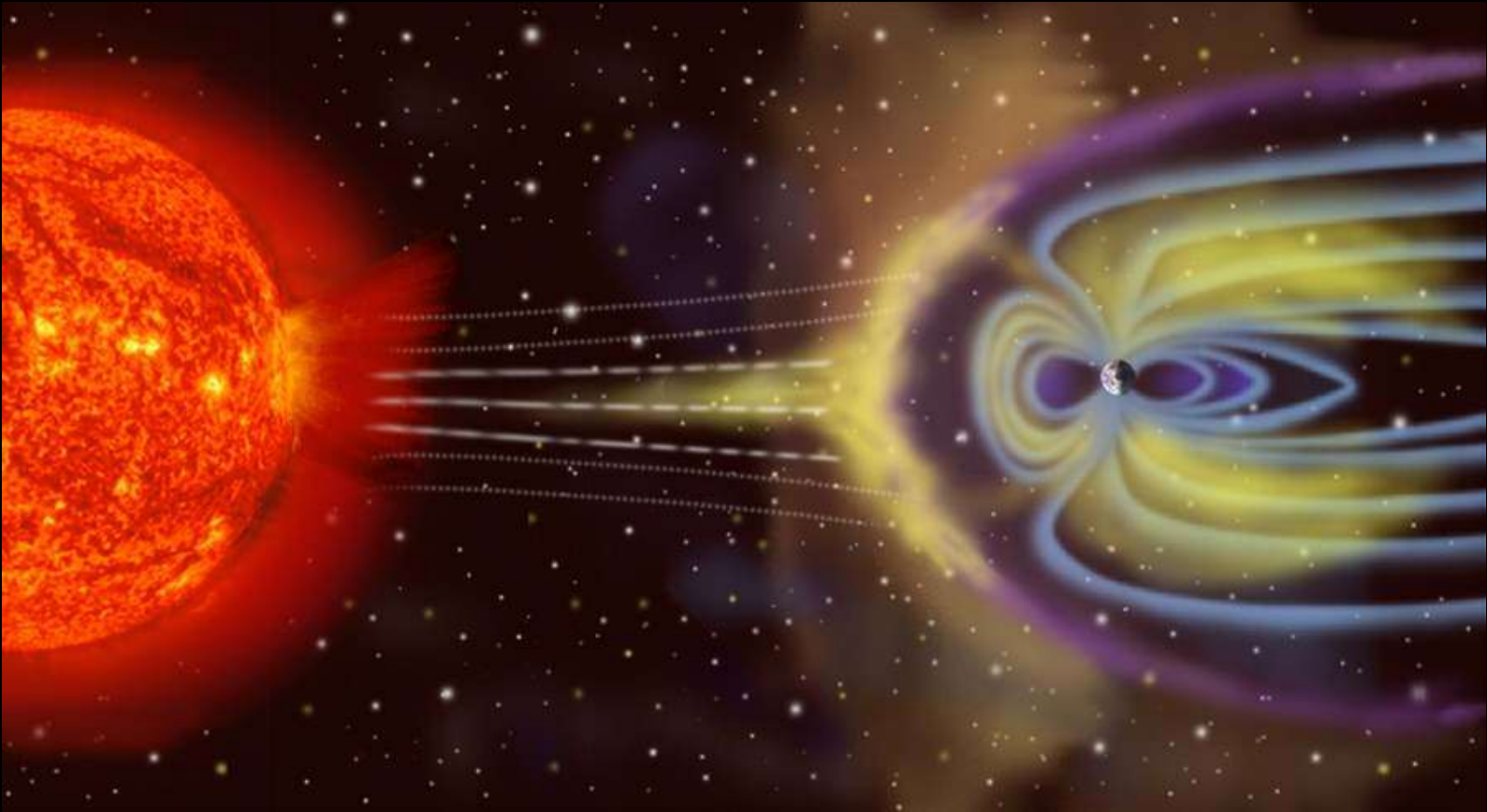
La fine del Sole: nebulosa planetaria e nana bianca (foto: Ring Nebula)

---

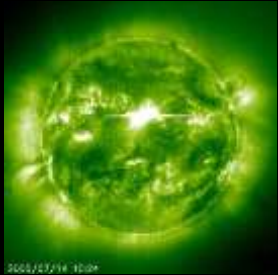
# Perché studiare il Sole?

- **Capire e prevedere gli eventi di Meteorologia Spaziale**

Le eruzioni solari investono spesso la Terra con un flusso di particelle ad alta energia, solo in parte schermate dal campo magnetico terrestre



# Perché studiare il Sole?



**RADIAZIONE  
ELETTROMAGNETICA**  
ARRIVO: 8 MINUTI  
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV,  
ATTIVITA' RADIO

**PARTICELLE  
AD ALTA ENERGIA**  
ARRIVO: 15 MIN - ORE  
DURATA: GIORNI

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA  
MEDIO-BASSA**  
ARRIVO: 2-4 GIORNI  
DURATA: GIORNI

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

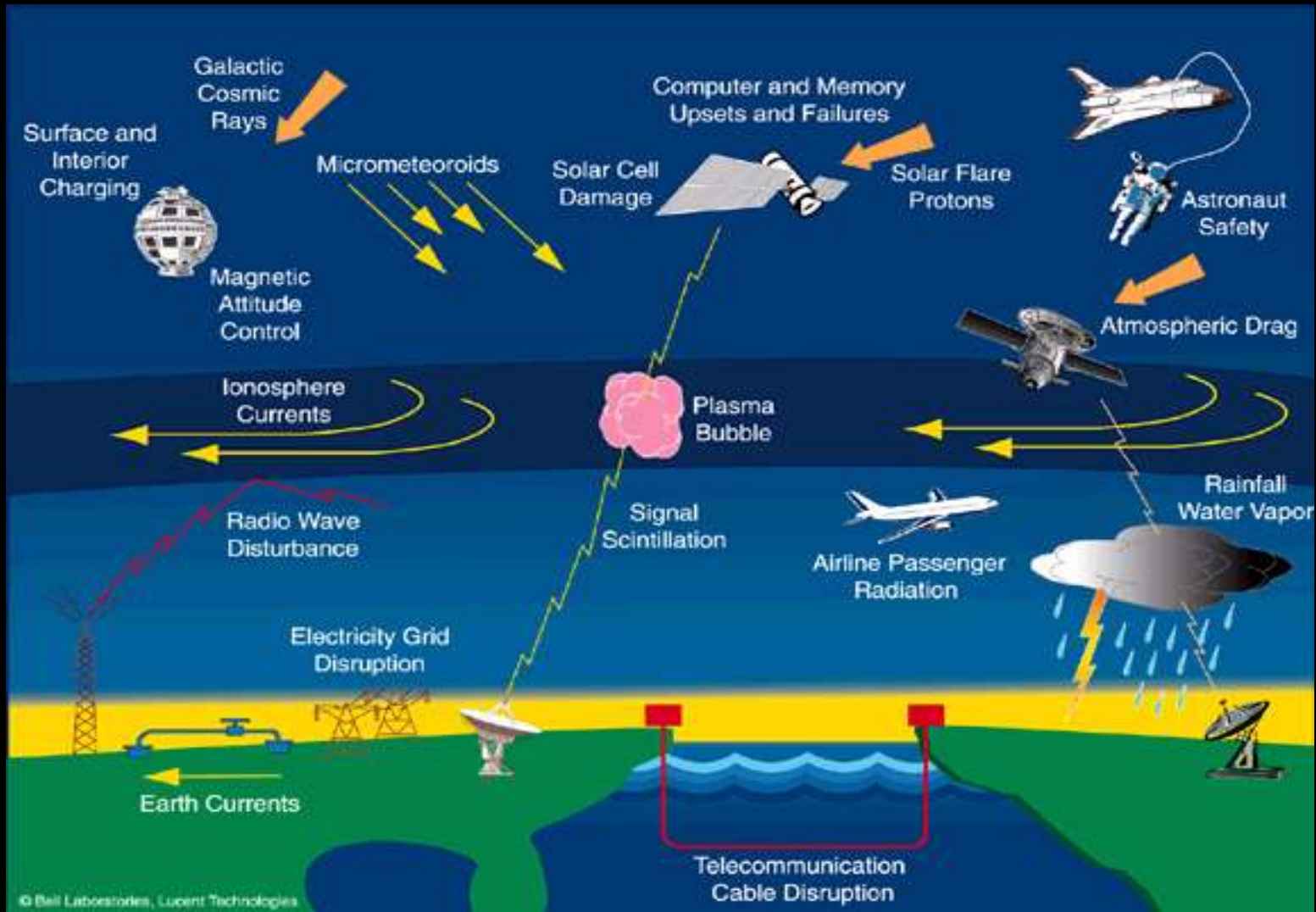
## EFFETTI SULL'UOMO

- ✓ Rischio radiazioni per astronauti
- ✓ Radiazioni aerei ad alta quota

## EFFETTI SULLE TECNOLOGIE UMANE

- ✓ Danneggiamento delle sonde spaziali:
  - danneggiamento strumentazione elettronica
  - degradazione pannelli solari
  - degradazione rivelatori ottici
  - caduta per attrito atmosferico
- ✓ Interferenze segnali radio
- ✓ Interferenze sistemi di navigazione (GPS, Loran-C)
- ✓ Correnti indotte sui sistemi di terra:
  - corrosione reti oleodotti/gasdotti
  - danneggiamento centrali elettriche

# Perché la meteorologia spaziale?



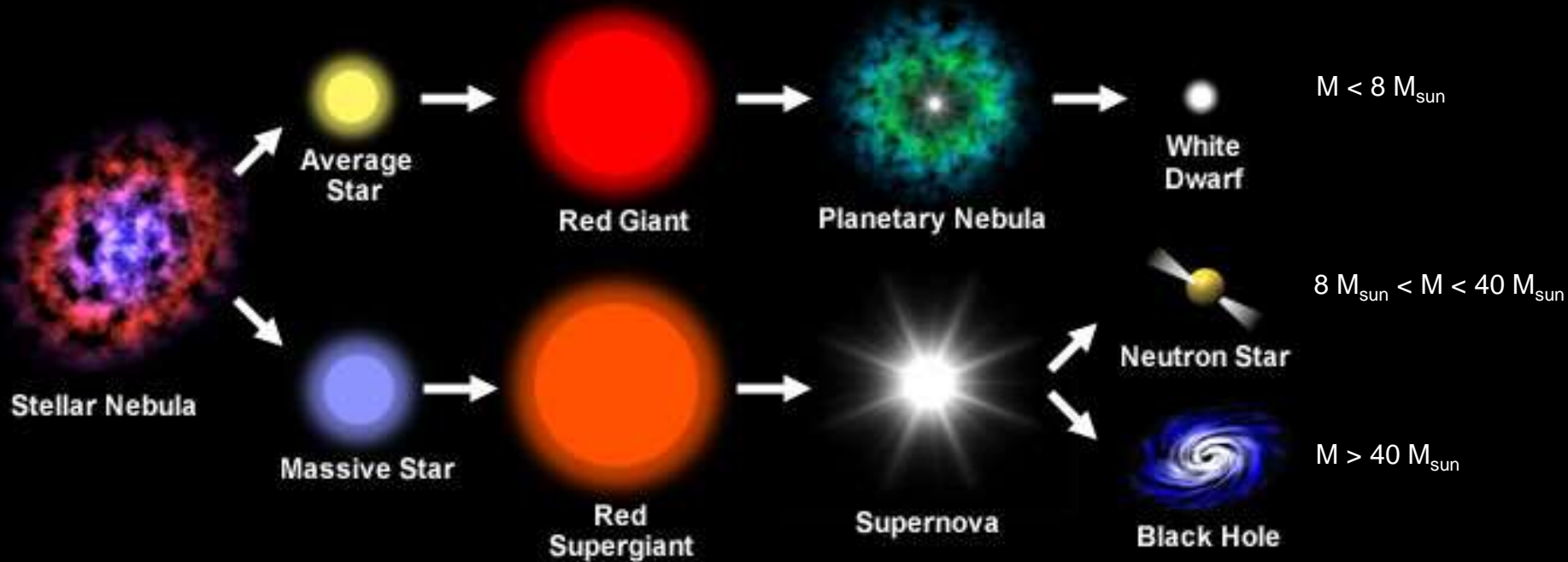


# Perché studiare il Sole?

- **Capire la nascita e la vita di tutte le stelle**

Tutti i modelli di **evoluzione stellare** sono «versioni modificate» dei nostri modelli di evoluzione del Sole

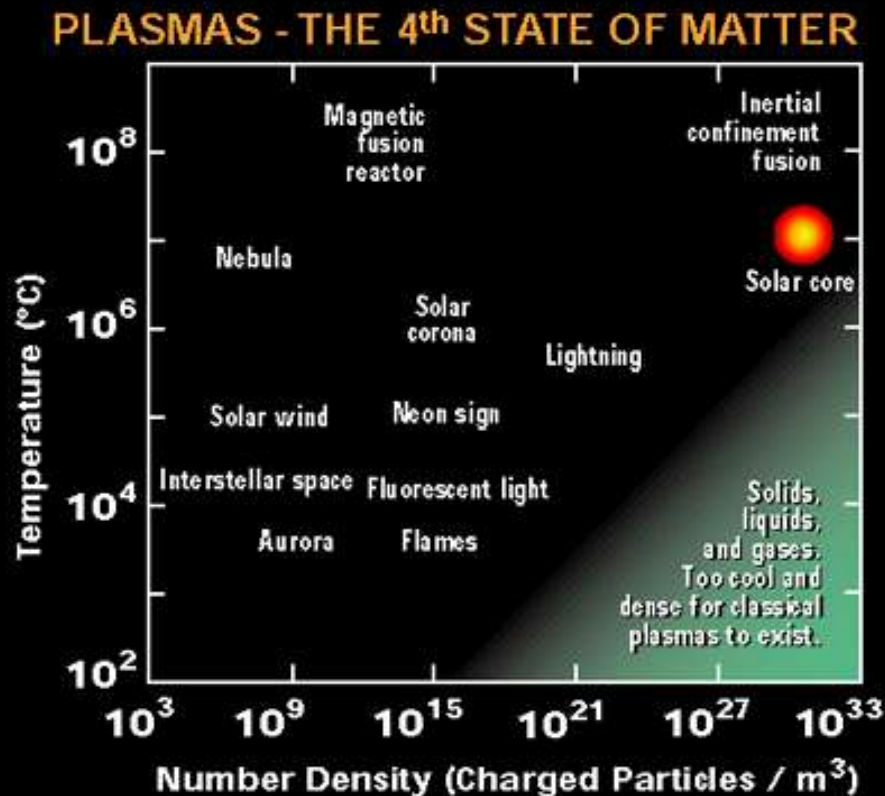
Life Cycle of a Star



# Perché studiare il Sole?

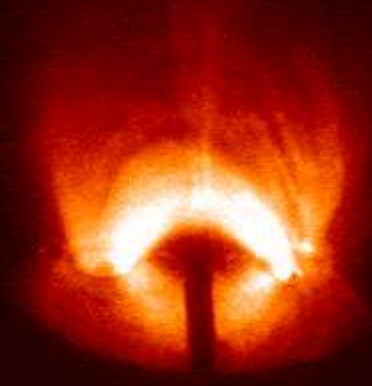
- **Capire la fisica del plasma**

Il 99.999% dell'universo visibile è fatto di **plasma**, così come il Sole → studiare il Sole vuol dire studiare la fisica del 4° stato della materia di cui è fatto tutto l'universo

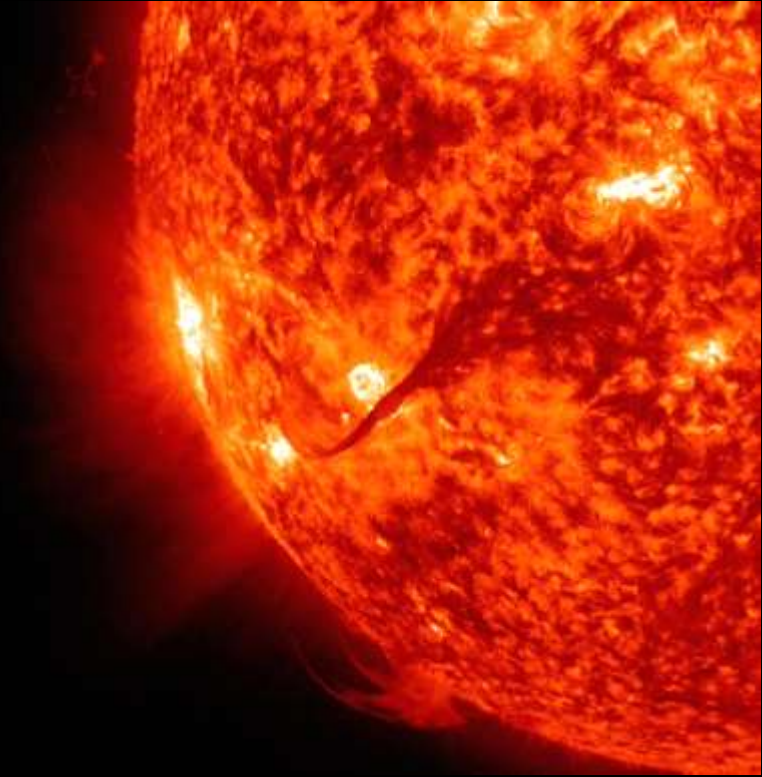


# Perché studiare il Sole?

---



30 cm



500.000 km

---

# Cosa conosciamo del Sole?



# Come si osserva il Sole?

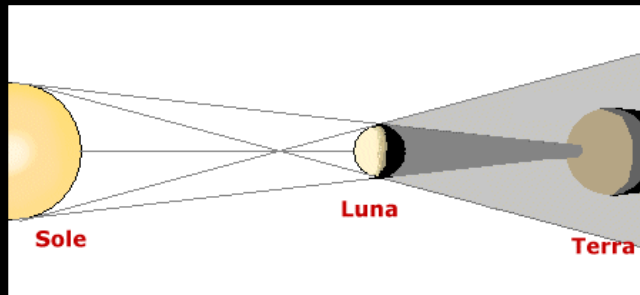
**Da Terra...** fin da Galileo!



**Dallo spazio...** solo dagli anni '70.  
Solo dallo spazio è possibile  
**monitorare il sole 24h su 24.**



Durante le eclissi  
(per studiarne l'atmosfera esterna)



Missione SOHO



Missione Hinode



Missione STEREO

# Il Sole in cifre

❑ Il Sole si trova in un braccio spirale della nostra Galassia (Via Lattea), chiamato braccio di Orione, a circa 30000 anni-luce dal centro.

❑ Il Sole ruota intorno al centro della Galassia in 225 milioni di anni. Quindi il Sistema Solare ha una velocità di 230 km/s (o 830.000 km/h).



**Massa:**  $2 \times 10^{30}$  kg = 333,000 volte la massa della Terra

**Diametro:** 1,400,000 km = 109 volte il diametro della Terra

**Densità:** 1.4 volte la densità dell'acqua

**Composizione:** PLASMA: 74% H + 25% He + 1% Metalli

**Temperatura della superficie:** 5,800 K

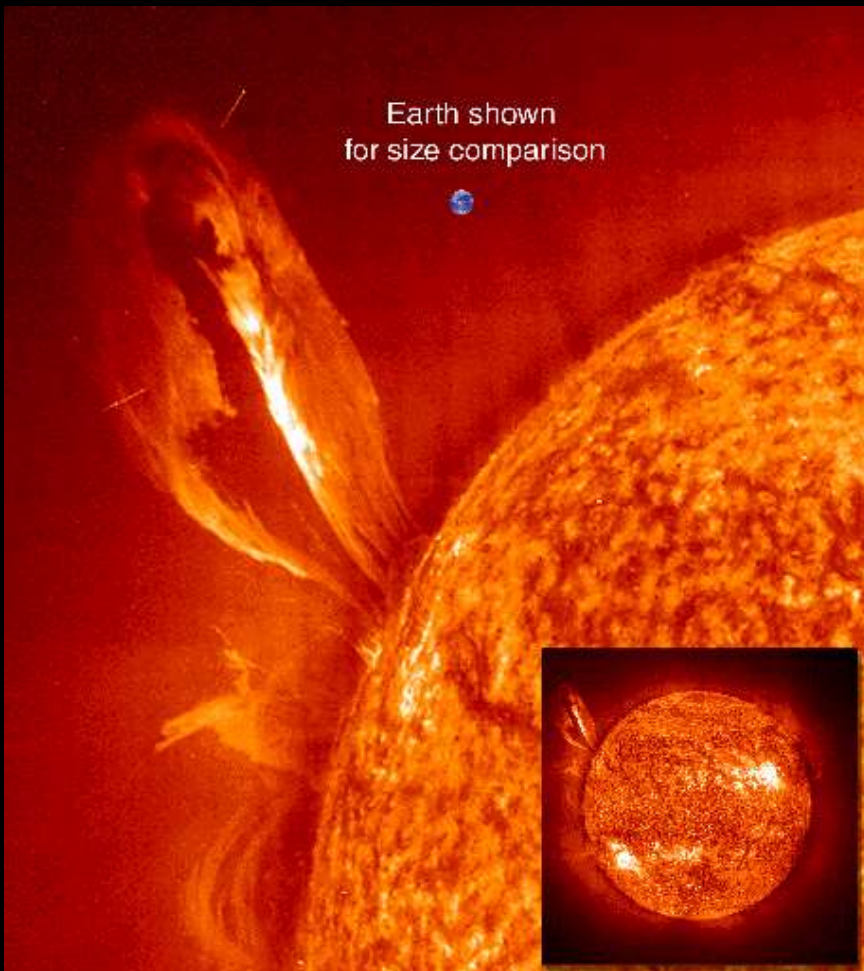
**Temperatura dell'atmosfera esterna (corona):** >1,000,000 K

**Temperatura al centro:** 15,000,000 K

**Energia totale emessa:**  $4 \times 10^{26}$  W (5 minuti della radiazione che investe la Terra sono pari al consumo mondiale annuale di energia elettrica).

# Ma quanto è grande il Sole?

Se il sole avesse le dimensioni di una palla da basket, la terra sarebbe una “goccia” del diametro di 2.2 mm e sarebbe ad una distanza di circa 50 m.



---

# L'interno del Sole



# La Struttura interna del Sole

## ❑ **Nocciolo** $0 \Rightarrow 0.25 R_{\odot}$

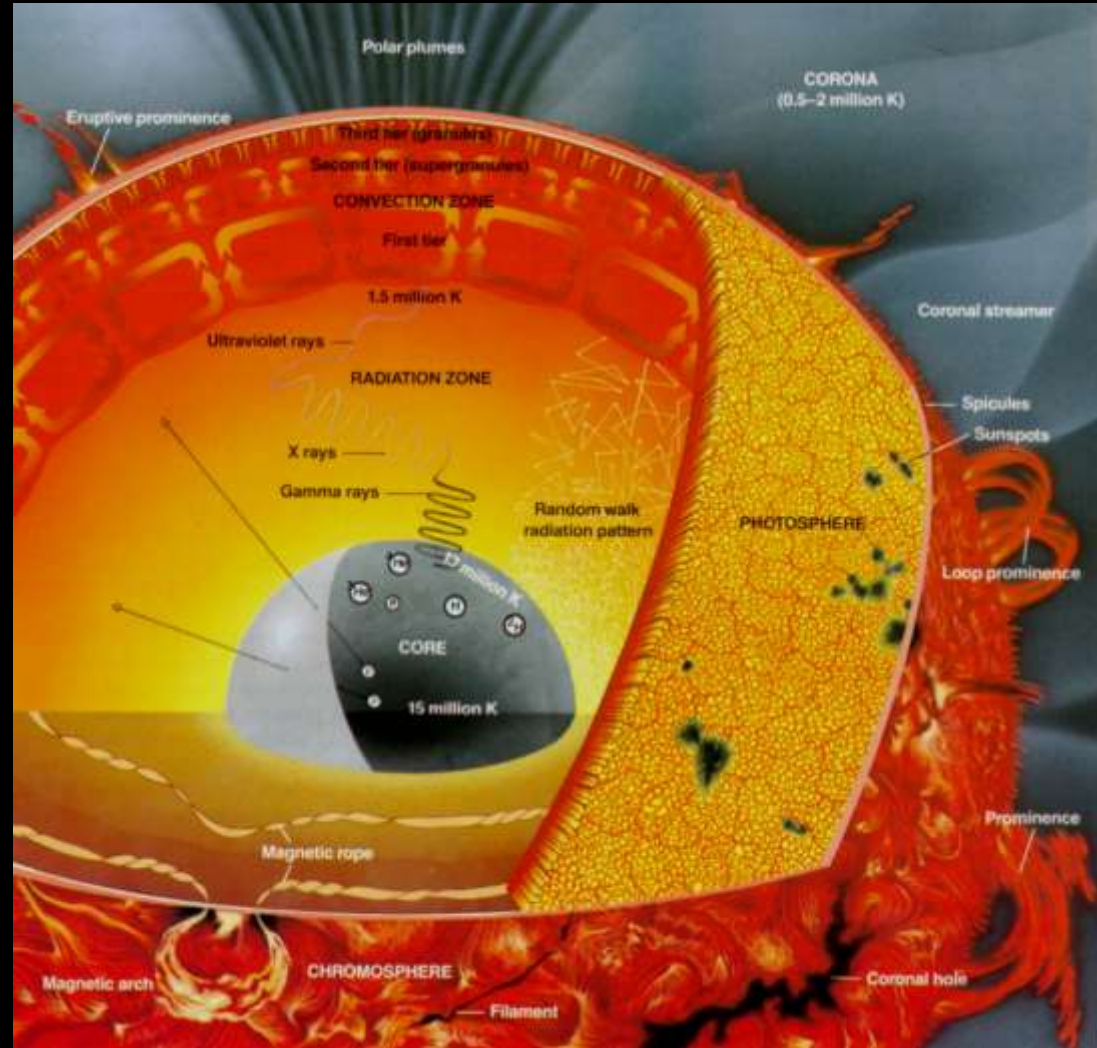
- L'energia viene prodotta
- La fusione nucleare trasforma  $7 \cdot 10^{11}$  kg di idrogeno in elio al secondo

## ❑ **Zona Radiativa** $0.25 \Rightarrow 0.75 R_{\odot}$

- l'energia viene trasportata per radiazione
- Sebbene i fotoni prodotti viaggino alla velocità della luce, vengono deviati così tante volte dal denso materiale che impiegano circa 100000 anni per raggiungere la superficie

## ❑ **Zona Convettiva** $0.75 \Rightarrow 1 R_{\odot}$

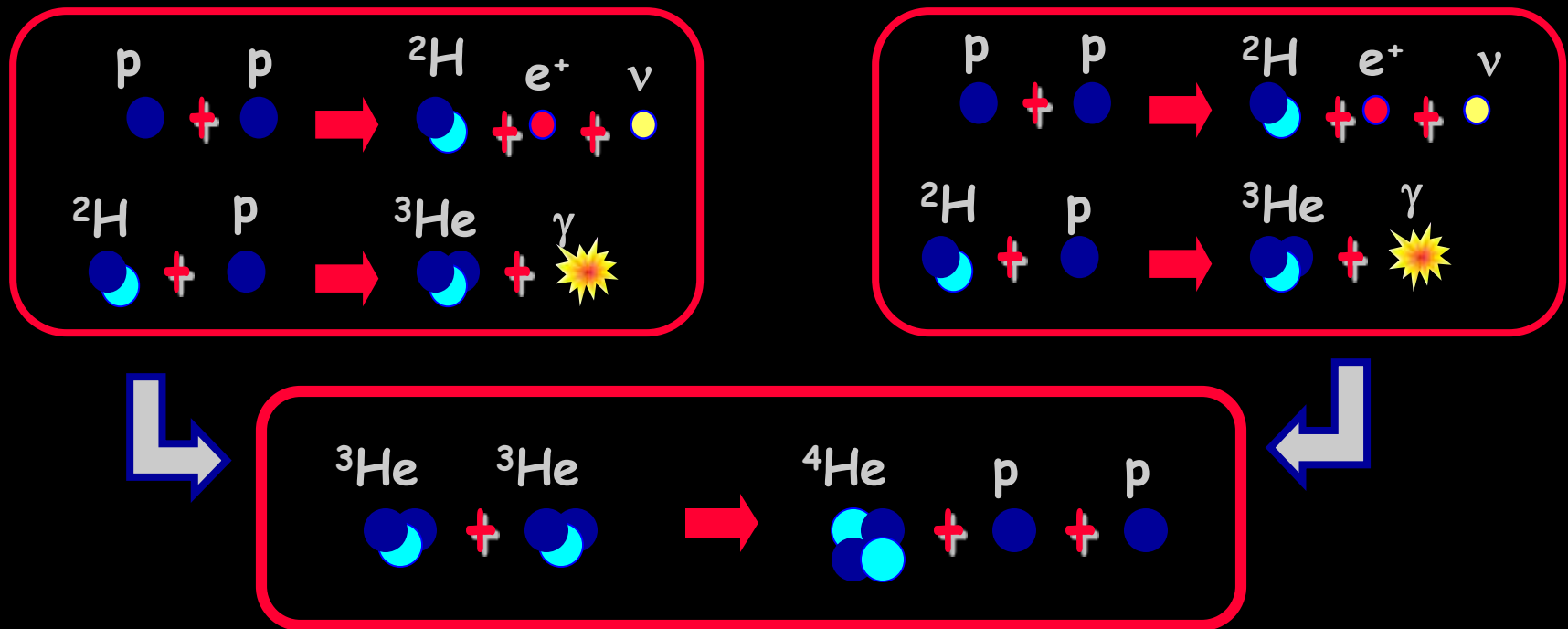
- L'energia viene trasportata per convezione in superficie, come in una pentola d'acqua che bolle



La temperatura nel sole va da 15.000.000 K (nucleo) a 5000 K (fotosfera)

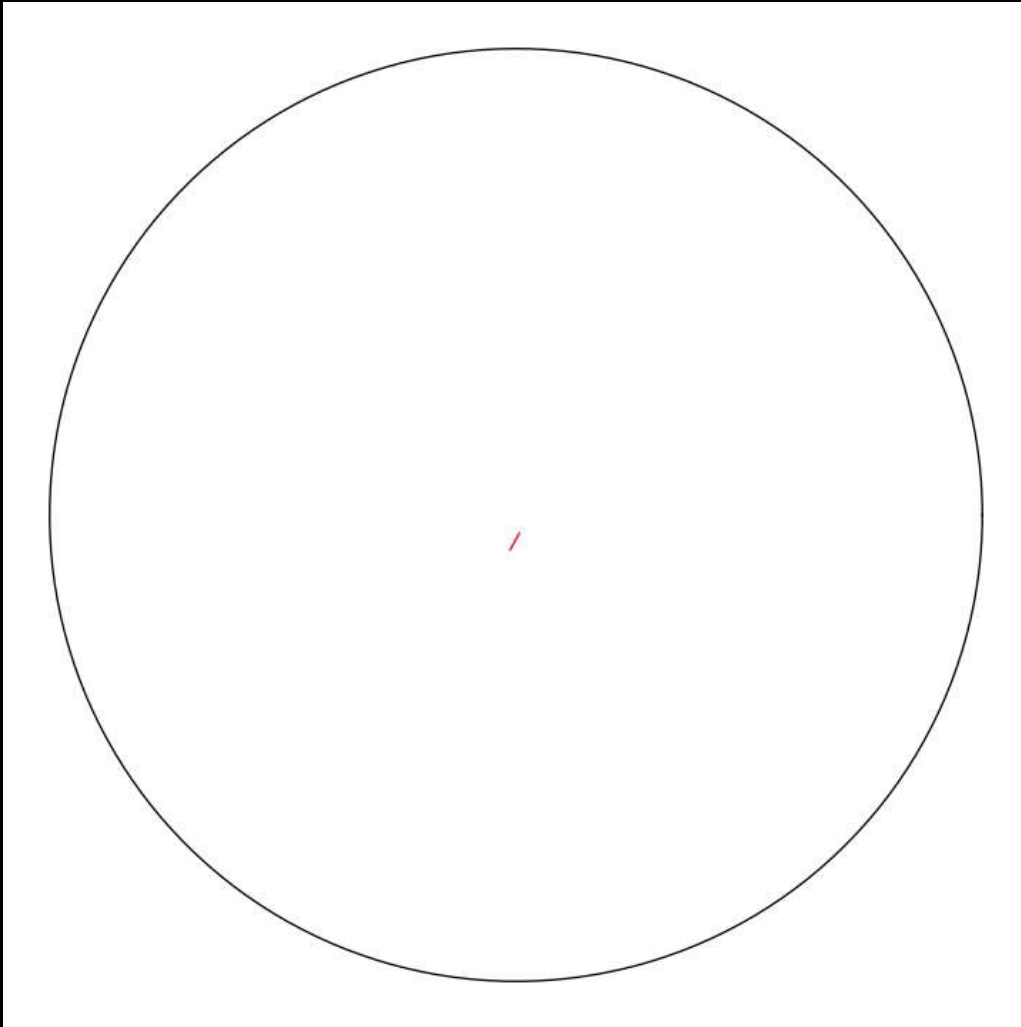
# Interno del Sole: il nocciolo

La pressione prodotta nel nucleo dal plasma solare ( $10^{11}$  atmosfere) riscalda il plasma fino a 15 milioni di gradi, temperatura alla quale si innesca una reazione nucleare (FUSIONE) che trasforma 4 protoni in un nucleo di Elio rilasciando energia:



La fusione nucleare trasforma  $7 \cdot 10^{11}$  kg di idrogeno in elio al secondo. Circa lo 0.7% di questa massa viene trasformato in energia ( $E = m c^2$ )

# Interno del Sole: zona radiativa



Il **nucleo del Sole** è un gas con una densità di  $150 \text{ g/cm}^3$  (150 volte la densità dell'acqua, **16.6 volte la densità del piombo**)

→ i fotoni urtano continuamente con i gas circostanti

→ a seguito delle collisioni con la materia il cammino percorso dai fotoni è una somma di direzioni casuali detto **random walk**

→ in totale i fotoni impiegano tra  **$10^5$  e  $10^6$  anni** per arrivare alla superficie del Sole

→ dopo ogni collisione i fotoni perdono un po' di energia

**Come si calcola questo tempo?**

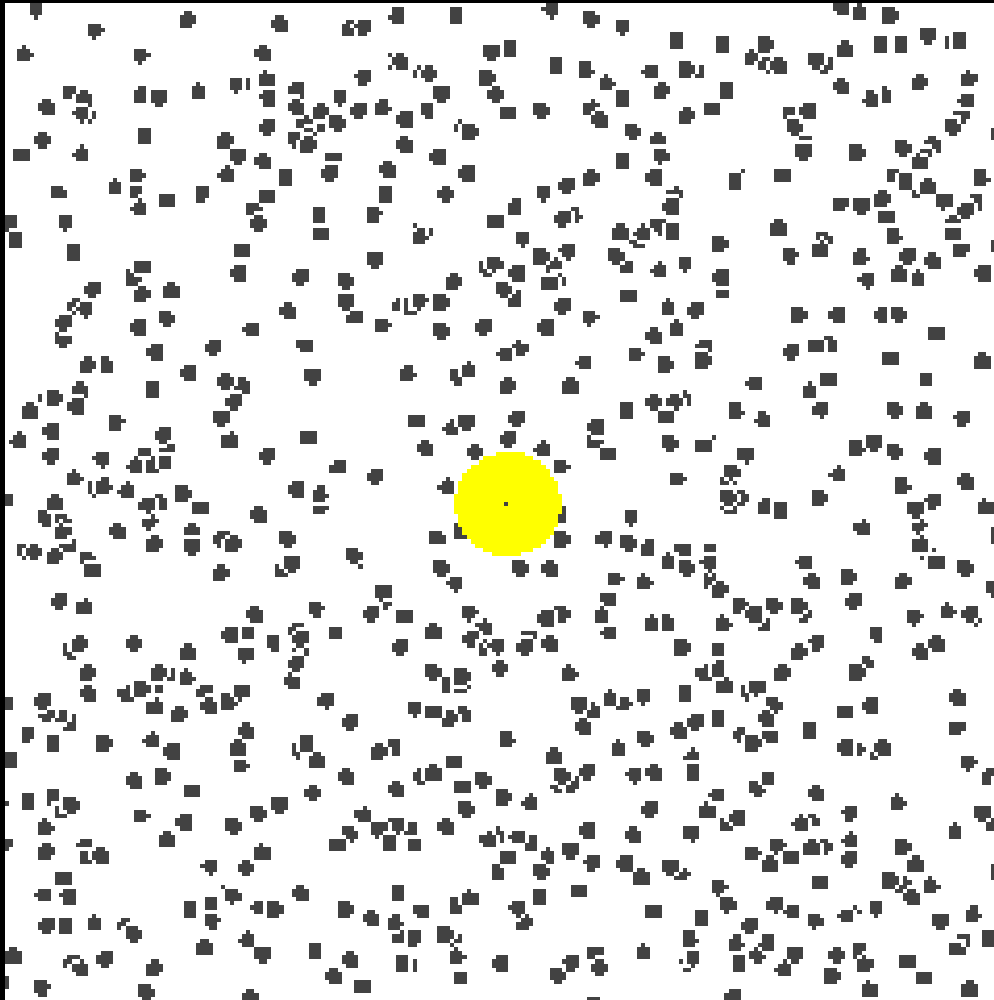
# Random walk: un po' di storia

---

Il concetto di «**camminata casuale**» («**random walk**») è collegato al fenomeno del moto browniano: nel 1827 Robert Brown osservò che particelle di polline immerse in acqua si muovono continuamente... ma non seppe spiegare il perché..



# Random walk: un po' di storia



L'interpretazione del fenomeno fu dimostrata nel 1905 da Albert Einstein: le particelle di polline (visibili) **urtano continuamente con le molecole di acqua** circostanti (non visibili) che si muovono continuamente per **agitazione termica** → spingono i grani di polline a seguire un cammino casuale.

# Random walk: un po' di storia

Osserva infatti, ogni volta che raggi penetrati infondono la luce del sole nell'ombra delle case: molti minuti corpi in molti modi, attraverso il vuoto vedrai mescolarsi nella luce stessa dei raggi, e come in eterna contesa attaccar battaglie e zuffe, a torme contendendo, e non far sosta, da aggregazioni e disgregazioni frequenti travagliati; (...)

E per questa ragione più conviene che tu ponga mente a questi corpi che vediamo agitarsi nei raggi del sole: perché tali agitazioni rivelano che ci sono movimenti di materia anche al di sotto, segreti ed invisibili. Molte particelle infatti ivi vedrai stimulate da urti ciechi cambiar cammino e indietro respinte ritornare, or qui or là, da ogni punto verso qualunque parte. Certo questo errante movimento ha per tutti origine dagli atomi. (...)

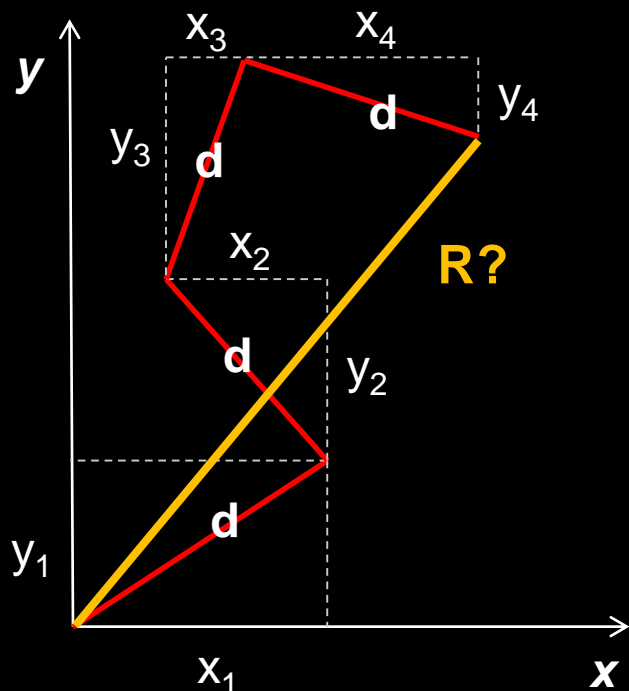
Così dai primi principi ascende il movimento e a poco a poco emerge ai nostri sensi, sì che si muovono anche quelle cose che possiamo discernere alla luce del sole; e tuttavia, per quali urti lo facciano, non appare apertamente.



Tito Luvrezio Caro, «De Rerum Natura», libro II (I sec. a. C.)

# Random walk: un po' di teoria

Consideriamo il moto di una particella in un piano  $(x, y)$ . Supponiamo che tra una collisione e la successiva la particella che stiamo osservando percorra sempre la stessa distanza  $d$ , ma ogni volta in una direzione casuale diversa. Allora la distanza totale  $R$  dopo 4 passi è



$$\begin{array}{ll} x_1 > 0, y_1 > 0; & x_2 < 0, y_2 > 0 \\ x_3 > 0, y_3 > 0; & x_4 > 0, y_4 < 0 \end{array}$$

$$\begin{aligned} R^2 &= x^2 + y^2 = \\ &= (x_1 + x_2 + x_3 + x_4)^2 + (y_1 + y_2 + y_3 + y_4)^2 = \\ &= x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 + 2x_1x_2 + 2x_1x_3 + \dots + \\ &\quad + y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2 + 2y_1y_2 + 2y_1y_3 + \dots = \\ &= d^2 + d^2 + d^2 + d^2 + 2x_1x_2 + 2y_1y_2 + \dots \sim 4d^2 \end{aligned}$$

perché tutti i doppi prodotti contengono quantità positive e negative che tendono a cancellarsi tra loro quando il numero di passi diventa molto grande.

