

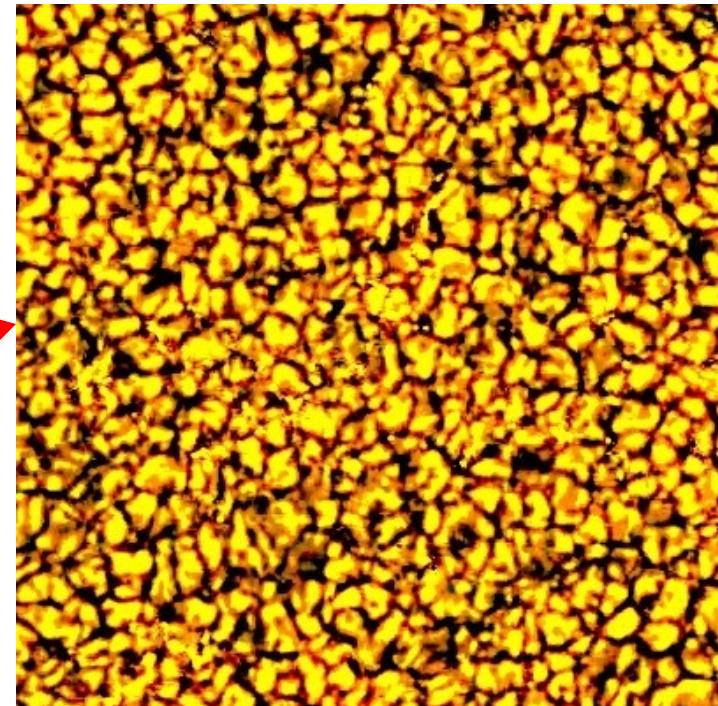
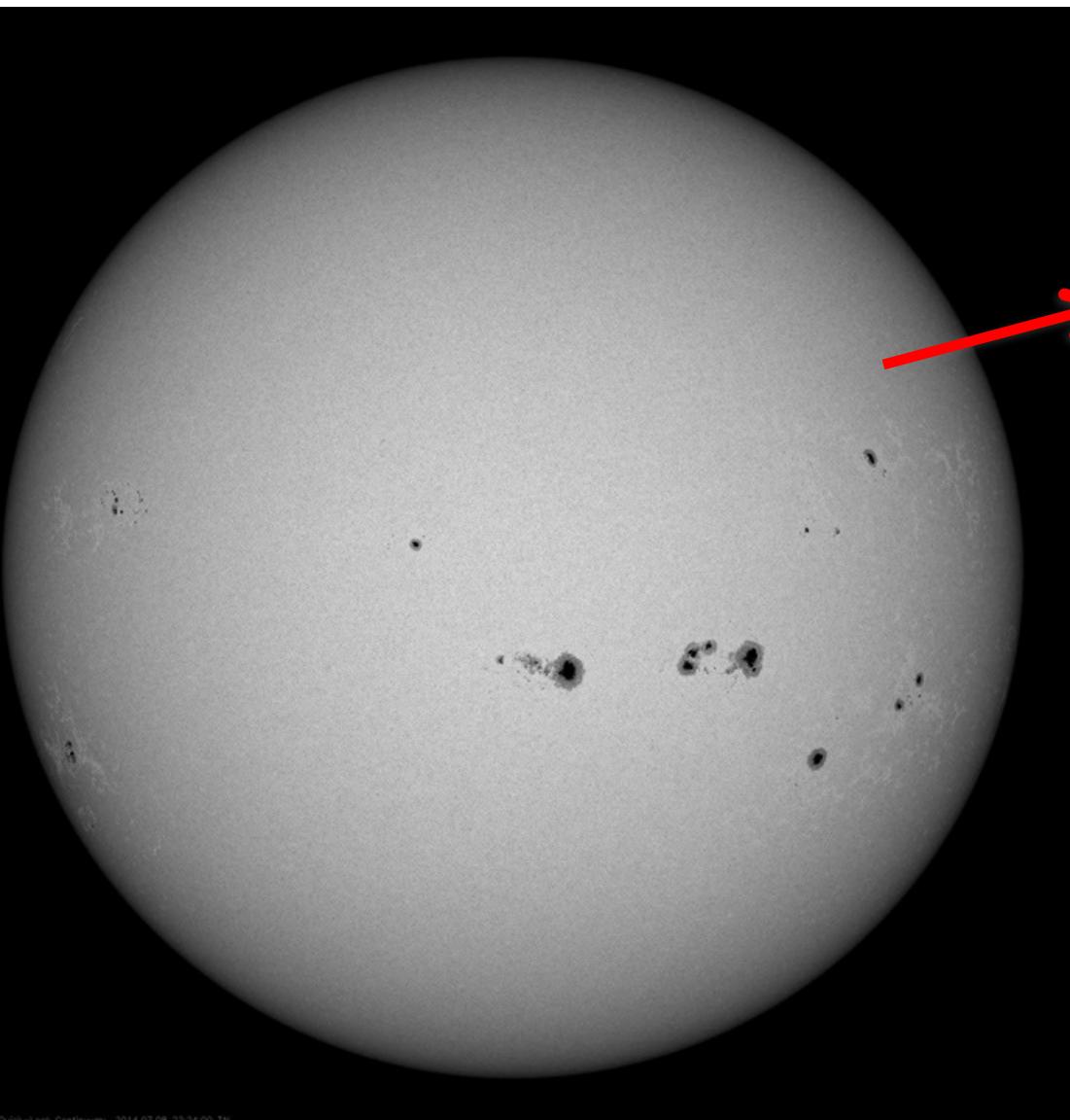
Il Sole

