

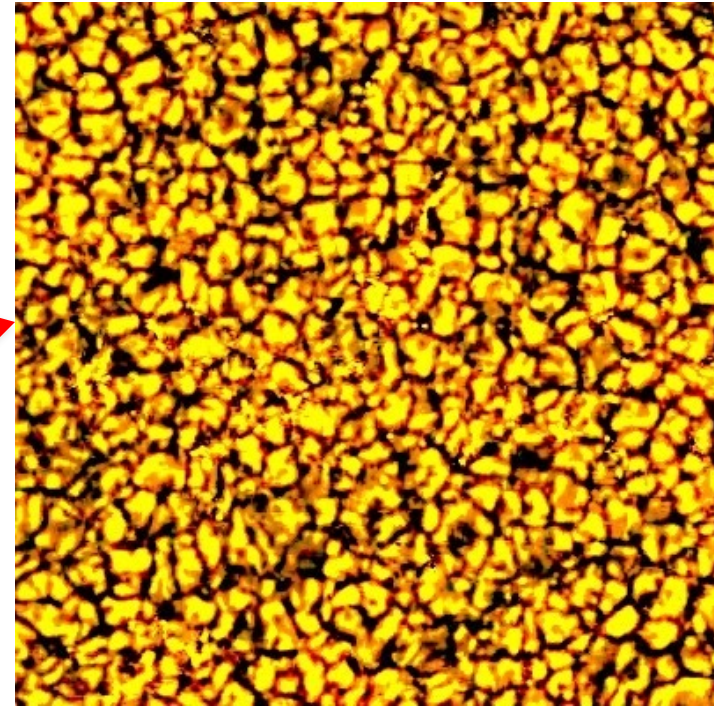
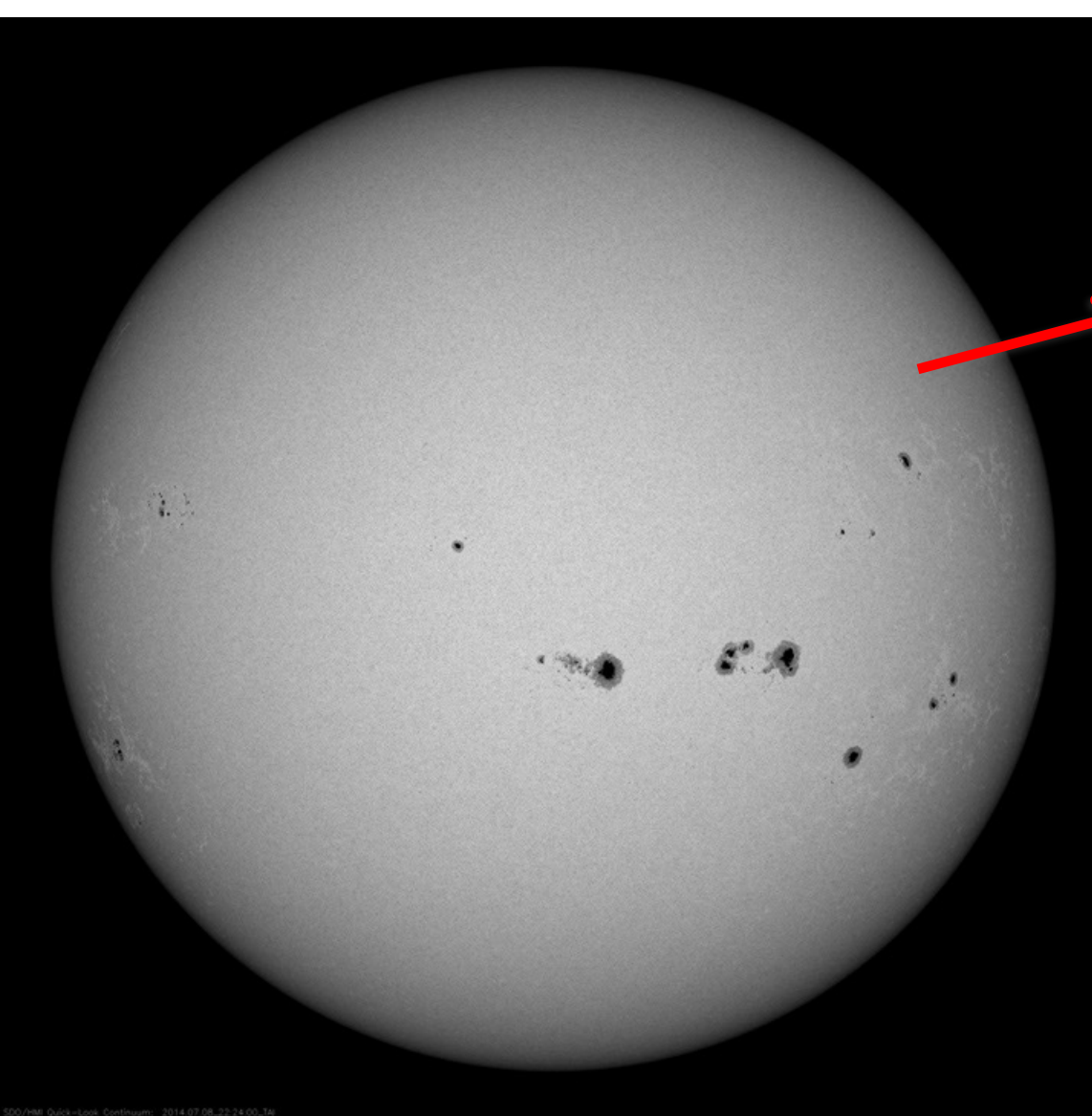
# Il Sole

Dott.ssa Silvia Perri

Dipartimento di Fisica, Università della Calabria

[silvia.perri@fis.unical.it](mailto:silvia.perri@fis.unical.it)

# La fotosfera

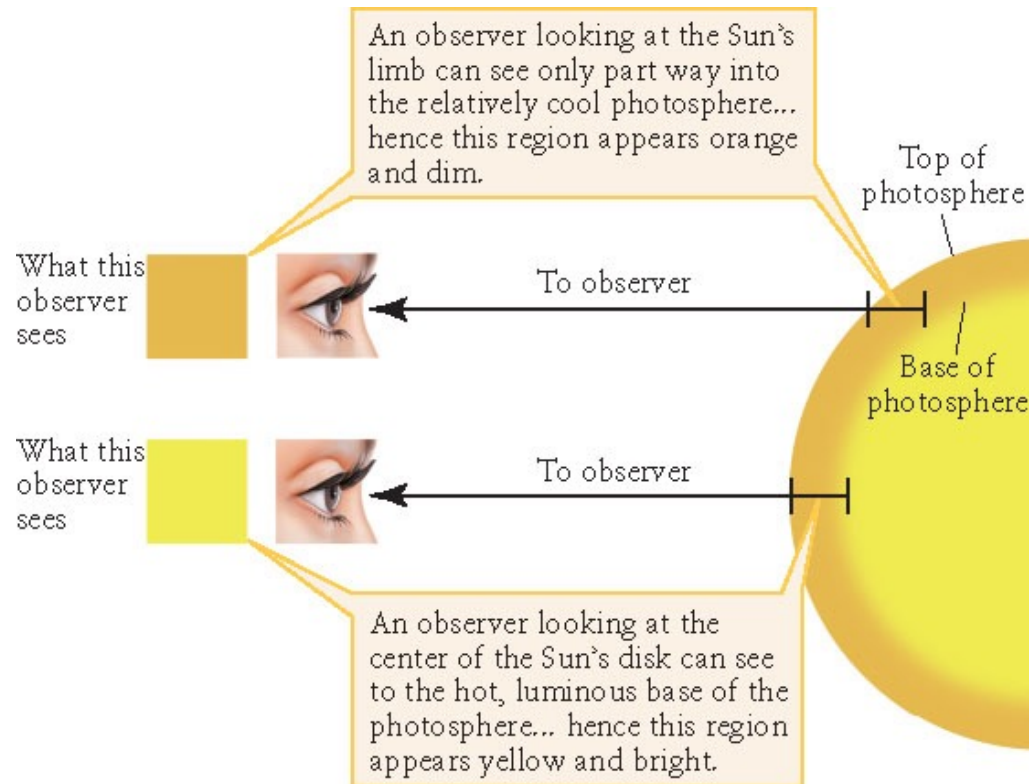


I bordi sono più scuri del centro  
(*limb darkening*)

Granulazione dovuta ai moti  
convettivi

Macchie solari

# Limb darkening (Oscuramento al bordo)



La temperatura efficace cambia dal centro ai bordi

Spostandoci dal centro ai bordi, si guarda a strati di gas meno denso e a fotoni provenienti da strati più caldi (al centro) e meno caldi (ai bordi).

$$dI_\lambda = -\kappa_\lambda \rho I_\lambda ds$$

Intensità di un raggio di luce ad una data lunghezza d'onda

Coefficiente di assorbimento  
(opacità)