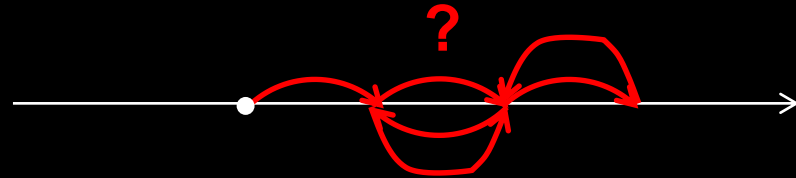
→ dopo  $N$  passi è  $R^2 = N d^2$  ossia

$$R = \sqrt{N} d$$

# Random walk: attività

Facciamo una verifica sperimentale!

Consideriamo un caso ancora più semplice di un corpo che si può muovere **solo lungo una retta**.



Ad ogni passo **tiriamo una moneta**: se esce testa il corpo fa un passo a destra, se invece esce croce va a sinistra...

**Dopo  $N$  passi di quanto si è spostato dal punto iniziale?**

Fuga dal Sole

Esito del lancio

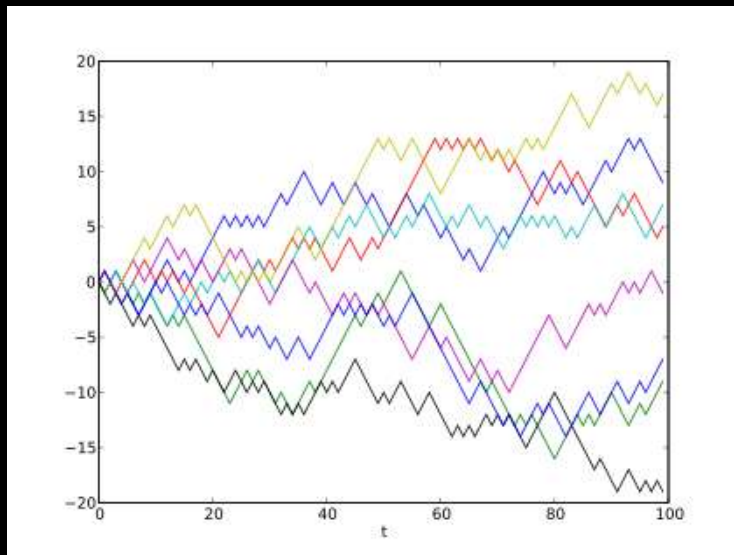
TESTA

CROCE



IN VIA

# Random walk: attività



In ogni lancio, la probabilità che esca testa è uguale alla probabilità che esca croce. Dopo  $N$  lanci ci aspettiamo che

$$N(\text{testa}) \sim N(\text{croce}) \sim N/2$$

Il punto però è proprio questo però sopra non compare il segno di uguaglianza, ma di circa uguale.... **Perché?**

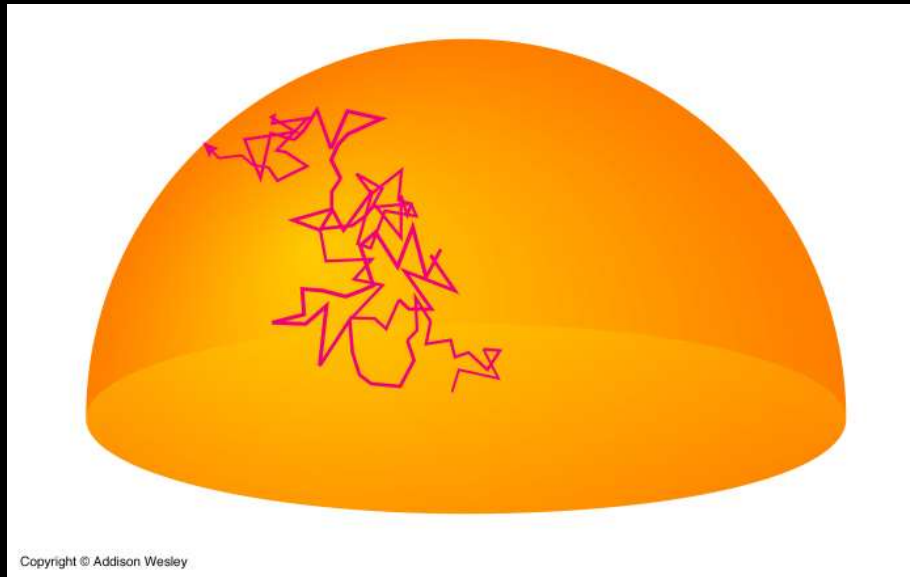
Se fosse esattamente  $N(\text{testa}) = N(\text{croce}) = N/2$  allora il corpo non andrebbe da nessuna parte e alla fine sarebbe sempre nella posizione da cui è partito. Ma in statistica ci sono sempre delle **fluttuazioni rispetto al valore atteso**.

Sono proprio queste fluttuazioni a far sì che alla fine il corpo si sposti, e lo spostamento dopo  $N$  lanci è (circa) **proporzionale alla radice quadrata di  $N$** !

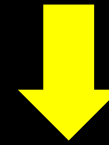
Alla fine risulta quindi  $|N(\text{testa}) - N(\text{croce})| \sim \sqrt{N}$



# Random walk dei fotoni solari



$$R = \sqrt{N} d$$



$$N = \frac{R^2}{d^2}$$

Per l'interno del Sole mediamente  $d$  (detto libero cammino medio) è circa  $d \sim 10^{-4} \text{ m} = 0.1 \text{ mm}$   
→ data la distanza  $R = R_{sun}$  che deve percorrere il fotone, come si calcola il numero di passi  $N$ ?

**RISPOSTA:** il numero totale di passi  $N$  che ogni fotone deve compiere per arrivare fino in superficie è  $N = (R_{sun}/d)^2 = 10^{26}$  passi! E quant'è la distanza totale  $s$  percorsa dal fotone?

**RISPOSTA:**  $s = Nd = 10^{22} \text{ m} \sim 10^{13} R_{sun}$ . Propagandosi alla velocità della luce ( $\sim 300000 \text{ km/s}$ ) il fotone impiega  $t = 10^6$  anni per percorrere questa distanza ed arrivare alla superficie!

# Interno del Sole: random walk applet

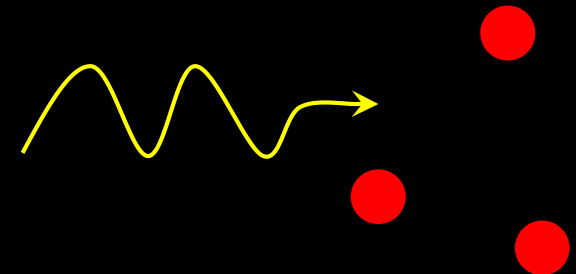
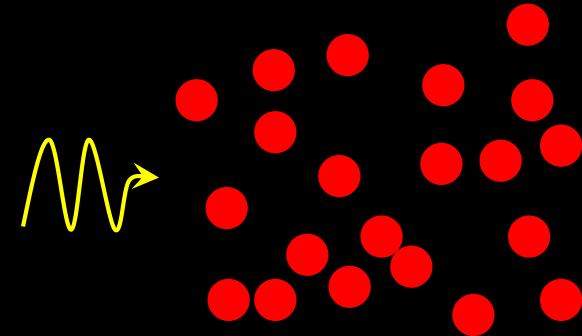
The screenshot shows a web browser window with the URL <https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=11349>. The page is from the Open Source Physics (OSP) website. The main content area is titled "Computer Program Detail Page" and features the "Solar Photon Random Walk" applet, written by Drew Onken. The applet is described as a simulation of photon paths in radiative transport, showing a random walk pattern on a yellow circular background. The text explains that photons do not travel in a straight line but rather collide and get redirected. It also provides information about the applet's development as a final project in a Computational Physics course (Phy 200) using the Easy Java Simulations (EJS) modeling tool. The applet is distributed as a ready-to-run (compiled) Java archive. A download link for the .jar file is provided, along with a link to previous versions. The page also includes a sidebar with navigation links (SIMULATIONS, EJS MODELING, CURRICULUM, PROGRAMMING, TOOLS, JS/HTML MATERIALS, BROWSE MATERIALS, RELATED SITES, DISCUSSION, ABOUT OSP) and a section for Science SPORE Prize November 2011. The footer of the page includes the URL <https://www.compadre.org/osp/index.cfm>.

<https://www.compadre.org/osp/items/detail.cfm?ID=11349>

# Random walk dei fotoni solari

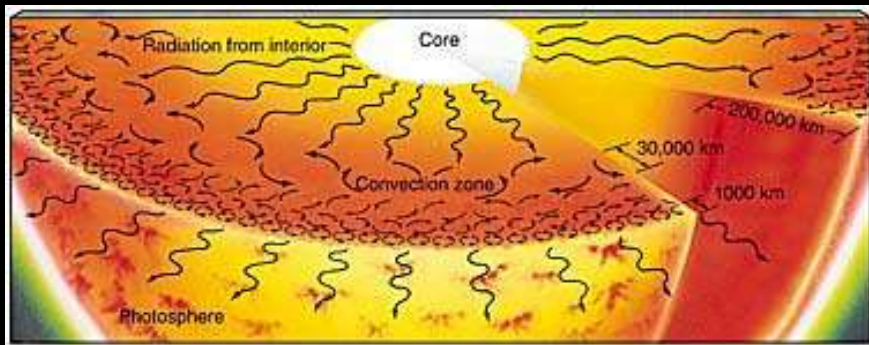
Il calcolo del tempo medio impiegato dai fotoni è **molto più complicato**, soprattutto per due motivi:

- 1) Andando dal centro del Sole alla sua superficie la densità delle particelle diminuisce da  $150 \text{ g/cm}^3$  nel nucleo fino a  $10^{-9} \text{ g/cm}^3$  in superficie, quindi di un fattore 150 000 000 000 (150 miliardi) → i fotoni passeranno la maggior parte del tempo intrappolati nel nucleo del Sole → per calcolare il tempo di propagazione bisogna tenere conto della variazione di densità lungo il cammino del fotone, e quindi della **variazione del libero cammino medio  $d$** .
- 2) Ad ogni collisione con le particelle (elettroni) circostanti il fotone perde un po' di energia, quindi aumenta la sua lunghezza d'onda, e l'interazione con le particelle diventa via via più facile, come se le particelle intorno diventassero via via un po' più grosse... → bisogna tener conto della **variazione della «sezione d'urto»  $\sigma$** .





# Interno del Sole: zona convettiva



Nell'ultimo  $\frac{1}{4}$  di raggio solare l'energia viene trasportata da enormi **celle convettive** che trasportano il plasma più caldo in superficie.

→ la parte terminale di questo moto è visibile sulla superficie del Sole, la **fotosfera solare**

→ la **granulazione** è l'emersione di «bolle» di plasma più caldo che si raffredda e torna verso l'interno del Sole



(video della durata di 1 ora)

# Il modello solare standard

Costruito a partire da un insieme di equazioni che descrivono l'evoluzione dei parametri fisici del plasma all'interno del sole, ossia:

Conservazione della massa

$$dM/dr = \rho(r) 4\pi r^2$$

Bilancio di pressione termica

$$dp/dr = -M G/r^2 \rho = -g(r) \rho$$

Equazione di stato del gas

$$P = P_{\text{gas}} + P_{\text{rad}} - P_{\text{elett}} + P_{\text{degen}}$$

Tasso di produzione dell'energia

$$\varepsilon_{\text{pp}} = F[\rho, X, T]$$

Conservazione dell'energia

$$dL/dr = \varepsilon(r) \rho(r) 4\pi r^2$$

Evoluzione della composizione chimica

$$X(t) = X_0 \tau / (\tau + X_0 t)$$

Gradienti di temperatura adiabatico e radiativo

$$(dT/dr) = \max [ (dT/dr)_{\text{ad}}, (dT/dr)_{\text{rad}} ]$$

→ criterio di Schwarzschild

Queste equazioni chiudono il sistema, assegnate le *boundary conditions*:

$$r = 0 \quad \rightarrow \quad M = 0, L = 0$$

$$r = R_{\text{sun}} \quad \rightarrow \quad M = M_{\text{sun}}, L = L_{\text{sun}} \text{ a } t = 4.5 \times 10^9 \text{ anni dall'inizio}$$

Il calcolo inizia a  $t = 0$  con le condizioni tipiche di un stella di sequenza principale e si evolvono le equazioni fino a raggiungere  $M$ ,  $r$  e  $L$ .



# Il modello solare standard

---

**Modello Solar standard (MSS):** insieme di equazioni che descrivono l'equilibrio delle stelle (bilancio di pressione, conservazione della massa, dell'energia, evoluzione della composizione chimica, etc...)

## Risultati principali del Modello Solare Standard:

1. La luminosità solare  $L$  era inizialmente  $\sim 3/4$  del valore attuale  $\rightarrow$  se ciò avvenisse oggi comporterebbe degli sconvolgimenti climatici enormi (calotte polari su tutto il globo), ma non se ne hanno evidenze geologiche nel passato  $\rightarrow$  fattori evolutivi composizione atmosfera terrestre (maggiore effetto serra).
2.  $T_C \sim 1.5 \times 10^7 \text{ K}$ ,  $n_C \sim 10^{25} \text{ cm}^{-3}$  Pressione e densità decadono di un fattore 10 entro  $\sim 0.3 R_{\text{sun}}$  (mentre la  $T$  decade più lentamente, di un fattore 10 entro  $\sim 0.8 R_{\text{sun}}$ )  $\rightarrow$  entro  $0.5 R_{\text{sun}}$  è contenuto il 90% della massa solare
3. Entro  $0.72 R_{\text{sun}}$  prevale il trasporto radiativo dell'energia, più in alto prevale il trasporto convettivo.
4. il MSS permette di derivare delle conclusioni sull'**evoluzione futura** del Sole.

# Il problema dei neutrini solari

Complessivamente per ogni ciclo protone-protone si ha:

$4 \text{ } ^1\text{H} \Rightarrow \text{}^4\text{He} + 2 \gamma + 2 \nu_e + 26.73 \text{ MeV}$  in energia cinetica delle particelle

quindi il numero totale  $N_\nu$  di  $\nu_e$  che ci aspettiamo siano prodotti al secondo all'interno del Sole per dare la luminosità osservata  $L_{sun}$  (erg/s) è dato da

$$N_\nu = \frac{2L_{sun}}{Q_{pp}} \rightarrow \Phi_\nu = \frac{N_\nu}{4\pi a^2} \approx 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

**Problema:** le misure del flusso di neutrini ottenute dalla fine degli anni '60 conclusero che il  $\Phi_\nu$  osservato era circa 1/3 di quanto atteso dal modello solare standard → **problema dei neutrini solari**

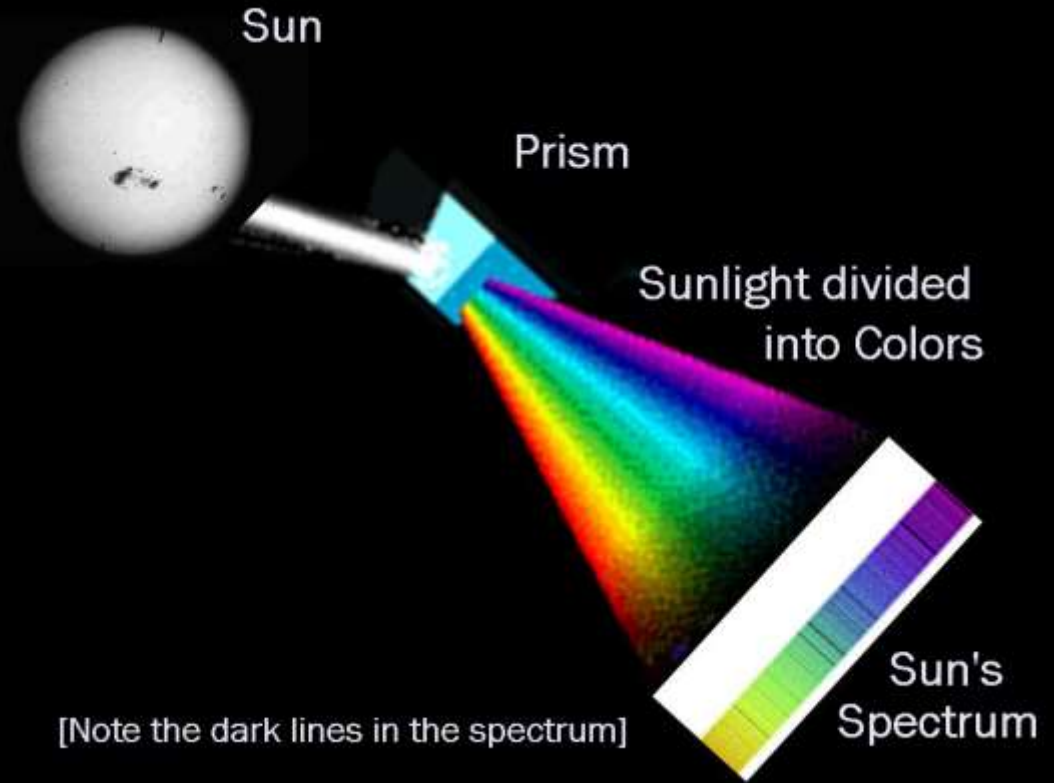
**Soluzioni proposte:** modelli «alternativi» dell'interno del Sole, verifica sperimentale accurata delle misure del flusso  $\Phi_\nu$ , attribuzione della discrepanza al fenomeno dell'oscillazione dei neutrini

**Soluzione:** misure dei tre tipi di neutrini esistenti ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) confermarono l'esistenza delle **oscillazioni dei neutrini** e la correttezza del MSS.

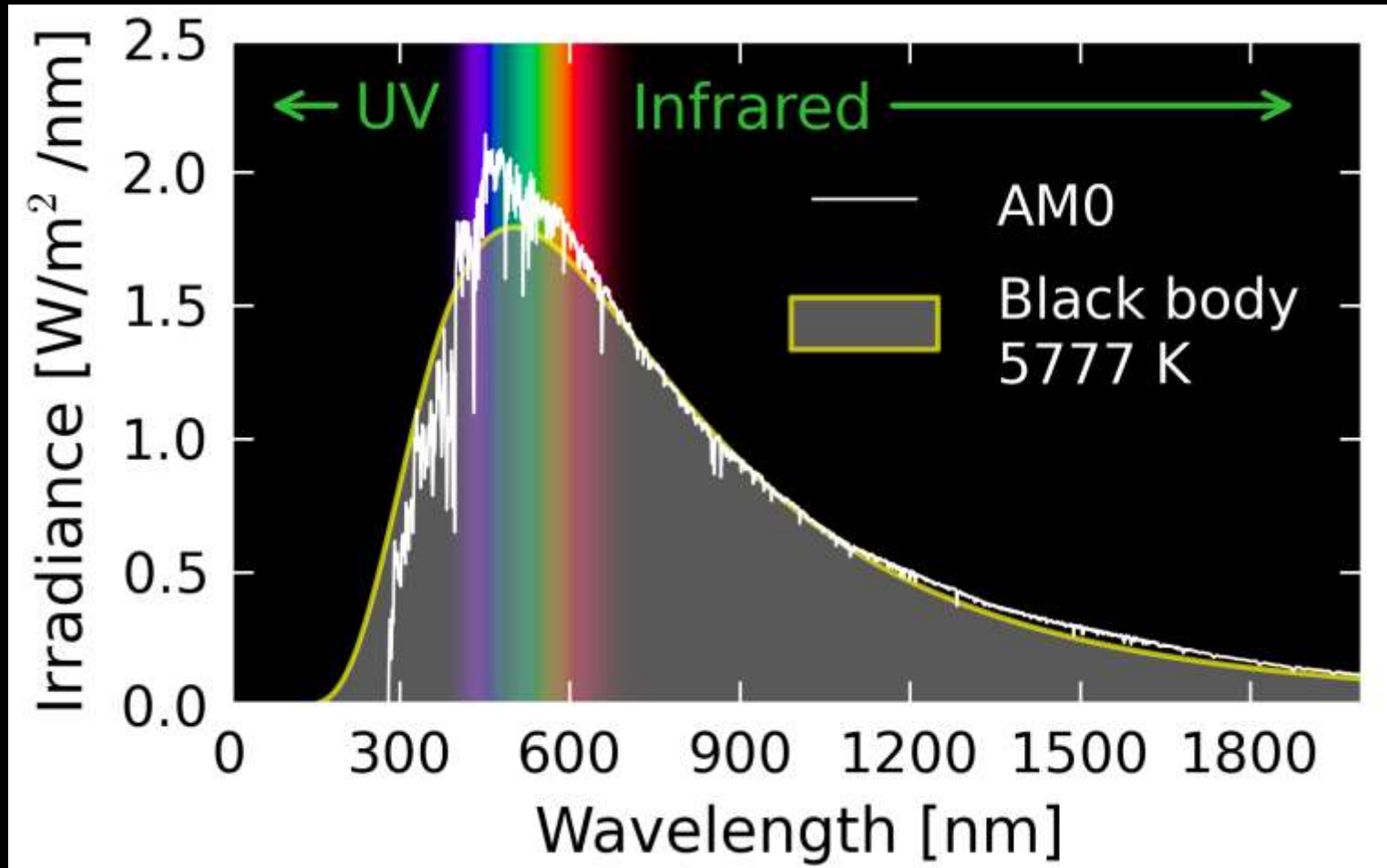
---

# L'esterno del Sole

# Esterno del Sole: spettro solare



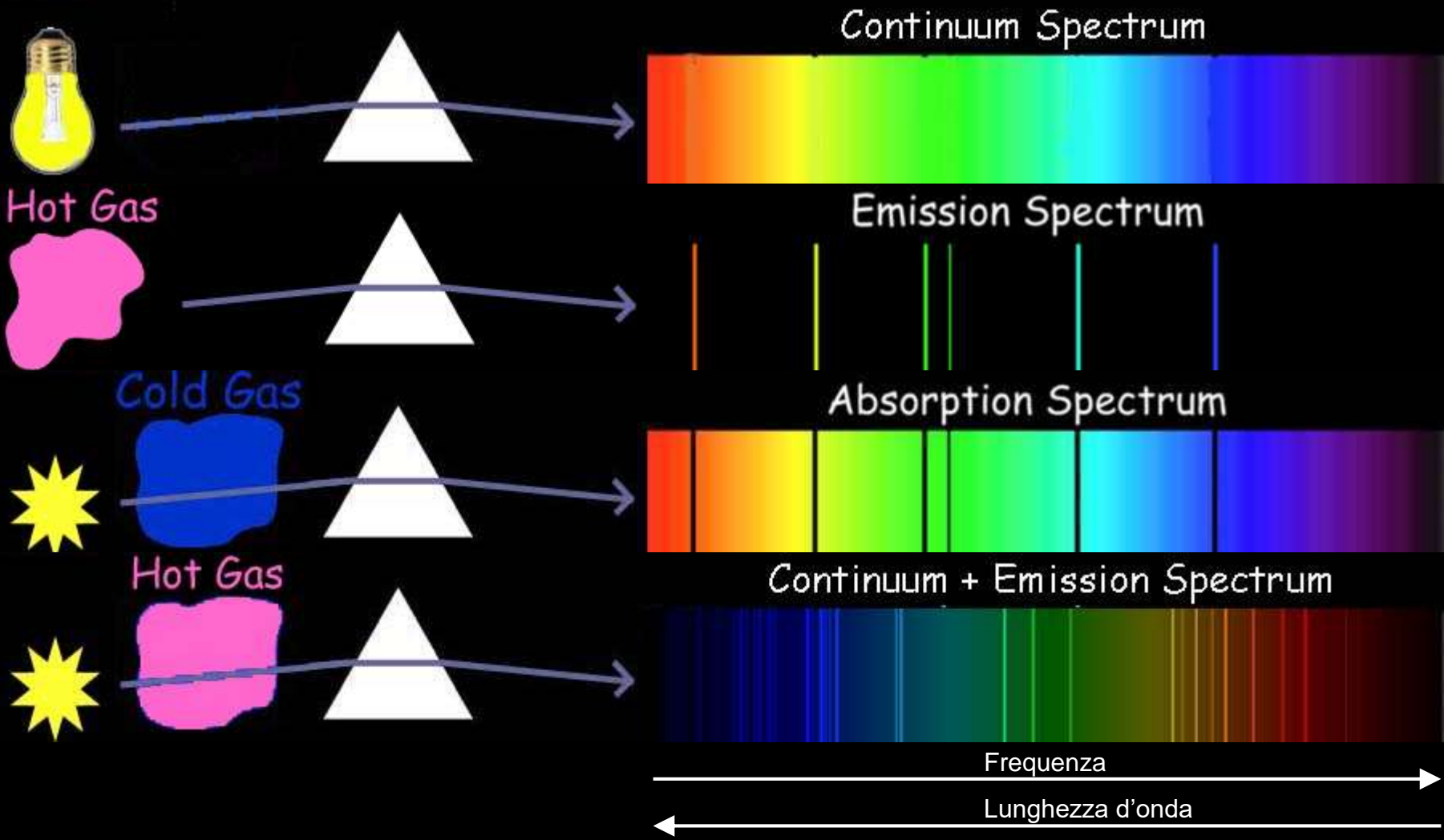
# Esterno del Sole: spettro solare



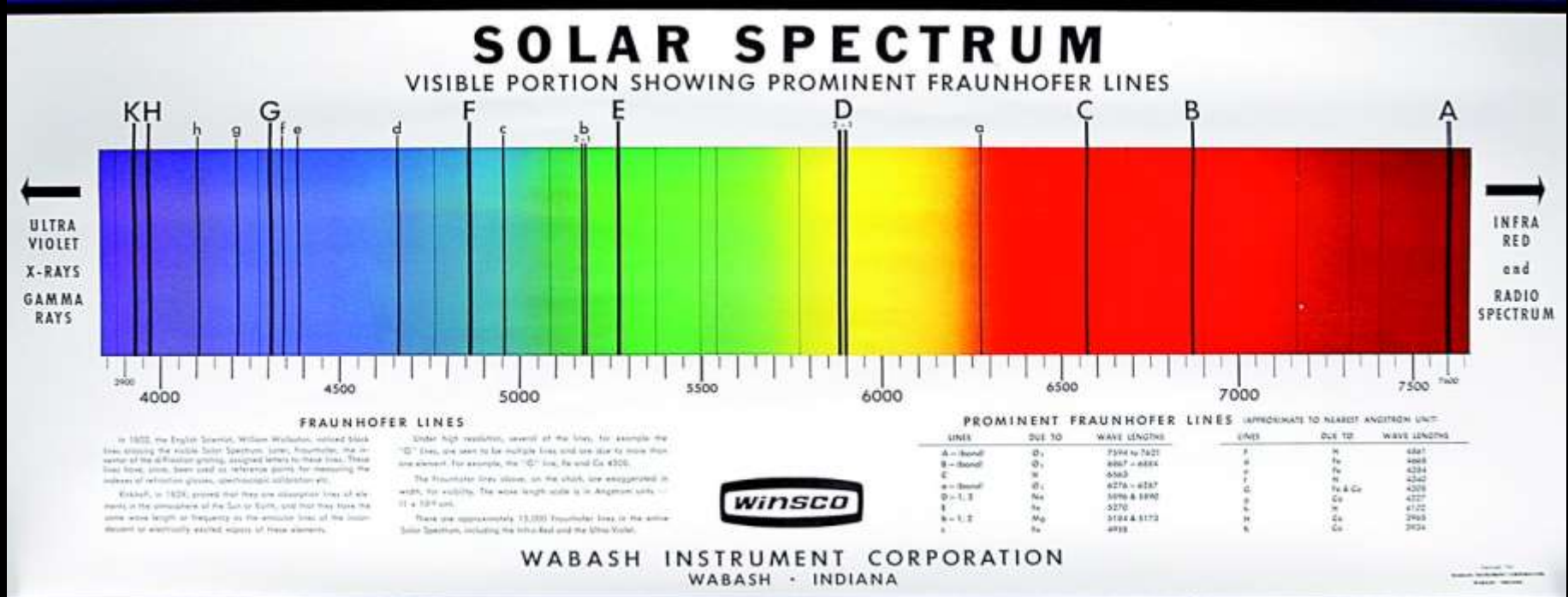
Spettro solare ben approssimato dall' **emissione di corpo nero** con T efficace di 5777 K; lo spettro presenta però molteplici righe scure → righe di Franhofer



# Spettroscopia

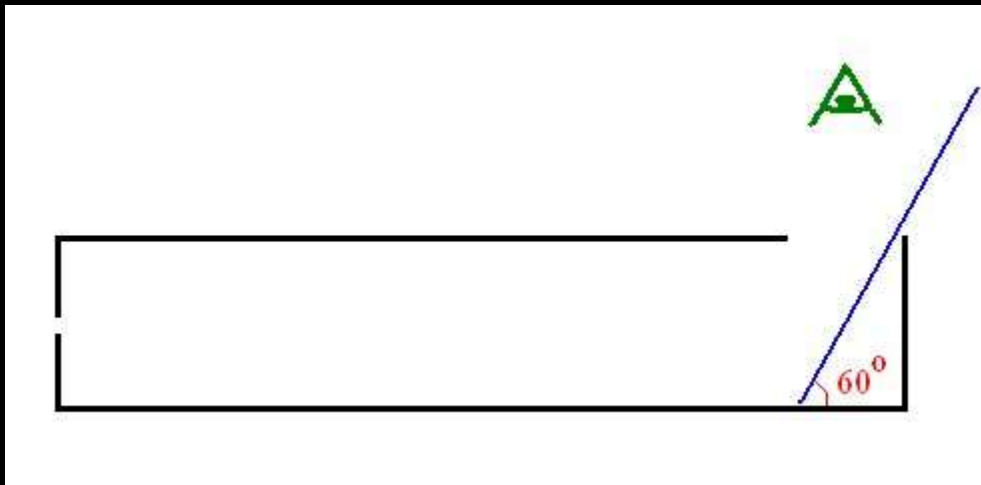


# Lo spettro visibile del Sole



Le **righe di Franhofer** sono righe dovute all'assorbimento della radiazione fotosferica da parte del plasma alla base della cromosfera più freddo (circa 4000 K).

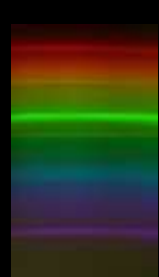
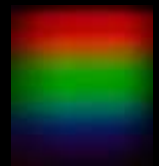
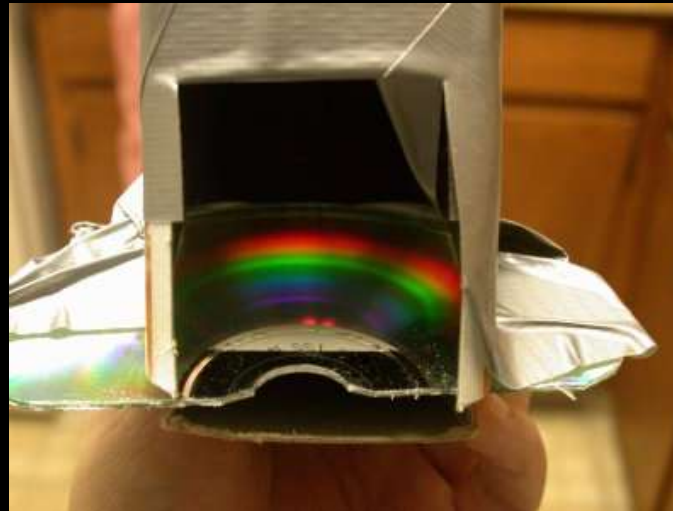
# Osservare lo spettro del Sole



E' possibile costruire un spettroscopio molto semplice per osservare lo spettro solare continuo solcato dalle righe di assorbimento di Fraunhofer, utilizzando:

- una scatola di cartone
- un vecchio CD

Questo può essere poi utilizzato per osservare anche gli spettri di lampade ad incandescenza, al neon, o altro...



# La Struttura esterna del Sole

## Fotosfera

- ❑ Il sole visibile all'occhio umano
- ❑  $T = 5.000 \text{ K}$

## Cromosfera

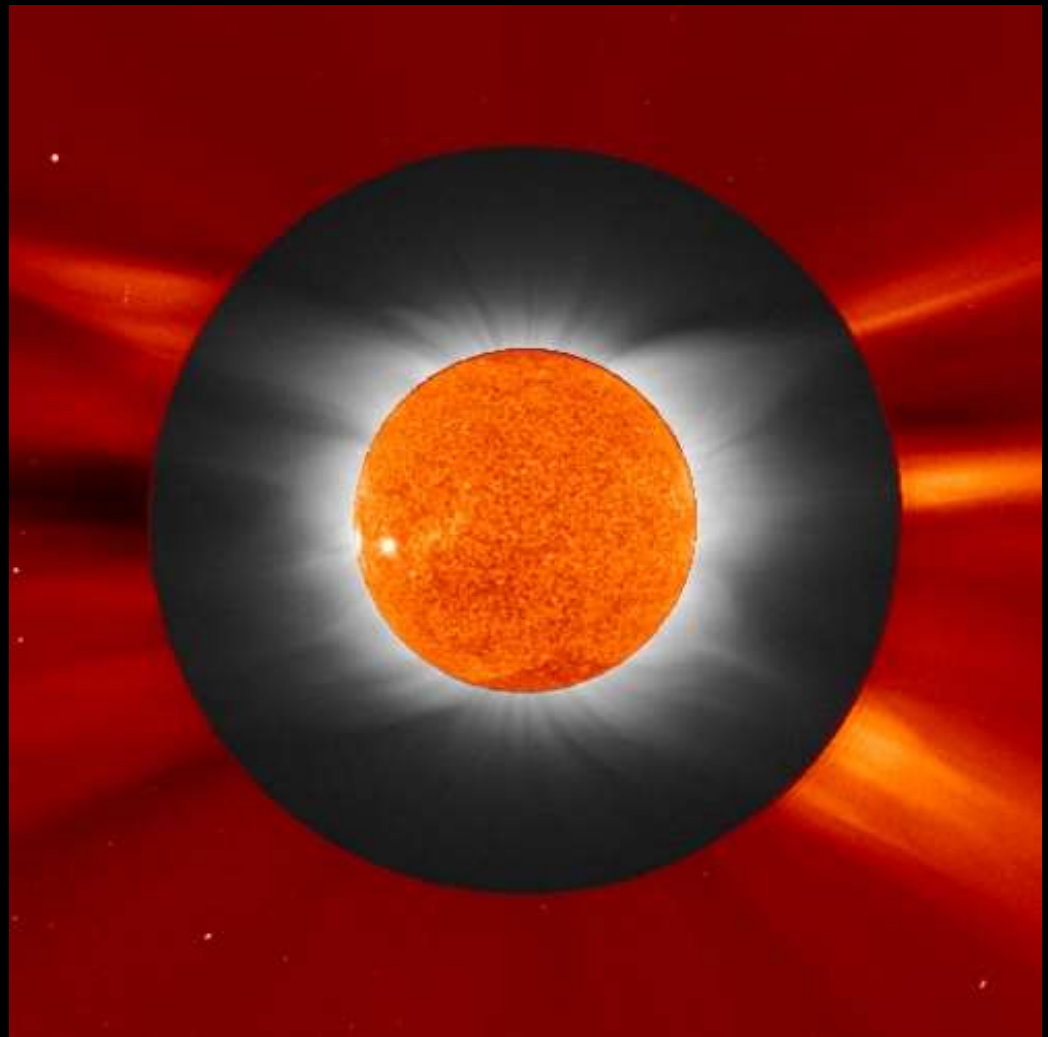
- ❑  $T = 50.000^\circ$

## Regione di Transizione

- ❑  $T$  aumenta fino a  $500.000 \text{ K}$

## Corona

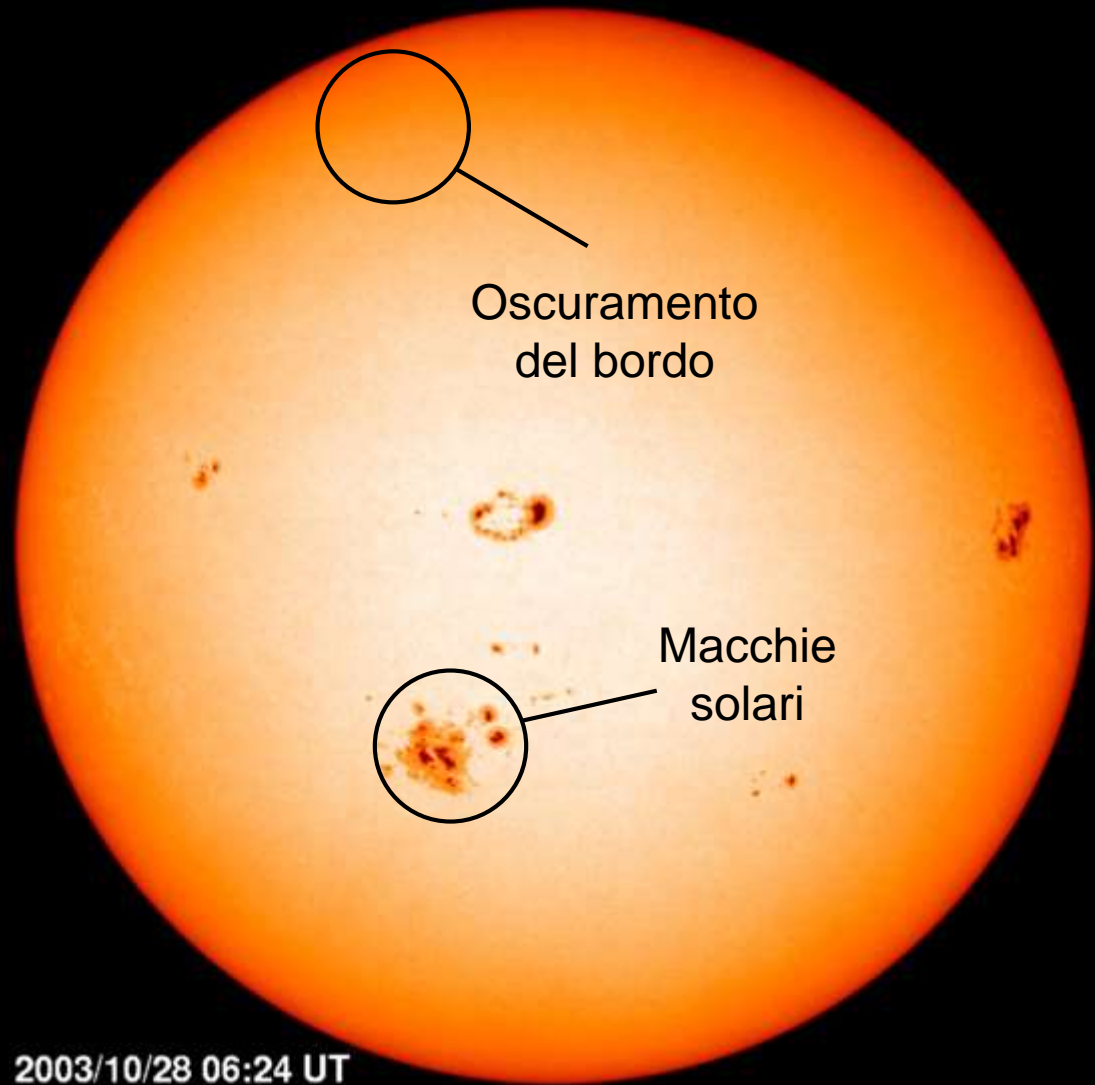
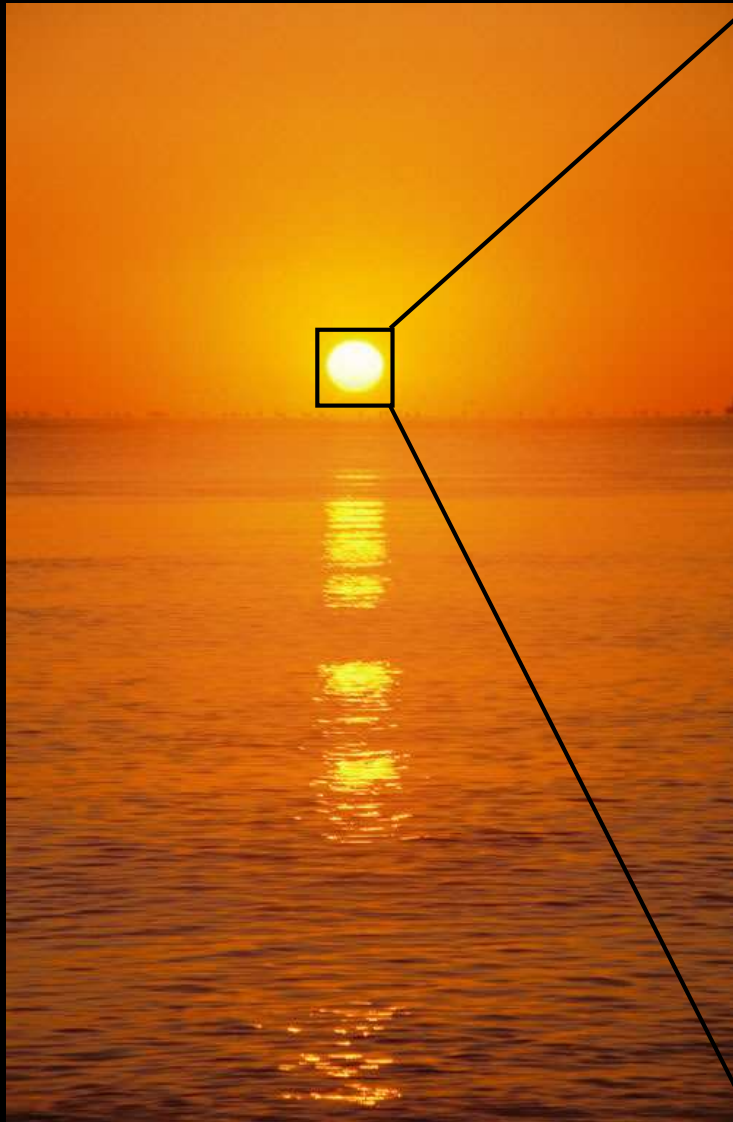
- ❑ L'atmosfera del Sole
- ❑ Visibile durante le eclissi oppure dallo spazio
- ❑ Vento solare
- ❑  $T$  più di 1 Milione di gradi!