Dott.ssa Silvia Perri

Dipartimento di Fisica, Università della Calabria

silvia.perri@fis.unical.it

La fotosfera

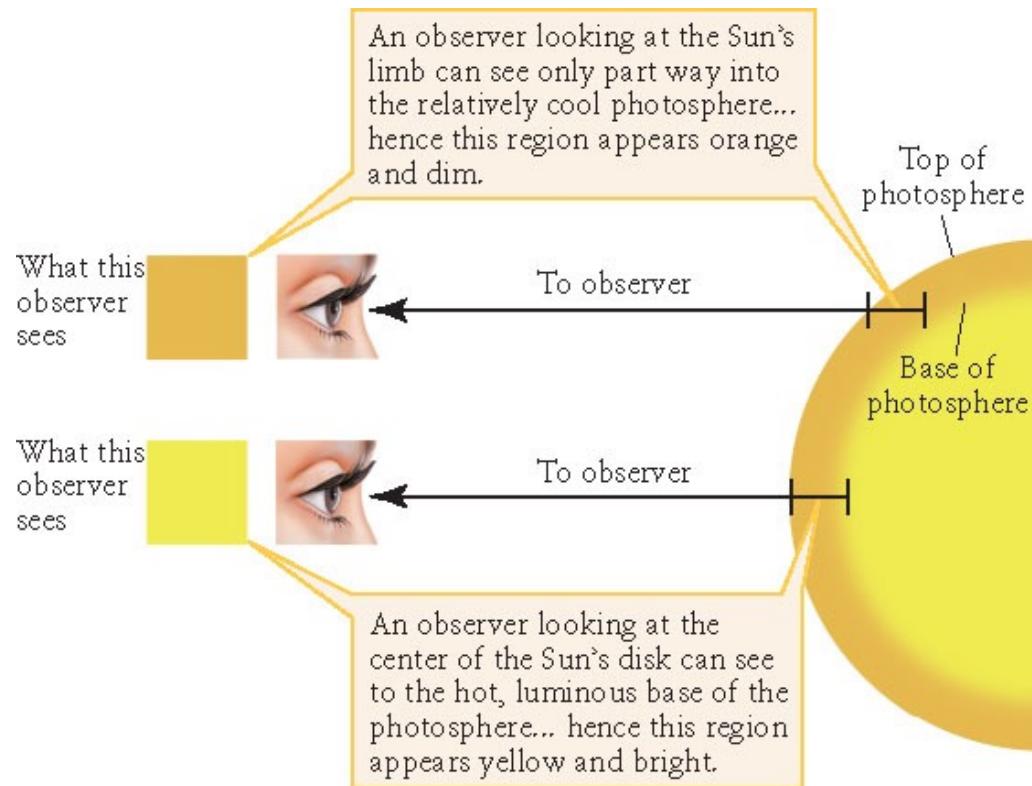


I bordi sono più scuri del centro
(limb darkening)

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 piu' 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 una 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.