Consideriamo l'intensità finale di un raggio luminoso emesso a  $s=0$  con intensità  $I_{\lambda,0}$  dopo aver percorso un tratto  $s$  in un gas a densità e opacità costanti

$$\int_{I_{\lambda,0}}^{I_{\lambda,f}} \frac{dI_\lambda}{I_\lambda} = - \int_0^s \kappa_\lambda \rho ds$$

$$d\tau_\lambda = -\kappa_\lambda \rho ds$$

$$\Delta\tau_\lambda = \tau_{\lambda,f} - \tau_{\lambda,0} = - \int_0^s \kappa_\lambda \rho ds$$

$$I_\lambda = I_{\lambda,0} e^{-\int_0^s \kappa_\lambda \rho ds},$$

Definiamo  $\tau=0$  al limite esterno della struttura (superficie della stella)

$$I_\lambda = I_{\lambda,0} e^{-\kappa_\lambda \rho s}$$

$$0 - \tau_{\lambda,0} = - \int_0^s \kappa_\lambda \rho ds$$

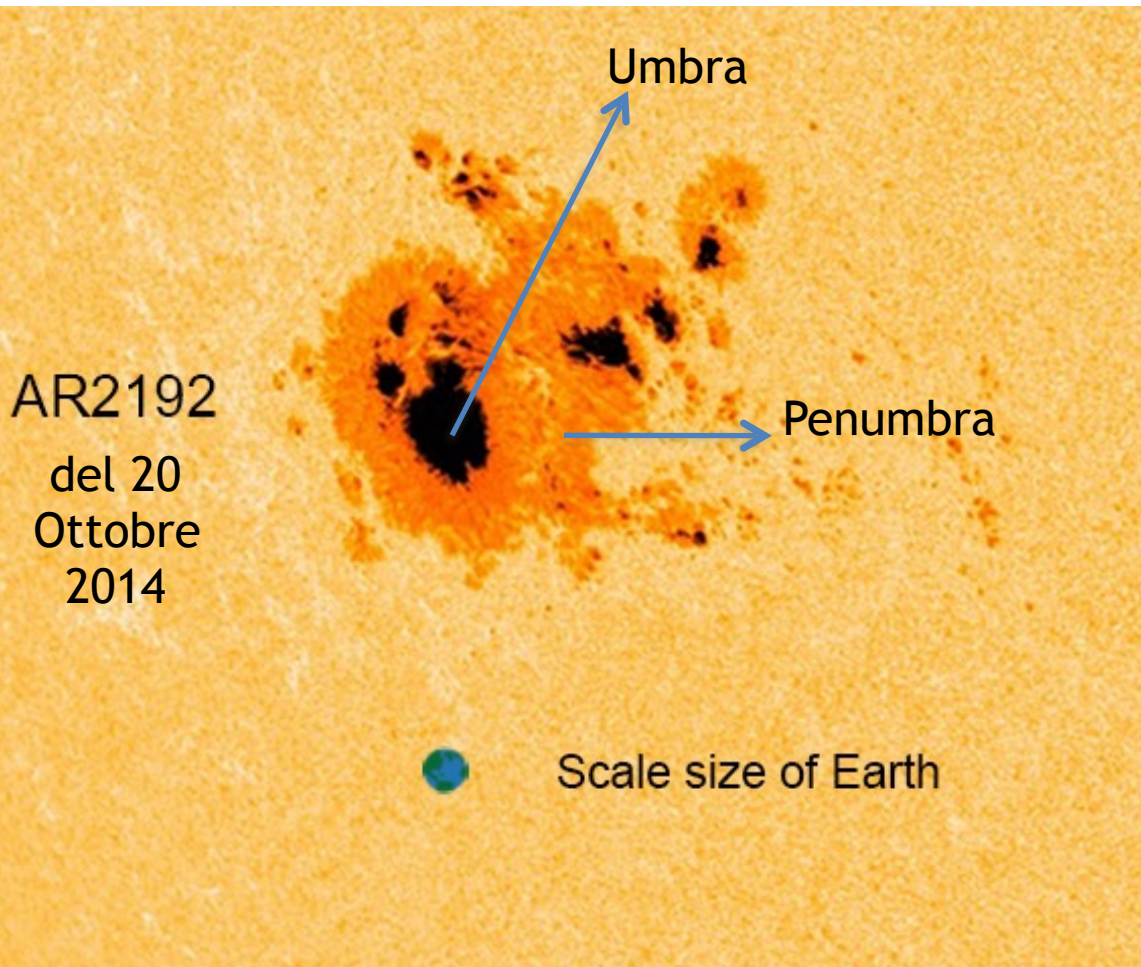
$$\tau_\lambda = \int_0^s \kappa_\lambda \rho ds.$$

**Profondità ottica**

La profondità ottica è la probabilità di un fotone di subire un'interazione prima di sfuggire dalla struttura. Quando  $\tau_\lambda=1$  l'intensità diminuisce di  $1/e$ . E' legata alla profondità geometrica.



# Macchie solari



In genere le macchie solari emergono a coppie

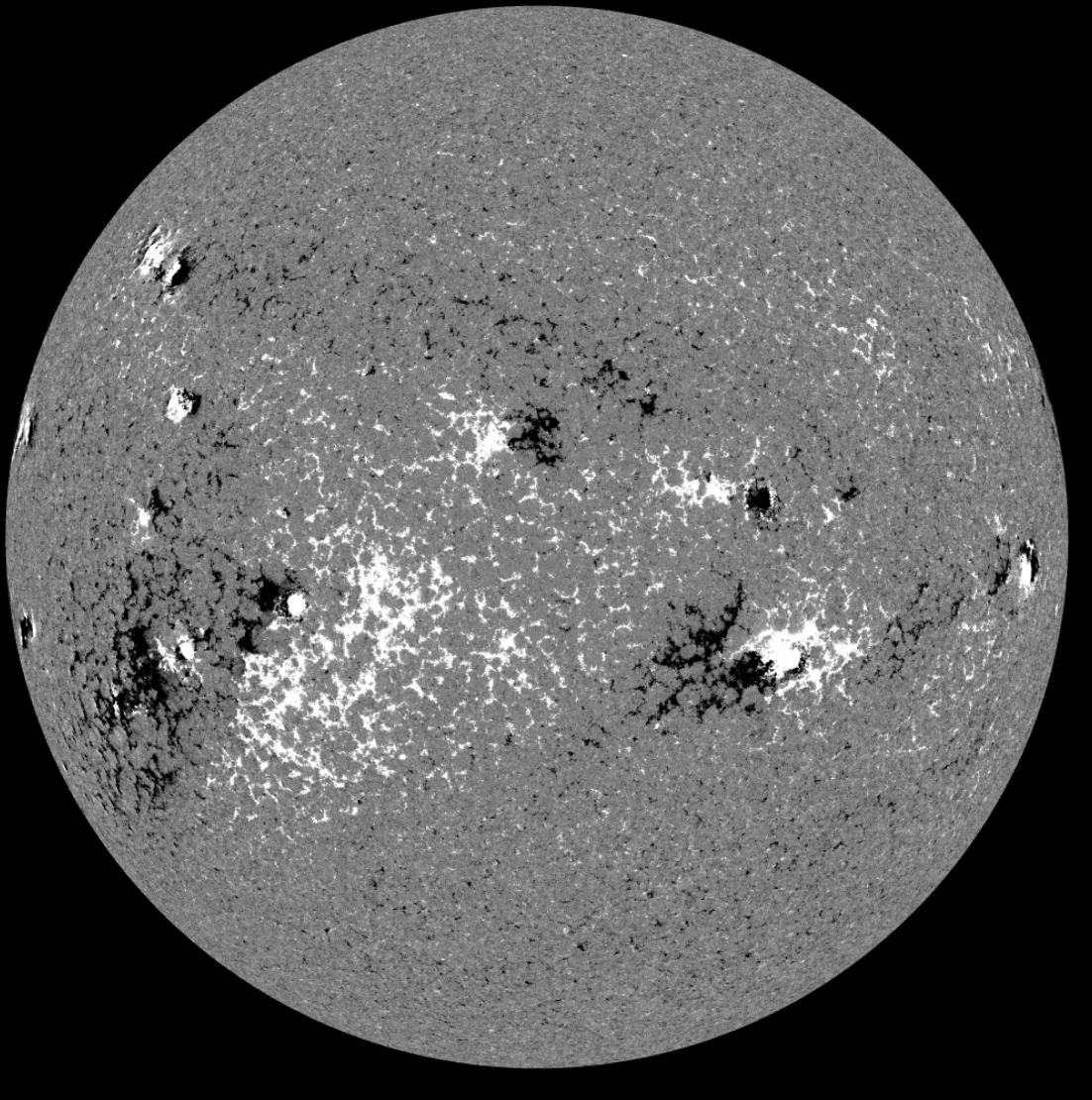
Sono delle strutture nella fotosfera più fredde (temperatura al centro della macchia  $4000\text{ }^{\circ}\text{K}$ )

Generalmente sono osservabili per alcune settimane

Regioni con un campo magnetico più intenso

L'intenso campo magnetico sopprime la convezione, portando ad una riduzione dell'energia trasportata in fotosfera.

Questo risulta in regioni più fredde rispetto al resto

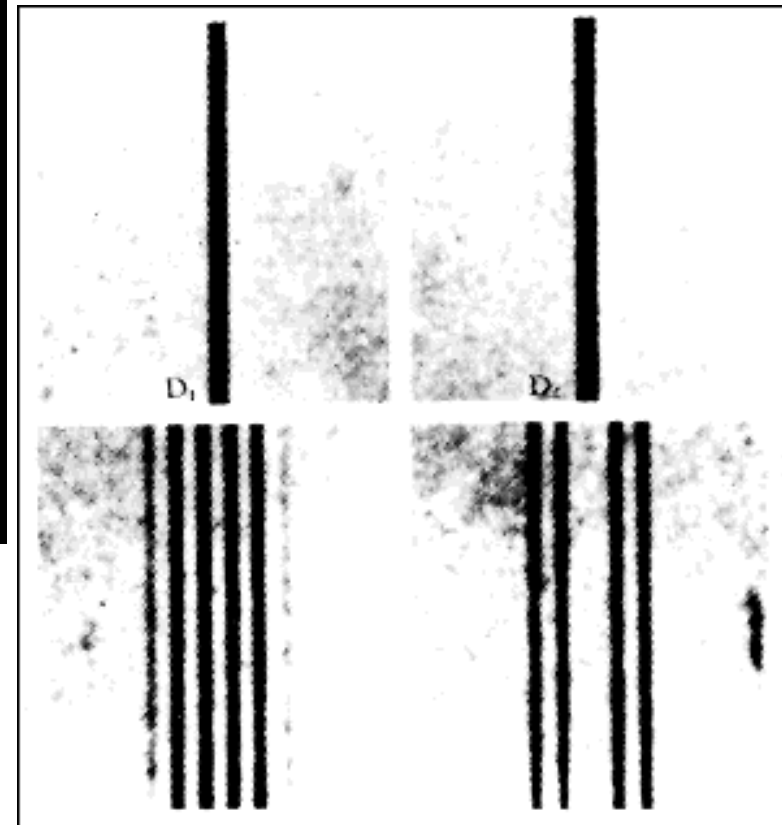


**Magnetogrammi del Sole:**  
mappe del campo  
magnetico.

Le coppie di macchie  
hanno polarità opposta.