La temperatura sale da  $5.000 \text{ K}$  (fotosfera)  $1.000.000 \text{ K}$  (corona)



# Esterno del Sole: Fotosfera

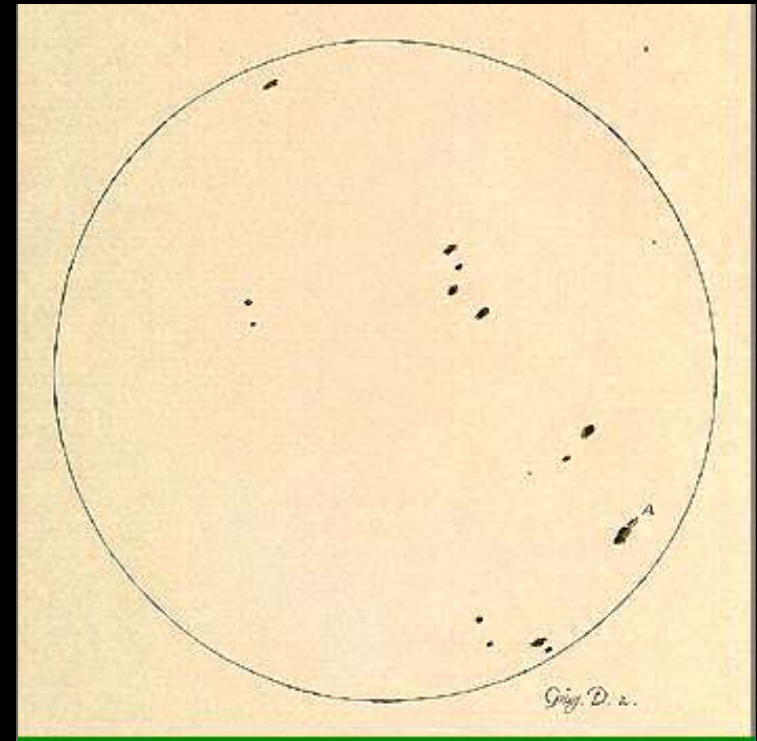




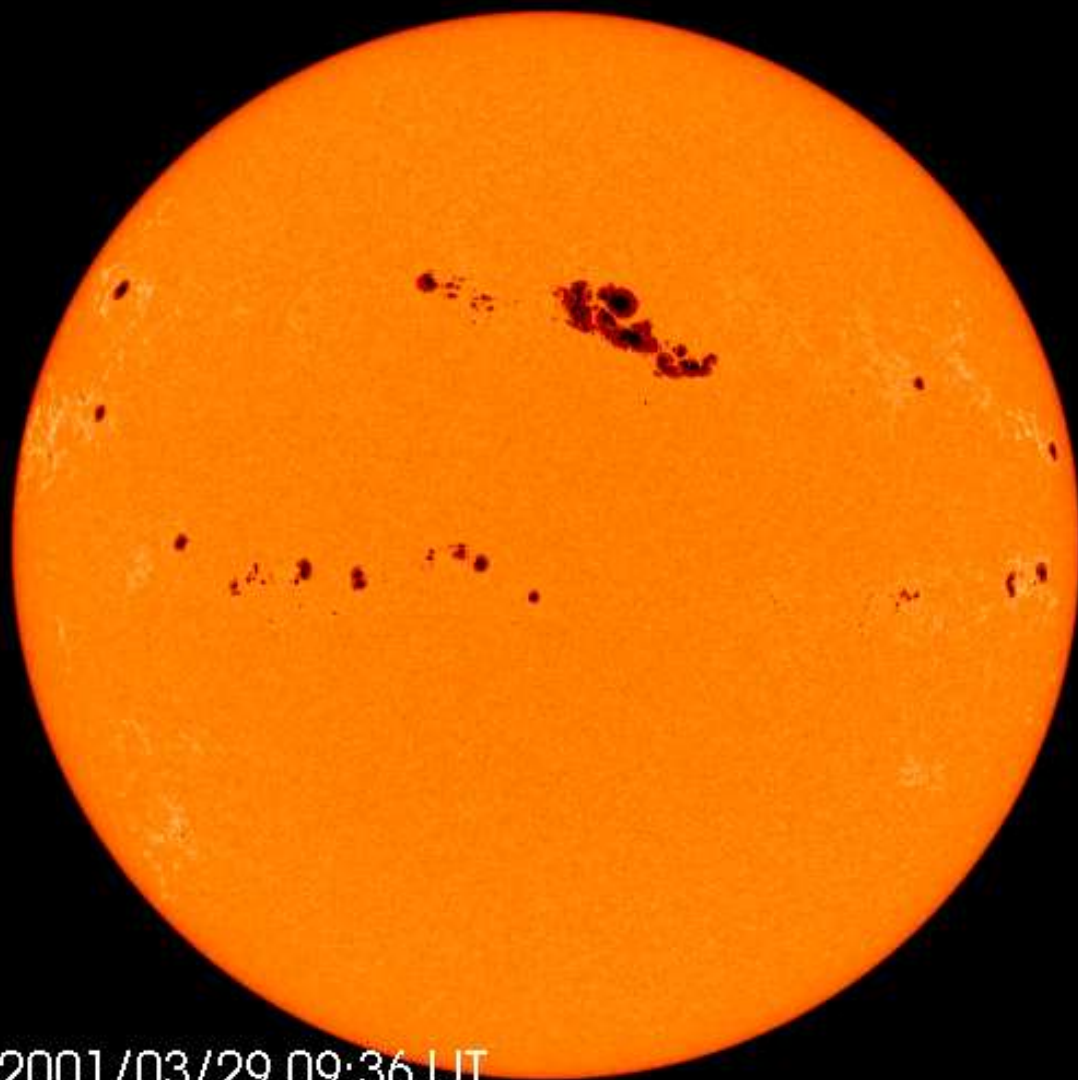
# Scoperta delle macchie solari

## Conclusioni di Galileo

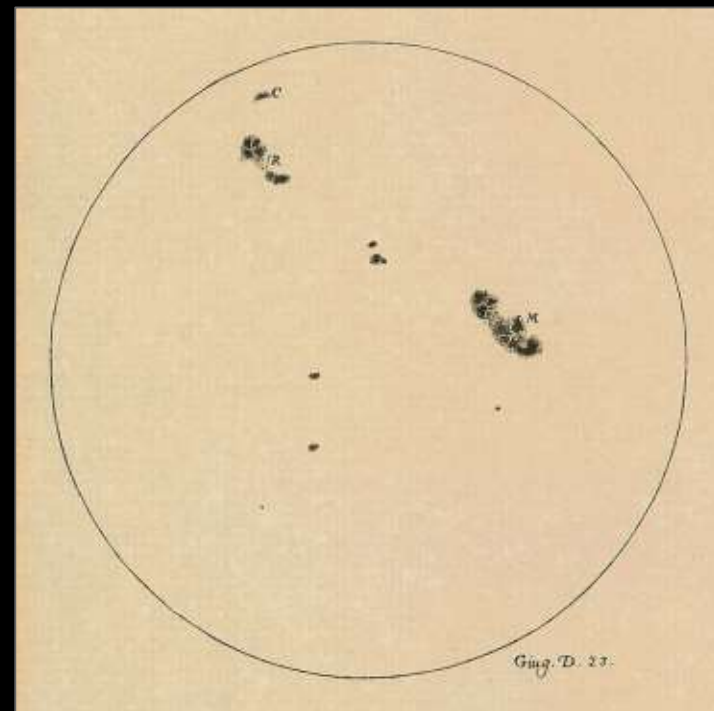
- Il Sole ruota con periodo di 27 giorni da Est a Ovest e le macchie solari sono trascinate nel moto di rotazione
- Appaiono in due zone a Nord e a Sud dell' equatore solare con latitudine massima di  $28^{\circ}$ - $29^{\circ}$
- Sono fenomeni transitori, sono di forma irregolare e variabile, con vita media di 6 giorni
- Le macchie sono veramente fenomeni solari e non planetoidi o asteroidi.



# Scoperta delle macchie solari



2001/03/29 09:36 UT



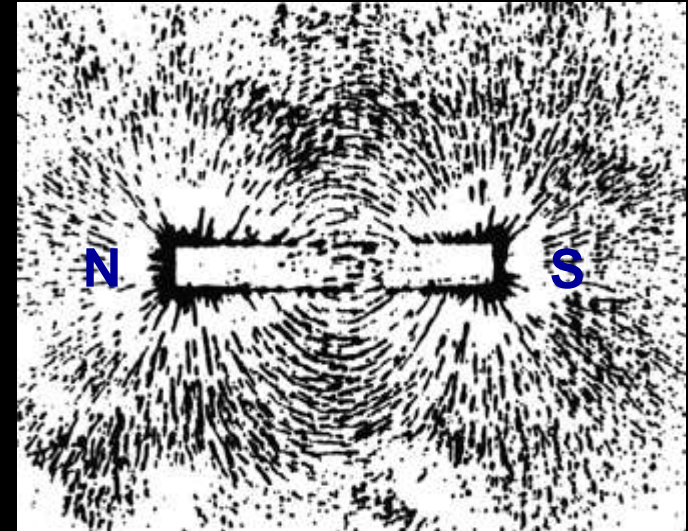
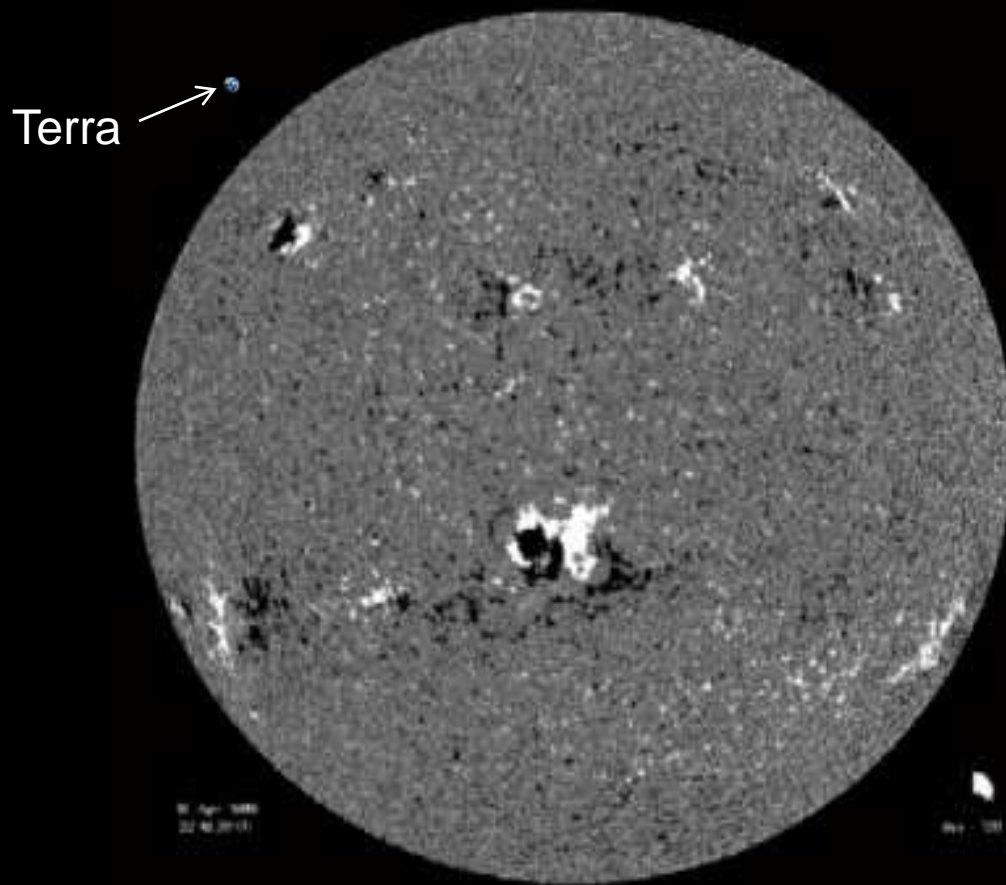
# Fotosfera: le macchie solari

- ❑ Aree scure (2 zone: ombra e penombra)
- ❑ Intensi campi magnetici
  - Il trasporto di energia dall' interno del sole è inibito
  - Aree più fredde e quindi più scure



Immagine dettagliata di macchia solare e granulazione

# Fotosfera: le macchie solari

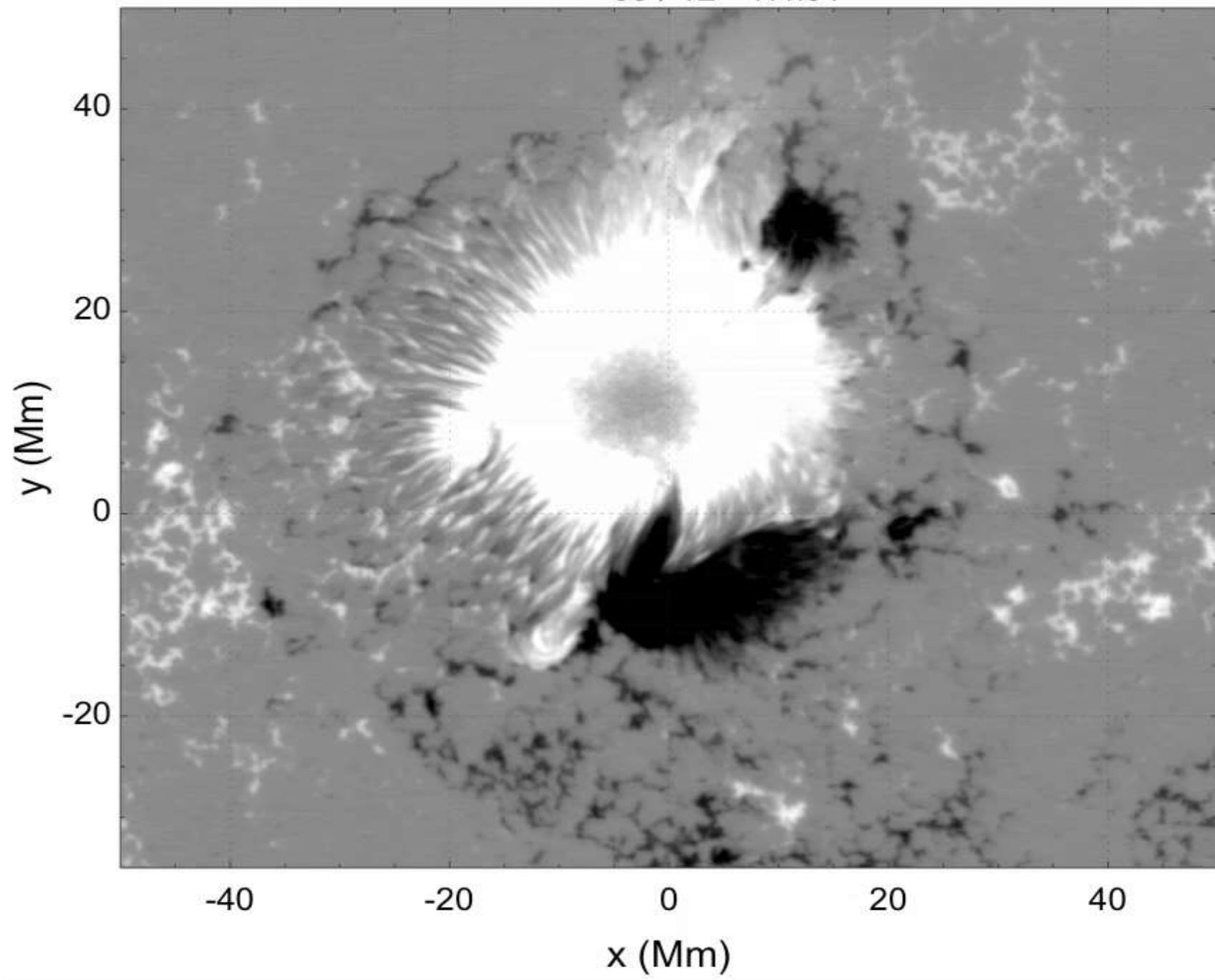


Qualunque magnete genera una configurazione caratteristica del campo magnetico detta "di dipolo", con due polarità opposte.

**Magnetogramma del Sole:** le aree chiare e quelle scure indicano la presenza di intensi campi magnetici di polarità opposta



09 / 12 - 17h01





# Fotosfera: la granulazione

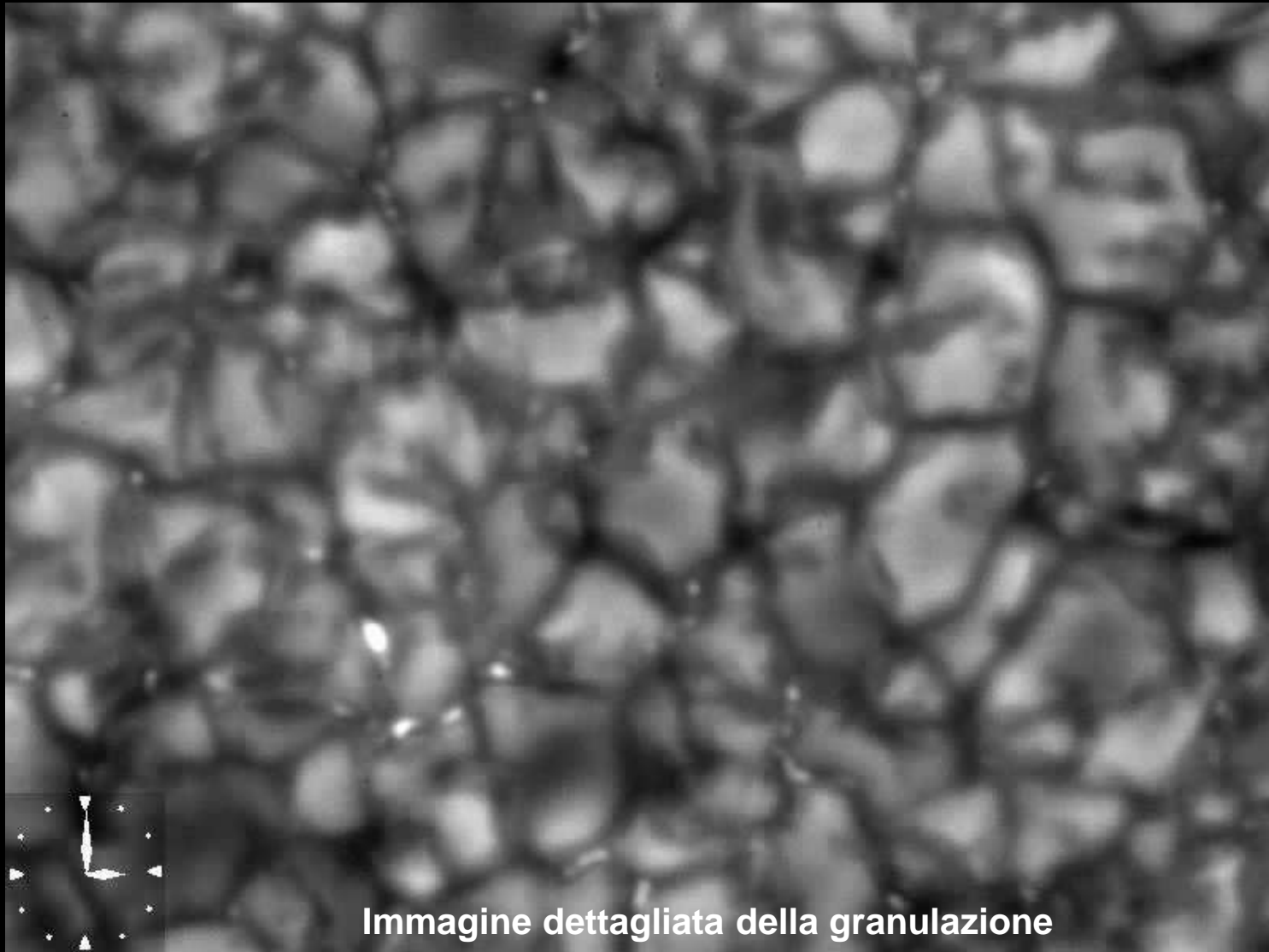


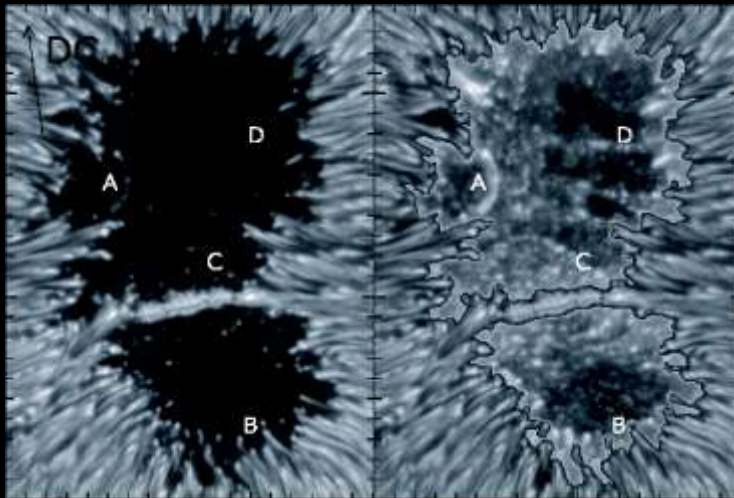
Immagine dettagliata della granulazione

# Perché le macchie sono scure?

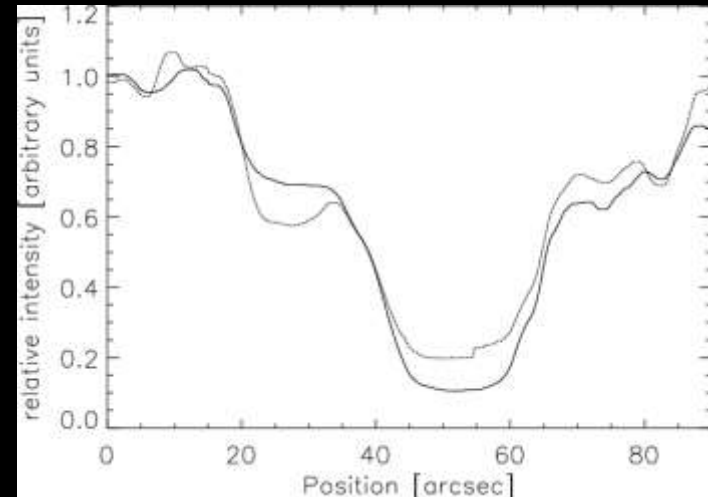
Le macchie solari appaiono “scure” per via del forte contrasto rispetto al sole quieto circostante. In particolare il rapporto  $I_{\text{umbra}} / I_{\text{QS}}$  può essere stimato usando la legge di radiazione di **corpo nero**

$$I_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right]^{-1} \rightarrow \frac{I_{\lambda}(T_1)}{I_{\lambda}(T_2)} = \frac{\left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T_2}\right) - 1 \right]}{\left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T_1}\right) - 1 \right]} \approx (0.13)_{\lambda=5500 \text{ \AA}}$$

per  $T_1 = 4000 \text{ K}$  e  $T_2 = 5800 \text{ K}$  → variazione circa del 90% nell'intensità a  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$ .  
Un conto analogo per grano/intergrano (contrasto ~ 0.88-0.90) →  $\Delta T \sim 150\text{-}200 \text{ K}$

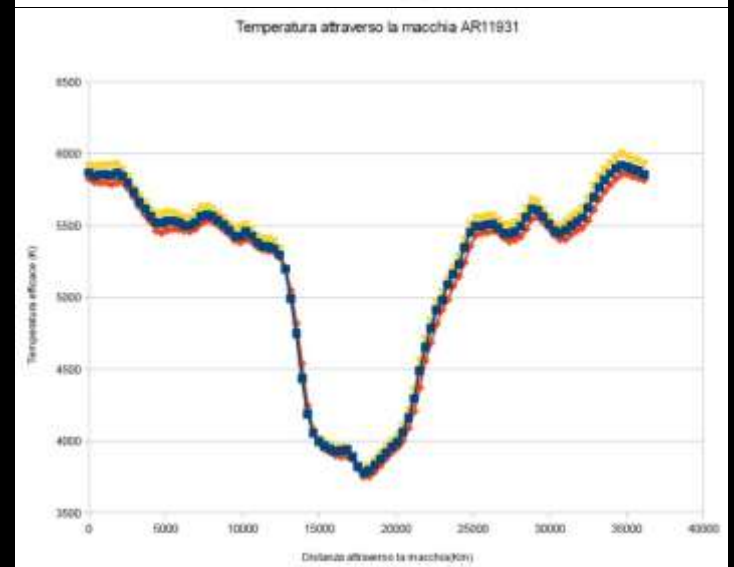
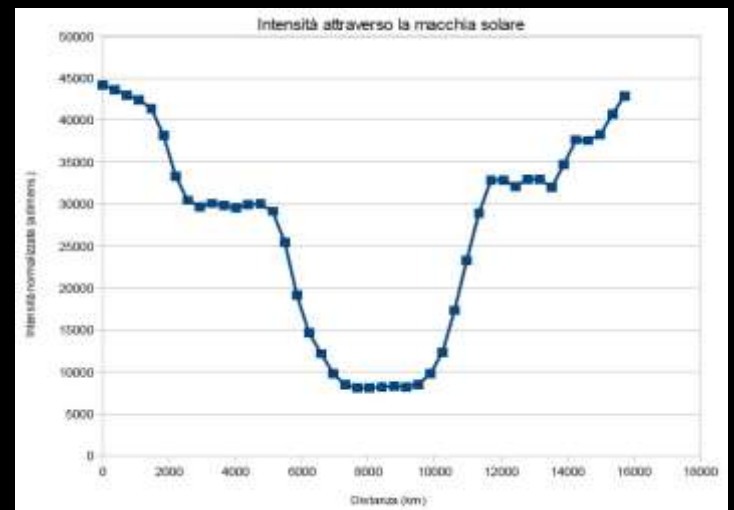
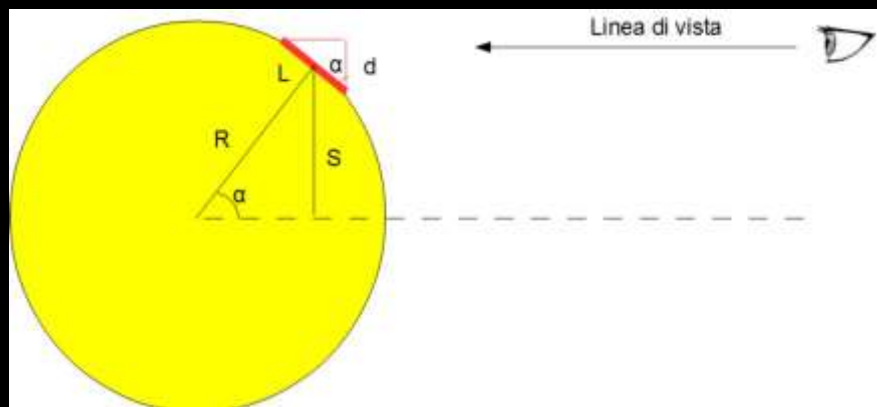
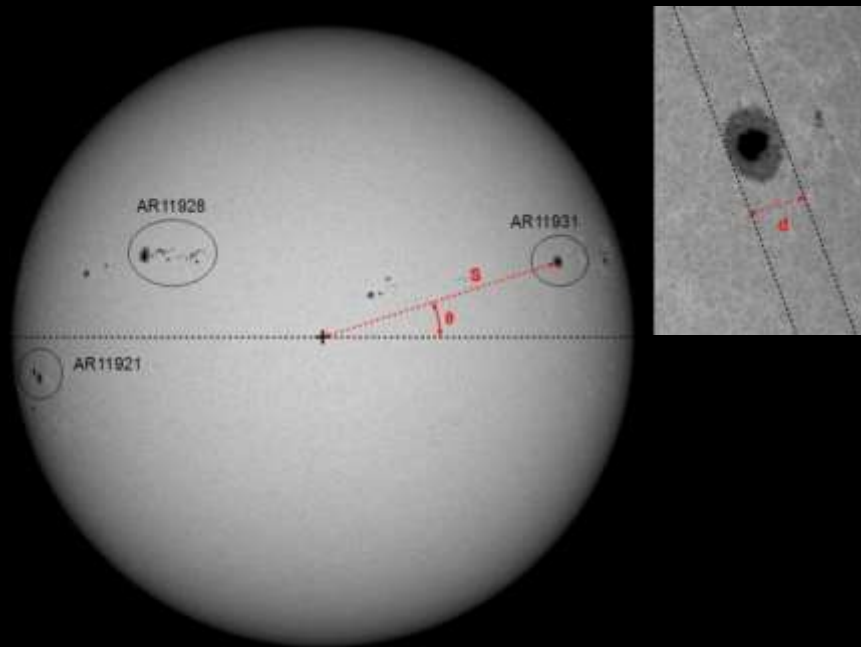


Aumento di contrasto → *umbral dots*



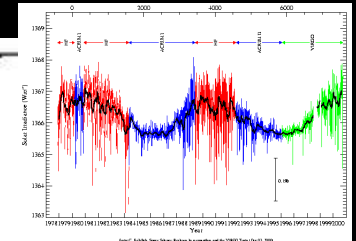
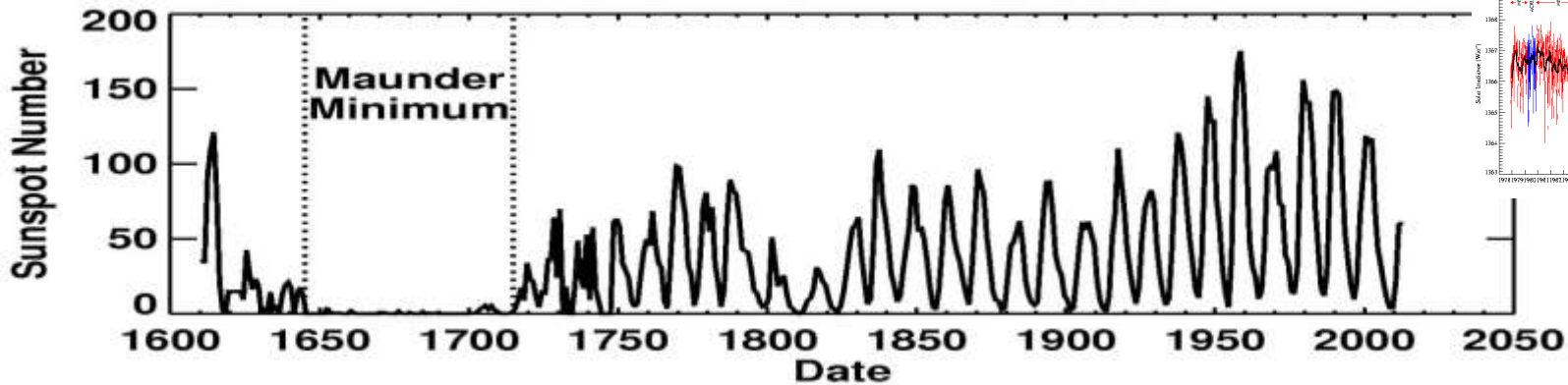
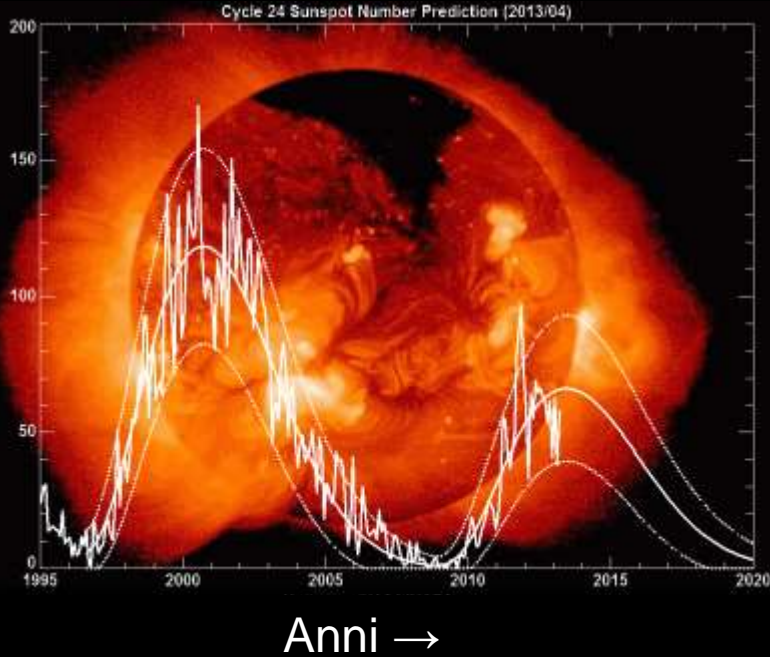
Intensità relativa lungo una macchia

# Misurare la T di una macchia



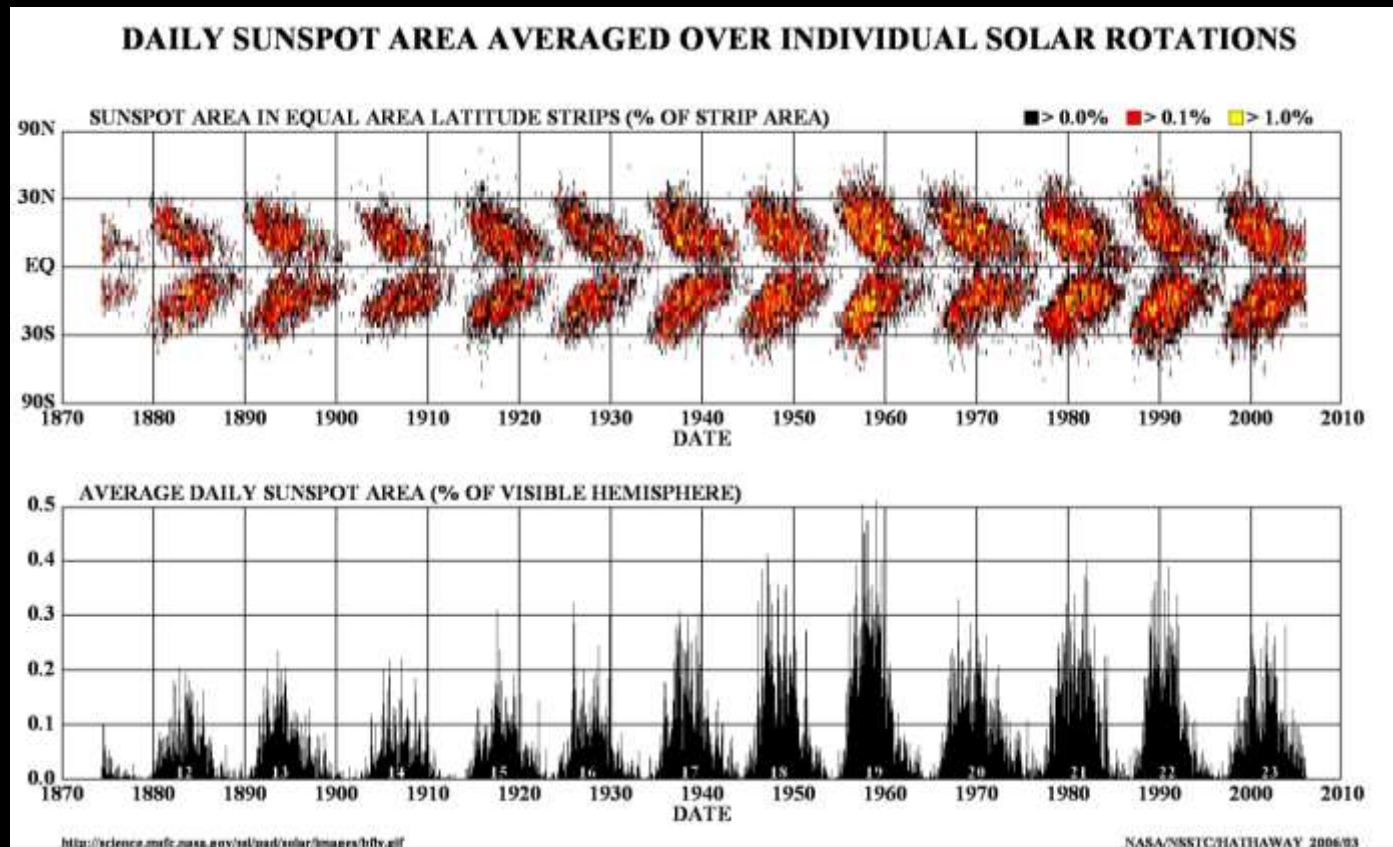
# Il Ciclo di Attività Solare

Numero di macchie solari →





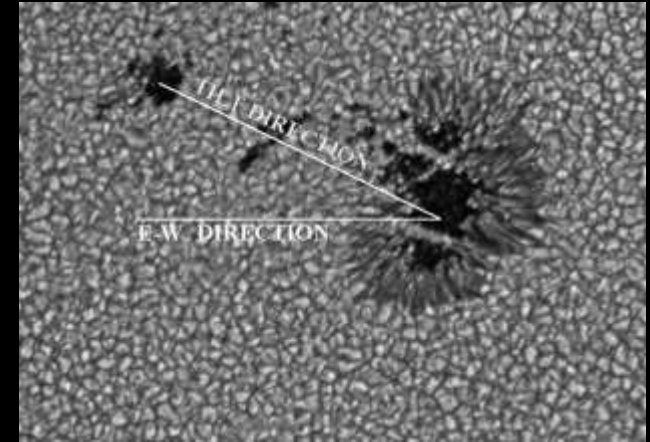
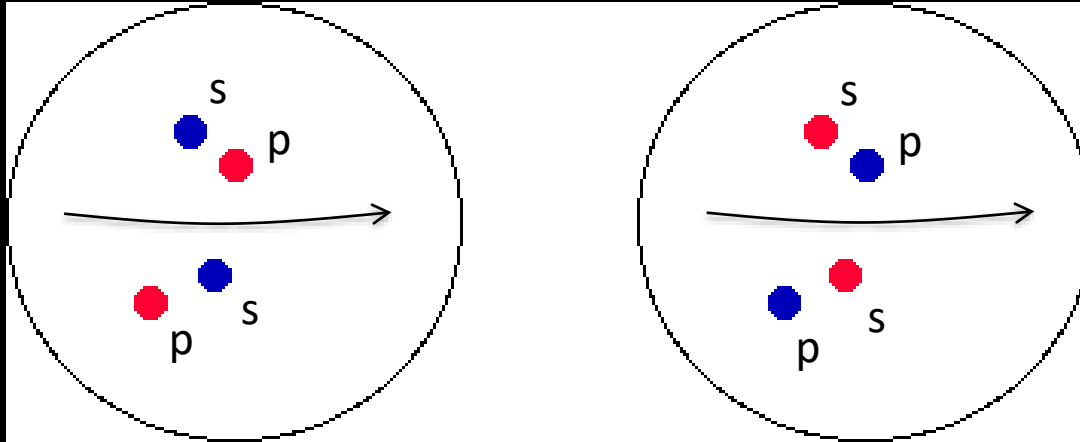
# Proprietà delle macchie solari



- Periodicità nel numero di macchie ( $11.5 \pm 2.4$ ) anni, possibili periodicità secolari
- Butterfly Diagram: nel corso del ciclo le macchie si spostano da 30-45 deg all'inizio del ciclo fino a  $\sim 15$ deg in latitudine alla fine del ciclo (legge di sporer)
- International Sunspot Number:  $R = k (10 g + s)$  con  $s$ =numero di spot,  $g$  numero di gruppi,  $k$  fattore di correzione ( $k < 1$ ) legato all'osservatore.



# Proprietà delle macchie solari

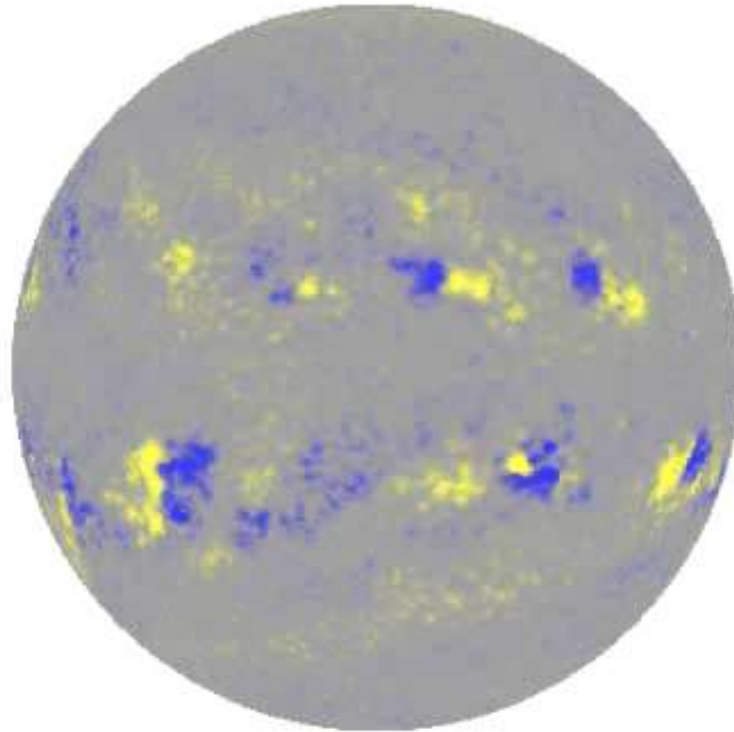


- Le macchie si presentano tipicamente in **coppie bipolari**, con una macchia che precede (p) ed una che segue (f).
- **Legge di Sporer**: nel corso del ciclo le macchie si spostano da 30-45 deg all'inizio del ciclo fino a ~ 15deg in latitudine alla fine del ciclo
- **Legge di Joy**: le coppie presentano un angolo di tilt di circa 10deg, con un tilt medio che aumenta alle più alte latitudini
- **Prima Legge di Hale**: la macchia p ha polarità opposta a quella della sua macchia f, macchie p e f hanno polarità opposte tra loro nei 2 emisferi
- **Seconda Legge di Hale**: la polarità delle macchie si inverte nel ciclo successivo, così come tutto il campo poloidale del sole.