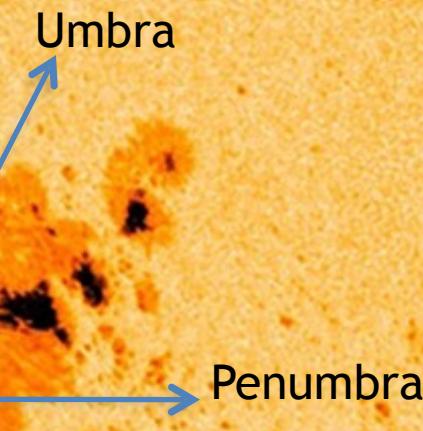
Macchie solari

AR2192
del 20
Ottobre
2014



Scale size of Earth

In genere le macchie solari emergono
a coppie

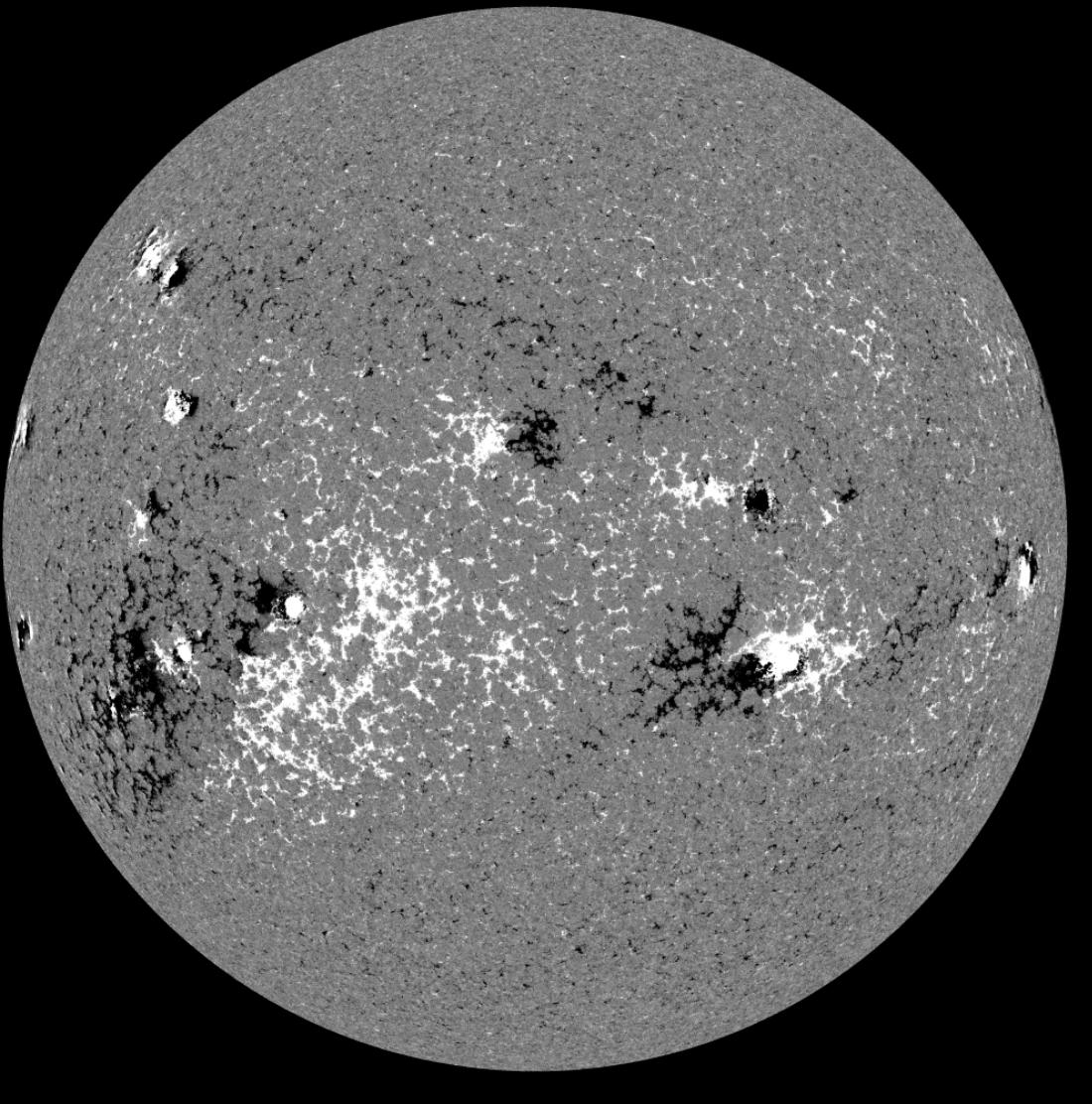


Sono delle strutture nella fotosfera più fredde (temperatura al centro della macchia 4000 °K)