$B \cong 1-3 \times 10^3$  Gauss misurabile tramite l'effetto  
Zeeman

Nelle zone non attive  $B$  vale  $\sim 100 - 200$  Gauss



# Cromosfera

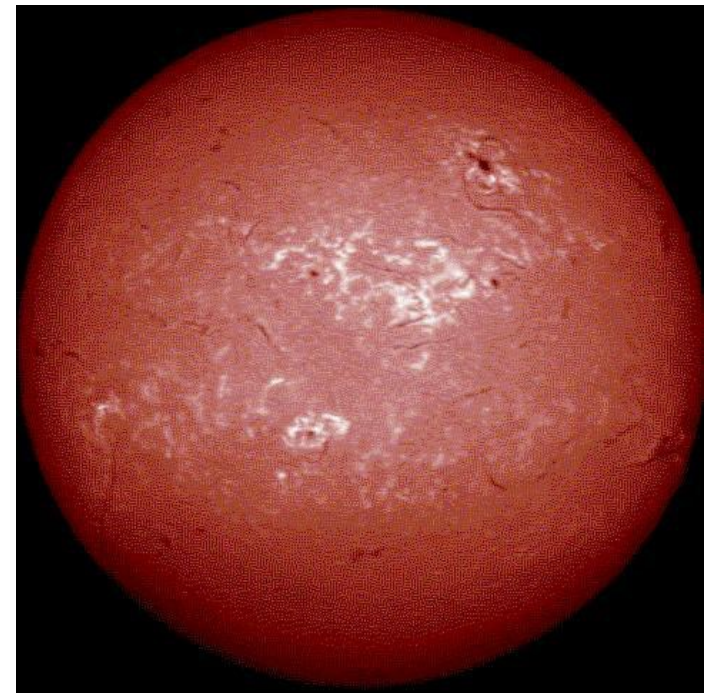


Sottile strato dell'atmosfera solare ben visibile durante un'eclisse totale.

Si estende per circa 10.000 km al di sopra della fotosfera

La densità è molto bassa ( $10^{-4}$  volte la densità in fotosfera) e la temperatura decresce fino a circa 3800 °K

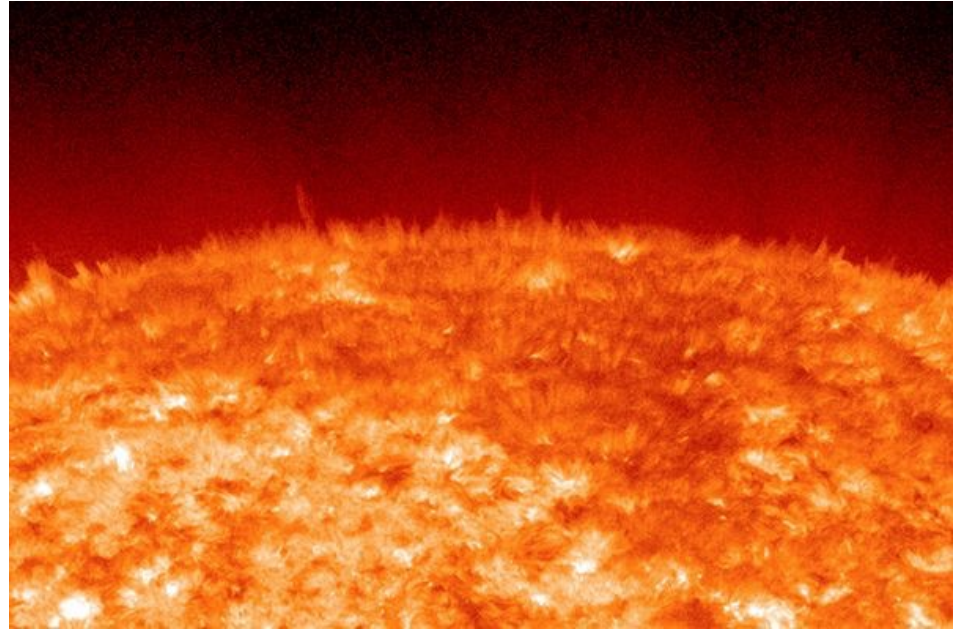
Lo spettro è costituito da molte linee di emissione  
La più intensa è quella dell'idrogeno  $H_{\alpha}$  che corrisponde alla transizione dal livello atomico  $n=3$  ad  $n=2$





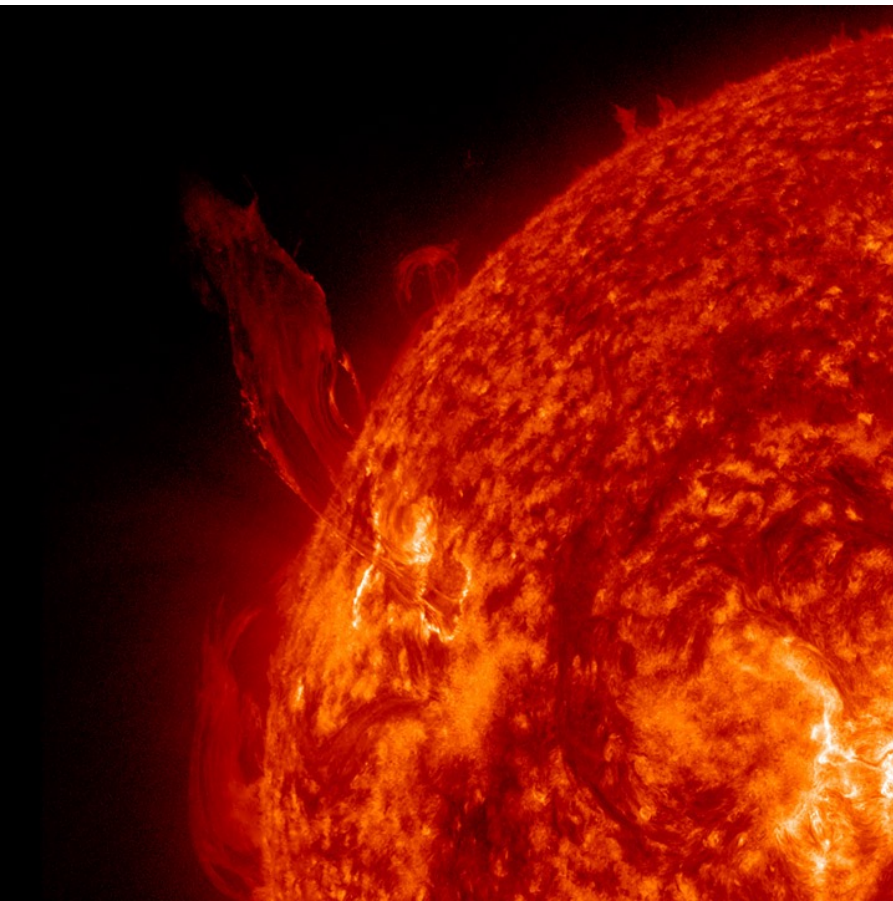
# Strutture dinamiche in cromosfera

Spicole: getti di plasma di diametro di circa 1000 km che si propagano a velocità di 20-50 km/s. Durano pochi minuti.



Protuberanze: getti di plasma molto luminosi che si estendono dalla cromosfera a gli strati più alti dell'atmosfera solare. Possono persistere per alcune settimane. L'equilibrio è dovuto a

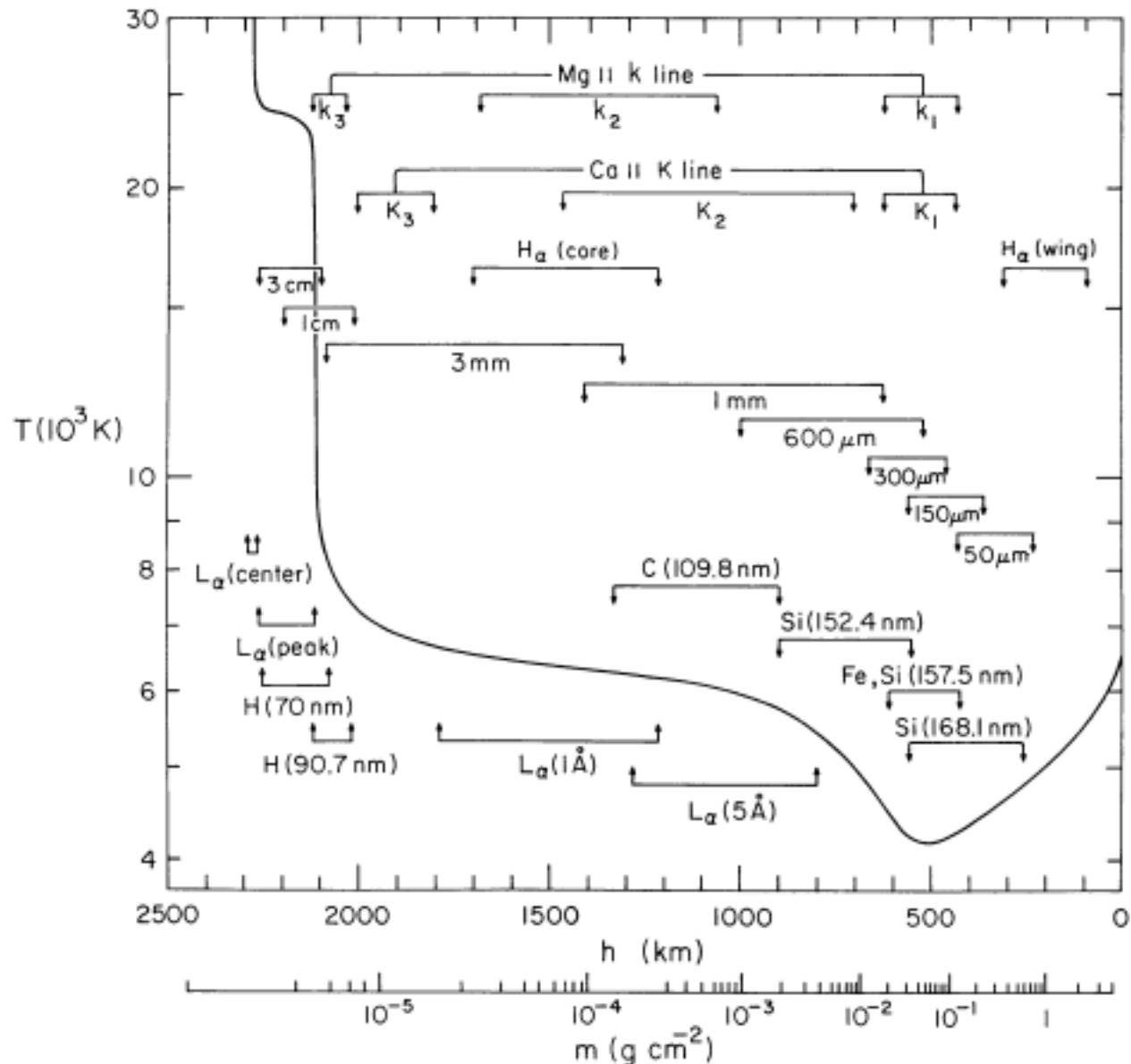
$$\rho g_s + \frac{1}{4\pi} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B} = 0$$