→ complessivamente il ciclo solare ha un periodo di 22 anni

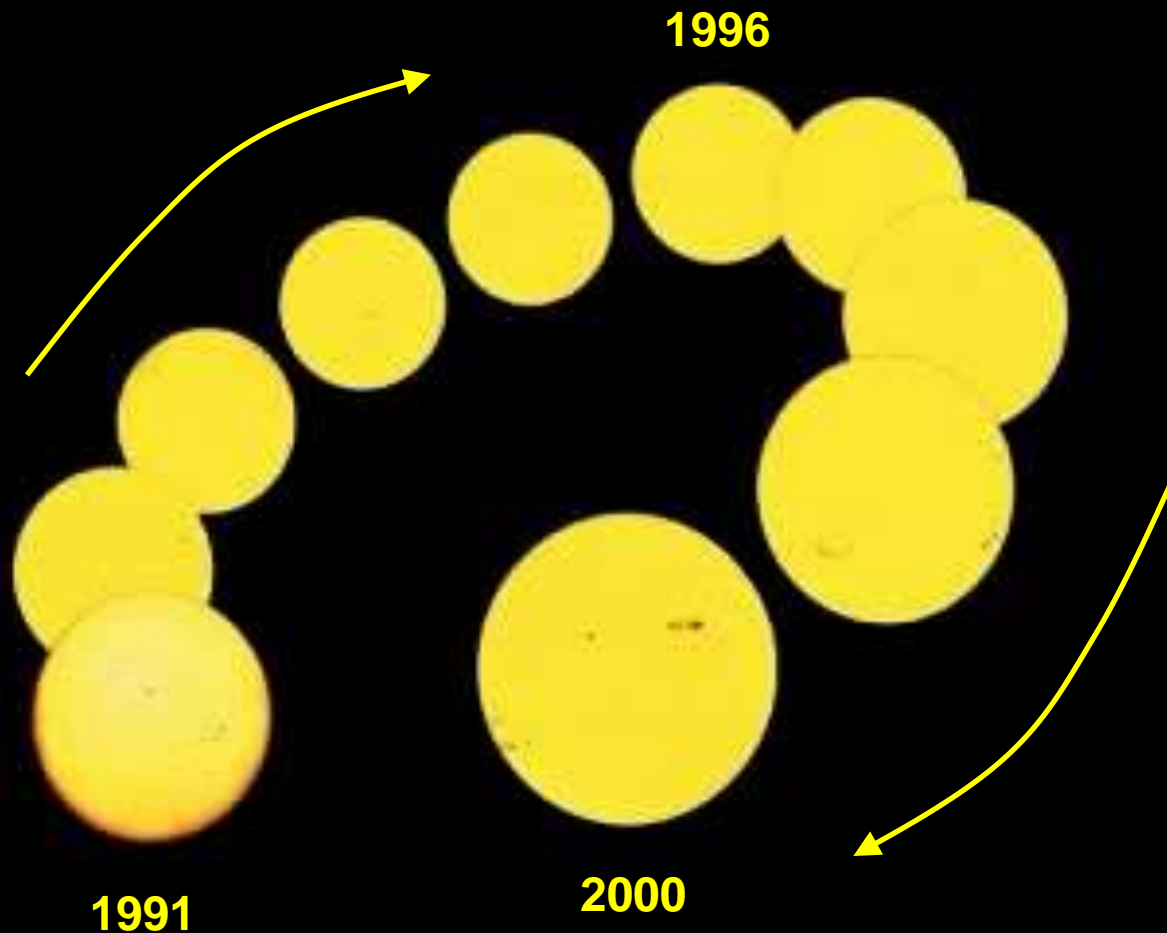
# Proprietà delle macchie solari

---



# Attività Solare 1991-2000

---



# Il Campo Magnetico del Sole

---

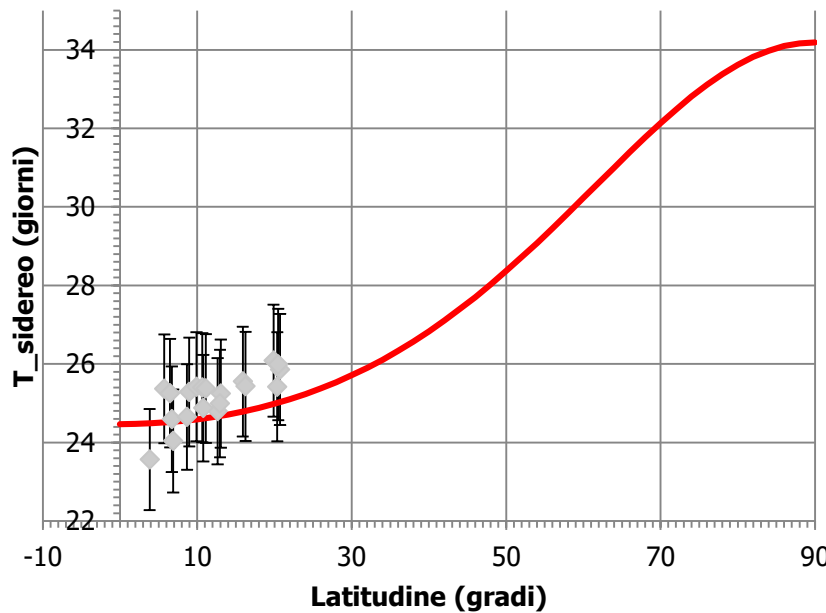
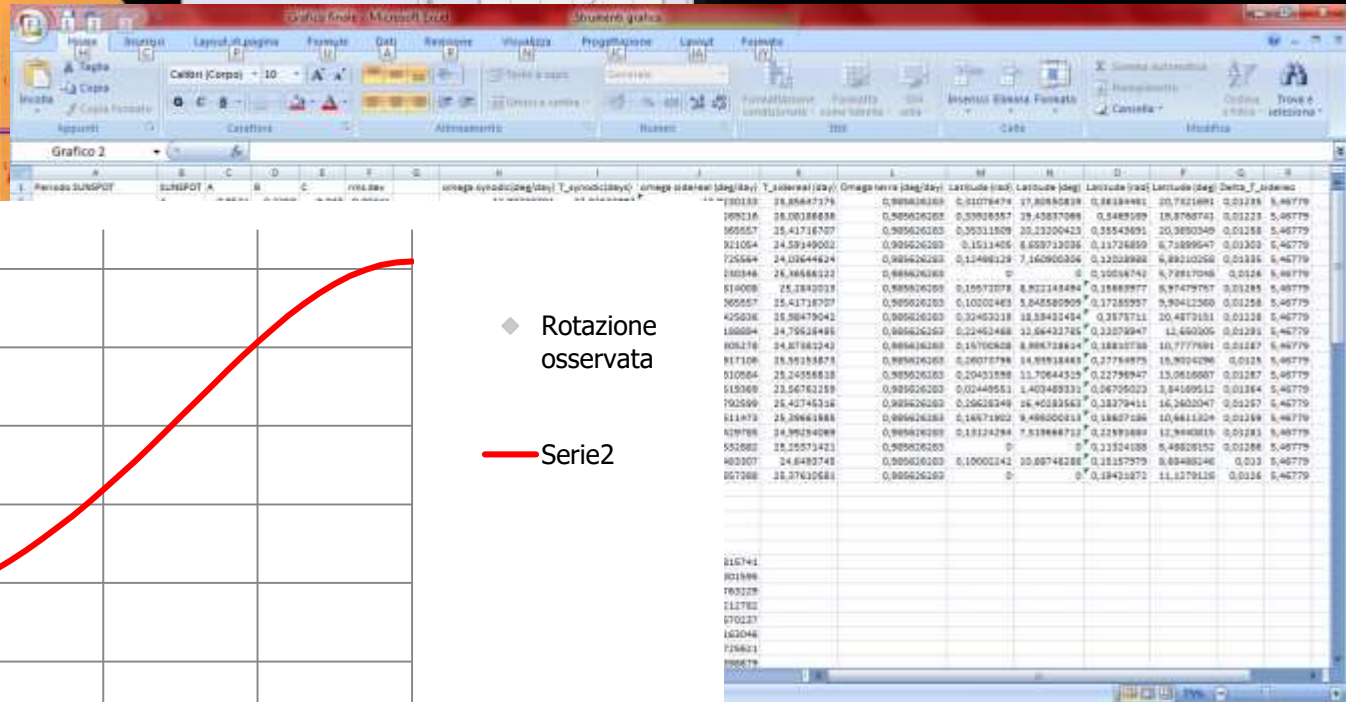
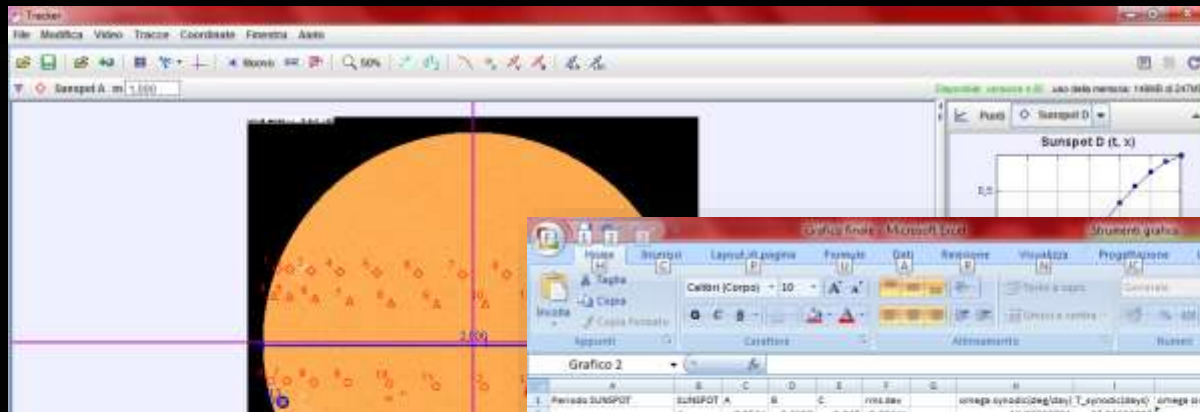


La velocità di rotazione all'equatore è maggiore rispetto ai poli (“**rotazione differenziale**”).



A causa della rotazione differenziale il campo magnetico viene “deformato e frammentato”.

# Misura della $v$ di rotazione solare

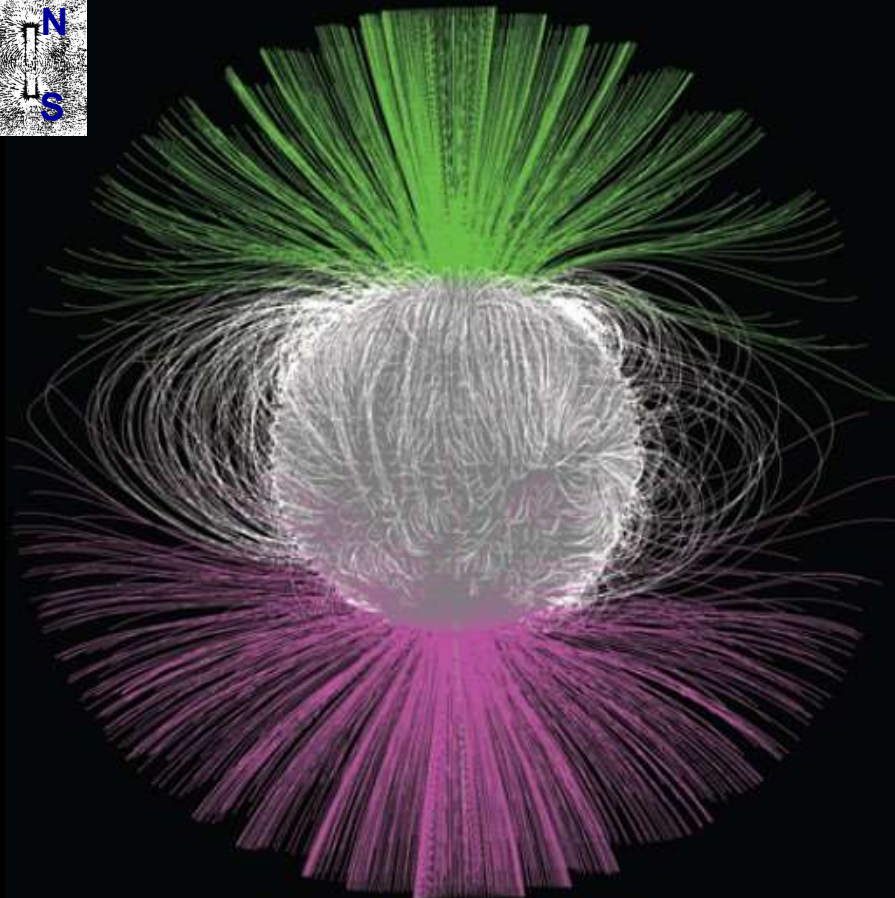
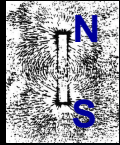


◆ Rotazione osservata  
— Serie2

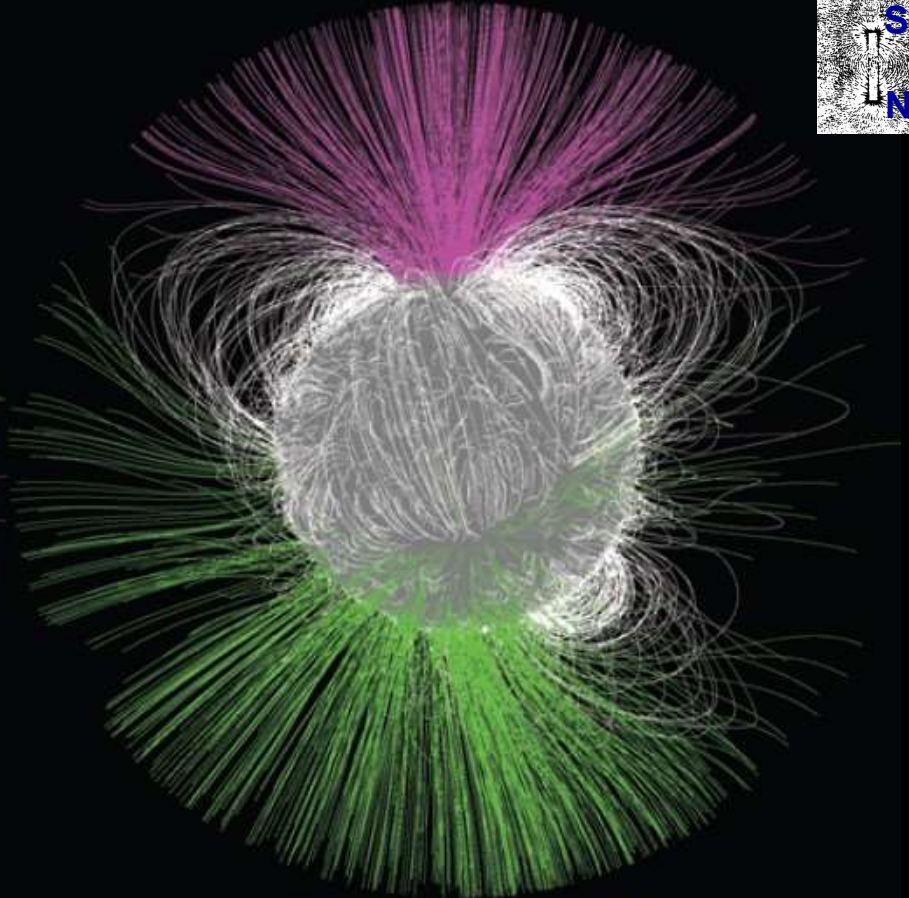




# Il Campo Magnetico del Sole



Solar Minimum 22/23  
January 1 1997

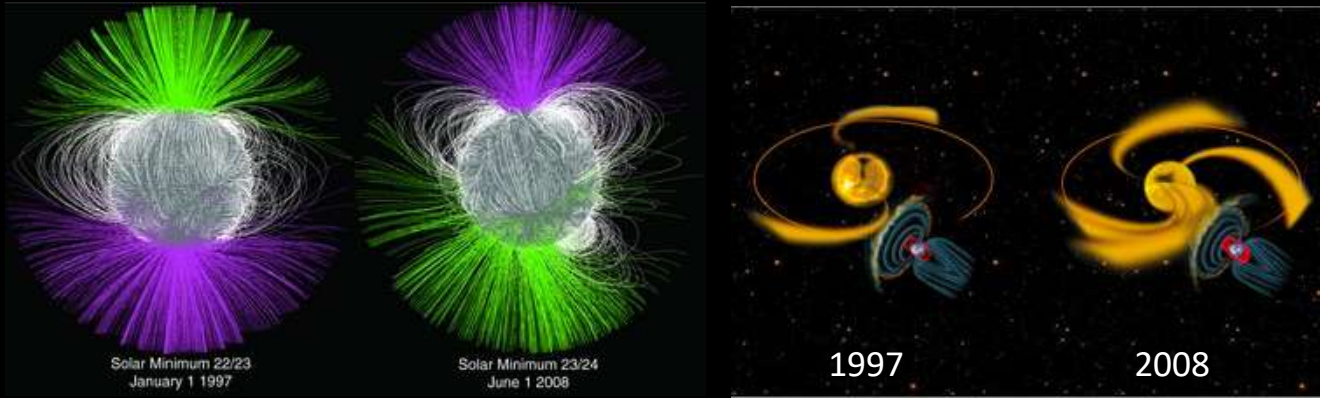


Solar Minimum 23/24  
June 1 2008

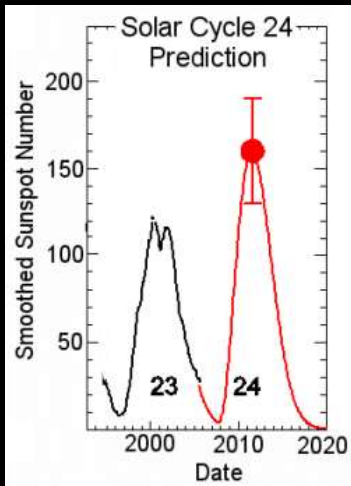
Ogni ciclo la polarità globale del Sole si inverte.

# Comportamenti inattesi del Sole

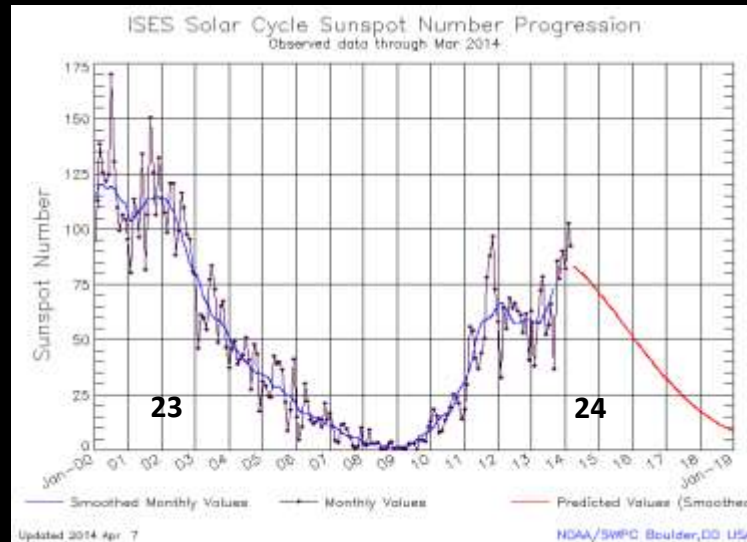
1. Lo strano minimo al termine del ciclo 23: la fine del ciclo e l'assenza di macchie durò un anno di più del previsto (a luglio 2008 si parlava di possibile nuovo minimo di Maunder),



il campo risultò molto più asimmetrico, si osservarono buchi coronali equatoriali con streams di vento veloce anche a basse latitudini.



Predizione /12/2006



2. Le previsioni errate sul picco del ciclo 24: i modelli predirono un picco più intenso della media per fine dicembre 2012 (!) e non fu previsto il doppio picco. Il ciclo 24 è il più debole dal picco del 1906 (ciclo 14).

# La Struttura esterna del Sole

## Fotosfera

- ❑ Il sole visibile all'occhio umano
- ❑  $T = 5.000 \text{ K}$

## Cromosfera

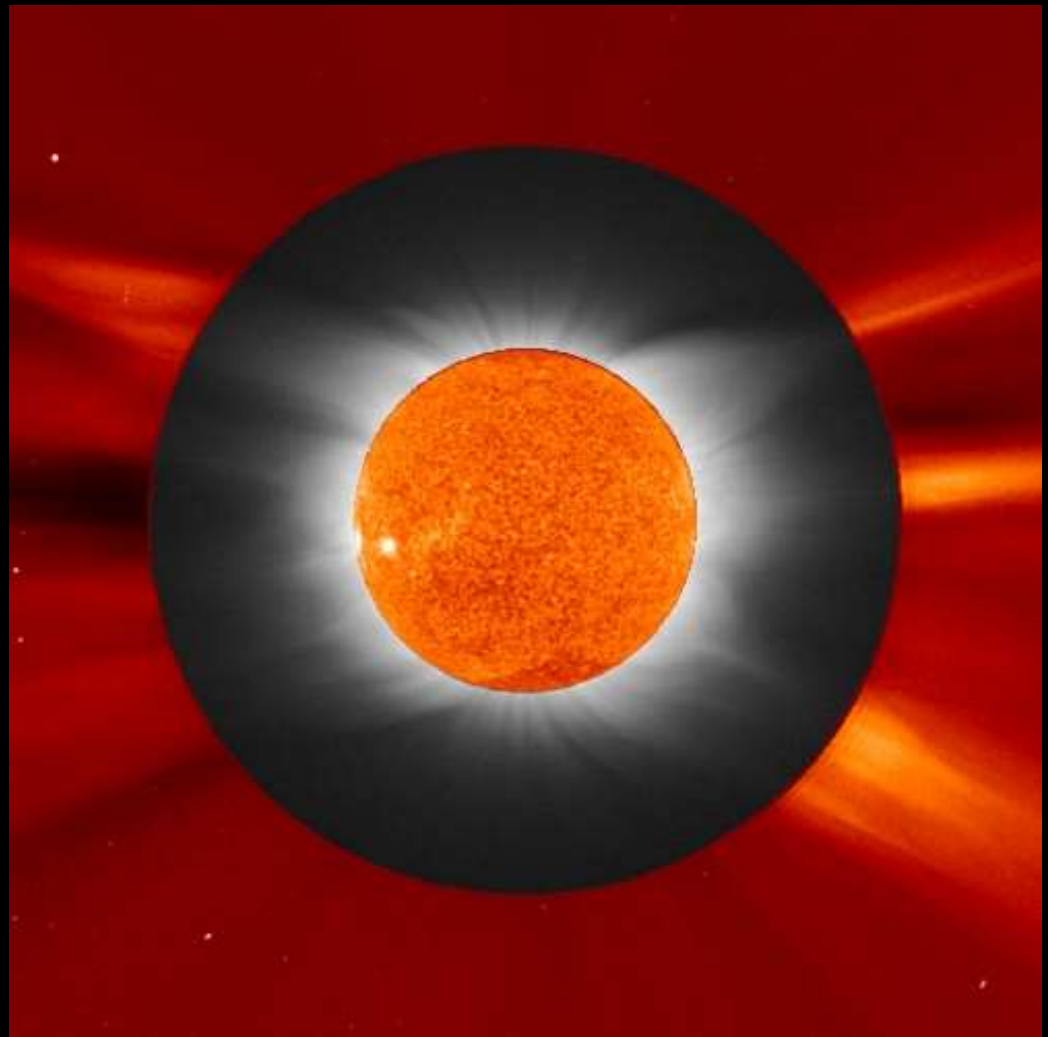
- ❑  $T = 50.000^\circ$

## Regione di Transizione

- ❑  $T$  aumenta fino a  $500.000 \text{ K}$

## Corona

- ❑ L'atmosfera del Sole
- ❑ Visibile durante le eclissi oppure dallo spazio
- ❑ Vento solare
- ❑  $T$  più di 1 Milione di gradi!

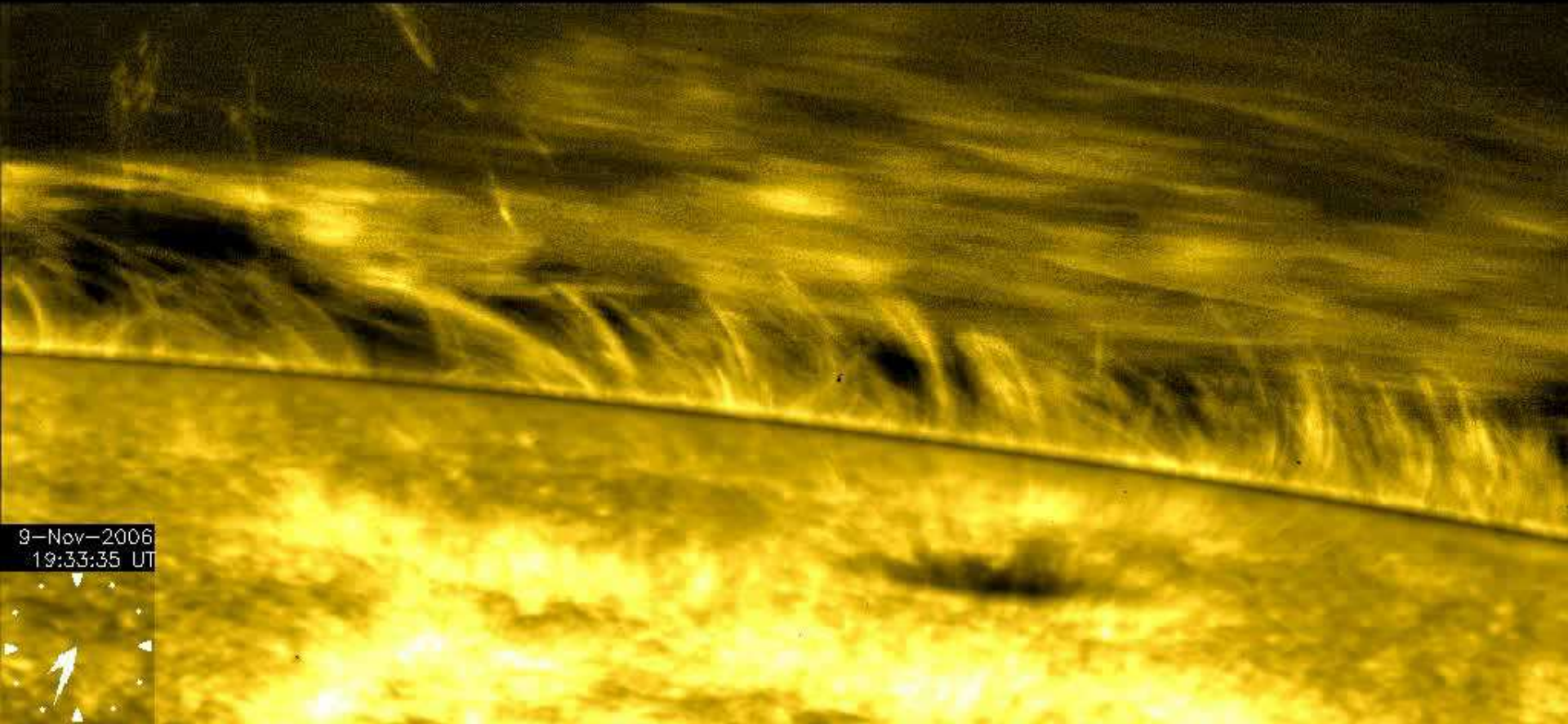


La temperatura sale da  $5.000 \text{ K}$  (fotosfera)  $1.000.000 \text{ K}$  (corona)



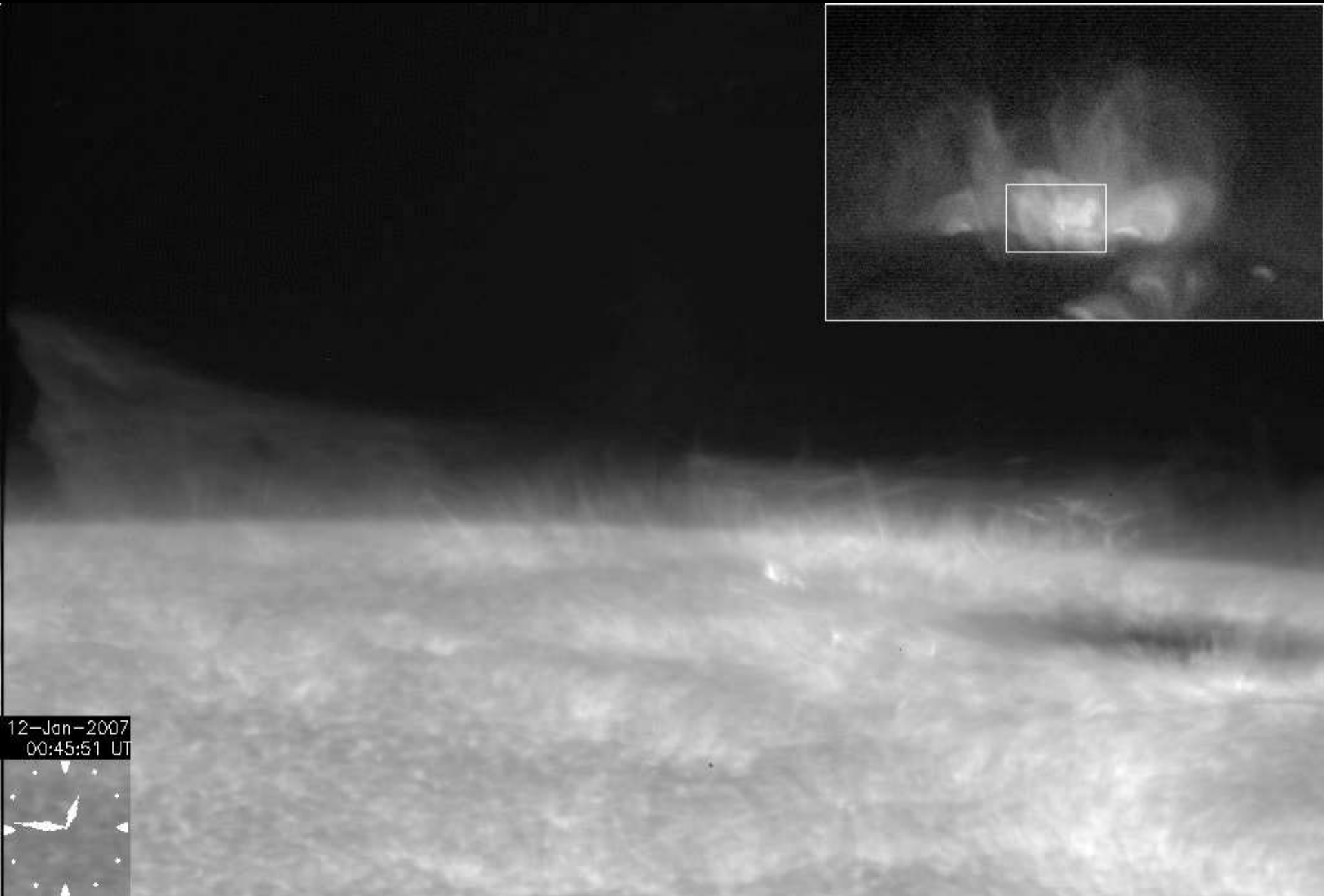
# La Cromosfera

---



(JAXA-Hinode SOT telescope)

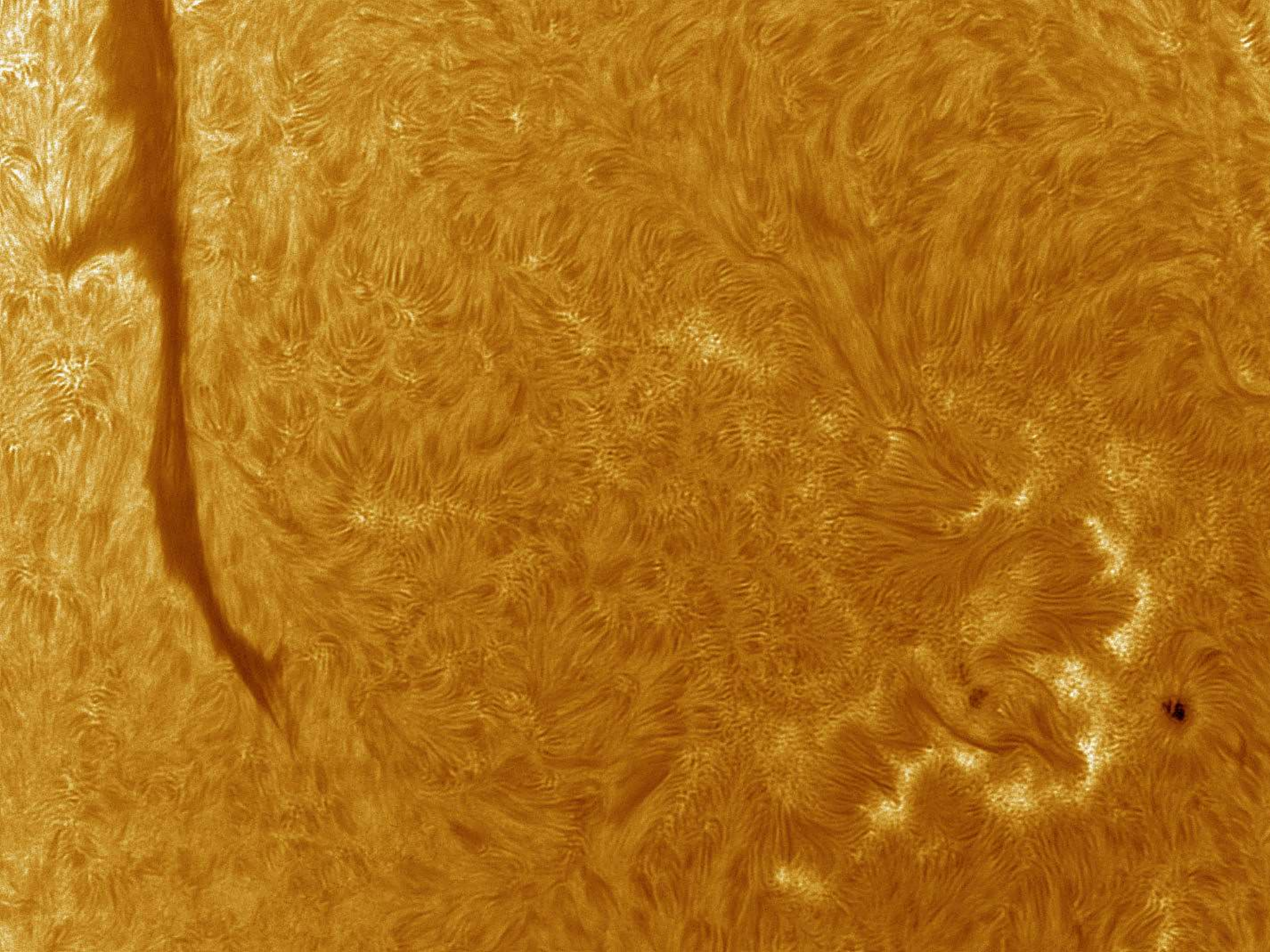
# La Cromosfera



12-Jan-2007  
00:45:51 UT



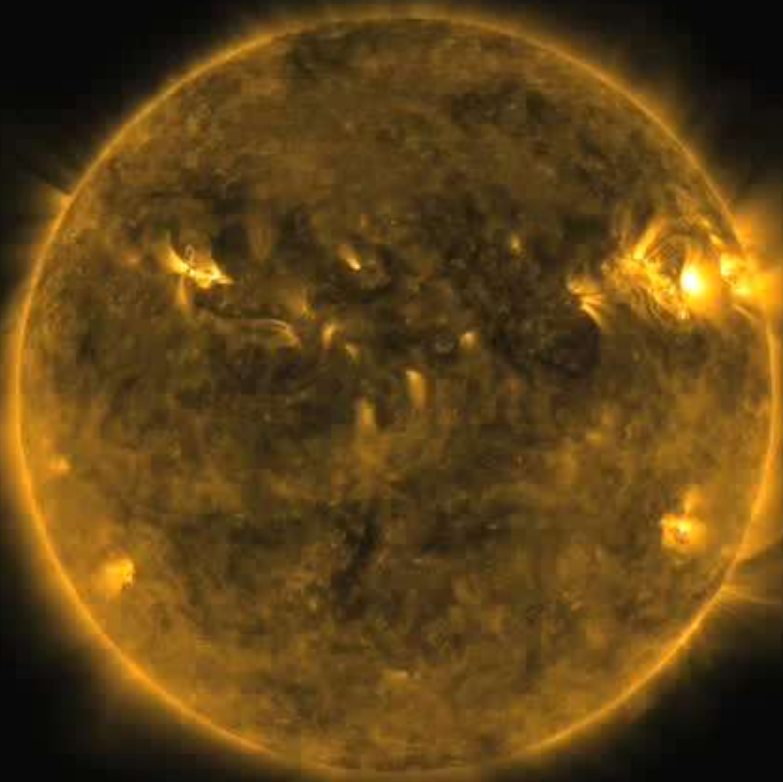




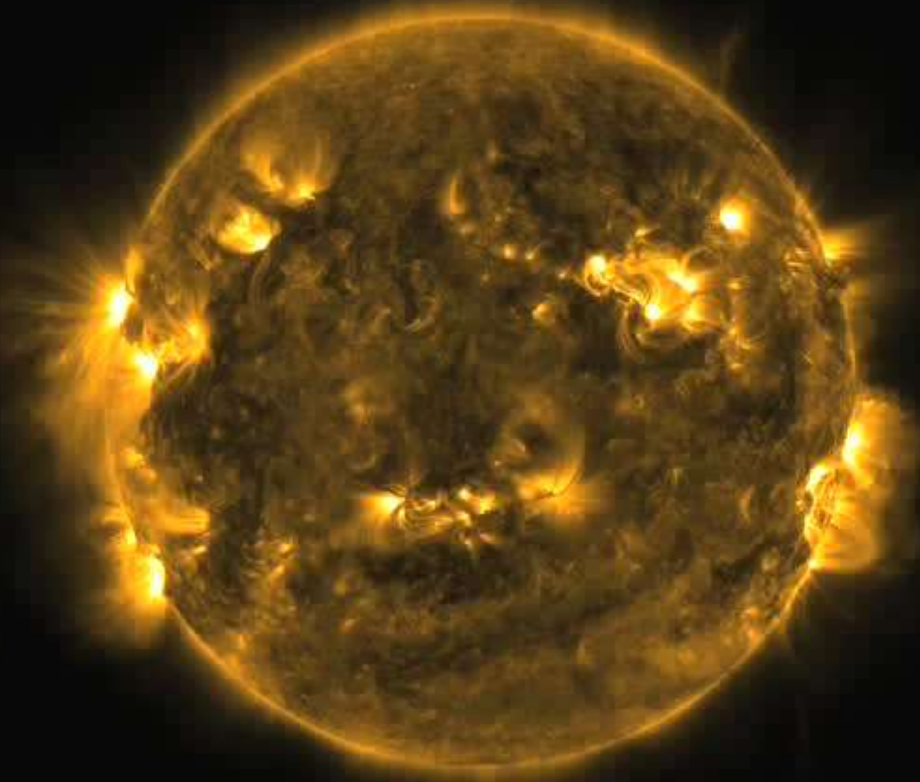


# La bassa Corona

---



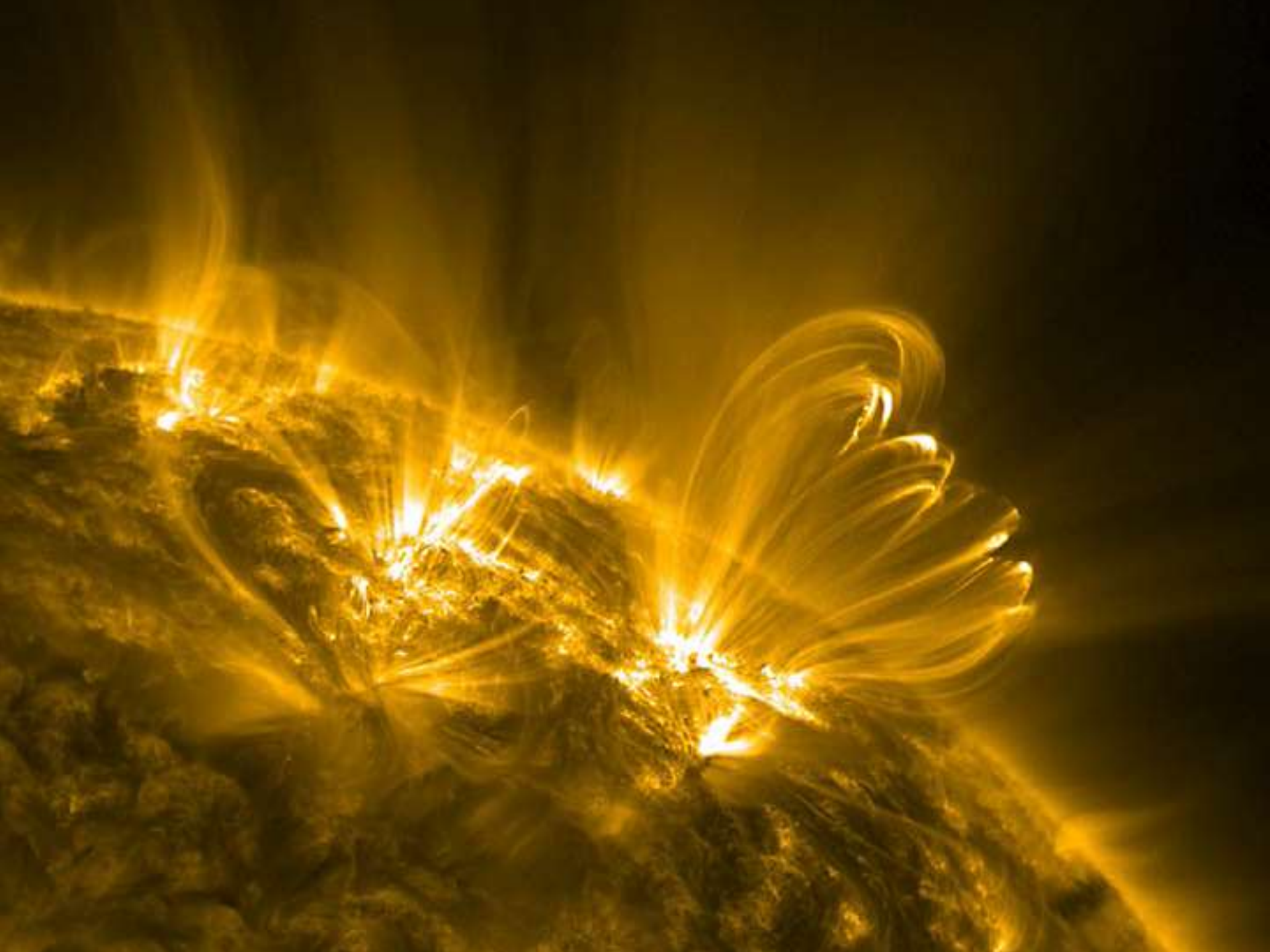
SDO/AIA 171 2010-10-02 01:15:01 UT



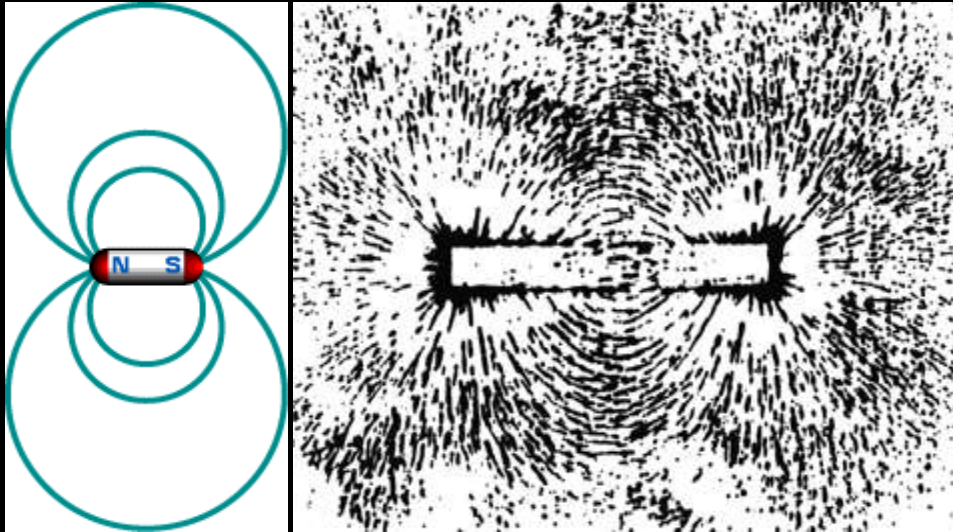
SDO/AIA 171 2013-05-11 01:15:48 UT

Filmati nell'EUV (17.1 nm) → plasmi a 1.5 milioni di gradi. Questa regione del Sole può essere osservata **solo dallo spazio** (NASA-SDO AIA telescope)

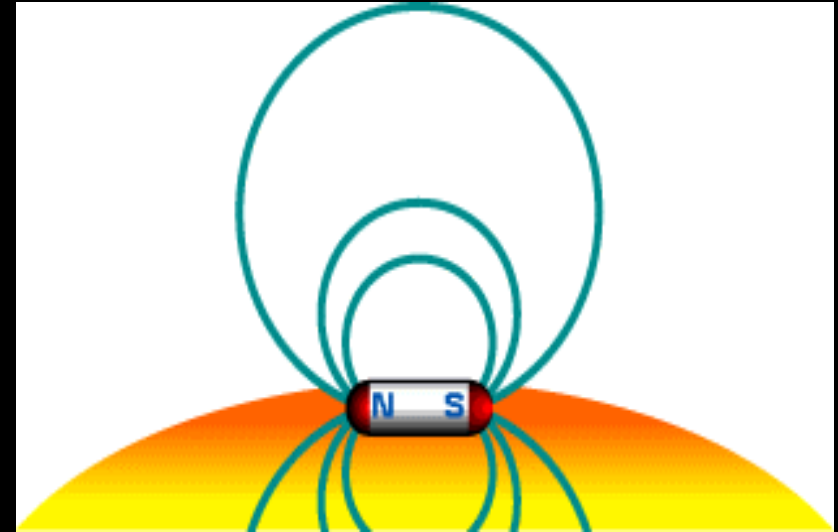
---



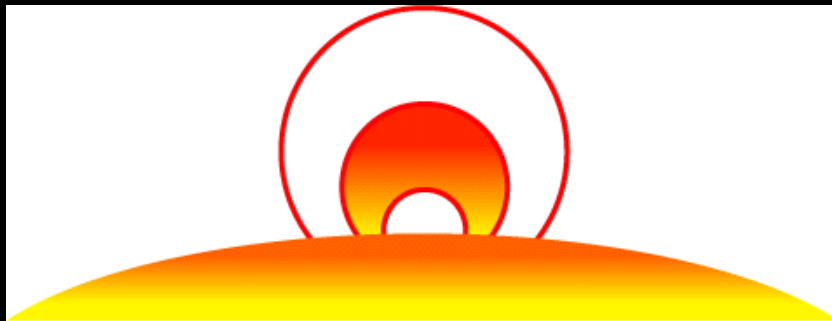
# Il Campo Magnetico della Corona



Un qualunque magnete genera una configurazione caratteristica del campo magnetico detta "di dipolo"



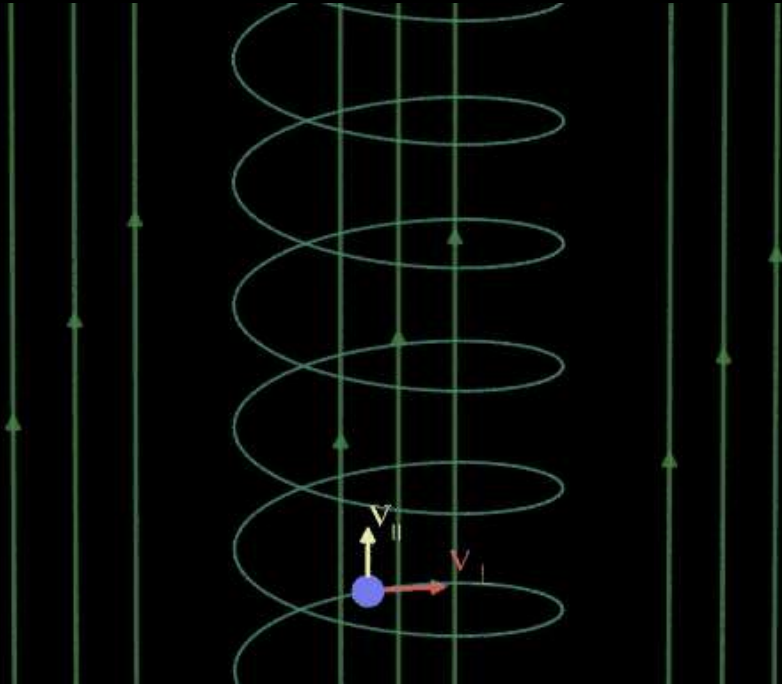
In alcune zone della superficie solare emerge un campo magnetico molto simile a quello di dipolo



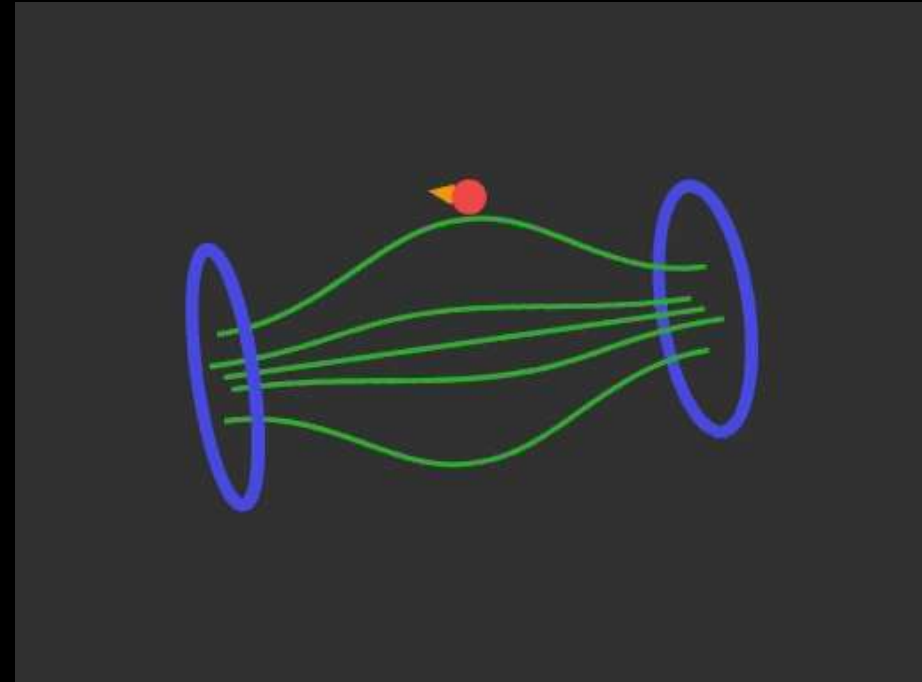
Le particelle cariche (gas ionizzati) restano intrappolate all'interno della regione di campo magnetico dipolare ed emettono radiazione nell'UV; si rende visibile allora un'arcata (o *loop*) coronale.



# Moto in una "bottiglia magnetica"



Moto di una carica immersa in un **campo magnetico uniforme**



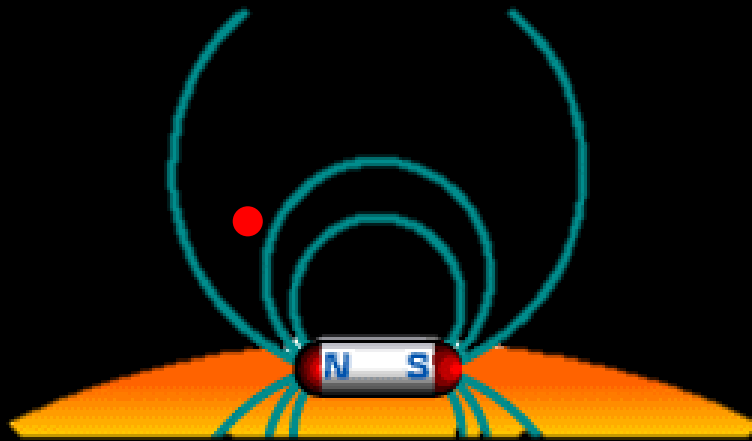
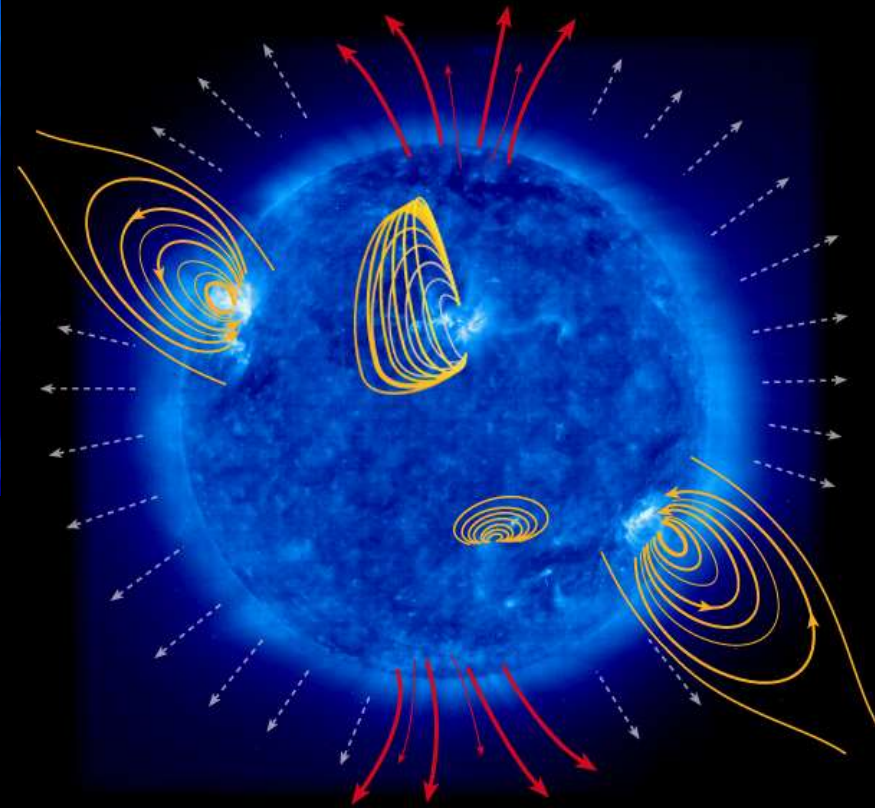
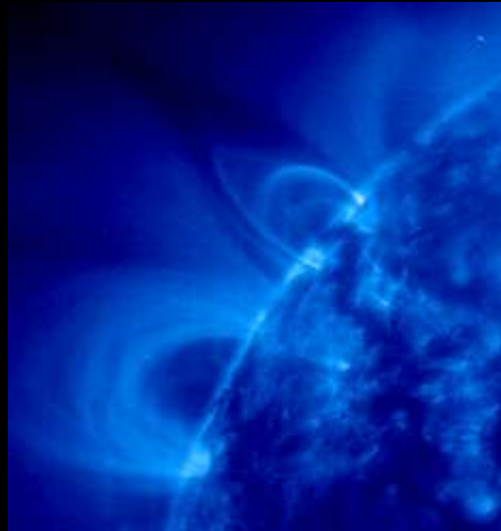
Moto di una carica immersa in un campo magnetico **non uniforme** (bottiglia magnetica)



# Il Campo Magnetico della Corona

Osservando nell'UV si notano molte arcate che si espandono sopra la fotosfera. La regione qui visibile è chiamata corona solare:

si parla quindi di **arcate coronali**



Le particelle cariche (gas ionizzati) restano intrappolate all'interno della regione di campo magnetico dipolare ed emettono radiazione nell'UV; si rende visibile **un'arcata coronale**.

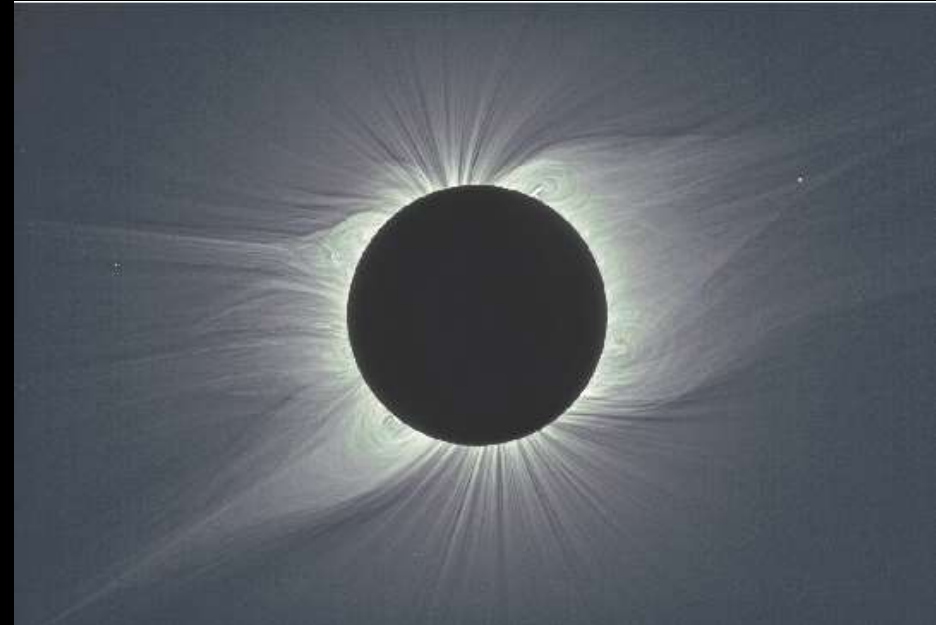
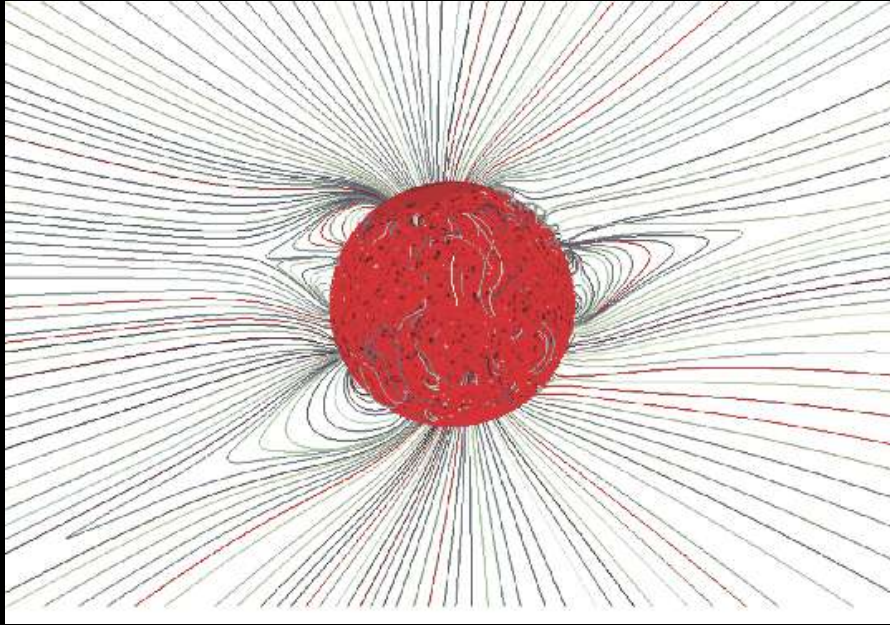
# La Corona intermedia

---



Le eclissi totali mostrano un'atmosfera molto più estesa di quanto ci si potrebbe attendere se in equilibrio idrostatico → evidenza di **un'espansione verso l'esterno**.

# Il Campo Magnetico della Corona intermedia



- Zone di **campo chiuso** → associate agli streamers coronali, più brillanti in luce visibile, associati alla propagazione del vento solare lento
- Zone di **campo aperto** → associate alle piume coronali, meno brillanti nel visibile, associate alla propagazione del vento solare veloce
- Notare come l'orientazione delle strutture tracci le linee di campo ( $\beta \ll 1$ )

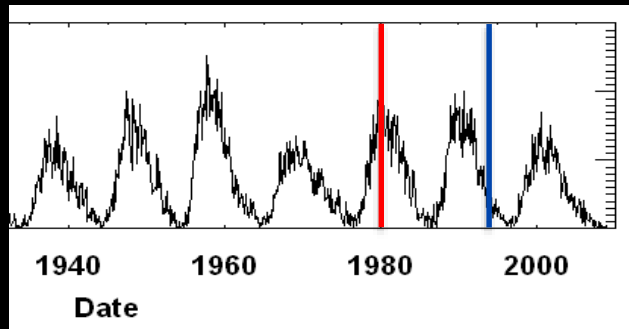
# Variabilità della Corona col ciclo



Eclissi totale del 1994



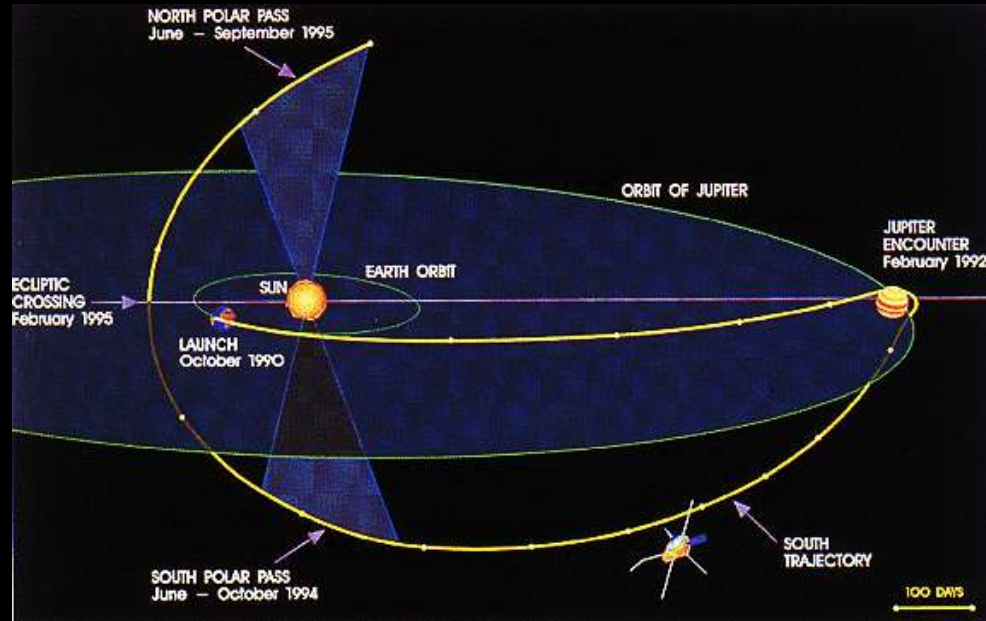
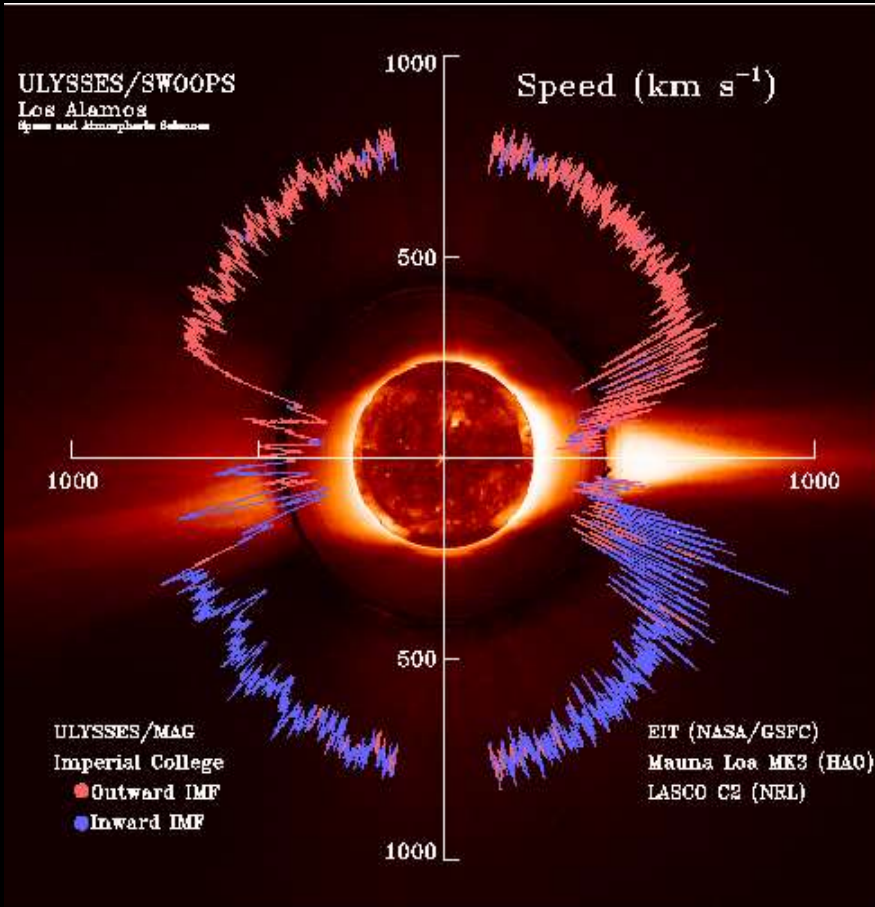
Eclissi totale del 1980



- **Minimo del ciclo:** streamers lungo la fascia equatoriale, buchi coronali alle alte latitudini
- **Massimo del ciclo:** distribuzione omogenea di streamers e riduzione dei buchi coronali

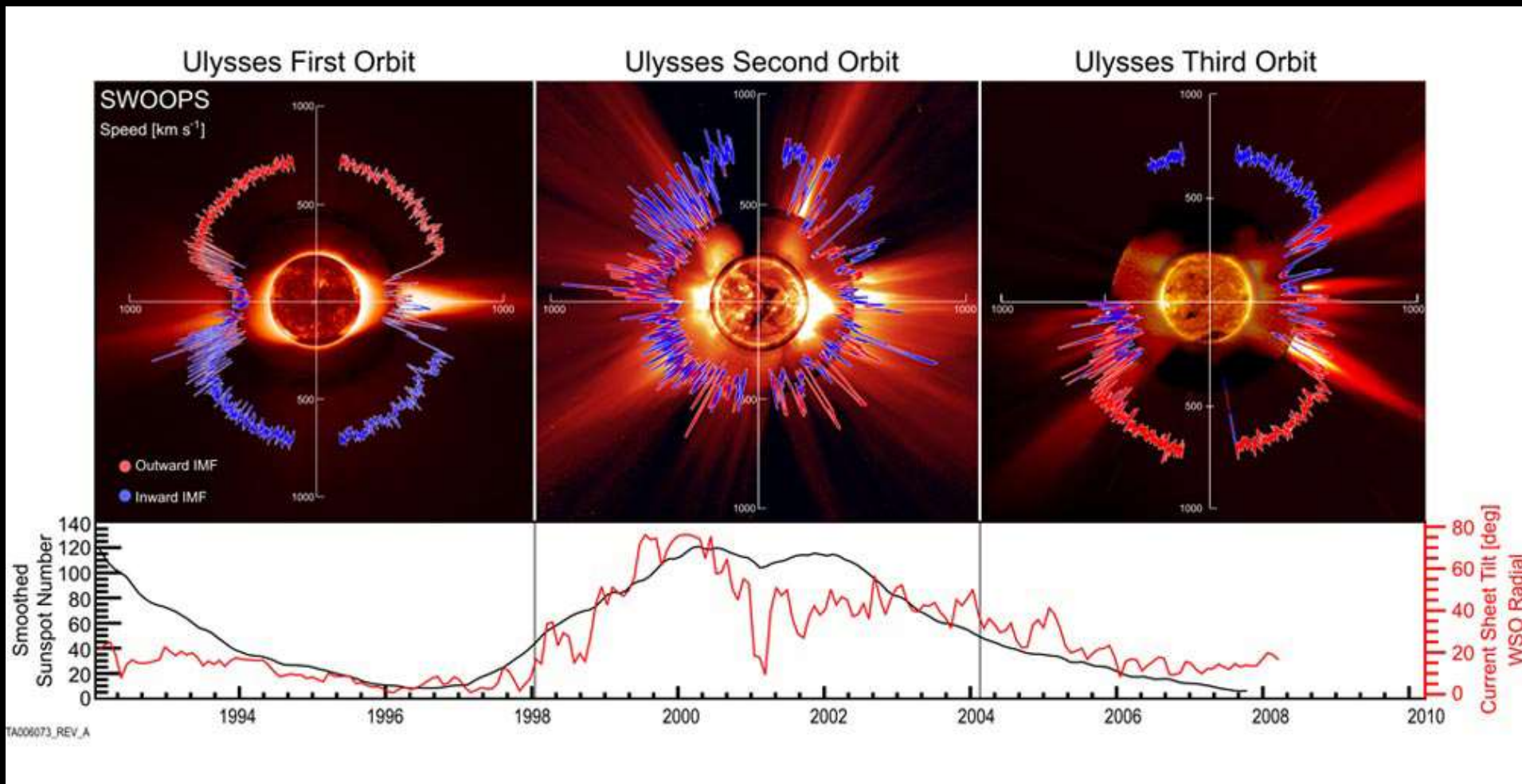


# Il Vento Solare





# Variabilità del Vento Solare col ciclo



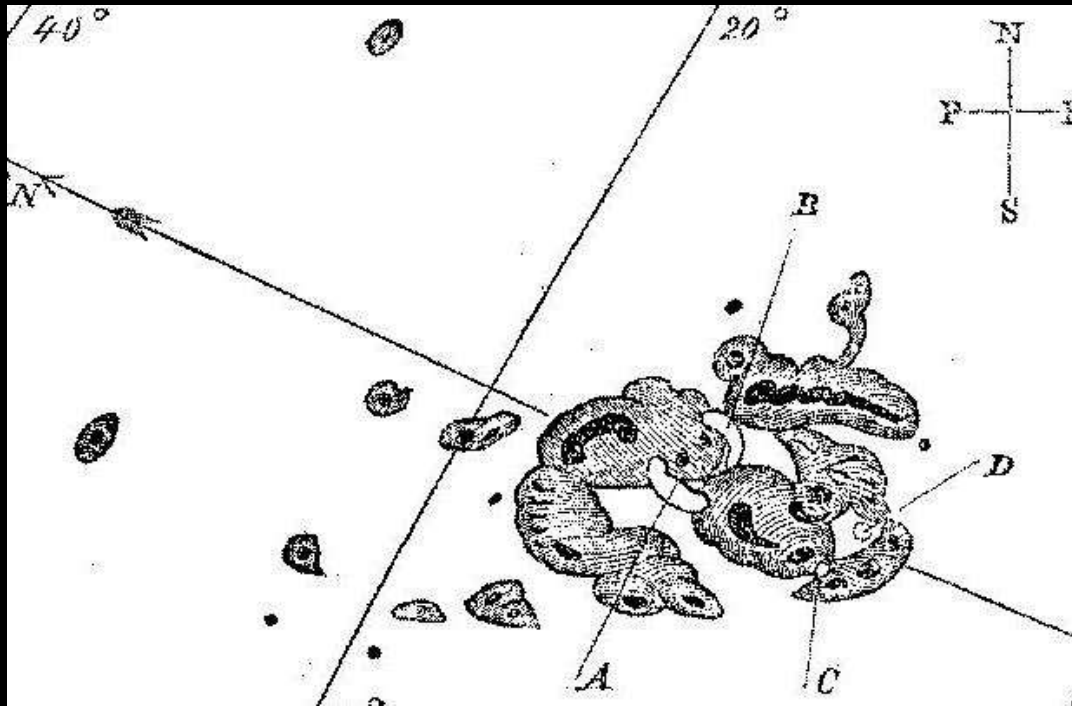
# Brillamenti solari

---

**Energia rilasciata:**  $\sim 10^{25}$  Joules in  $\sim 10$  minuti ( $\sim 100$  miliardi di bombe di Hiroshima)

---

# L'evento di Carrington

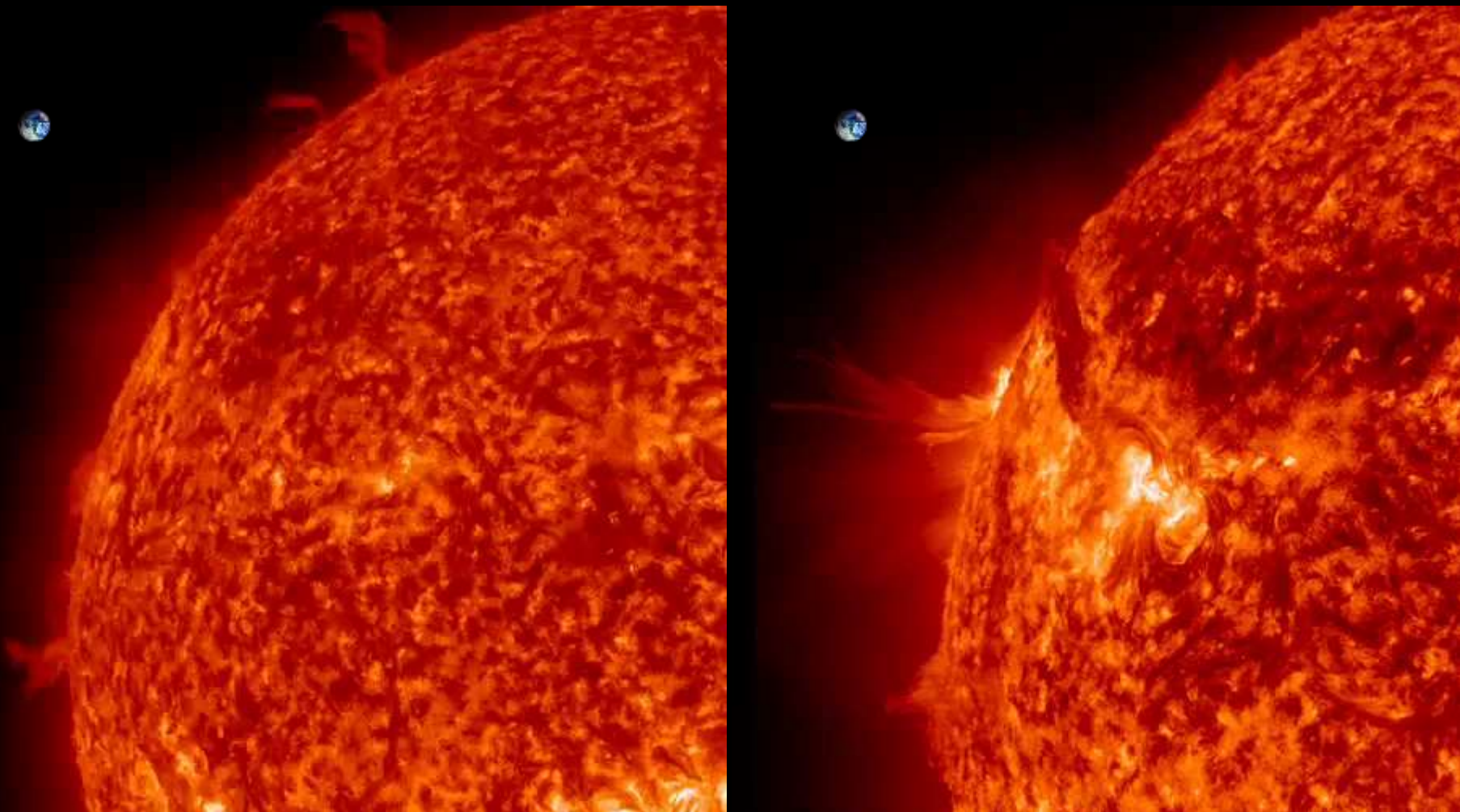


Disegno di Carrington del gruppo di macchie del 01/09/1859

Il primo Settembre 1859 l'astronomo Richard Carrington era impegnato nella sua quotidiana osservazione delle macchie solari quando osservò un improvviso aumento di luminosità nelle macchie al centro del disco solare, mai osservato prima → **brillamento solare più intenso degli ultimi 150 anni**

→ A partire da 17 ore dopo brillanti aurore furono osservate fino a basse latitudini geomagnetiche ( $\sim 20^\circ$ ) ed il servizio telegrafico fu interrotto per giorni → **primo evento di meteorologia spaziale**. Quali ripercussioni avrebbe oggi sulle nostre tecnologie un evento del genere?

# Protuberanze quiescenti ed eruttive



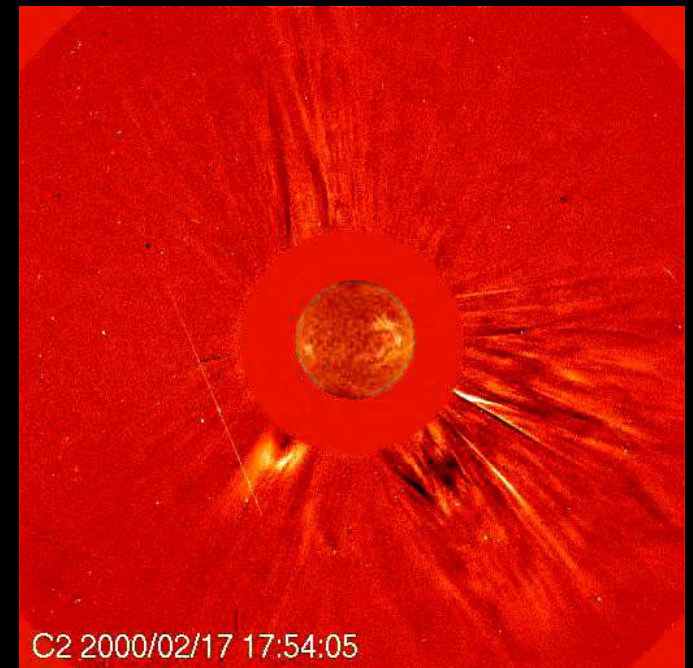
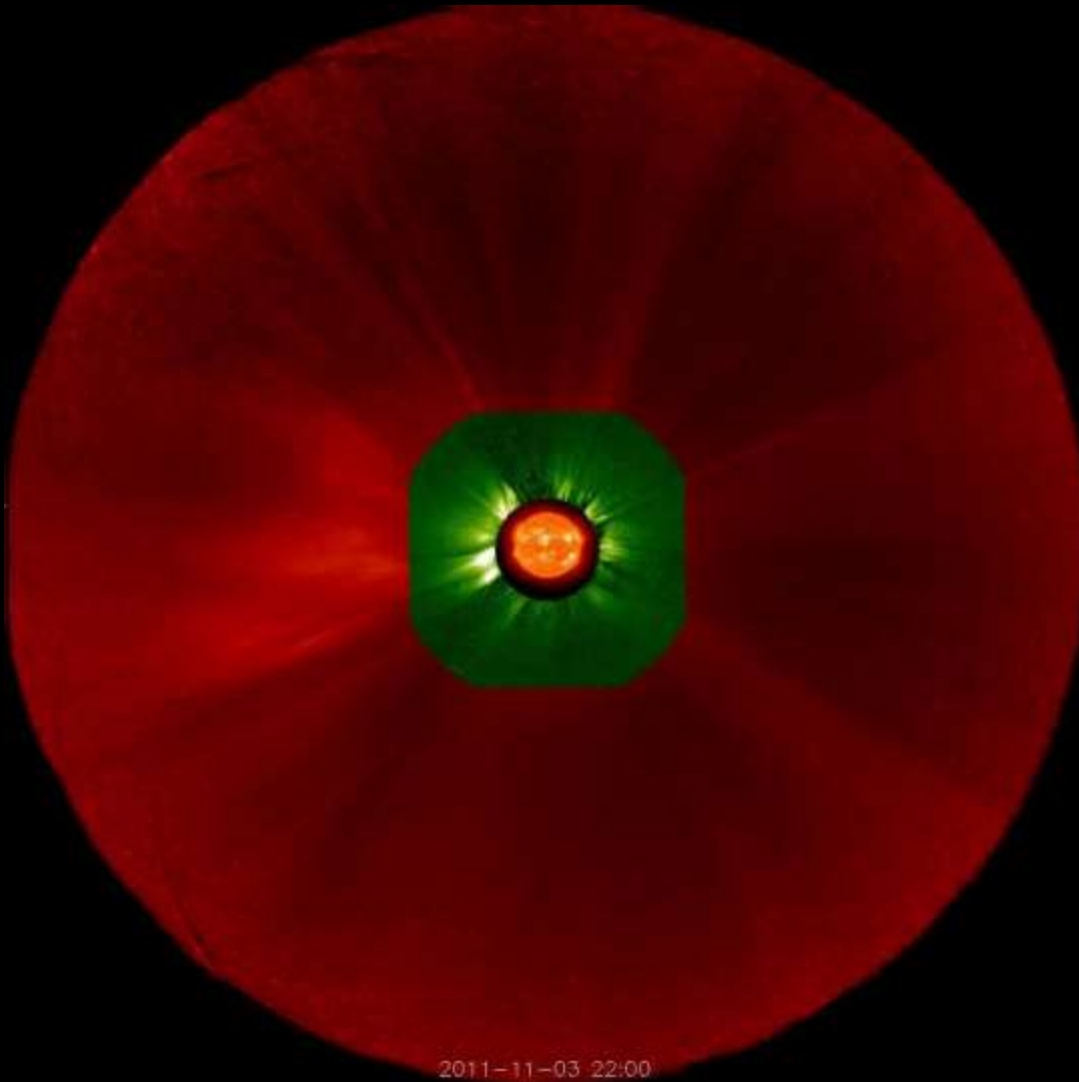
Filmati nell'EUV (30.4 nm) → plasma a 50.000 gradi



# Espulsioni Coronali di Massa (CME)

Un CME può espellere fino a  **$10^{13}$  kg** di plasma (10 miliardi di tonnellate) a **1000-2000 km/s**.