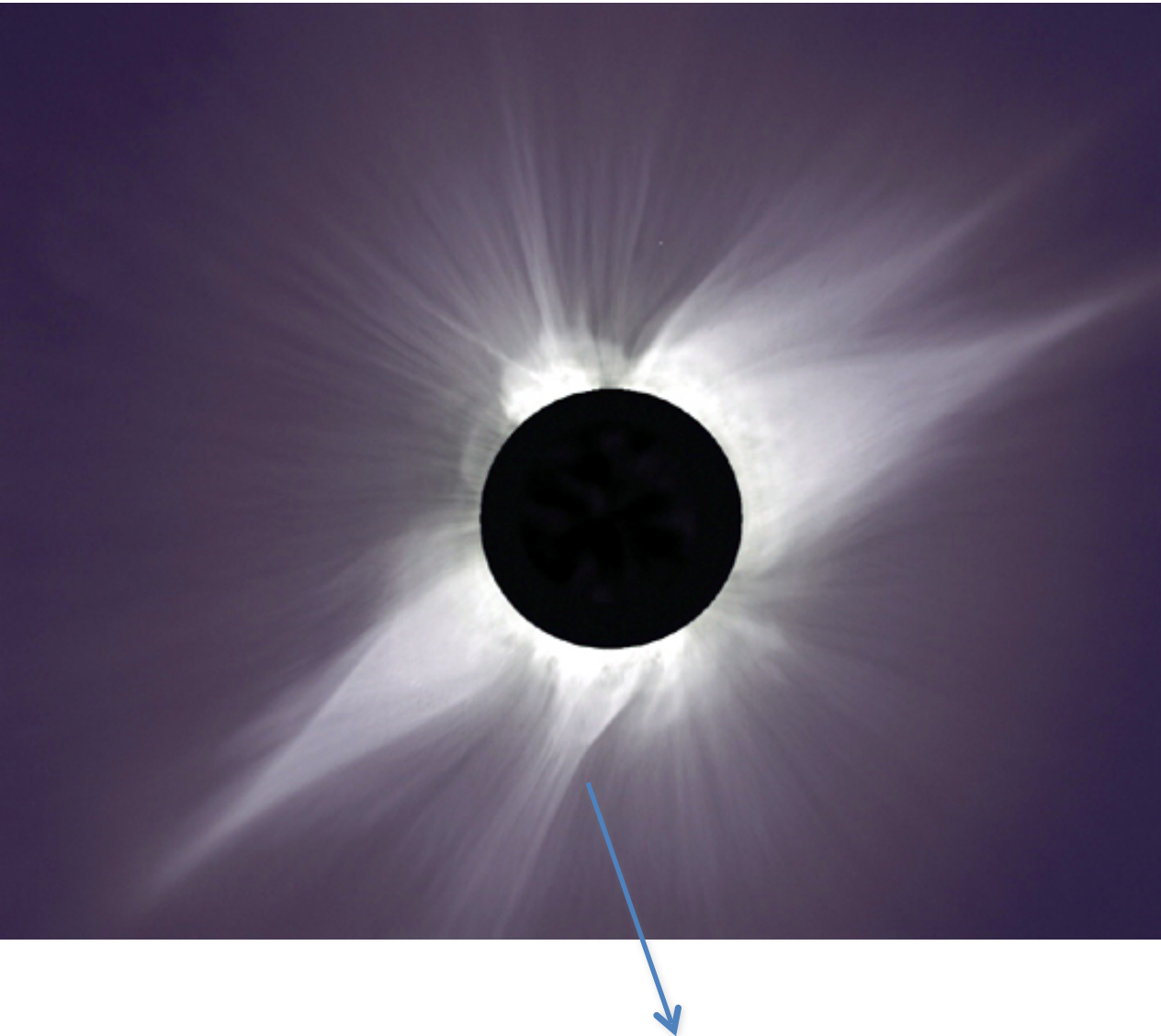


# Andamento della temperatura

## QUIET SUN EUV BRIGHTNESS COMPONENTS



# La corona solare



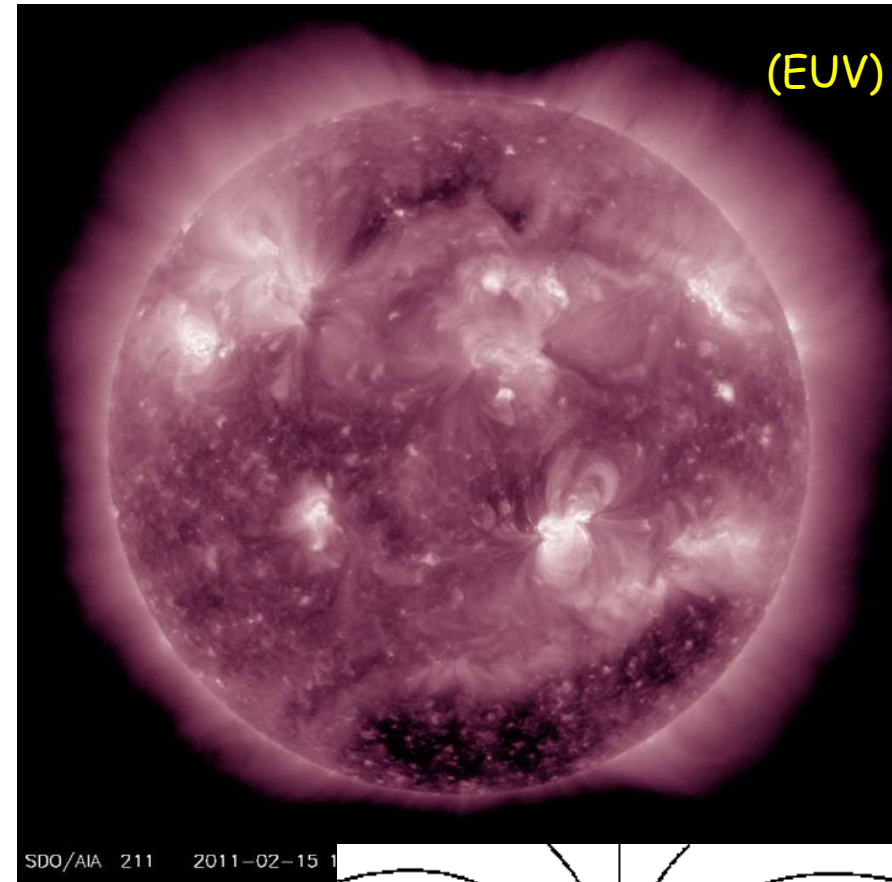
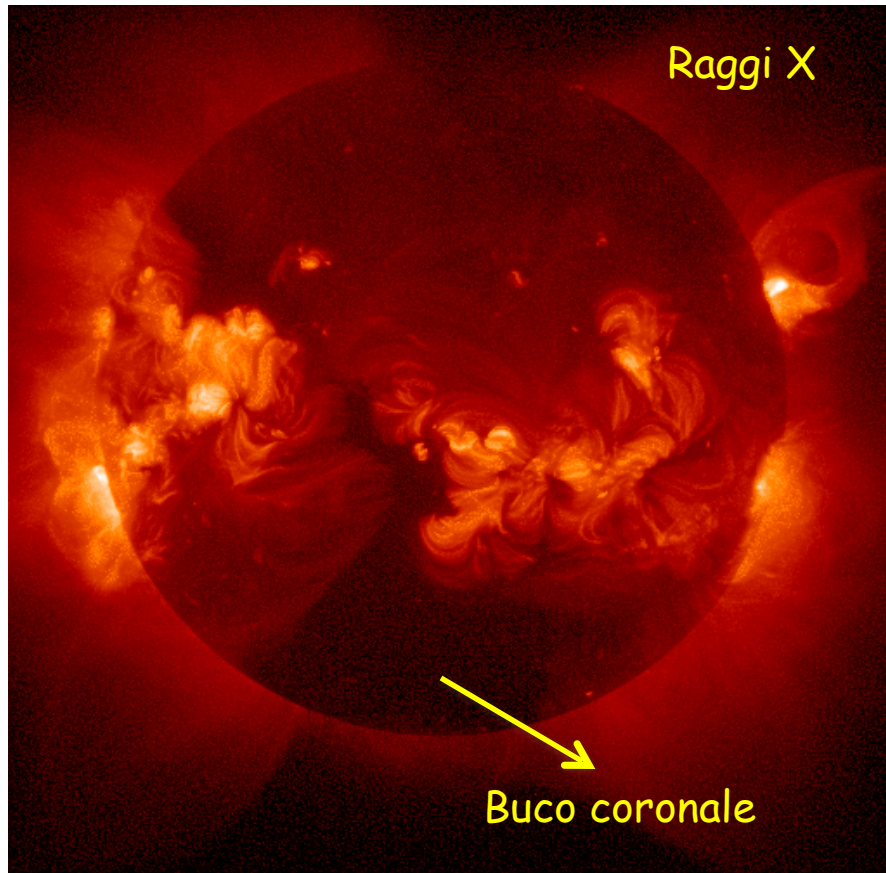
Corona in luce visibile

E' la parte più esterna dell'atmosfera solare.

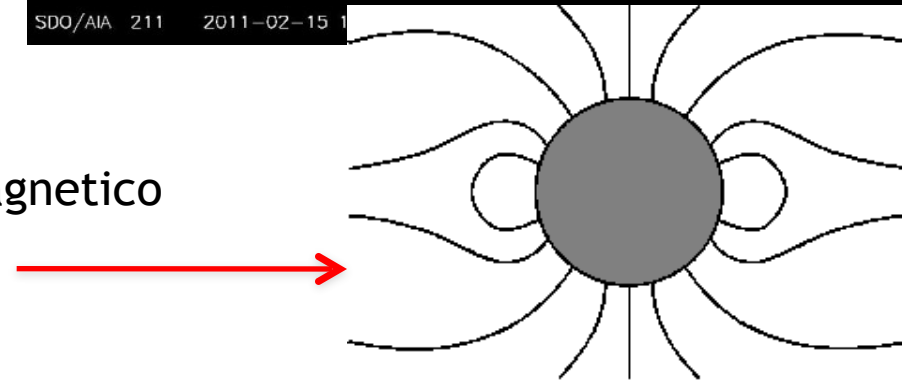
E' formata da un gas molto tenue che si estende per decine di raggi solari. Radiazione fotosferica diffusa dagli elettroni in corona.