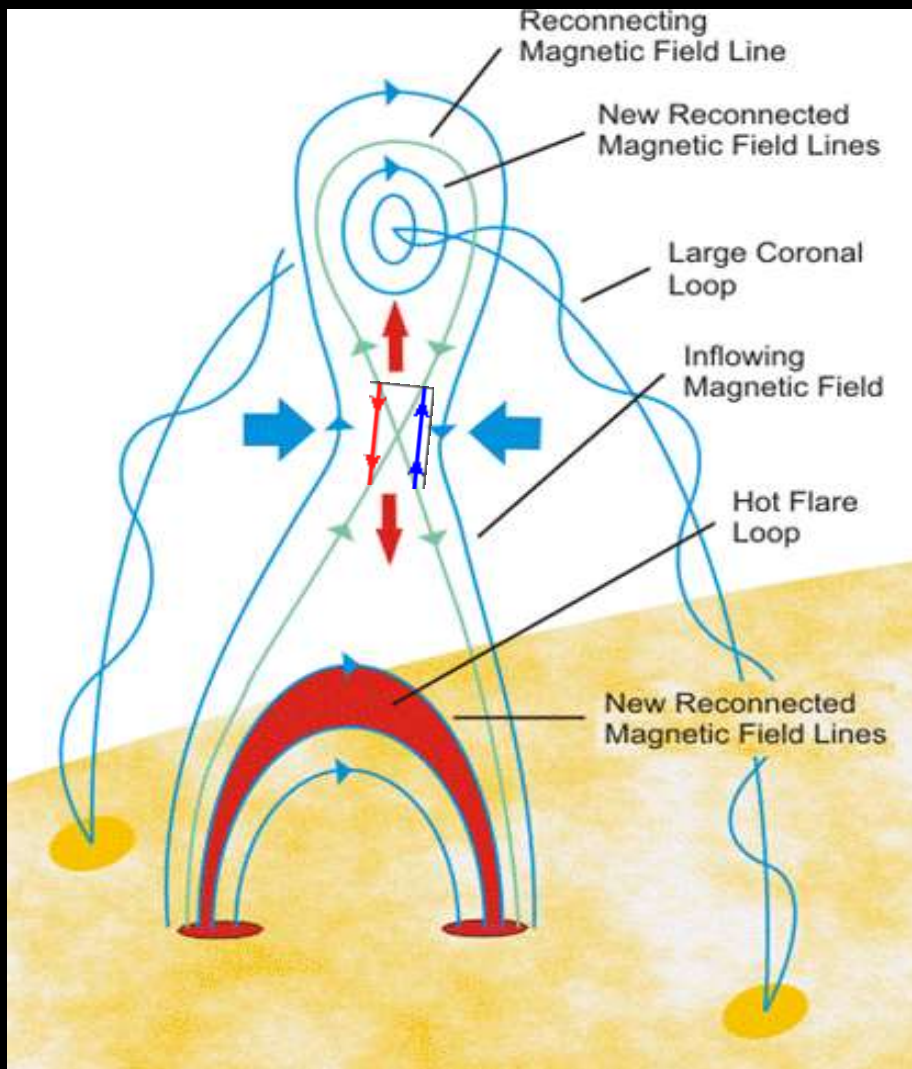
I CME hanno una frequenza di circa **uno alla settimana** (fase di minimo) a più di **uno al giorno** (fase di massimo)





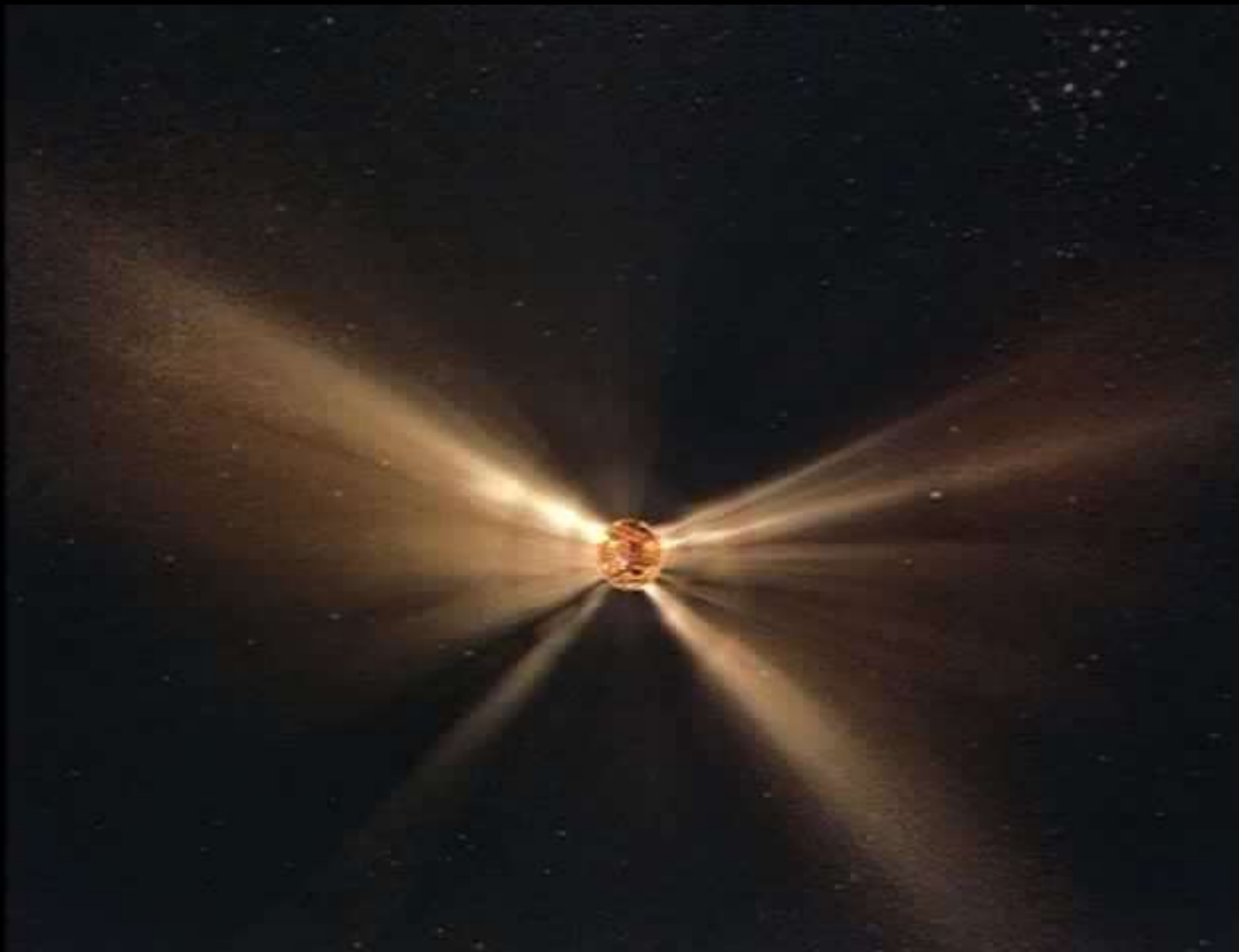
# Origine delle eruzioni solari

- L'unica sorgente possibile sul Sole delle enormi energie rilasciate nel corso delle eruzioni solari è il **campo magnetico**.
- E' necessario però un processo fisico per la **conversione dell'energia** accumulata nel campo magnetico coronale  $B^2/2\mu$  nelle altre forme di energia (termica, cinetica, radiazione).
- Questo processo fondamentale di fisica del plasma fu identificato a partire dagli anni '50 e fu denominato **RICONNESSIONE MAGNETICA**.
- Attraverso questo processo si produce una **dissipazione dell'energia accumulata nel campo magnetico** ed un'accelerazione, compressione e riscaldamento del plasma.



# Dal Sole all'Eliosfera

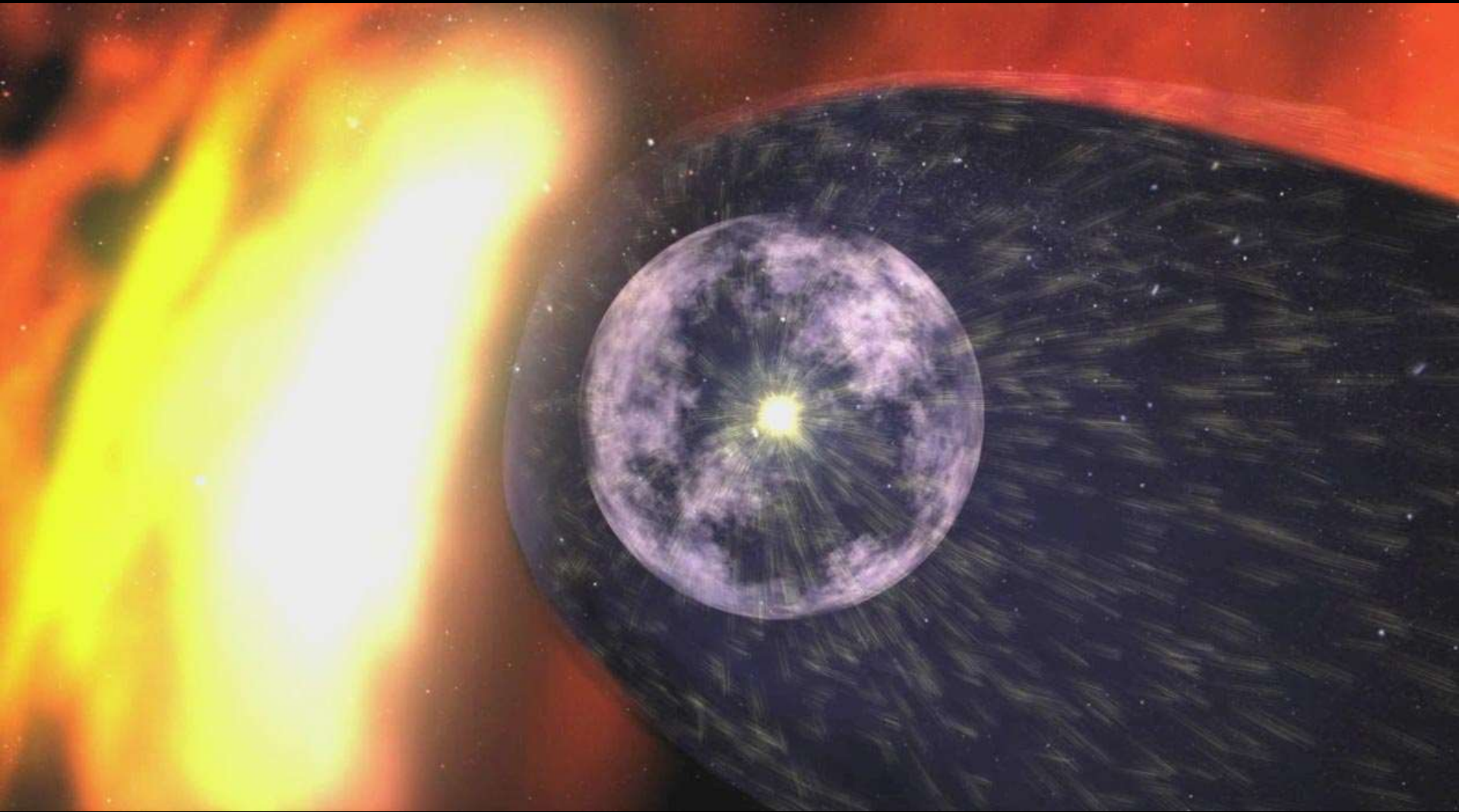
---



Filmati nella luce visibile (500 nm)

# Dal Sole all'Eliosfera

---





# Eliosfera e Astrosfere

## ASTROSPHERES

LL Orionis  
Visible  
Hubble



Helix nebula

Mira  
Ultraviolet  
GALEX



# Introduzione

---

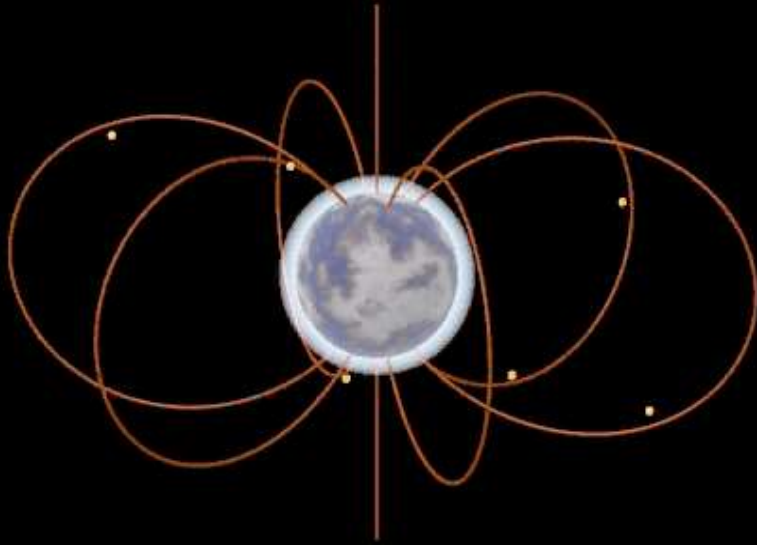
- **Perché studiare il Sole?**
- **Cosa conosciamo del Sole?**
  - L'interno del Sole: produzione e trasporto dell'energia
  - L'esterno del Sole: struttura ed attività dell'atmosfera
- **Effetti dell'attività solare sulla Terra**
  - Magnetosfera terrestre e Aurore
  - Tempeste Geomagnetiche
  - Sole e climatologia terrestre
- **Sfide future per l'astrofisica**
  - Solar Orbiter
  - Altri progetti a Torino



---

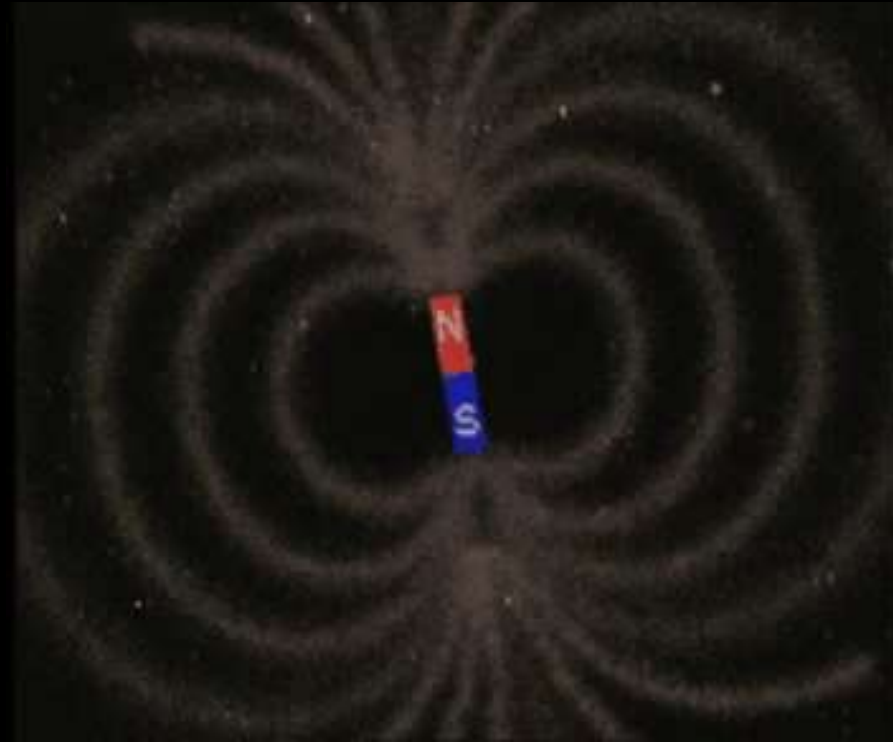
# Effetti dell'attività solare sulla Terra

# La Magnetosfera terrestre



**Moto di particelle cariche intrappolate dal campo magnetico terrestre nelle fasce di VanHallen.**

**Il tempo di «rimbalzo» tipico ( $e^-$  da 100 keV) è 0.1 s, quello di orbita attorno alla Terra 1000 s.**

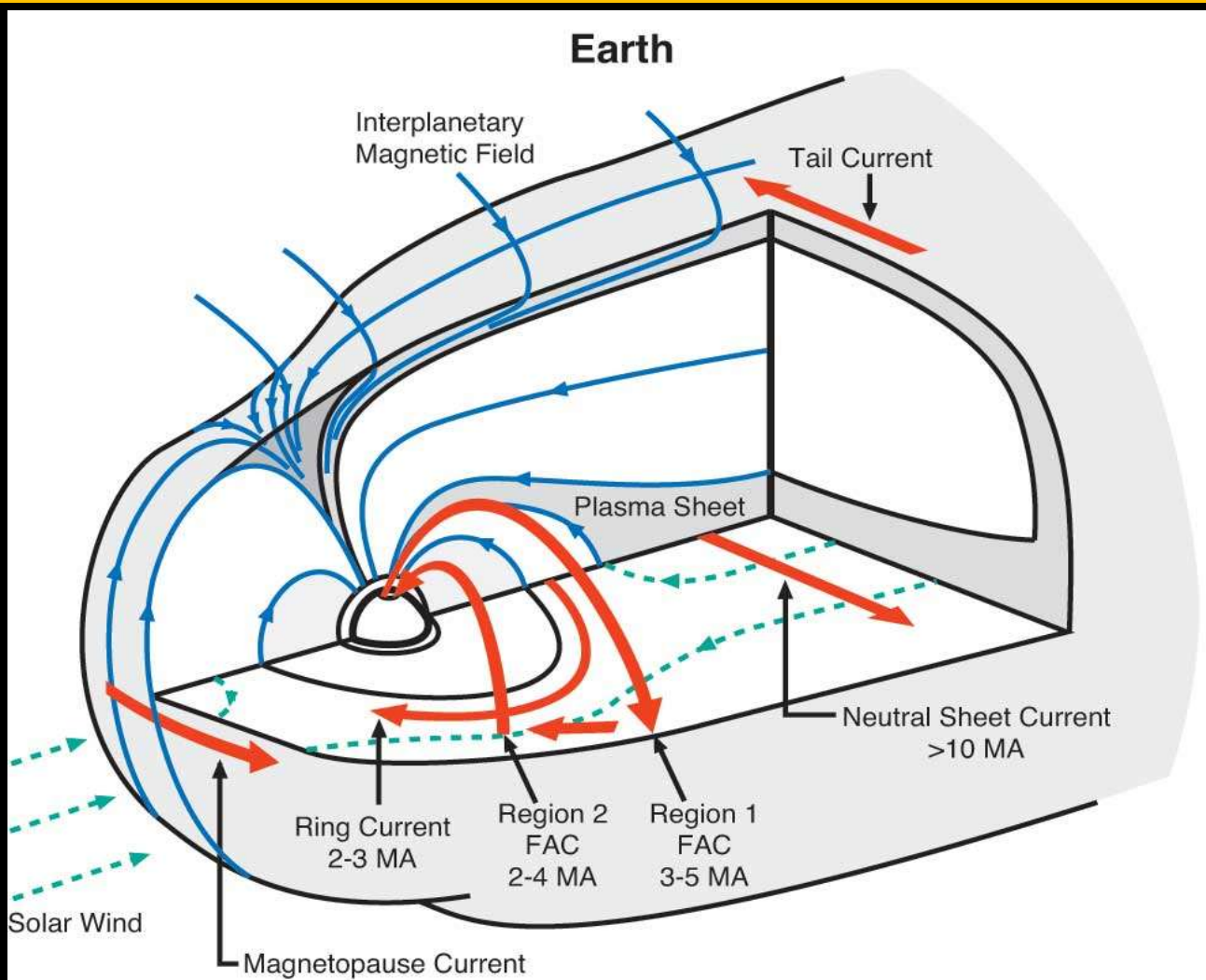


**Il flusso del vento solare emesso dal Sole modifica la struttura dipolare della magnetosfera terrestre**

**La magnetosfera agisce da schermo per le particelle del vento solare**



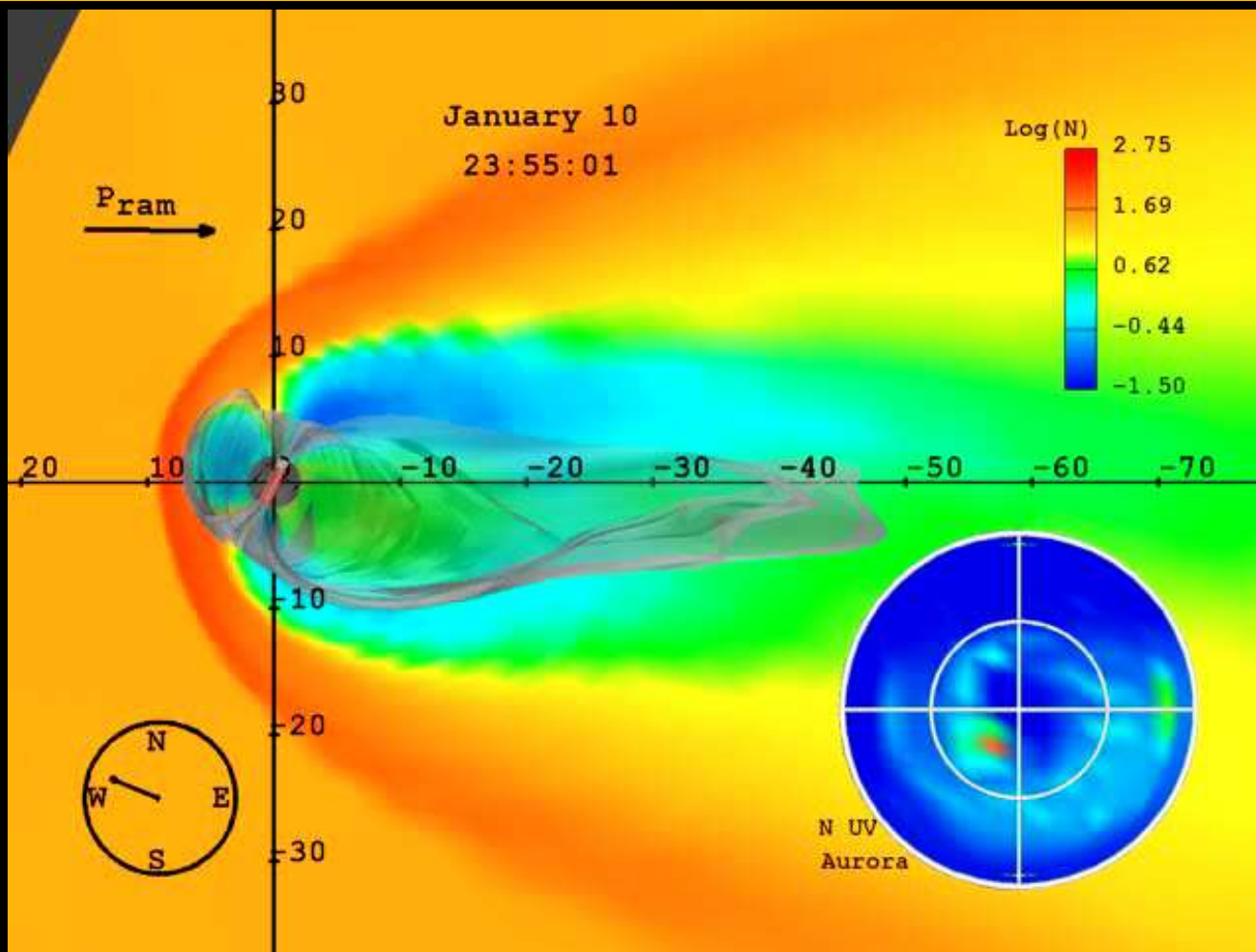
# La Magnetosfera terrestre



Permeata da molti sistemi di correnti tra cui le **CORRENTI AD ANELLO** che scorrono da Est verso Ovest



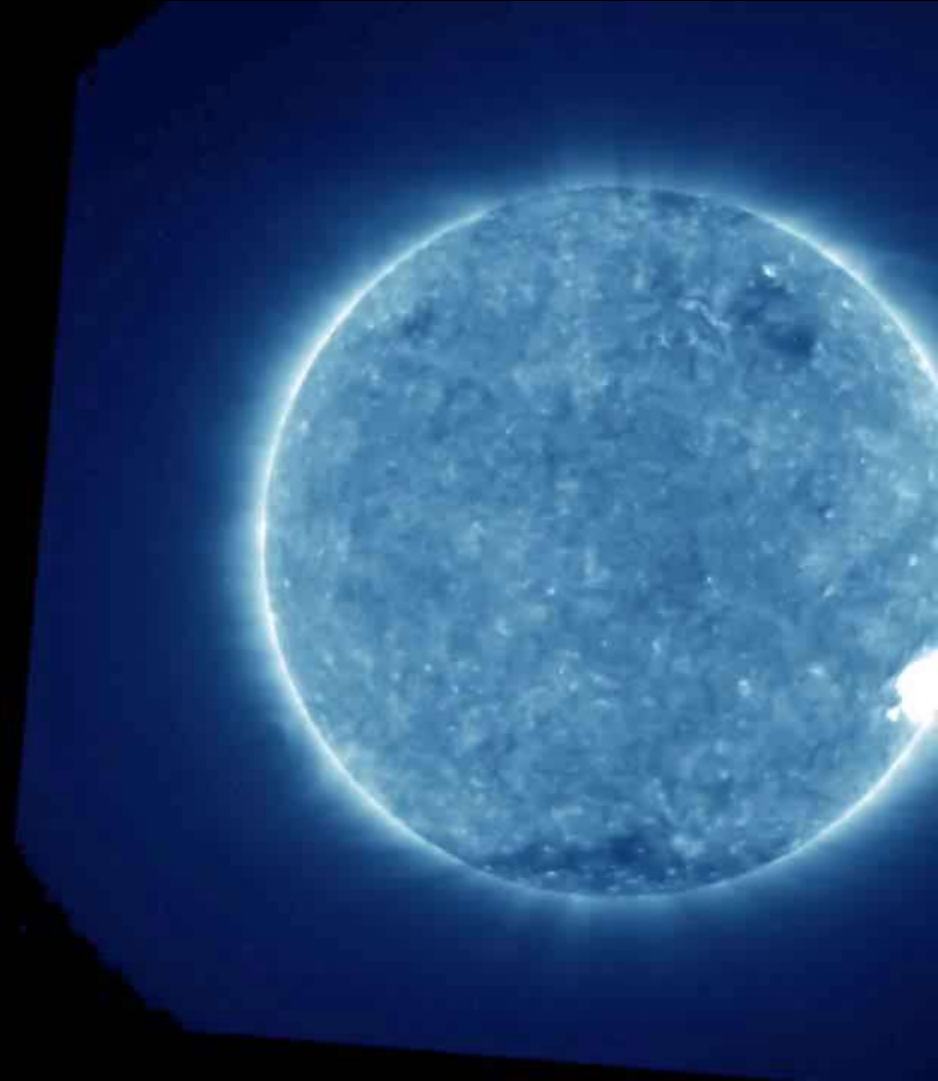
# Dinamica della Magnetosfera



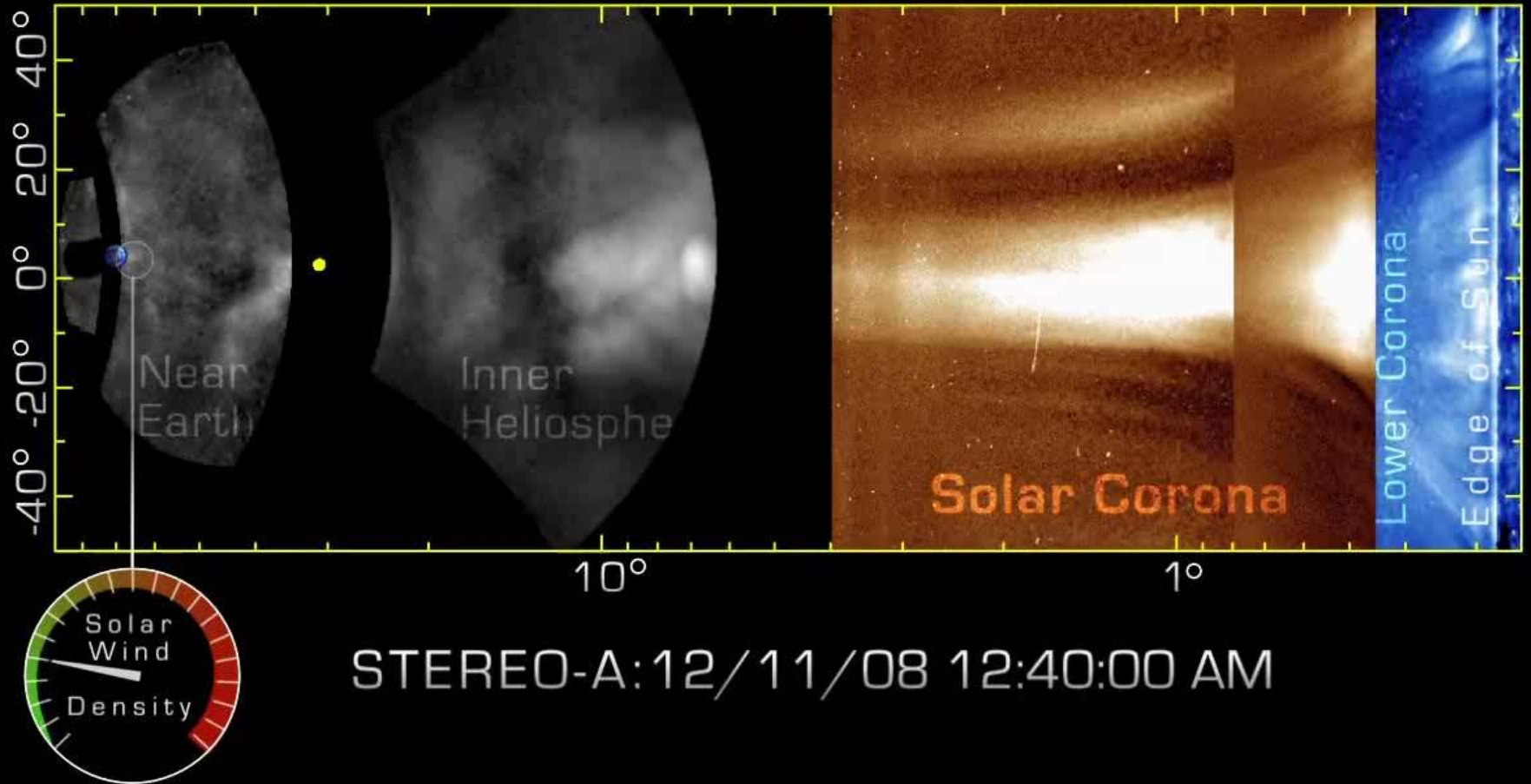
Simulazione numerica che illustra le variazioni della magnetopausa all'aumentare della pressione dinamica del vento solare all'arrivo di un'eruzione solare

# Dal Sole alla Terra

---



# Dal Sole alla Terra



# Dal Sole alla Terra

---





# Effetti sulla Terra: aurore

---



IMAGE-FUV-2000/07/15-14:00:39.U1

# Effetti sulla Terra: aurore



Aurore a corona



Aurore a spirale



Raggi aurorali dallo spazio



Aurore a cortina

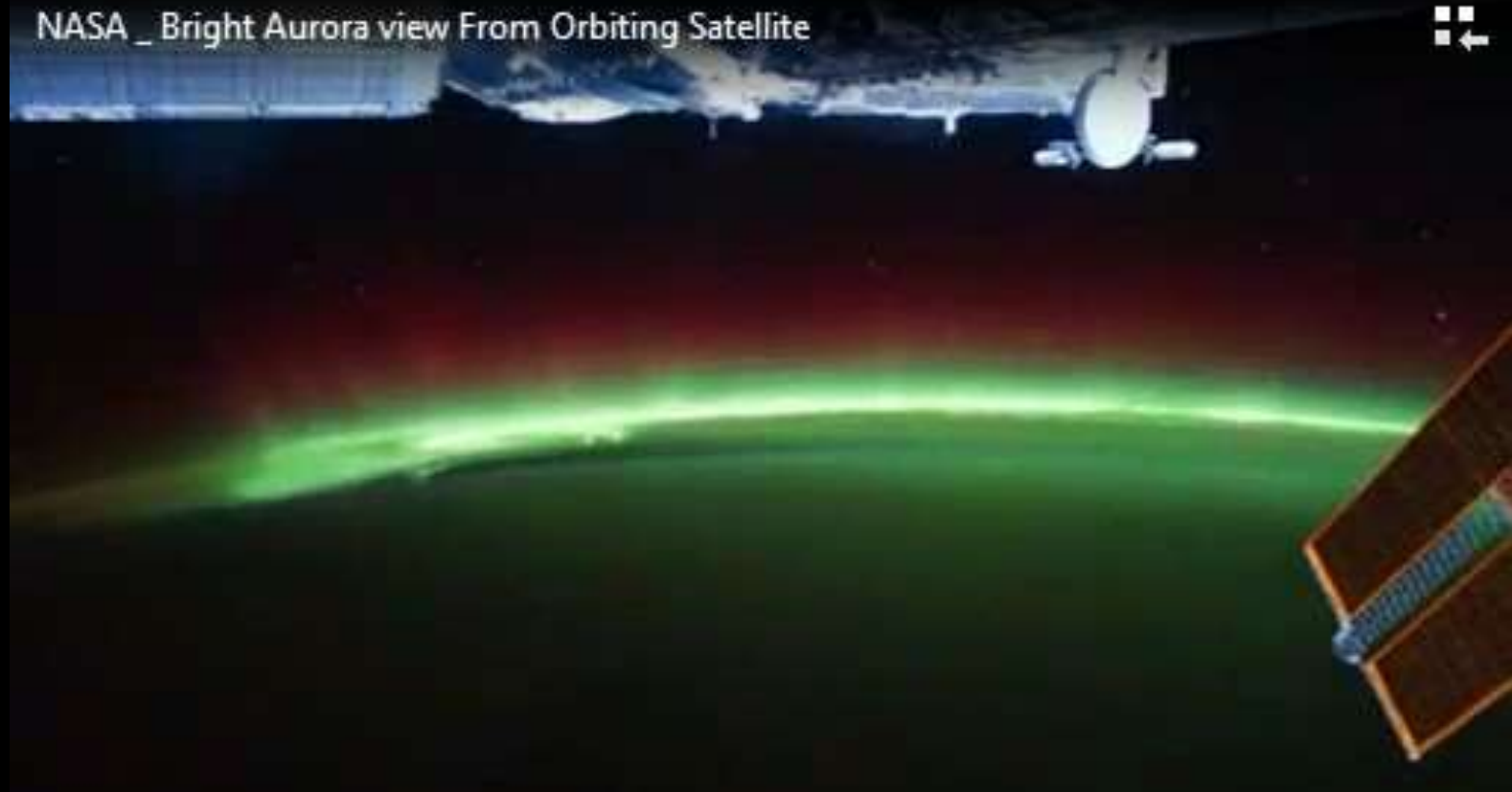


Aurore distaccate e diffuse



Raggi aurorali da Terra

# Aurore dallo Spazio



Ripresa video dalla ISS (orbita 330-435 km) di aurore: parte della luminosità è dovuta all' **airglow**, luminescenza naturale del cielo notturno dovuta a processi vari (ricombinazione ioni fotoionizzati di giorno, eccitazione da raggi cosmici, chemiluminescenza per reazioni chimiche tra O e N con molecole OH, etc...) visibile alla fine del video.

# I colori delle Aurore

Gli elettroni provenienti dal Sole vengono imprigionati dal campo magnetico terrestre ed entrano così nell'atmosfera. Le loro collisioni con gli atomi e molecole dell'atmosfera producono la luce delle Aurore.

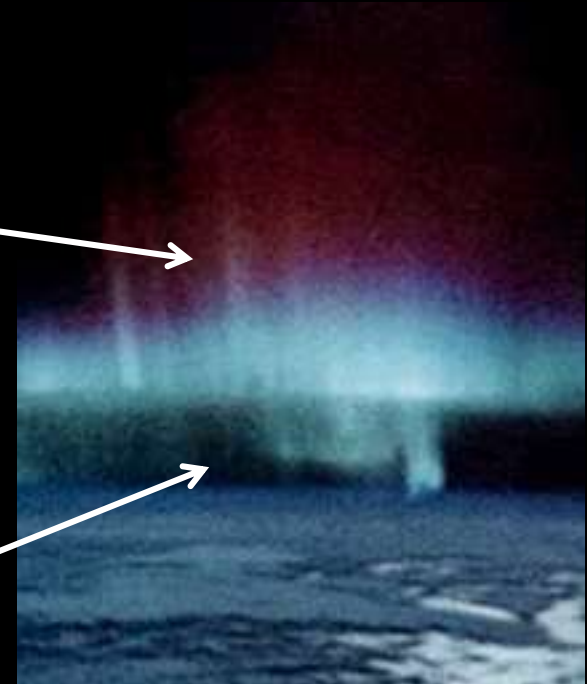
Gli atomi di ossigeno emettono luce rossa (> 200 km) o verde.

———— 200 KM ————

Gli atomi di azoto emettono luce blu.

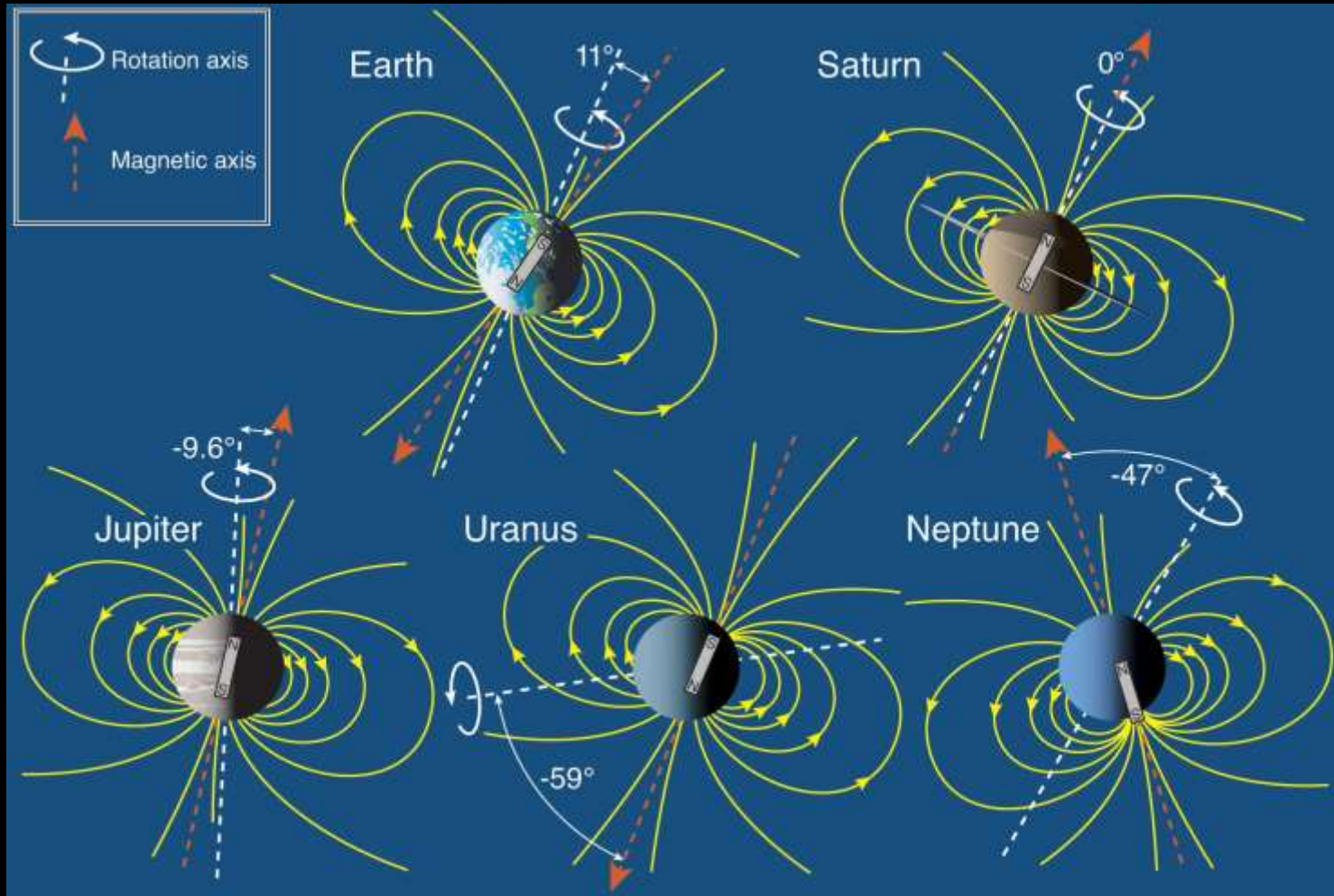
———— 100 KM ————

Le molecole di azoto emettono luce violetta (< 100 Km).





# Magnetosfere planetarie



Nel sistema solare tutti gli oggetti dotati di un campo magnetico intrinseco hanno una magnetosfera

# Magnetosfere planetarie



La magnetosfera di Giove è l'oggetto più esteso di tutto il Sistema Solare

# Aurore planetarie

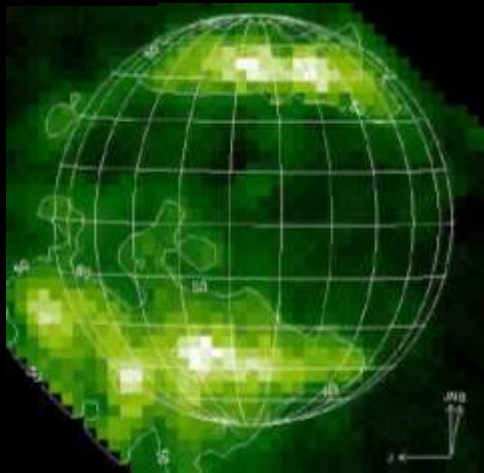
Giove



Saturno



Ganimede



Urano



---

# Tempeste geomagnetiche



# Tempeste Geomagnetiche

Fenomeni più evidenti legati ai processi di conversione dell'energia sono le aurore, oltre ai **disturbi del campo magnetico**, fenomeni collegati tra loro. Si distinguono:

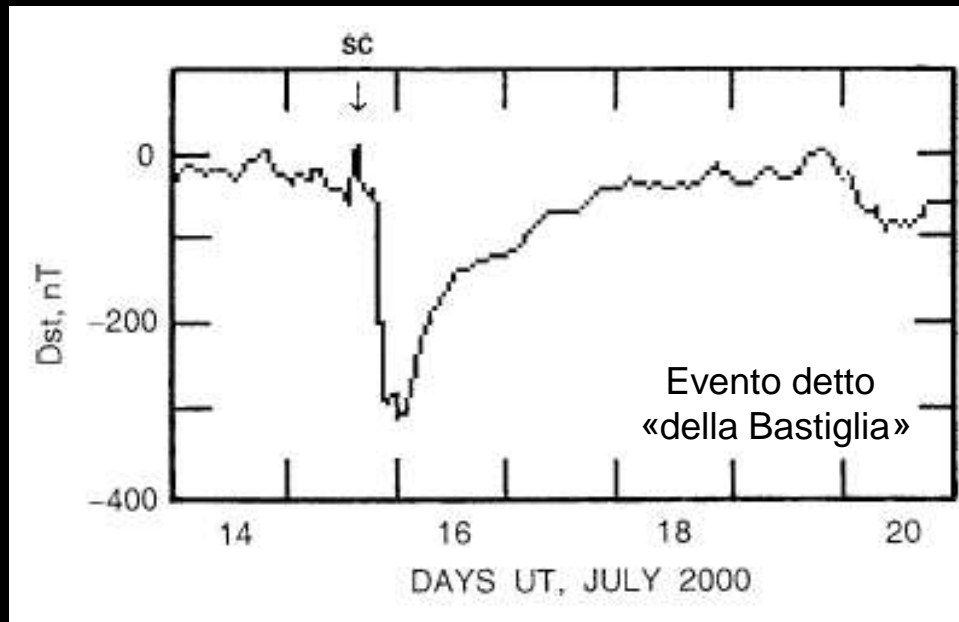
- **Magnetic storm:** disturbi geomagnetici su scala globale, tempi scala da ore a giorni, associati ad intense aurore fino a basse latitudini
- **Magnetic substorms:** disturbi geomagnetici limitati più alle alte latitudini, tempi scala da minuti a ore, associati ad aurore più localizzate.

Una **tempesta geomagnetica** è definita dall'evoluzione del ***Dst-index (Disturbance-storm time)***: misura media delle deviazioni della componente orizzontale di  $B_{Earth}$  misurata da diverse stazioni a bassa latitudine più sensibili ai campi indotti dalle ring currents. Il *Dst-index* è infatti una misura indiretta dell'intensità delle ring currents: il moto di deriva di  $p^+$  verso Ovest e di  $e^-$  verso Est produce una corrente totale in senso opposto alla rotazione terrestre → **ring currents producono un campo magnetico addizionale diretto verso Sud** ( $<0$ ) → disturbo misurabile campo geomagnetico ( $B_E \sim 0.4 \text{ G} = 40 \mu\text{T}$ )

Il picco negativo di *Dst-index* dà un'indicazione sull'intensità della tempesta magnetica:

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| $-50 \text{ nT} < Dst < -30 \text{ nT}$  | → <b>weak storm</b>     |
| $-100 \text{ nT} < Dst < -50 \text{ nT}$ | → <b>moderate storm</b> |
| $Dst < -100 \text{ nT}$                  | → <b>intense storm</b>  |

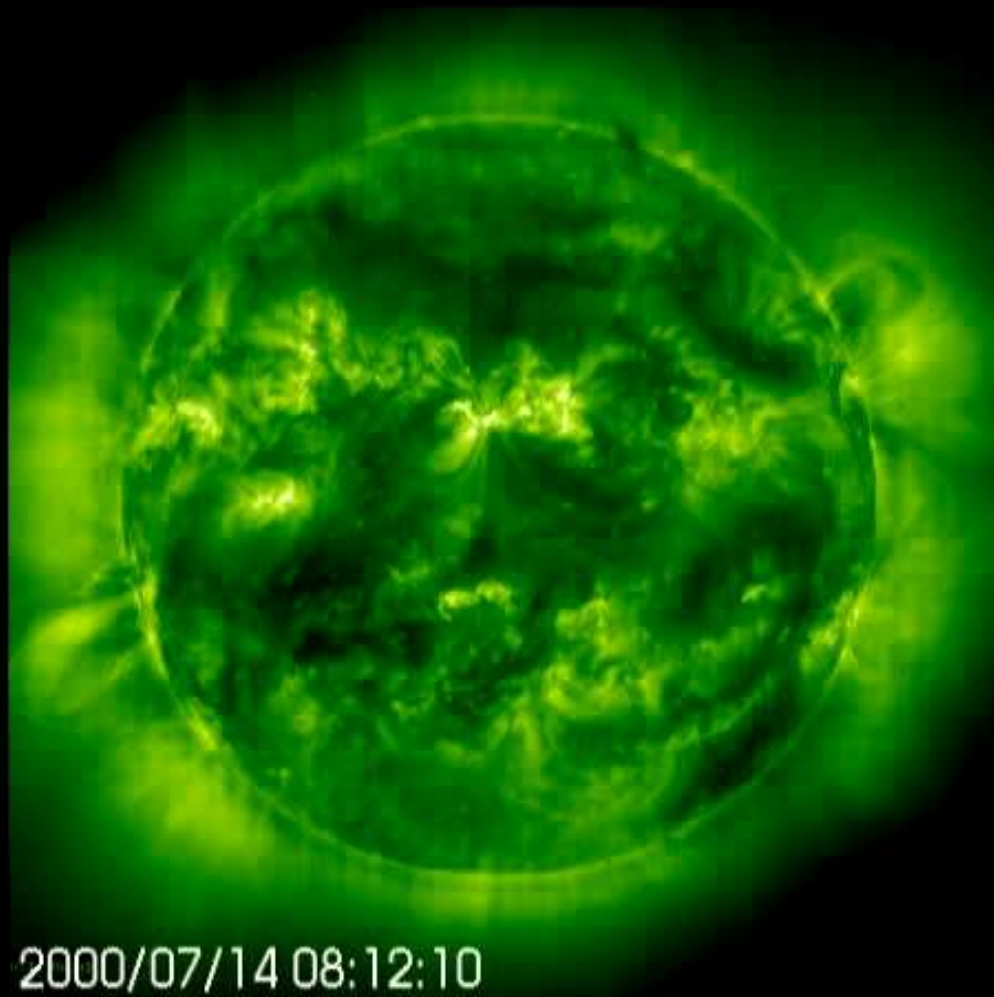
# Tempeste Geomagnetiche



## Definizione tipica di magnetic storm

1. **Sudden Storm Commencement (SSC):** improvviso (ore) aumento del Dst → compressione della magnetosfera dovuta all'arrivo della CIR o ICME
2. **Main phase:** significativa diminuzione del Dst → produzione delle ring currents
3. **Recovery phase:** recupero del Dst iniziale → espulsione del plasma aggiunto ad alta temperatura lungo le flowlines aperte che lo portano verso il dayside della magnetosfera, poi le ring currents decadono principalmente per charge exchange tra ioni e atomi neutri dell'esosfera, processo che rimuove prima gli ioni ad alta energia e poi progressivamente quelli a minore energia.

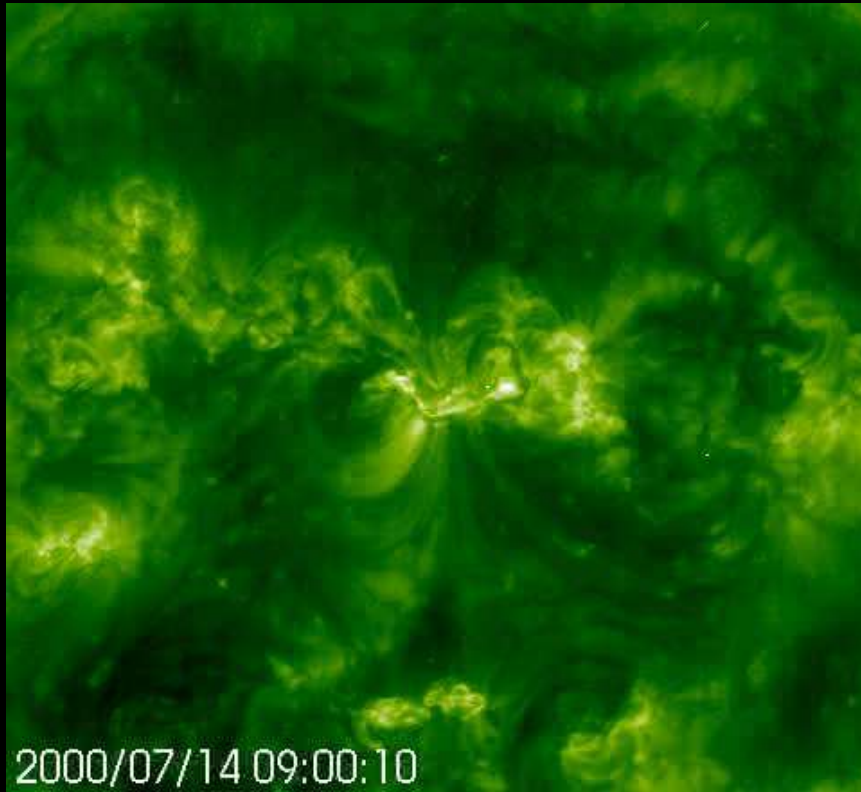
# L'Eruzione del 14 Luglio 2000



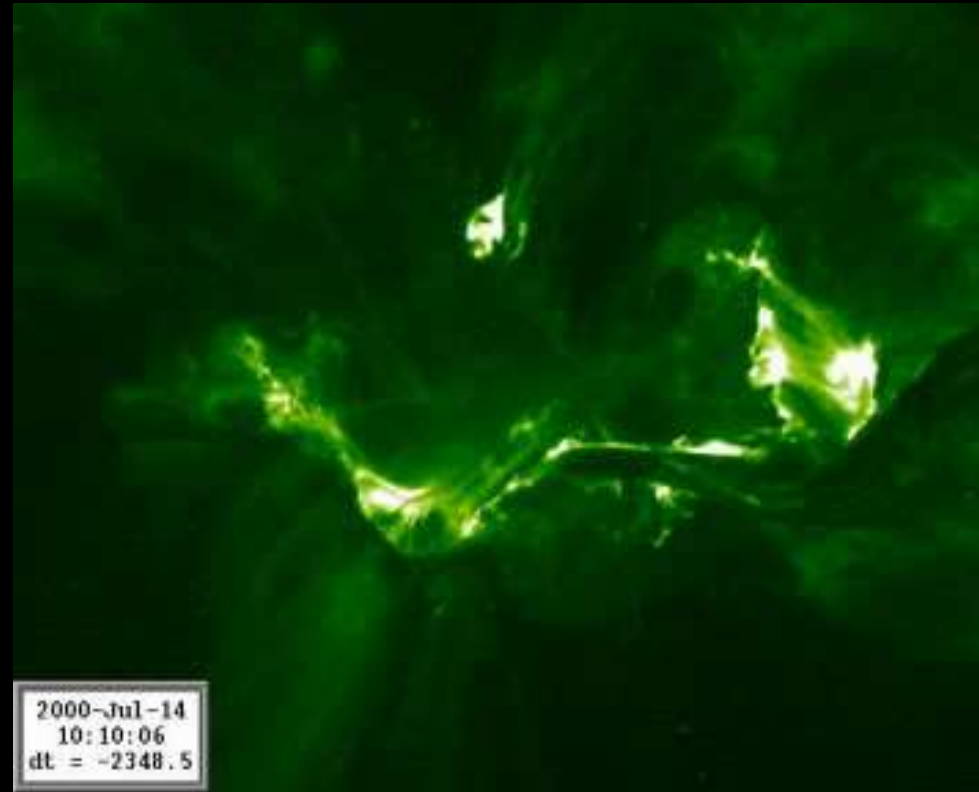
Serie di filmati che mostrano gli effetti del noto evento “della Bastiglia”:

- 1) **Brillamento** (immagini del disco in EUV) a centro disco;
- 2) Propagazione di un **CME** verso Terra (immagini in luce visibile della corona)
- 3) Bombardamento da **particelle ultra-relativistiche** (effetto “neve” sui detectors) pochi minuti dopo il brillamento

# L'Eruzione del 14 Luglio 2000



Brillamento nell'EUV



Formazione delle arcate post-flare



# Effetti a Terra



Filmato FUV, 15 luglio 2000, 12:18 – 18:59 UT

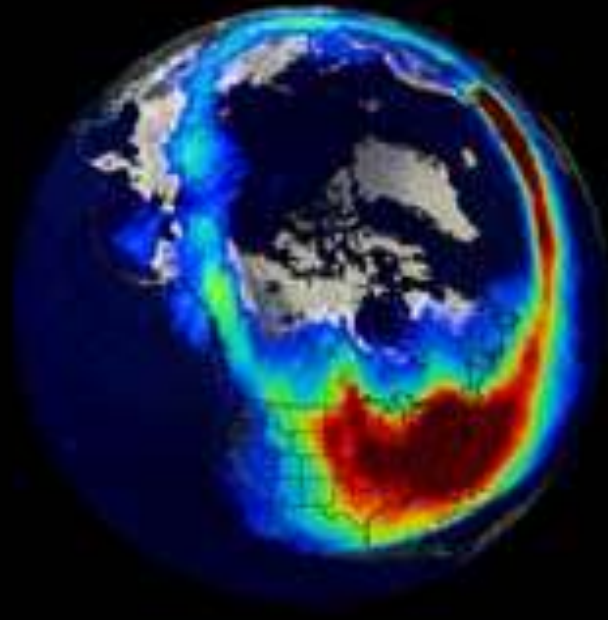


Immagine FUV sovrapposta a mappa terrestre

**Gli effetti dell'evento della Bastiglia furono globali:** i detectors ed i dispositivi di tracking stellare (controllo assetto satellitare – *attitude control*) furono sommersi di particelle per ore; diversi detectors di particelle del NOAA e della NASA subirono un degrado e furono spenti. Il satellite giapponese **ASCA** (Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics) funzionante da 7 anni **perse l'assetto e non fu più recuperato** (rientro in atmosfera 8 anni dopo).

A Terra furono osservate **intense aurore a bassissime latitudini** (fino a El Paso, Texas); sugli elettrodotti furono misurate intense **correnti indotte geomagneticamente** (GIC) che sovraccaricarono i condensatori e danneggiarono almeno un trasformatore. Il funzionamento della **rete GPS** fu degradato per diverse ore.

# Effetti a Terra

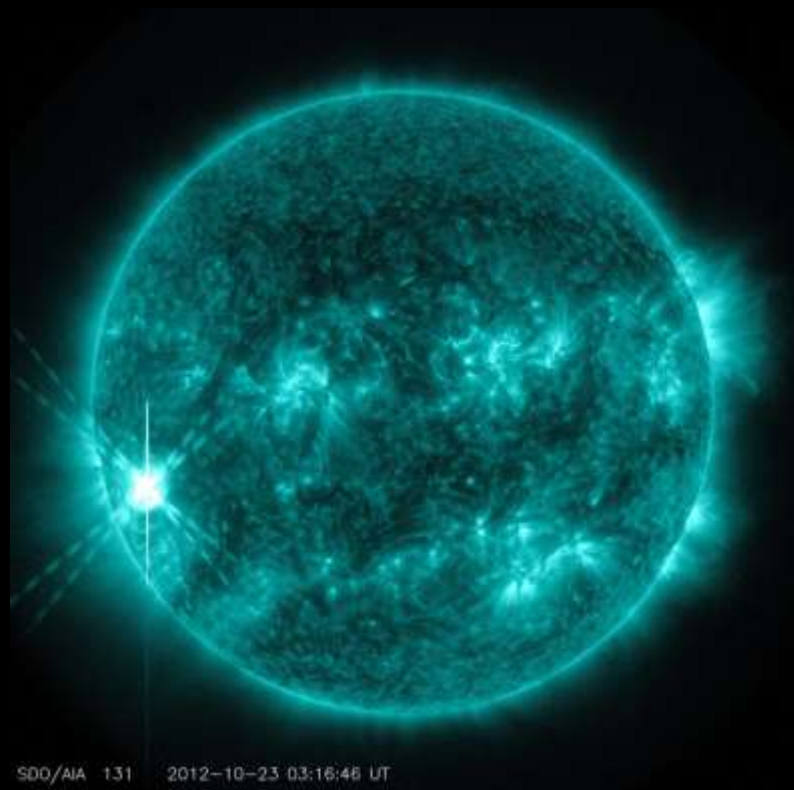
Anomalie riportate nei satelliti investiti dalla tempesta nei giorni 14-16 luglio 2000.

- **ASCA** (Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics) – lost attitude fix resulting in solar array misalignment and power loss, satellite lost (in P.C. Klanowski list).
- **GOES-8 & -10** – SEM Electron sensor problems, power panels
- **ACE** (Advanced Composition Explorer) – Temporary SW and other sensor problems
- **WIND** – Permanent (25%) loss of primary transmitter power & Temporary loss of Sun and star sensors
- **SOHO** (also **YOHKOH & TRACE**) – High energy protons obscure solar imagery
- **GEO** and **LEO** Satellites – S/C orientation problems during MPE
- **GEO** Satellites lost  $\sim 0.1$  amp output from solar arrays

Più informazioni sull'evento: <http://www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/events/2000july14/>

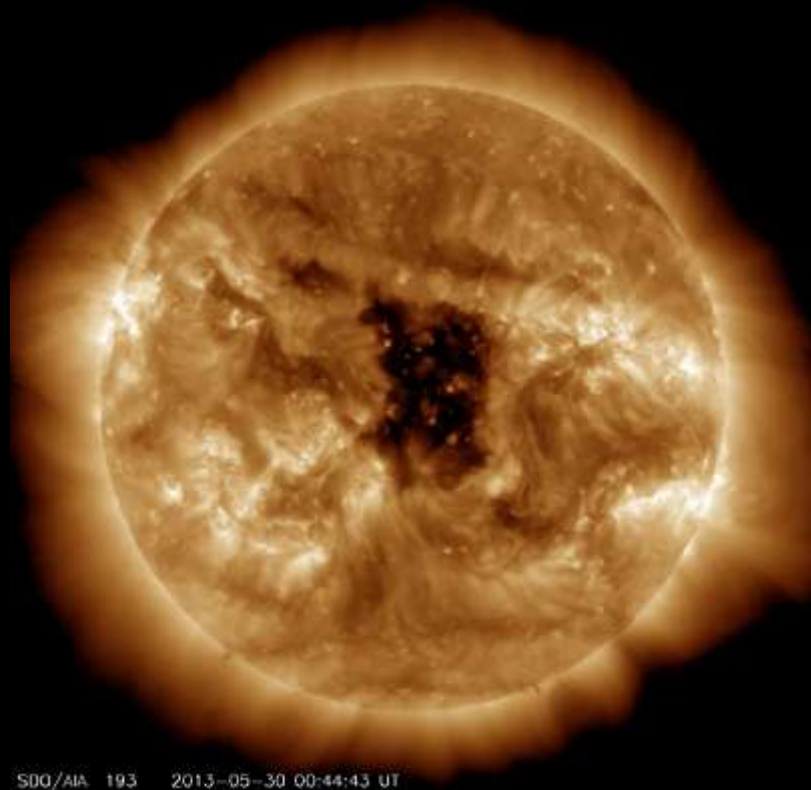
# Cause solari delle Tempeste Geomagnetiche

## Eruzioni solari



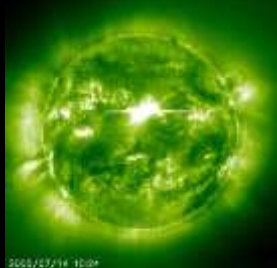
Brillamento di classe X1.8 del 23 ottobre 2012

## Buchi coronali



Buco coronale a bassa latitudine del 30 maggio 2013: intense aurore osservate 2-3 giorni dopo

# Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE  
ELETTROMAGNETICA**  
*ARRIVO: 8 MINUTI*  
*DURATA: 1-2 ORE*

RAGGI X, EUV,  
ATTIVITA' RADIO

**PARTICELLE  
AD ALTA ENERGIA**  
*ARRIVO: 15 MIN - ORE*  
*DURATA: GIORNI*

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA  
MEDIO-BASSA**  
*ARRIVO: 2-4 GIORNI*  
*DURATA: GIORNI*

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

- ✓ **Danneggiamento delle sonde spaziali:**
  - danneggiamento strumentazione elettronica
  - degradazione pannelli solari
  - degradazione rivelatori ottici
  - caduta per attrito atmosferico





# Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE  
ELETTROMAGNETICA**  
*ARRIVO: 8 MINUTI*  
*DURATA: 1-2 ORE*

RAGGI X, EUV,  
ATTIVITA' RADIO

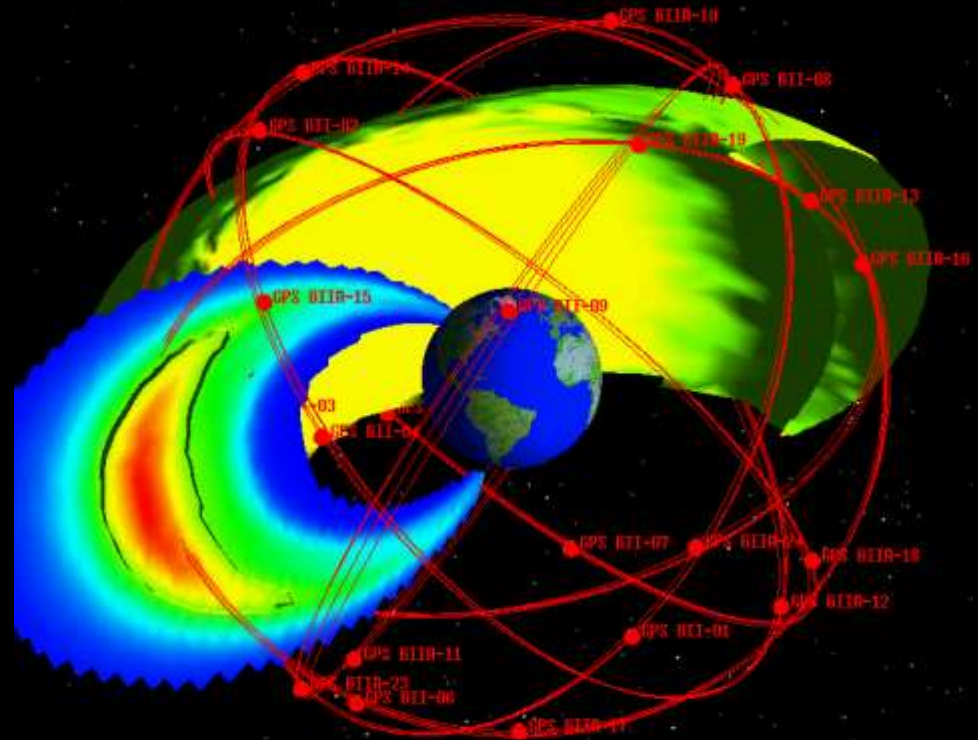
**PARTICELLE  
AD ALTA ENERGIA**  
*ARRIVO: 15 MIN - ORE*  
*DURATA: GIORNI*

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA  
MEDIO-BASSA**  
*ARRIVO: 2-4 GIORNI*  
*DURATA: GIORNI*

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

✓ Interferenze sistemi di navigazione (GPS, Loran-C)



# Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE  
ELETTROMAGNETICA**  
**ARRIVO: 8 MINUTI**  
**DURATA: 1-2 ORE**

RAGGI X, EUV,  
ATTIVITA' RADIO

**PARTICELLE  
AD ALTA ENERGIA**  
**ARRIVO: 15 MIN - ORE**  
**DURATA: GIORNI**

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA  
MEDIO-BASSA**  
**ARRIVO: 2-4 GIORNI**  
**DURATA: GIORNI**

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

✓ Rischio radiazioni per astronauti



# Effetti delle Tempeste Solari

**RADIAZIONE  
ELETTROMAGNETICA**  
ARRIVO: 8 MINUTI  
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV,  
ATTIVITA' RADIO

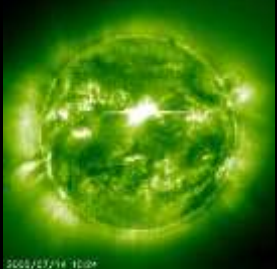
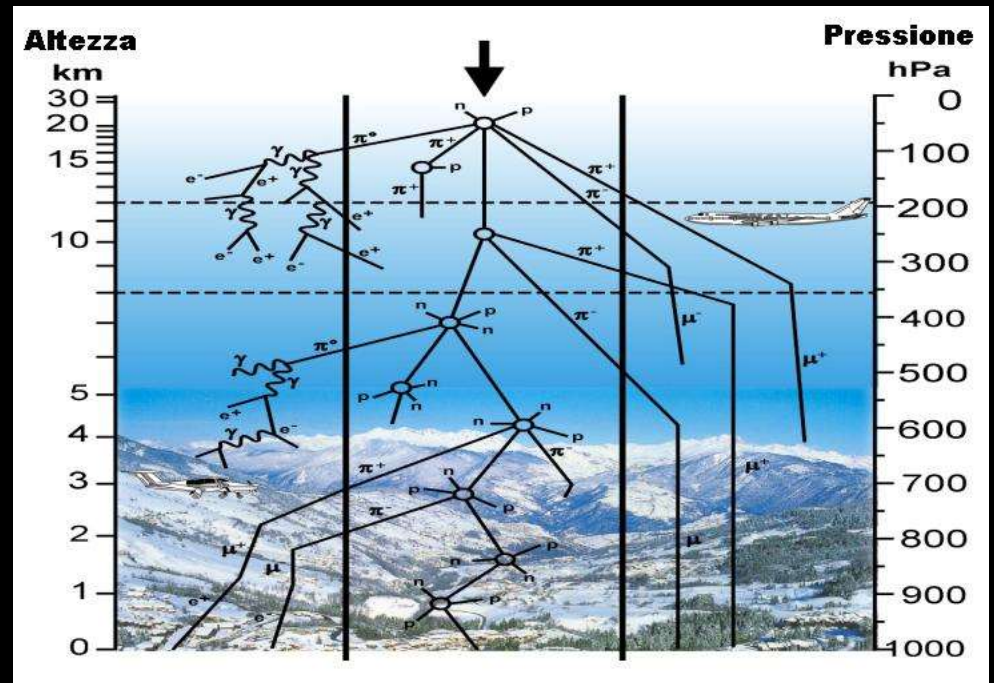
**PARTICELLE  
AD ALTA ENERGIA**  
ARRIVO: 15 MIN - ORE  
DURATA: GIORNI

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA  
MEDIO-BASSA**  
ARRIVO: 2-4 GIORNI  
DURATA: GIORNI

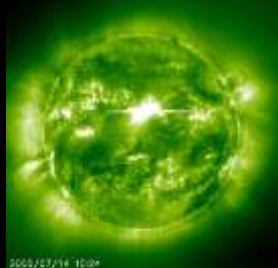
TEMPESTE GEOMAGNETICHE

✓ Radiazioni aerei ad alta quota



2005/03/14 10:04

# Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE  
ELETTROMAGNETICA**  
*ARRIVO: 8 MINUTI*  
*DURATA: 1-2 ORE*

RAGGI X, EUV,  
ATTIVITA' RADIO

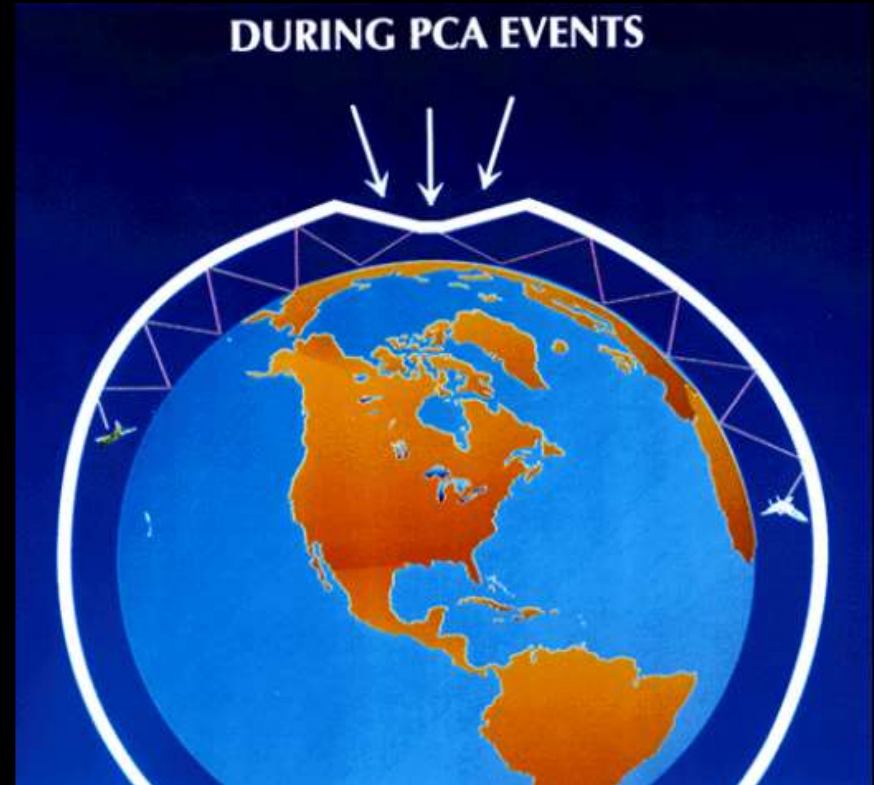
**PARTICELLE  
AD ALTA ENERGIA**  
*ARRIVO: 15 MIN - ORE*  
*DURATA: GIORNI*

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA  
MEDIO-BASSA**  
*ARRIVO: 2-4 GIORNI*  
*DURATA: GIORNI*

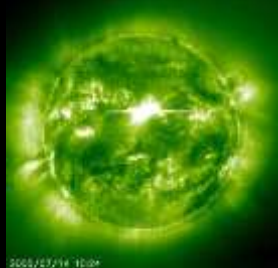
TEMPESTE GEOMAGNETICHE

✓ Interferenze segnali radio





# Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE  
ELETTROMAGNETICA**  
*ARRIVO: 8 MINUTI*  
*DURATA: 1-2 ORE*

RAGGI X, EUV,  
ATTIVITA' RADIO

**PARTICELLE  
AD ALTA ENERGIA**  
*ARRIVO: 15 MIN - ORE*  
*DURATA: GIORNI*

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA  
MEDIO-BASSA**  
*ARRIVO: 2-4 GIORNI*  
*DURATA: GIORNI*

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

✓ Correnti indotte sui sistemi di terra:

- corrosione reti oleodotti/gasdotti
- danneggiamento centrali elettriche



# Effetti delle Tempeste Solari



**RADIAZIONE  
ELETTROMAGNETICA**  
ARRIVO: 8 MINUTI  
DURATA: 1-2 ORE

RAGGI X, EUV,  
ATTIVITA' RADIO

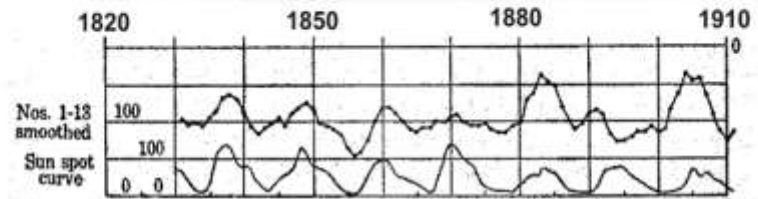
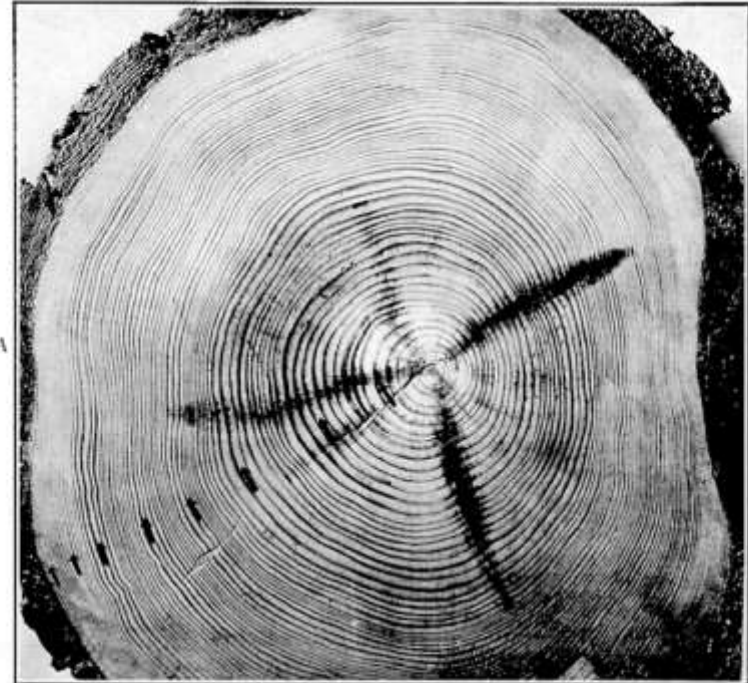
**PARTICELLE  
AD ALTA ENERGIA**  
ARRIVO: 15 MIN - ORE  
DURATA: GIORNI

EVENTI A PROTONI

**PARTICELLE AD ENERGIA  
MEDIO-BASSA**  
ARRIVO: 2-4 GIORNI  
DURATA: GIORNI

TEMPESTE GEOMAGNETICHE

## ✓ Variazioni climatiche



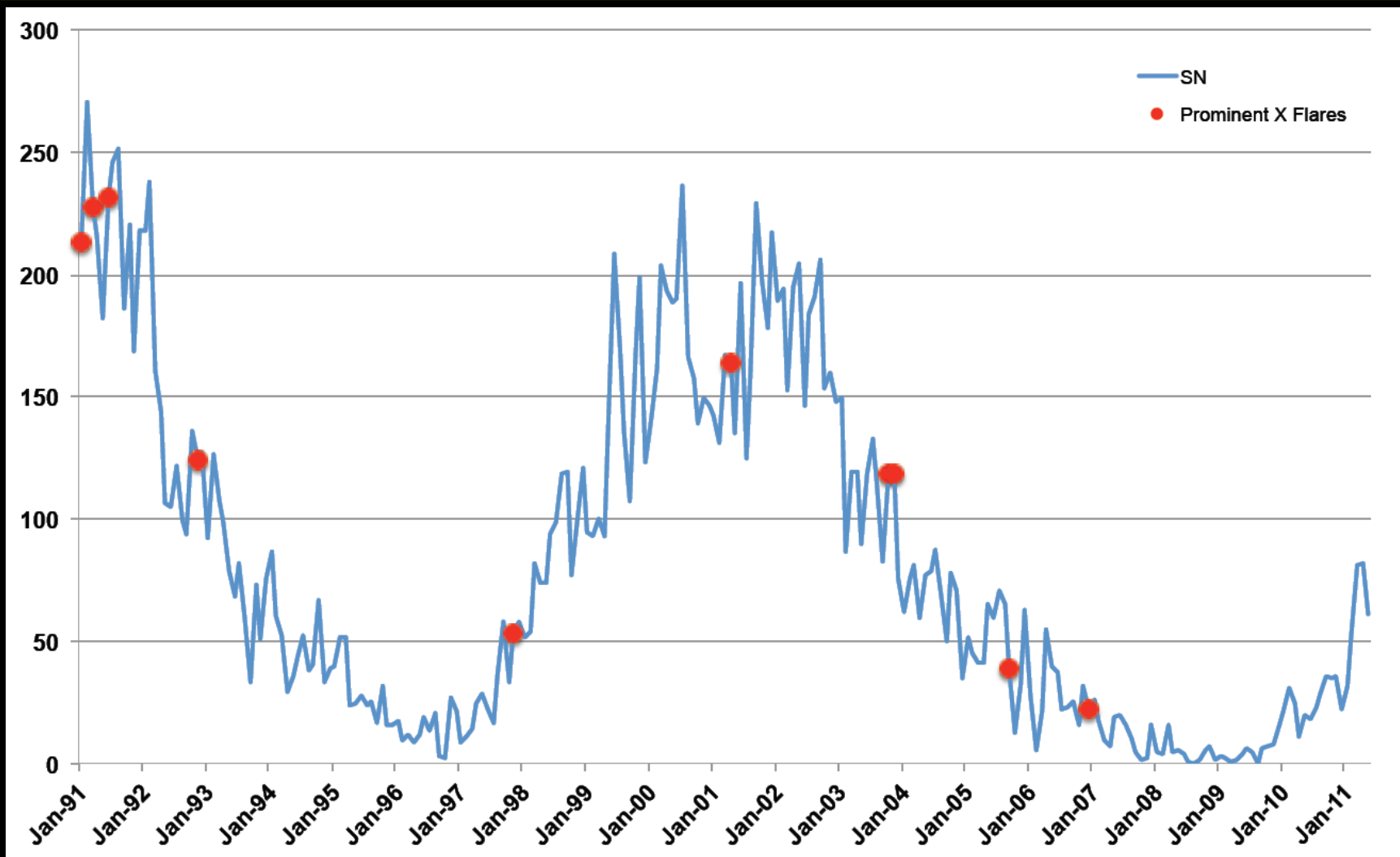
# Le Tempeste dell'ultimo secolo

---

Oltre all'evento di Carrington (1859), questi gli eventi principali degli ultimi 100 anni:

- **15-16 maggio 1921:** tempesta geomagnetica causa interruzioni servizi telegrafici su tutto il globo, incendi delle cabine, variazioni/danneggiamento segnaletica ferroviaria in tutta New York city
- **7 agosto 1972:** intenso rilascio di SEP giusto tra le missioni Apollo 16 e Apollo 17: se una missione fosse stata in corso sulla Luna la dose di esposizione sarebbe stata letale per gli astronauti (in 10 ore)
- **11 luglio 1979:** a causa dell'intensa attività solare, caduta inattesa di Skylab
- **13 marzo 1989:** tempesta geomagnetica causa danneggiamento di trasformatori in numerose centrali elettriche, blackout completo del Quebec per circa 9 ore lascia al buio 6 milioni di persone.
- **20 gennaio 1994:** tempesta geomagnetica disabilita 2 satelliti canadesi (Aniks E1, E2) ed un satellite internazionale (Intelsat K) per telecomunicazioni
- **7 gennaio 1997:** un CME colpisce la magnetosfera e causa la perdita del satellite per telecomunicazioni AT&T Telstar 401 (costo 200 M\$)
- **15 luglio 2000:** a seguito del "Bastille day event" è perso il satellite giapponese ASCA
- **21 aprile 2002:** la spacecraft giapponese Nozomi Mars Probe (diretta su Marte) è colpita da un evento SEP che la danneggia gravemente, la missione è abbandonata mesi dopo
- **31 ottobre 2003:** durante la Halloween storm registrati malfunzionamenti su 46 satelliti, satellite giapponese ADESO-2 danneggiato in modo permanente (costo 640 M\$); si rendono necessarie procedure di emergenza in diverse centrali nucleari canadesi e negli USA nord-orientali
- **5 aprile 2010:** il satellite per telecomunicazioni Galaxy-15 è perso e poi recuperato

# Supertempeste e ciclo solare



Le “super-tempeste” si possono verificare in qualunque fase del ciclo solare.



# Sempre colpa del Sole?

Dall'informazione alla disinformazione:

**10-11/06/2014:** avvengono 3 flares X → alcune news dell'11 parlano di *possibile tempesta geomagnetica* per il 13/06

**13/06/2014** (venerdì 13): malfunzionamento di «Wind-Italia» per ore su rete fissa e mobile → testata minore (Meteo Web) decide che la *causa è la tempesta solare prevista* per il 13 → notizia ripresa da decine di altre testate minori sul Web.