La temperatura raggiunge circa  $10^6$  °K ed è infatti possibile osservare righe di elementi pesanti altamente ionizzati come il  $\text{Fe}^{+13}$  (ciò è possibile solo a temperature molto elevate).

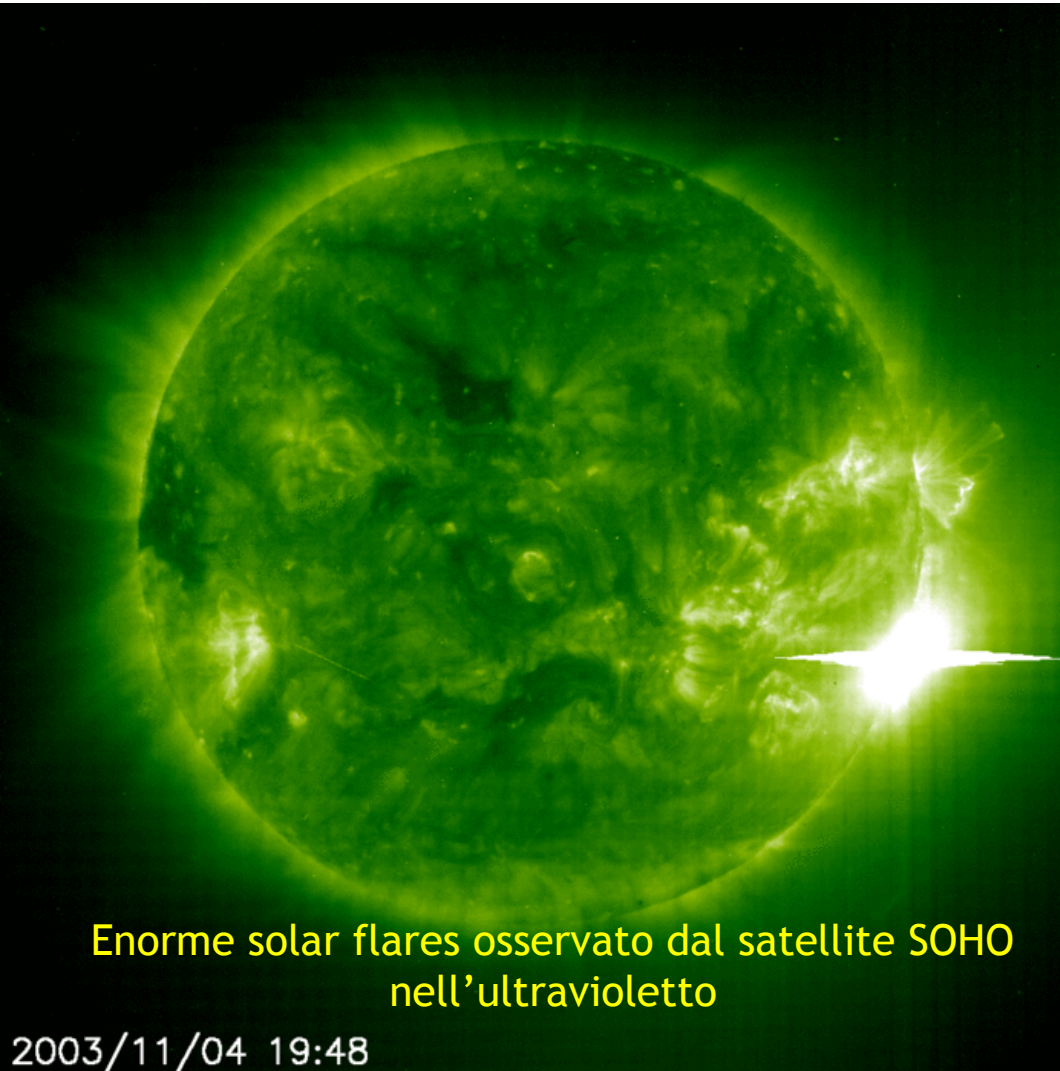
# La corona in alcune bande dello spettro elettromagnetico



Schema semplificato del campo magnetico  
solare a grande scala



# Solar Flares



E' un fenomeno di tipo esplosivo che si verifica nell'atmosfera solare ed in genere si genera in prossimità di un gruppo di macchie solari.

Esso interessa tutte le regioni dello spettro elettromagnetico ed è caratterizzato da un rapido aumento della luminosità (dura dai 100 ai 1000 sec).

In tempi brevi viene rilasciata una grande quantità di energia. I più energetici arrivano a rilasciare fino a  $\approx 10^{33}$  erg.

Poichè tali eventi si verificano nelle regioni attive, laddove il campo magnetico ha una struttura molto complessa, si è ipotizzato che essi siano fenomeni in cui viene rapidamente dissipata l'energia magnetica accumulata in quelle regioni



# Fenomeno della riconnessione magnetica

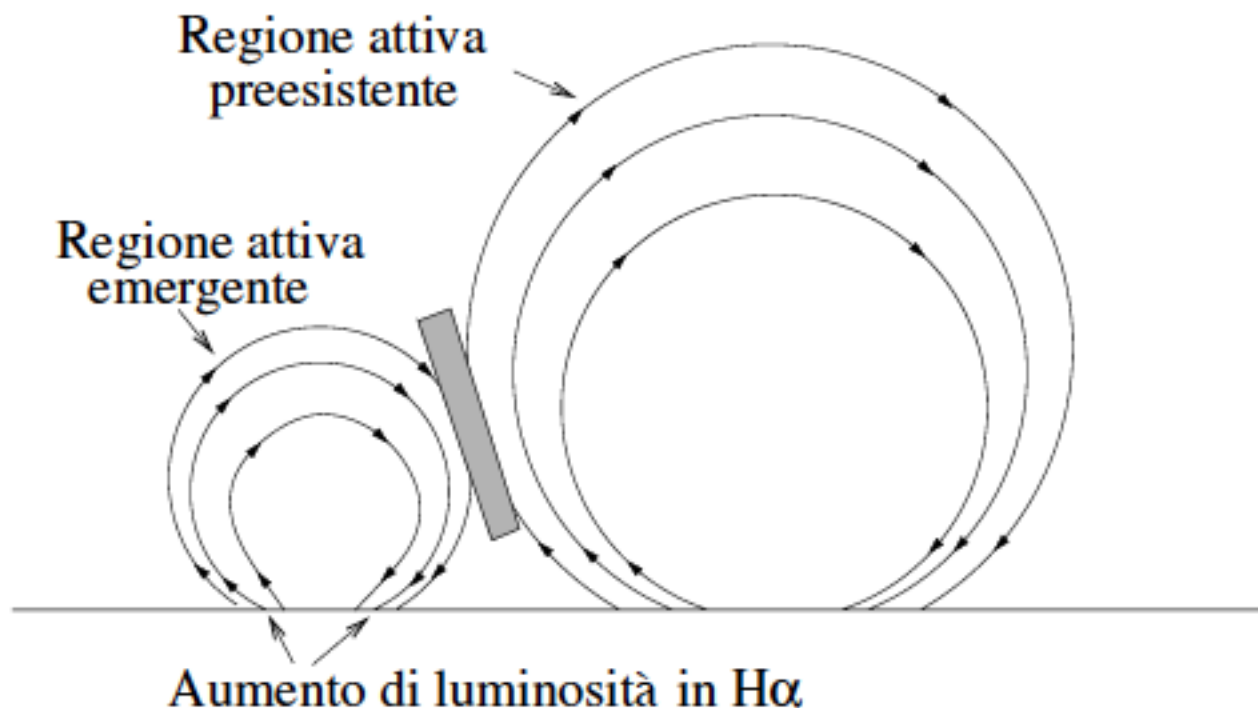
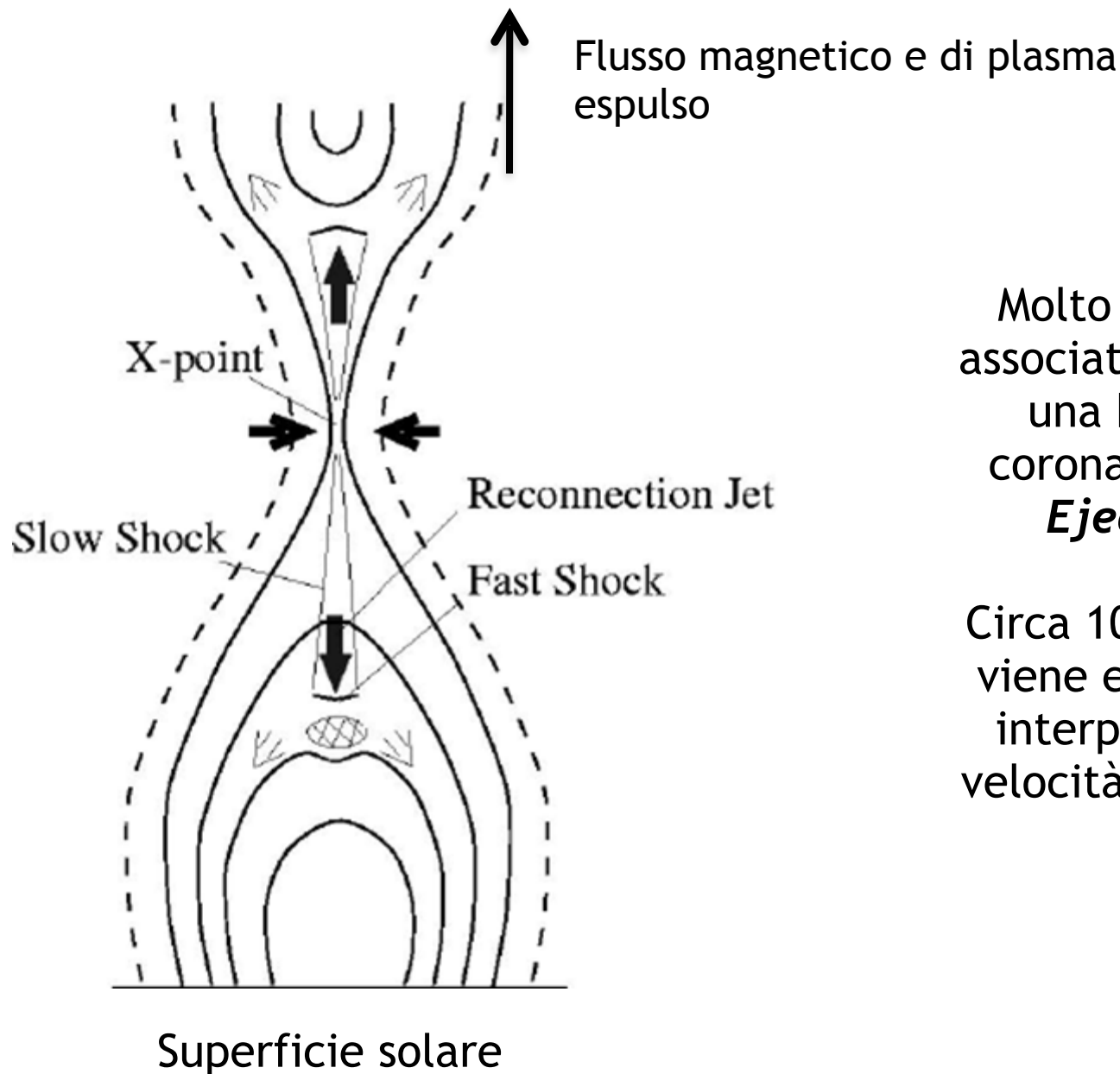