**Nessuna tempesta solare si verifica né il 13, né i giorni successivi → disinformazione!**



+



=



11/06/2014

13/06/2014

**“Corso di formazione di Astronomia e Astrofisica per docenti di scuola secondaria”**  
«Il Sole e l'attività solare» – A. Bemporad, INAF Osservatorio Astrofisico di Torino – 11/12/2019



---

# Sole e climatologia terrestre

# Sole e climatologia terrestre (1)

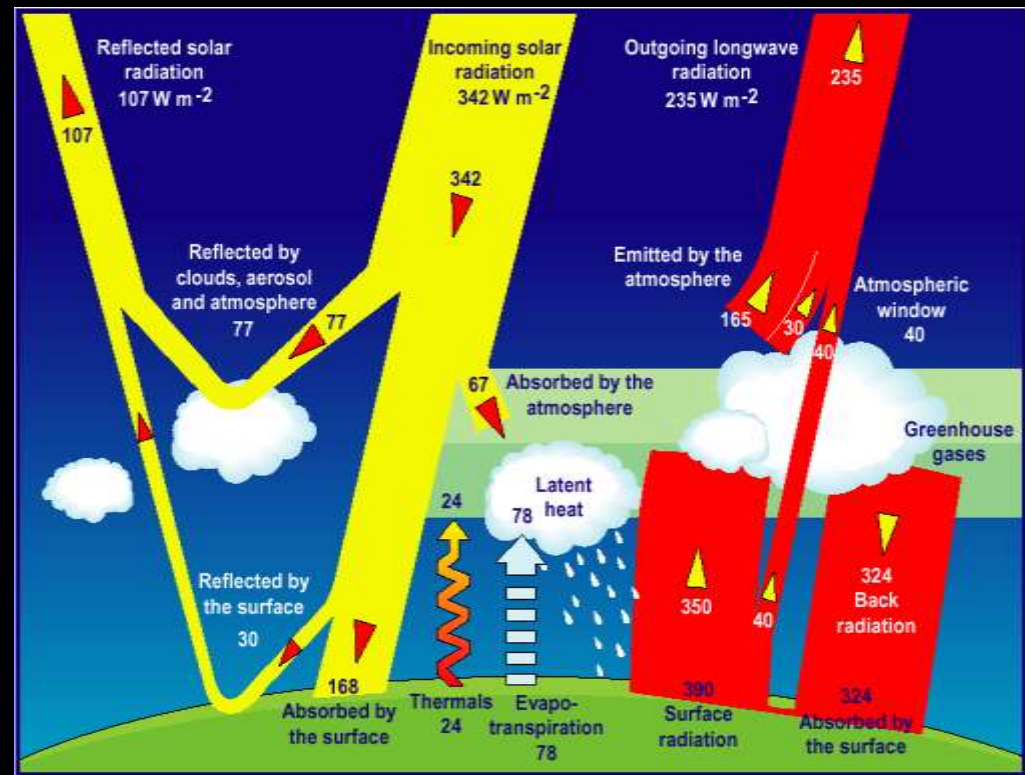
## • Effetti dell'atmosfera terrestre:

1. **Assorbimento raggi cosmici:** particelle ad alta energia (p+ e nuclei atomici) dal Sole e dallo spazio assorbite dall'alta atmosfera → protezione da radiazioni pericolose

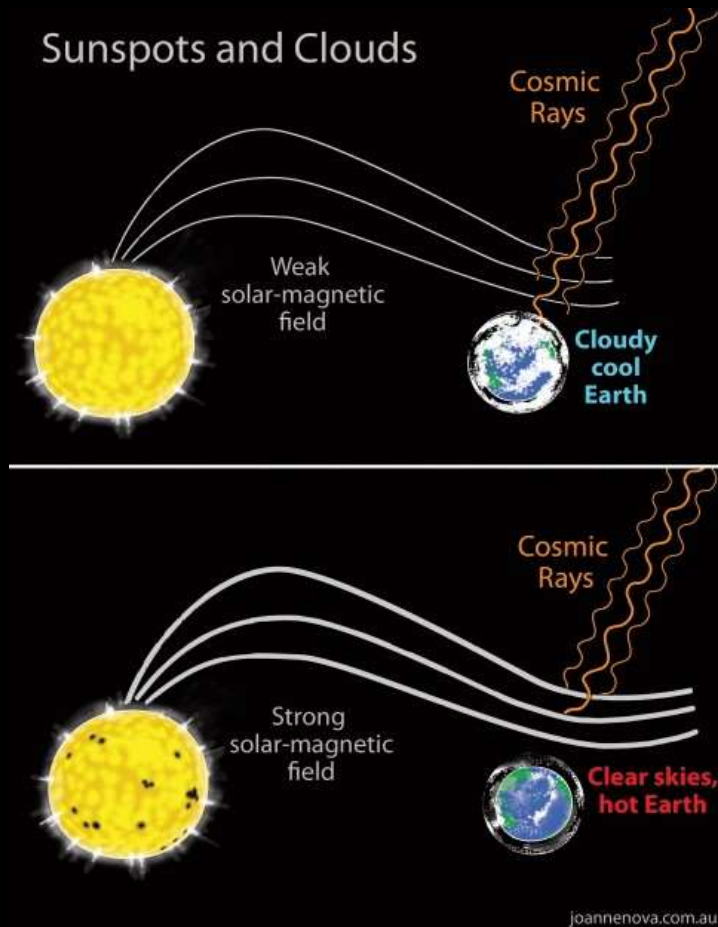
2. **Assorbimento radiazione EUV dal Sole:** grazie ad O molecolare (O<sub>2</sub>) ed ozono (O<sub>3</sub> distrutto dai Cloro-fluoro-Carburi) le radiazioni EUV sono in gran parte assorbite → protezione da radiazioni pericolose

3. **Assorbimento radiazione IR dalla Terra:** la Terra scaldata dal Sole riemette radiazione IR assorbita dall'atmosfera grazie a H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> → effetto serra «buono», in assenza di atmosfera la T media di equilibrio terrestre sarebbe -18°C invece di 16°C

• **Variabilità solare:** la quantità di luce emessa dal Sole varia dello 0.15%, ma variazioni 10 volte maggiori nell'UV. L'attività solare modula il flusso di raggi cosmici.



# Sole e climatologia terrestre (2)



- **Nuvole**

Assorbimento e riflessione della luce solare → *raffreddamento globale*, forse tasso di formazione delle nubi legato al flusso di raggi cosmici a sua volta modulato dal ciclo solare

- **Particolato atmosferico** (grani ~nm– $\mu$ m):

1. Riflessione della luce solare ed aumento formazione delle nubi → *raffreddamento globale*
2. Diminuzione della capacità di riflessione dei ghiacci polari → aumento H<sub>2</sub>O → *riscaldamento globale*

- **Albedo planetaria** (ossia quanta luce assorbe/riflette il suolo):

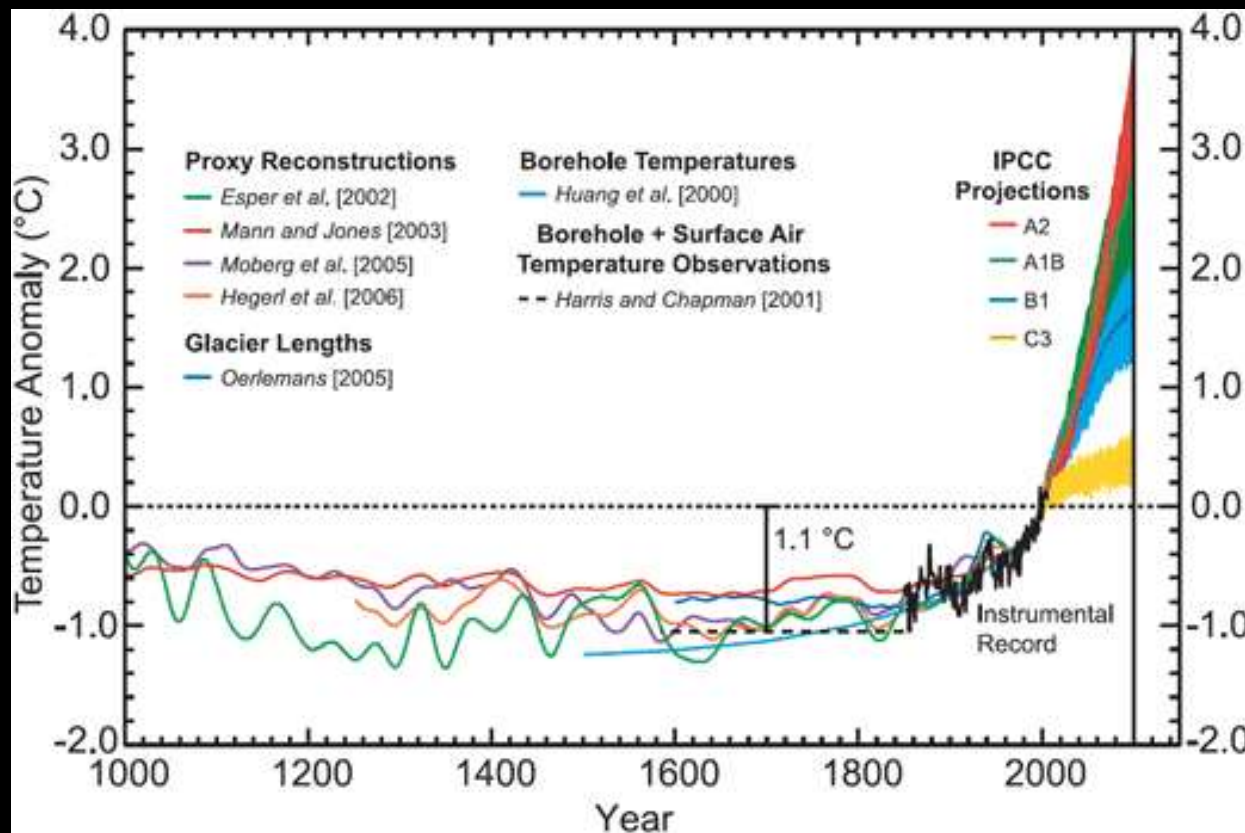
1. Oceani hanno albedo ~ a quella dell'asfalto → fusione ghiacci oceanici → aumento albedo → *riscaldamento globale*
2. Deforestazione → aumento albedo → *riscaldamento globale*

- **Altri fattori:** parametri orbitali della Terra, vulcanesimo, chimica atmosfera, etc...



# Sole e riscaldamento globale

Comprensione di tutti i fenomeni è molto complessa →



*Evoluzione climatica da misure e ricostruzioni a partire dal 1000 d.C. fino ad oggi e possibili previsioni per il futuro se avessimo fermato l'inquinamento nel 2000 (giallo) oppure no (altri colori per modelli diversi).*

## **Intergovernmental Panel on Climate Change**

(Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico, IPCC) è il foro scientifico formato nel 1988 dalle Nazioni Unite, allo scopo di studiare il riscaldamento globale.

**Cinque** rapporti di valutazione pubblicati → anche considerando tutti gli effetti di origini naturali ed umane, le **attività umane restano le principali responsabili** del riscaldamento globale degli ultimi 40 anni. Il Sole direttamente responsabile per un aumento solo di  $\sim 0.1^\circ\text{C}$ .

# Sole e Terra: alcune "big questions"

---

- **RISCALDAMENTO CORONALE**

Molti fenomeni possibili per spiegare sia le alte temperature coronali, sia l'accelerazione del vento solare → non sappiamo quale fenomeno domini → limitata comprensione fisica del plasma

- **CICLO SOLARE**

Conoscenza limitata dei moti di plasma all'interno del sole → limitata comprensione della dinamo solare → incapacità previsione del ciclo solare

- **ATTIVITA' SOLARE**

Conoscenza limitata dei processi fisici alla base delle eruzioni solari → limitata comprensione delle loro cause → incapacità previsioni eruzioni solari

- **METEOROLOGIA SPAZIALE**

Conoscenza limitata delle interazioni tra tempeste solari e magnetosfera terrestre → limitata comprensione cause tempeste geomagnetiche → incapacità previsioni di meteorologia spaziale

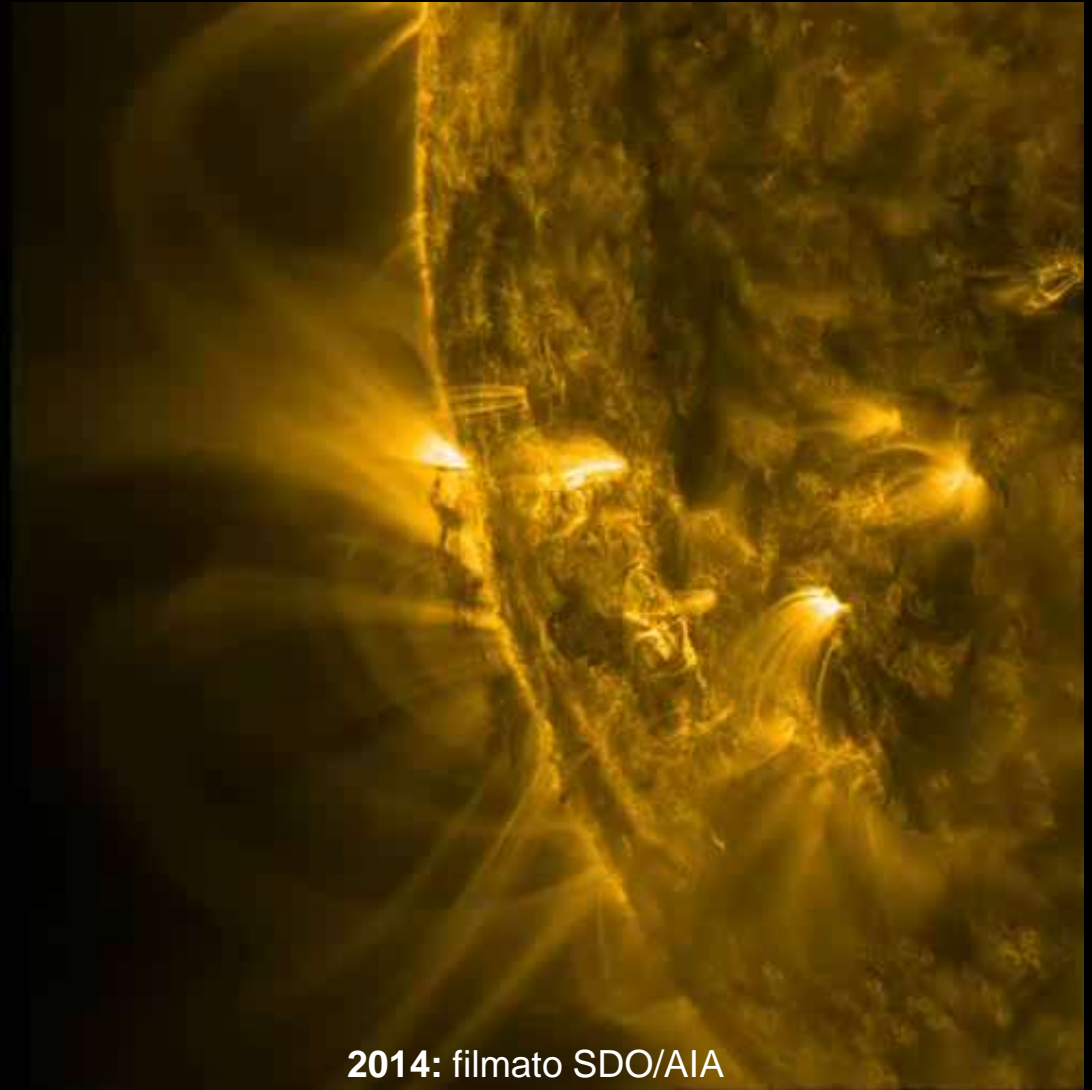
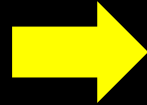
- **CLIMATOLOGIA TERRESTRE**

Comprensione non completa delle complesse sequenze causa-effetto che a partire dal Sole generano il clima sulla Terra → incapacità previsioni climatologiche

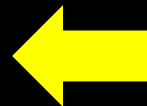
# Sfide delle future osservazioni



1960: prima immagine X del Sole (satellite Solrad I)



2014: filmato SDO/AIA



---

# La missione Solar Orbiter



# La missione Solar Orbiter dell'ESA

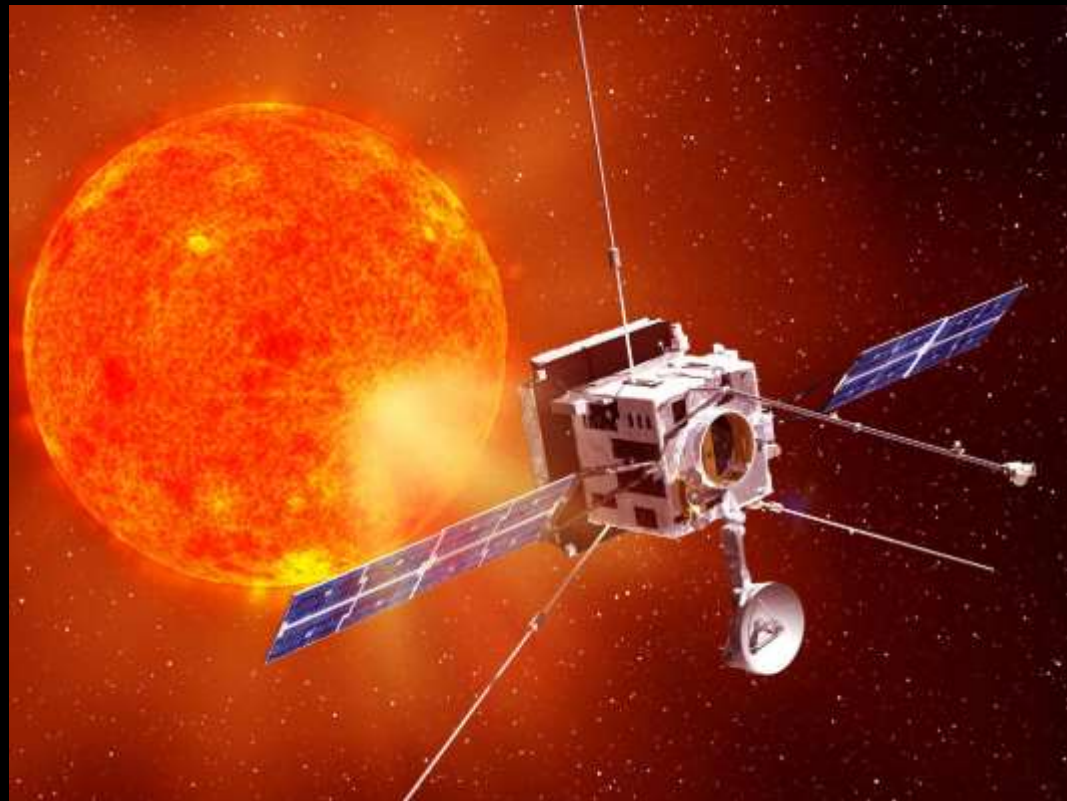
## SOLAR ORBITER

Missione dell' **Agenzia Spaziale Europea (ESA)** con partecipazione dell' **Agenzia Americana (NASA)**.

**Lancio: ottobre 2018** dalla base di Cape Canaveral - Florida

**Orbita:** ellittica tale da

- osservare per la **prima volta il Sole da vicino** (0.28 AU quasi 1/4 della distanza Terra-Sole → mai nessun satellite così vicino al Sole)
- osservare per la **prima volta i poli del Sole** (fino a  $34^\circ$  fuori dal piano dell'eclittica)



# La missione Solar Orbiter

---



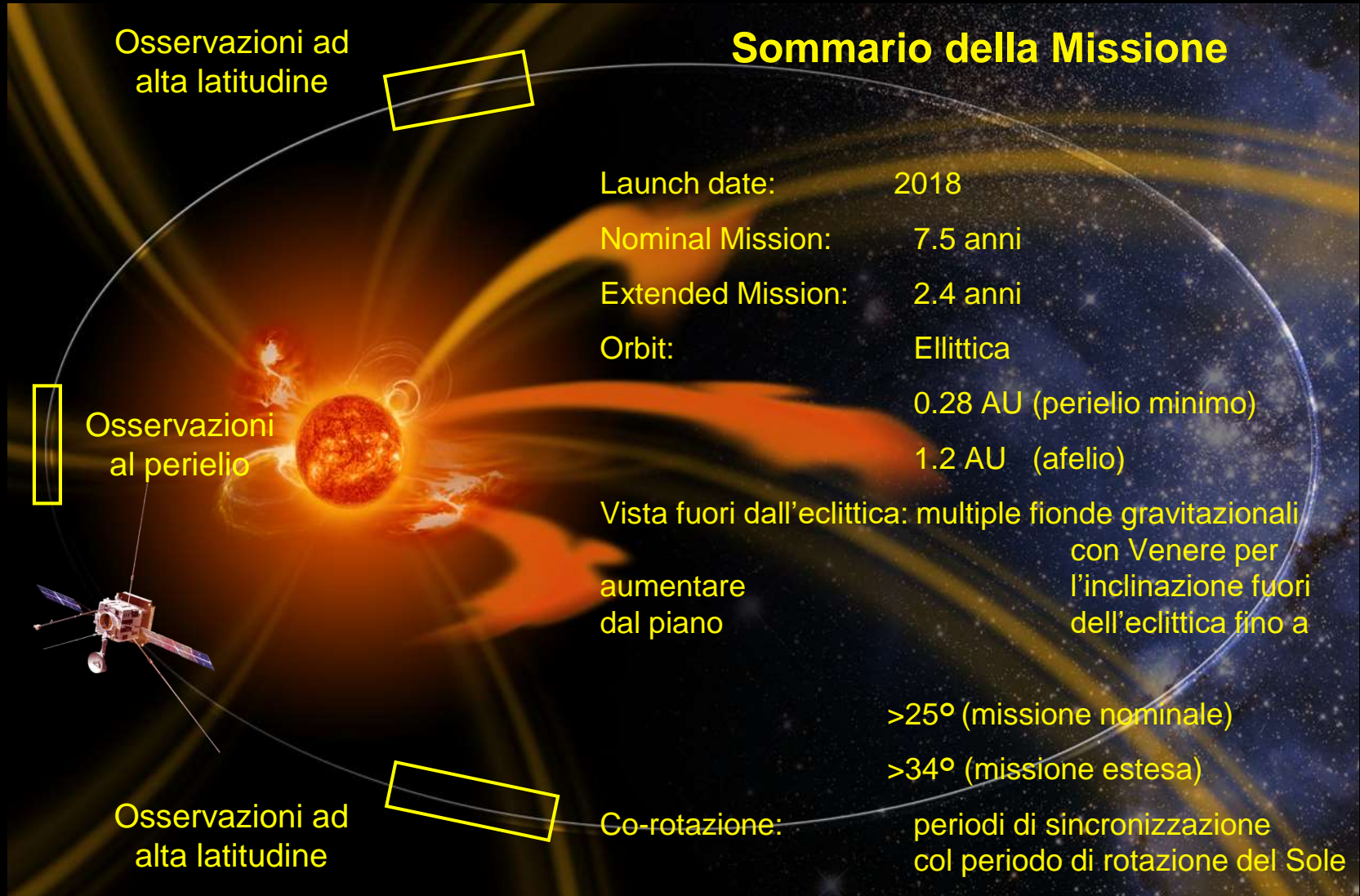
---

**“Corso di formazione di Astronomia e Astrofisica per docenti di scuola secondaria”**  
«Il Sole e l'attività solare» – A. Bemporad, INAF Osservatorio Astrofisico di Torino – 11/12/2019





# La missione Solar Orbiter



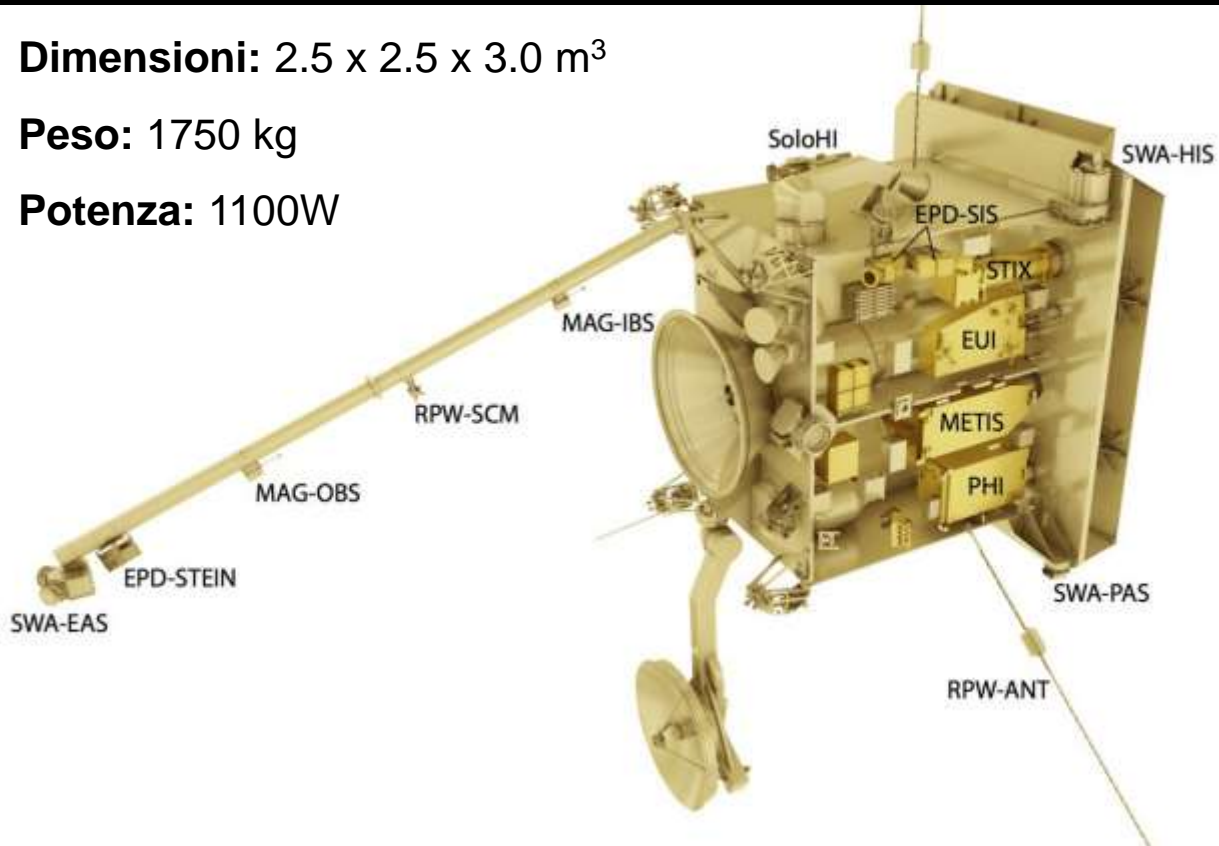
# La missione Solar Orbiter

I 10 strumenti a bordo di Solar Orbiter (nel rendering una parte del satellite è stata rimossa per mostrare gli strumenti montati all'interno, uno strumento SPICE non è visibile perchè montato dietro).

Dimensioni: 2.5 x 2.5 x 3.0 m<sup>3</sup>

Peso: 1750 kg

Potenza: 1100W



Due tipi di strumenti:

**REMOTE SENSING**  
per studiare il Sole da «lontano», ossia catturando la luce emessa a diverse lunghezze d'onda

**IN SITU** per misurare localmente le particelle del vento solare ed i campi magnetici nello attorno al satellite



# Gli strumenti a bordo di Solar Orbiter

## STRUMENTI IN SITU

<b>SWA</b>	Solar wind analyser	Chris Owen, UK	Sampling protons, electrons and heavy ions in the solar wind
<b>EPD</b>	Energetic particle detector	Javier Rodriguez-Pacheco, Spain	Measuring timing and distribution functions of accelerated energetic particles
<b>MAG</b>	Magnetometer	Tim Horbury, UK	High-precision measurements of the heliospheric magnetic field
<b>RPW</b>	Radio and plasma wave analyser	Milan Maksimovic, France	Studying local electromagnetic and electrostatic waves and solar radio bursts

## STRUMENTI REMOTE SENSING

<b>PHI</b>	Polarimetric and heliospheric imager	Sami Solanki, Germany	Full-disc and high-resolution visible light imaging of the Sun
<b>EUI</b>	Extreme ultraviolet imager	Pierre Rochus, Belgium	Studying fine-scale processes and large-scale eruptions
<b>STIX</b>	Spectrometer/telescope for X-rays	Arnold Benz, Switzerland	Studying hot plasmas and accelerated electrons
<b>METIS</b>	Multi-element telescope for imaging and spectroscopy	Ester Antonucci, Italy	High-resolution UV and extreme UV coronagraphy
<b>SoloHI</b>	Solar Orbiter heliospheric imager	Russ Howard, US	Observing light scattered by the solar wind over a wide field of view
<b>SPICE</b>	Spectral imaging of the coronal environment	Andrzej Fludra, UK	Spectroscopy on the solar disc and corona

# Torino sul Solar Orbiter: METIS

*Consortio Internazionale sotto la responsabilità di  
INAF – OATo; Principale Agenzia finanziatrice: ASI*



Principal Investigator: E. Antonucci, INAF-OATo, Turin  
Experiment Scientist: S. Fineschi, INAF –OATo, Turin  
Experiment Manager: G. Naletto, University of Padua  
Instrument Scientist: M. Romoli, University of Florence  
Science Team Coordinator: Daniele Spadaro, INAF-OACt

## ISTITUTI ITALIANI

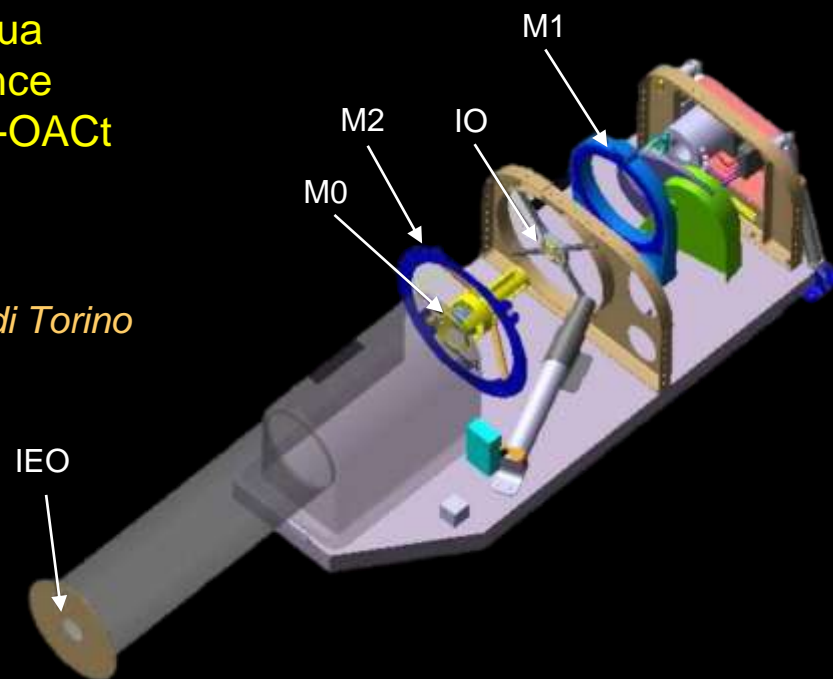
*INAF OAC, OACt, OARm, OAPa, OATo, OATs, IFSI-Rm  
Università di Firenze, Padova, Pavia, Catania, Politecnico di Torino*

## INDUSTRIE ITALIANE

*Thales-Alenia, SELEX Galileo, ALTEC, AMDL, AIEM*

## ISTITUTI EUROPEI

*Max Planck Institut (MPS) Lindau, Germany  
Astronomical Institute of the Czech Academy  
of Science (ASU-CAS), Czech Republic  
Institute d'Astrophysique Spatiale (IAS), F  
Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, F  
Naval Research Laboratory (NRL), US  
University of Athens, Gr*



3D drawing of the METIS structure, with emphasis on the main elements of the occulting system. IEO: Inverted external occulter. M0, M1, M2: Mirrors. IO: Internal occulter.

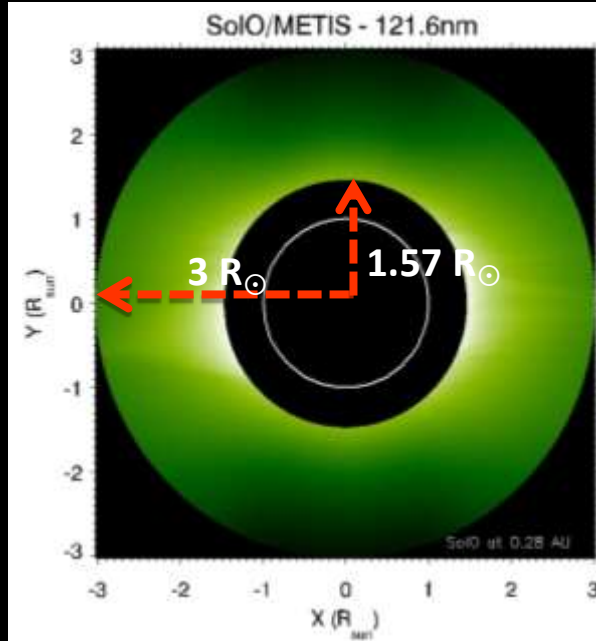
**“Corso di formazione di Astronomia e Astrofisica per docenti di scuola secondaria”**

«Il Sole e l'attività solare» – A. Bemporad, INAF Osservatorio Astrofisico di Torino – 11/12/2019

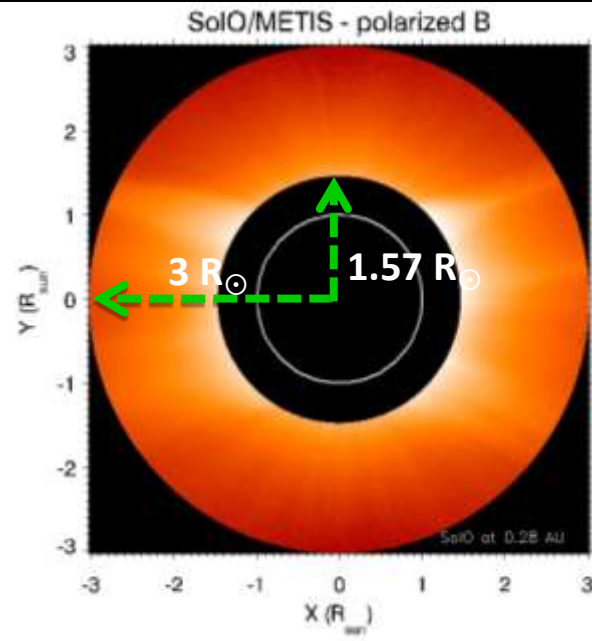


# Lo strumento METIS

(luce ultravioletta)



(luce visibile)

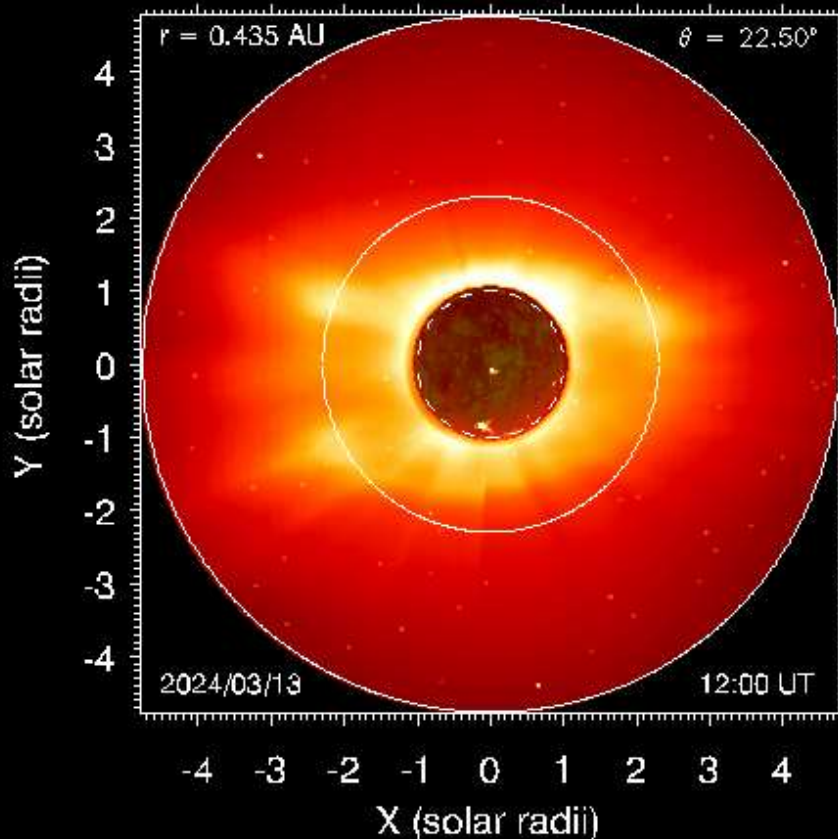


**METIS** è il primo coronografo **multi-channel** → osserverà per la prima volta contemporaneamente la corona solare in due diverse lunghezze d'onda: nella **luce visibile** (590-650 nm) e nell'**UV** (121 nm).

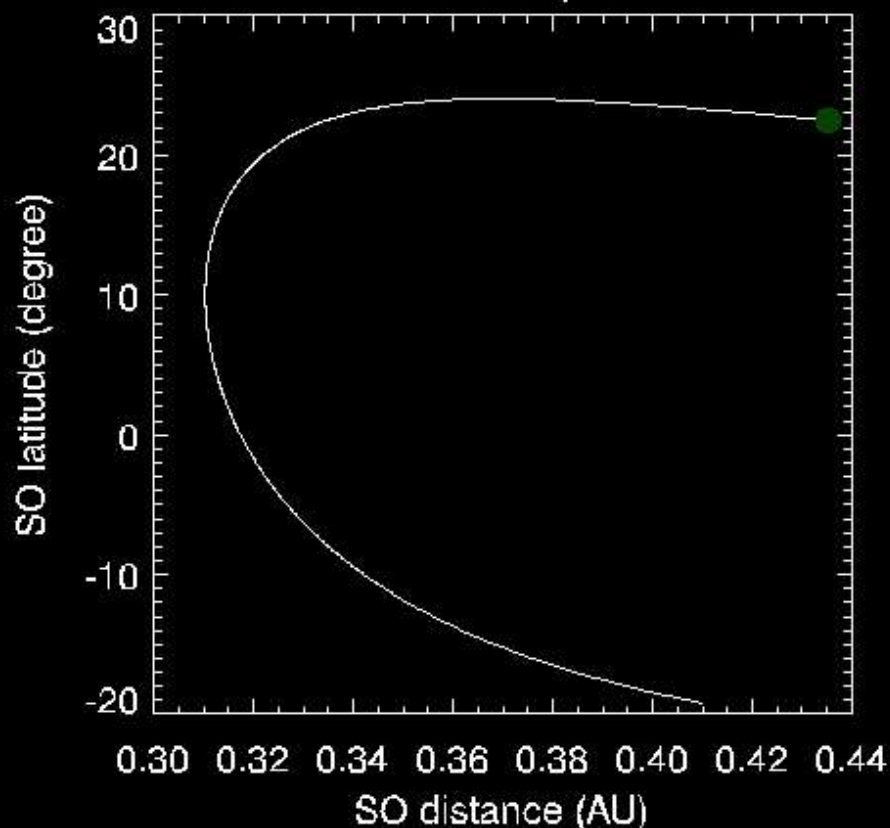
Le strutture della corona saranno osservate con una risoluzione di 20"/pixel (~ 4.000 km/pixel a 0.28 AU)

# Osservazioni simulate di METIS

Solar Orbiter/METIS



Solar Orbiter position





# Osservatorio di Torino: altri progetti

**ESA-NASA/SOHO mission**  
*UVCS spectrometer*  
1996 - 2012

**ESA-NASA/Solar Orbiter mission**  
*METIS coronagraph*  
launch in 2018

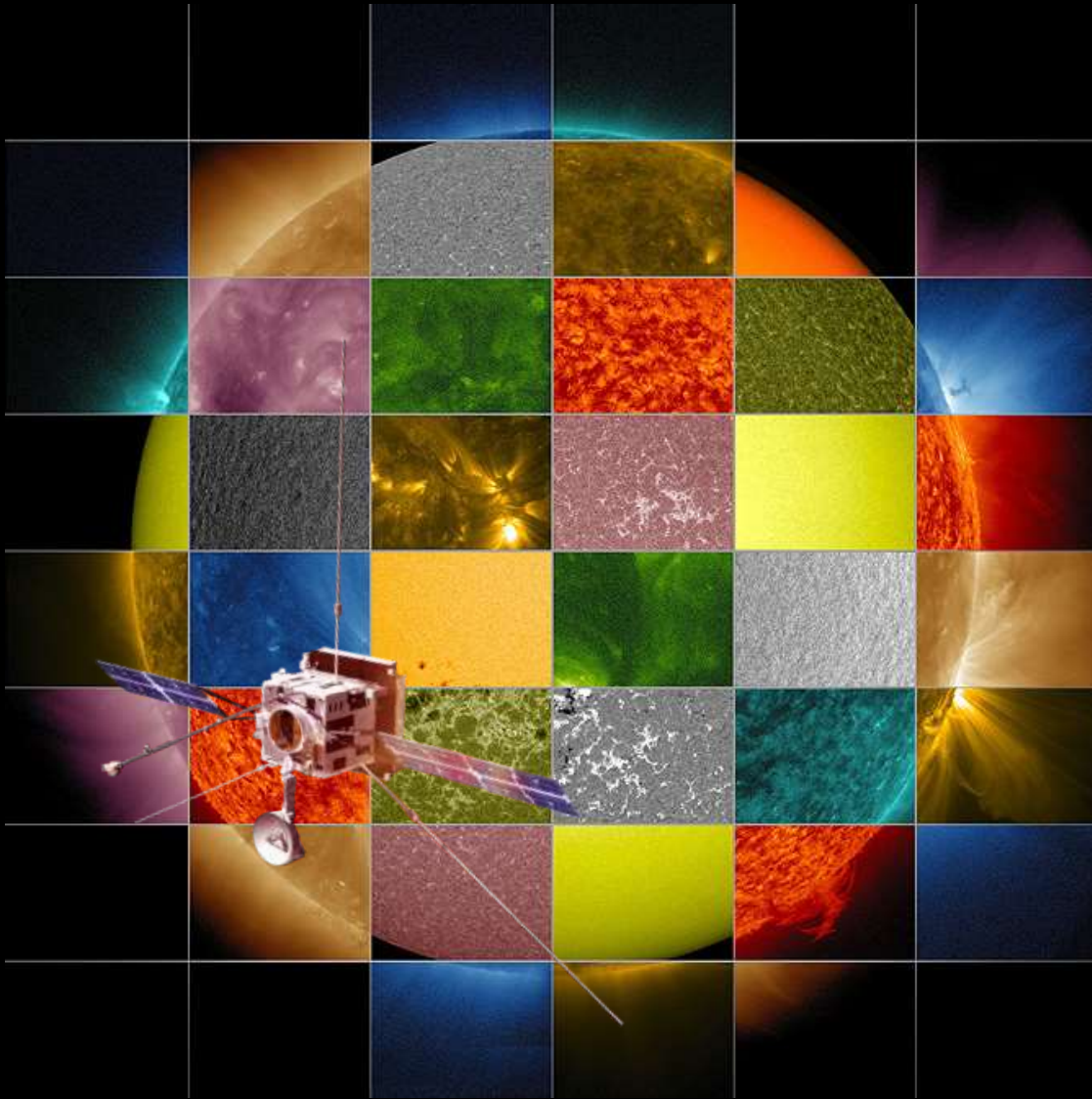
**Eclipse observations**  
*CorMag coronagraph*  
2006, 2010, 2017

**ESA/PROBA3 mission**  
*ASPIICS coronagraph*  
launch in 2019

**NASA/HERSCHEL rocket**  
*SCORE coronagraph*  
2009 and 2016

A. Bemporad

# Conclusioni



- Lo studio del Sole è molto importante: è la **nostra stella!**
- Il Sole ha una **struttura molto complessa** dominata da intensi campi magnetici.
- Molti fenomeni dell'attività solare (brillamenti, protuberanze, vento solare, etc...) che hanno **effetti diretti sulla Terra** (non solo aurore...) sono ancora **non del tutto compresi**.
- A causa dell'atmosfera terrestre, molti di questi fenomeni sono **osservabili solo dallo spazio**

La **particolare orbita** della sonda **SOLAR ORBITER** ed il set unico di strumenti a bordo (tra cui lo **strumento italiano METIS**) permetteranno di **rivoluzionare il campo della fisica solare!**

---

# Grazie!