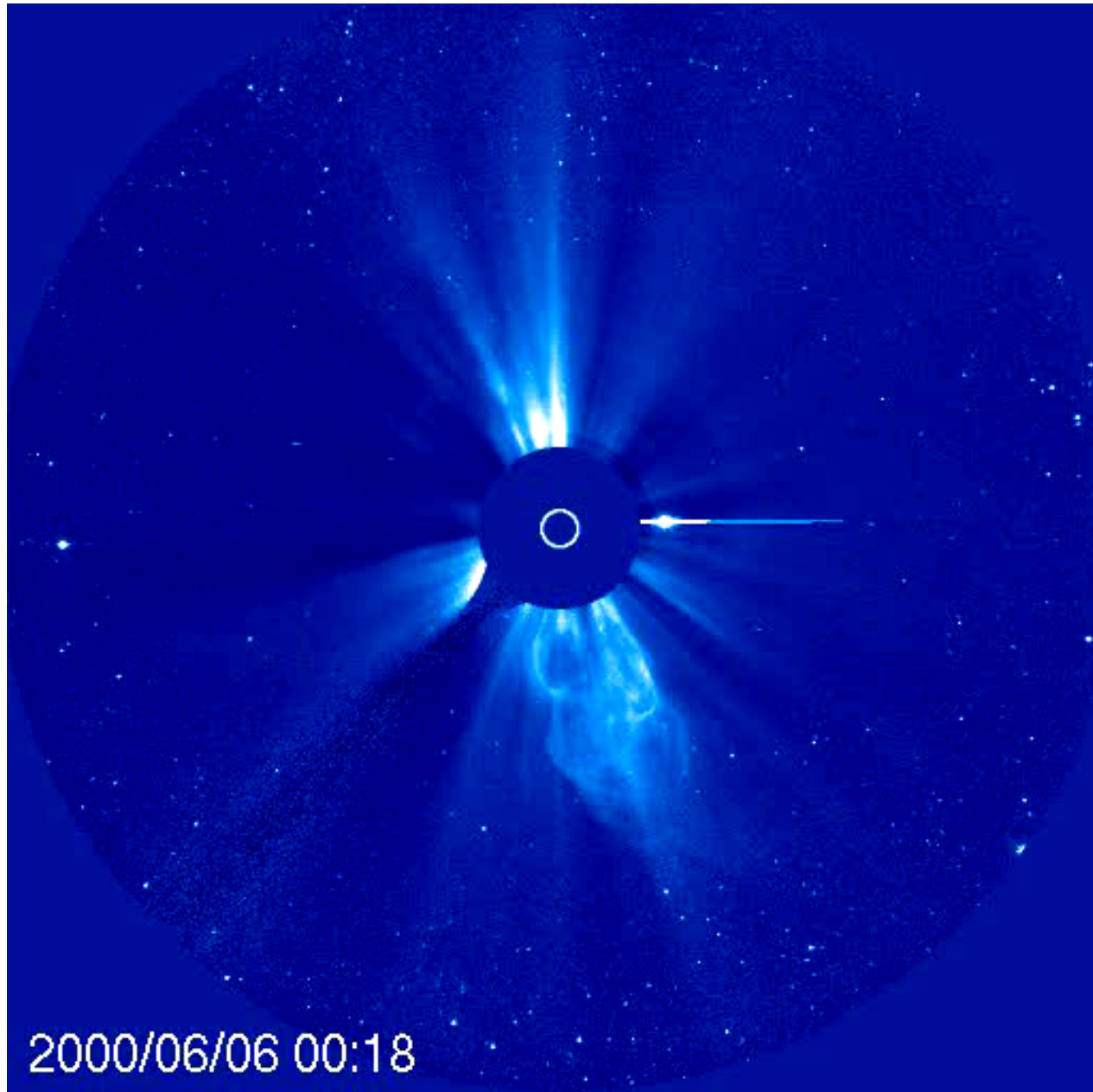
Fig. 5.25. Illustrazione schematica di un modello di flare. L'emersione di una nuova regione magnetica fa entrare in contatto campi magnetici di polarità opposta. Nella regione tratteggiata avviene il fenomeno di riconnessione magnetica con produzione di energia e di fasci di particelle accelerate. Le particelle si muovono lungo le linee di forza del campo magnetico e precipitano sulla cromosfera dando così luogo a un aumento di luminosità che viene osservato in H $\alpha$  come un flare a due nastri.



Molto spesso al flare è associata un'espulsione di una bolla di plasma coronale ***Coronal Mass Ejections (CMEs)***

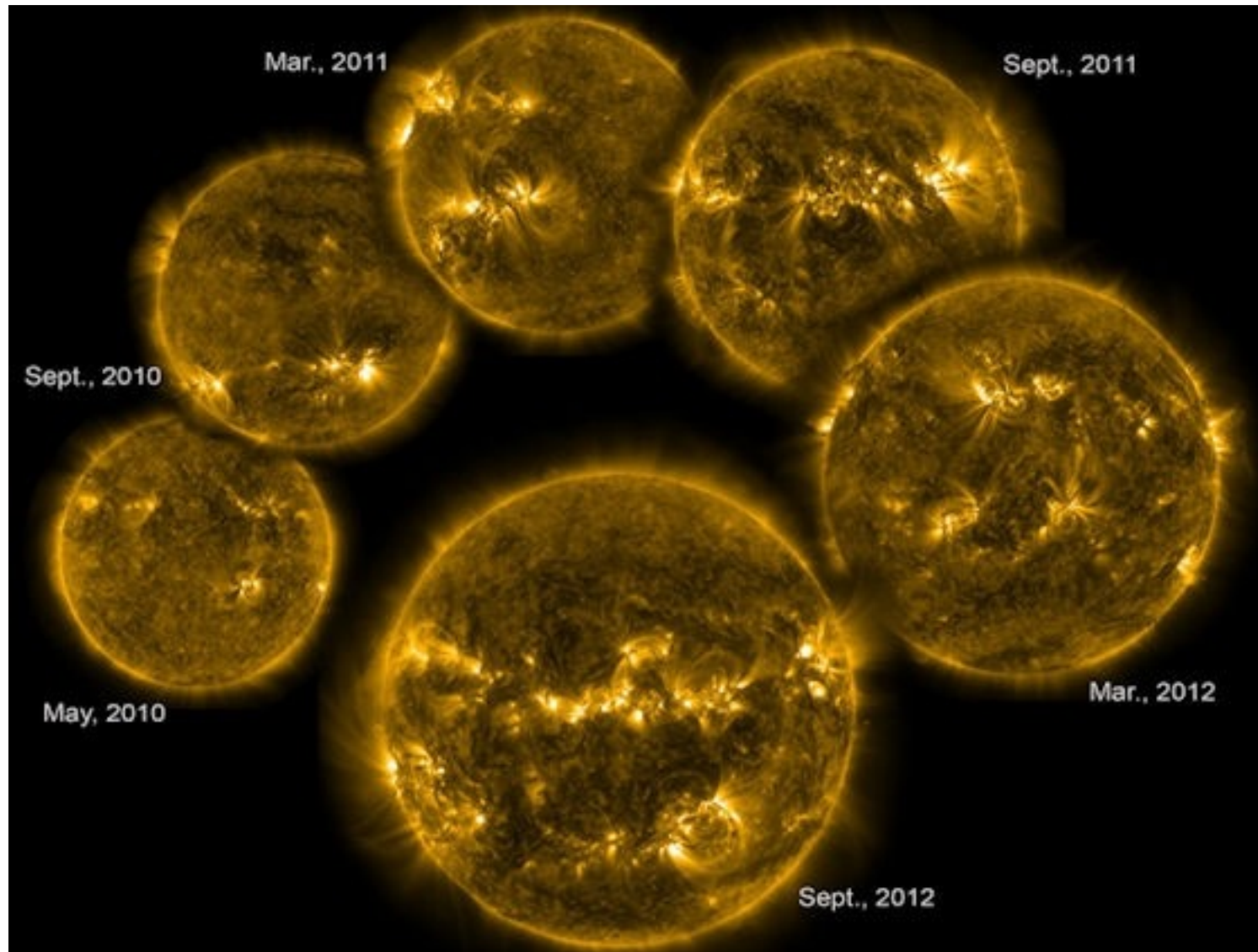
Circa  $10^{13}$  kg di materiale viene espulso nel mezzo interplanetario ad una velocità di circa 500 km/s

# Coronal Mass Ejections



2000/06/06 00:18

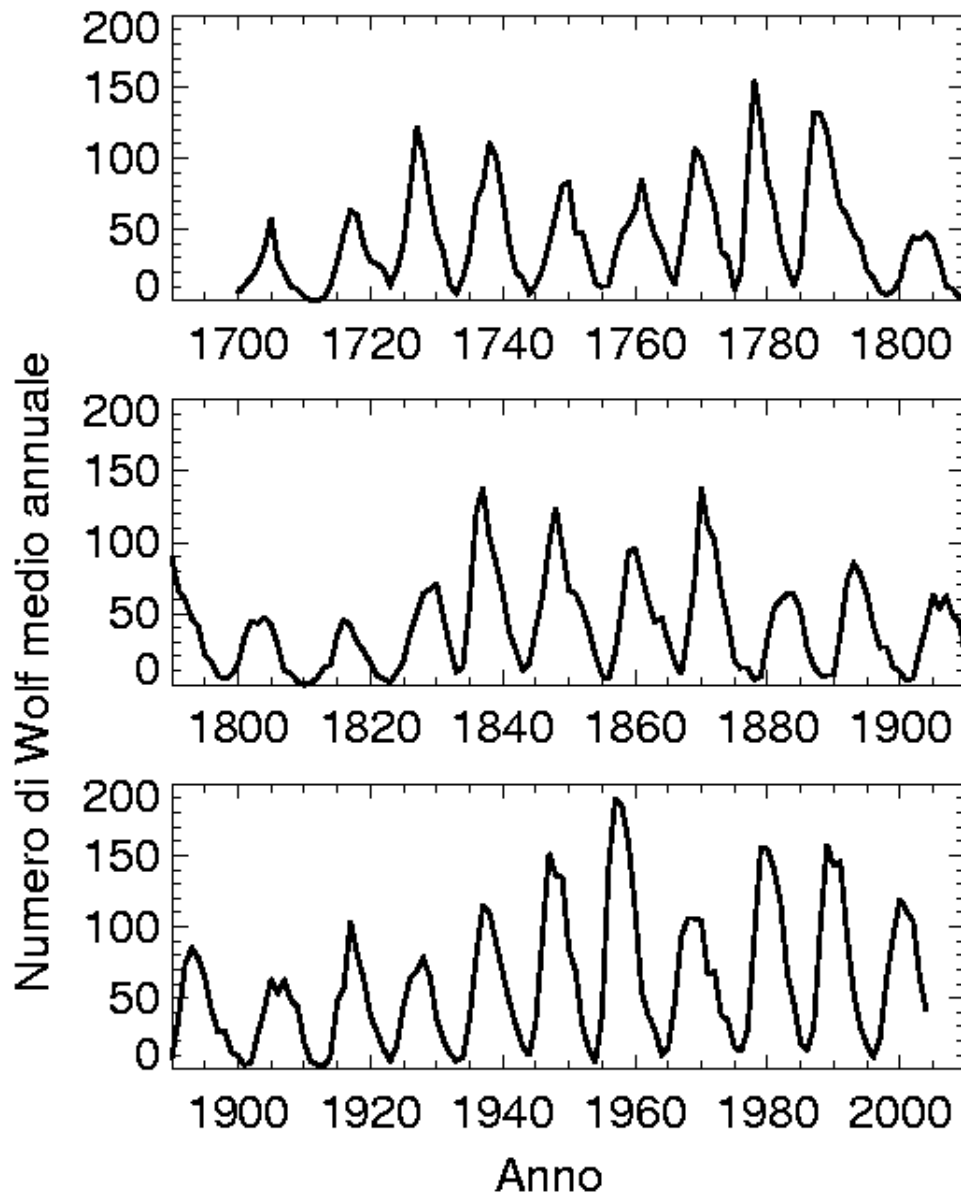
# Ciclo solare



L'attività solare è ciclica con dei massimi e dei minimi



## Ciclo dell'attivit  solare



Numero di Wolf=  $k (m+10g)$

$m$ = # di macchie

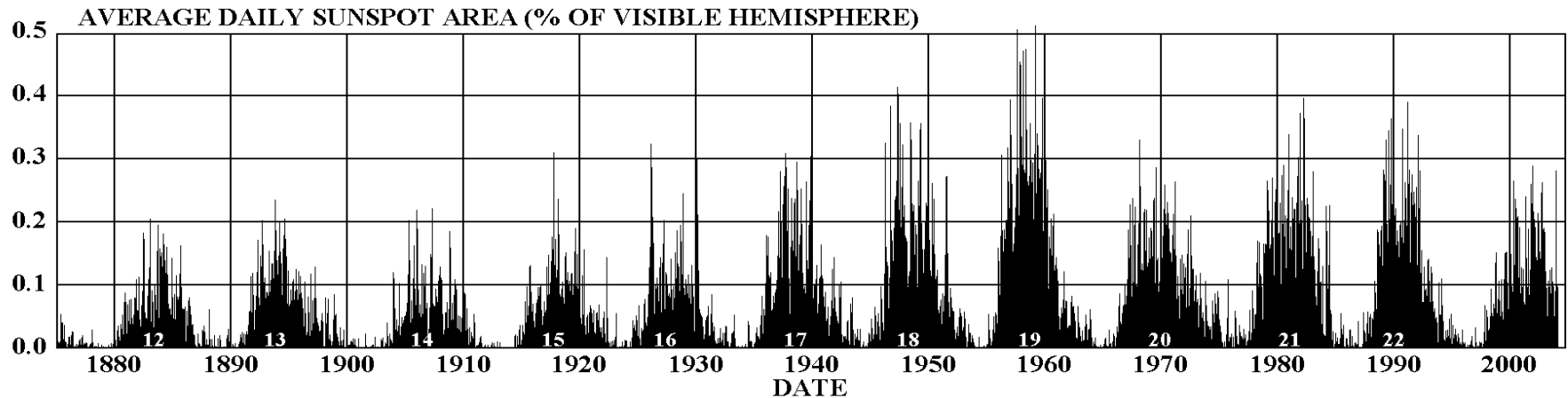
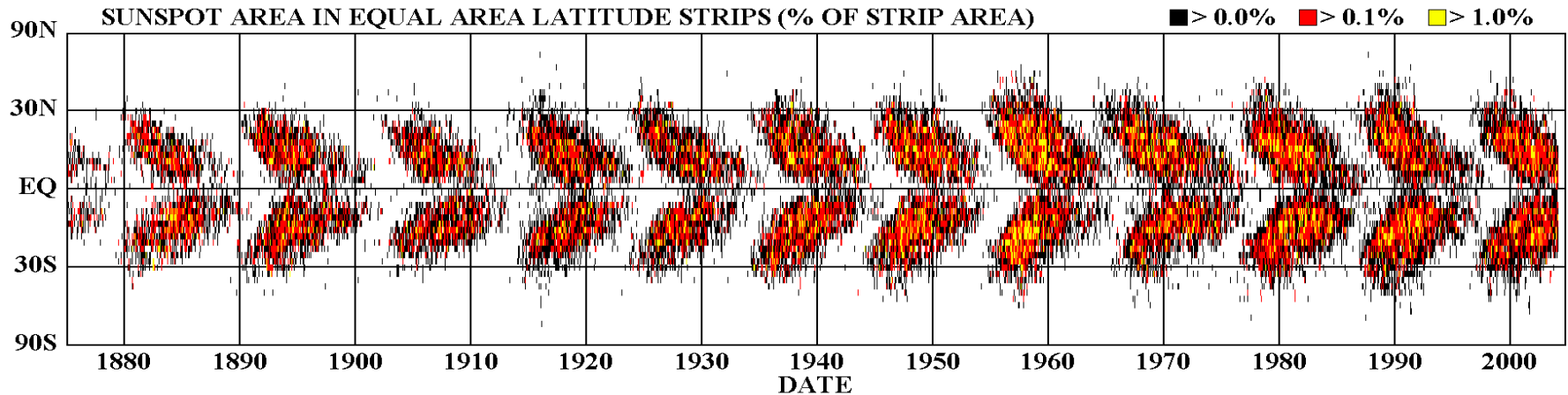
$g$ = # di gruppi di macchie

$k$  fattore correttivo

Il periodo che intercorre tra due massimi (o tra due minimi)   di circa **11 anni**

# Il diagramma a farfalla

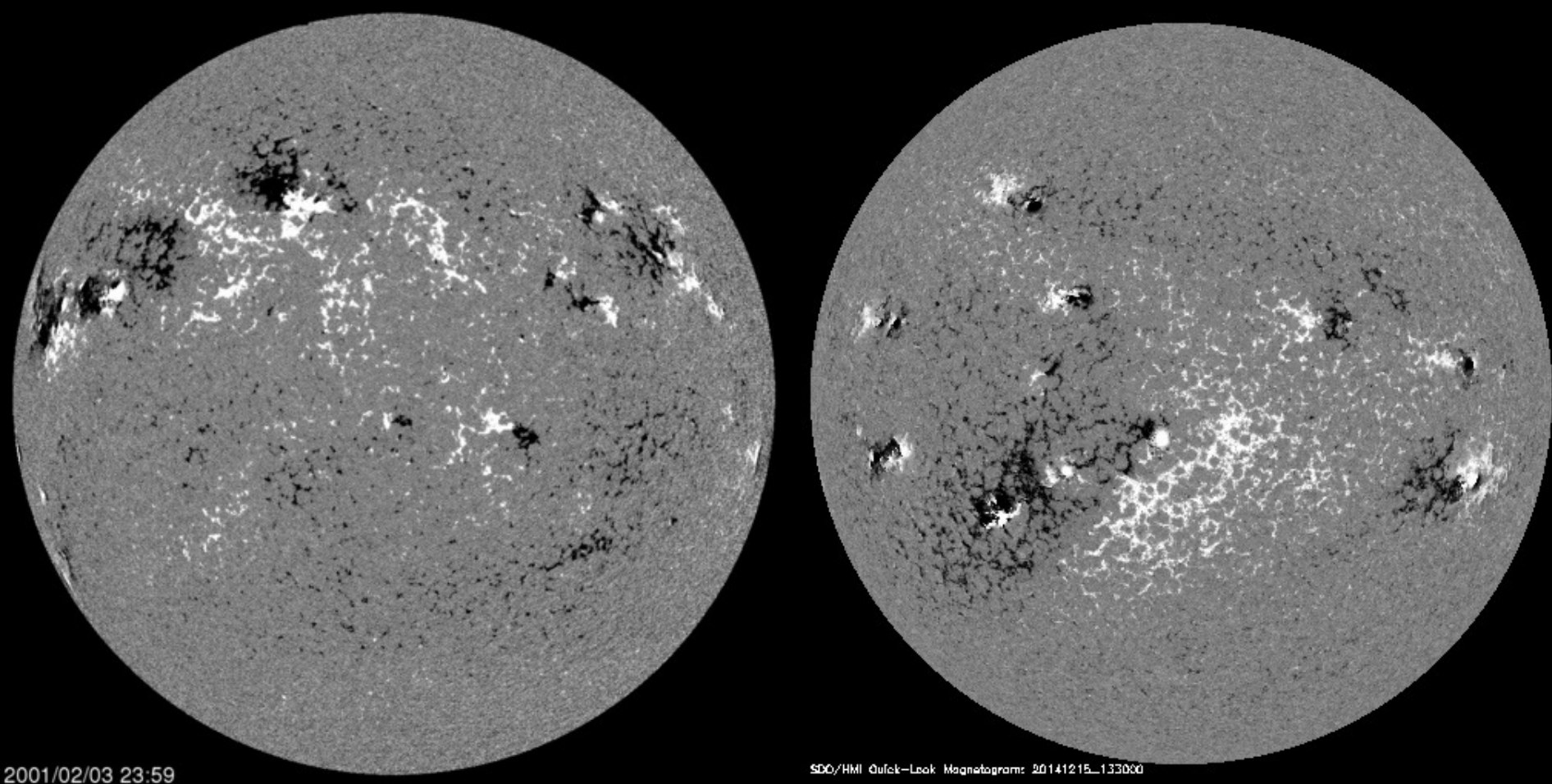
## DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



<http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/bfly.gif>

NASA/NSSTC/HATHAWAY 2004/02

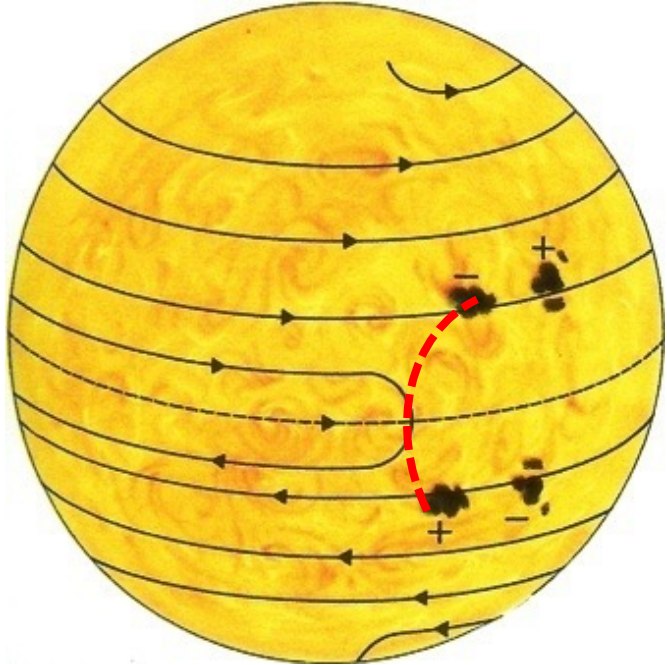
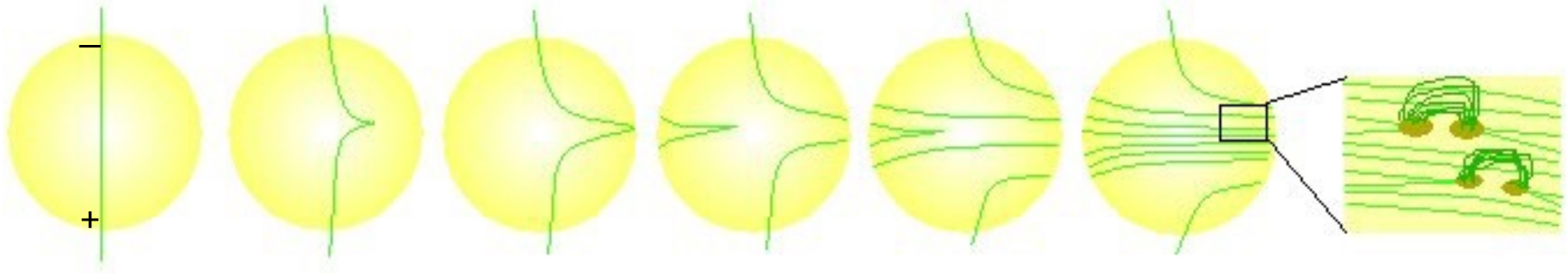
Prima della fase di massima attività le macchie sono a latitudini intermedie ( $\approx 30^\circ$ ), quindi 'migrano' verso la zona equatoriale



Magnetogrammi solari durante le fasi di massima attività in due cicli diversi. Le macchie si presentano a coppie di polarità opposte e con precedenza opposta nei due emisferi.

Ogni 11 anni le polarità si invertono. In realtà il vero ciclo è di 22 anni!

# Modello di Babcock per l'attività magnetica solare



Si basa su:

- 1) Rotazione differenziale del Sole (circa 27 giorni all'Equatore, circa 30 giorni ai poli);
- 2) Galleggiamento magnetico

**Inversione della polarità: ciclo di 11 anni**



# Teorema di gelo

Le linee di campo magnetico sono 'congelate' nel plasma (conseguenza del teorema di Alfvén)

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta \nabla^2 \vec{B}$$

Equazione di induzione per il campo magnetico

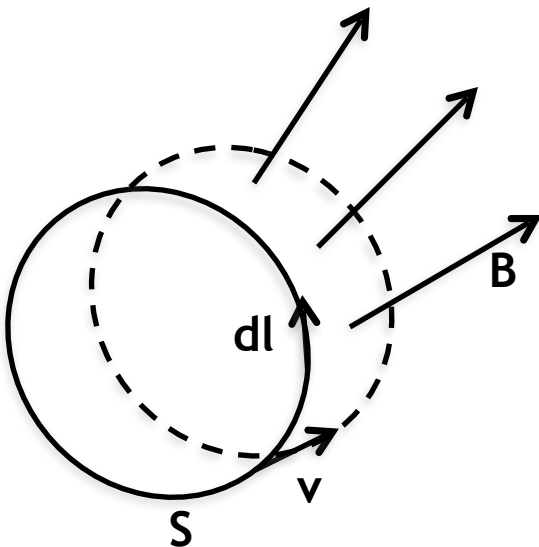
$$\eta = \frac{c^2}{4\pi\sigma\mu} \quad \text{diffusività magnetica}$$

$$\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dS = \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} dS$$

Dal'equazione di induzione supponendo  $\eta \rightarrow 0$

$$\begin{aligned} \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} dS &= \int_S (\vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B})) \cdot \hat{n} dS = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = \\ &= - \oint \vec{B} \cdot (\vec{v} \times d\vec{l}) \rightarrow \end{aligned}$$

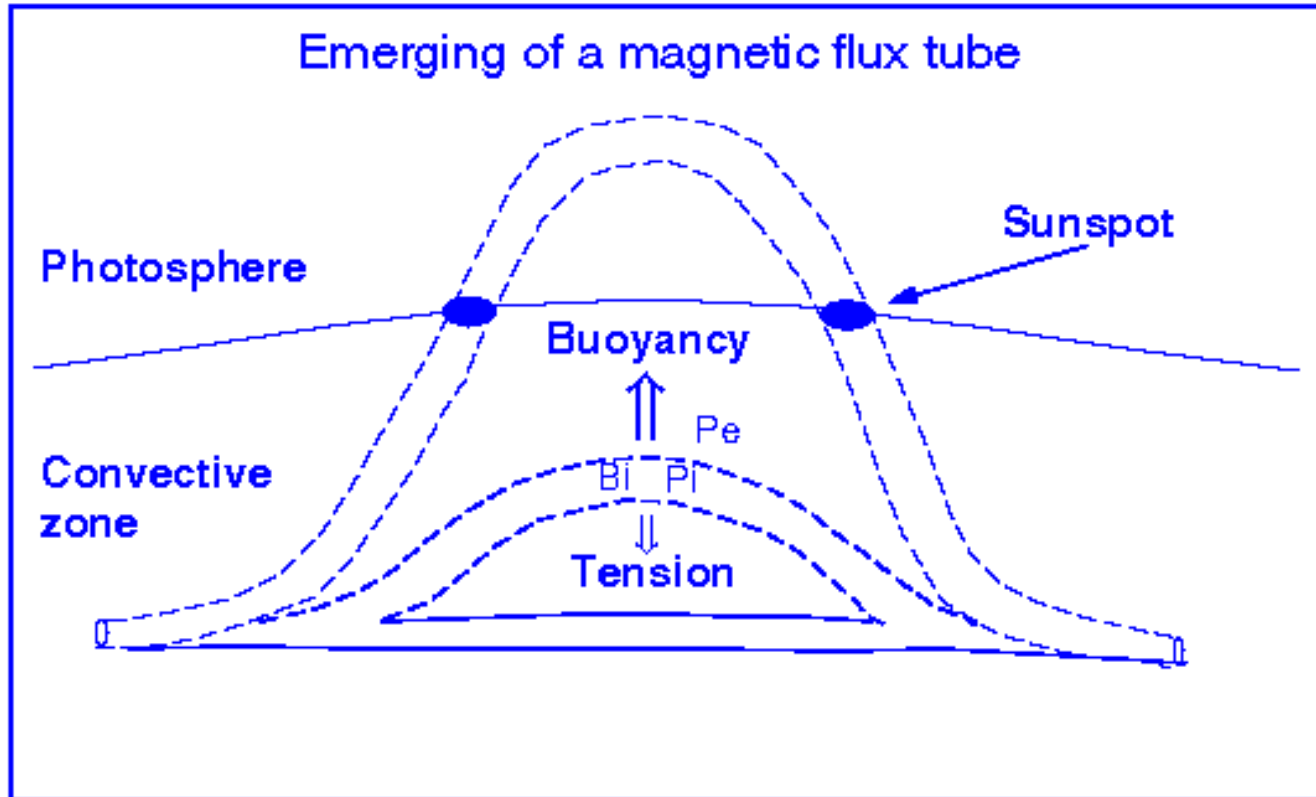
In un tempo  $dt$  verrà spazzata una superficie  $v dt dl$



$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} dS + \oint \vec{B} \cdot (\vec{v} \times d\vec{l}) = 0$$

**Il flusso magnetico si conserva.** Le linee di campo magnetico sono trasportate dal fluido (congelate!)

# Galleggiamento magnetico



Tubo di flusso in equilibrio  
con l'ambiente circostante

$$P_{ext} = P_{int} + \frac{B^2}{8\pi}$$

A parità di temperatura all'esterno e all'interno,  
la densità del tubo di flusso è inferiore. Il tubo  
viene spinto verso l'alto.

# Altri fenomeni legati al ciclo solare

- Aumenta la frazione di superficie coperta da facole;
- I buchi coronali si riducono molto durante i periodi di massimo, mentre si estendono anche a basse latitudini durante i minimi;
- Aumentano i flares e i CMEs durante il massimo;
- Aumenta la probabilità di avere tempeste geomagnetiche e interferenze nelle comunicazioni.

# Space weather (meteo spaziale)