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

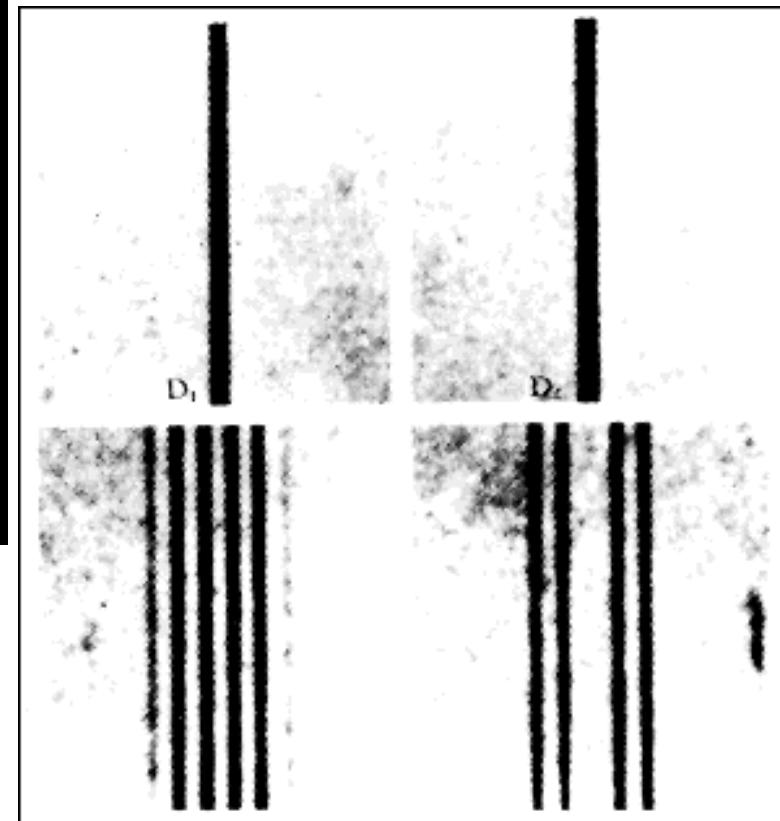


$B \approx 1-3 \times 10^3$ Gauss misurabile tramite l'effetto Zeeman

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

Magnetogrammi del Sole:
mappe del campo magnetico.

Le coppie di macchie hanno polarità opposta.



Cromosfera

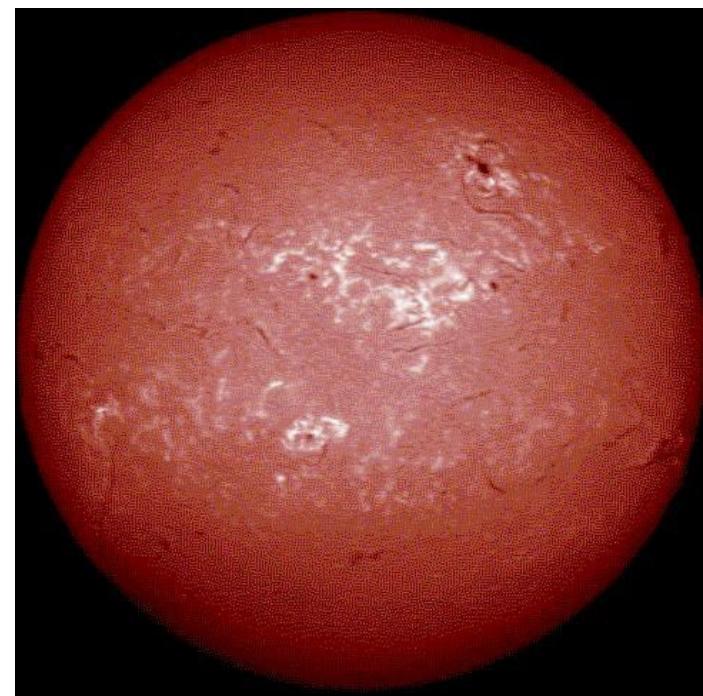


Lo spettro è costituito da molte linee di emissione
La più intensa è quella dell'idrogeno H_{α} che
corrisponde alla transizione dal livello atomico $n=3$ ad
 $n=2$

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

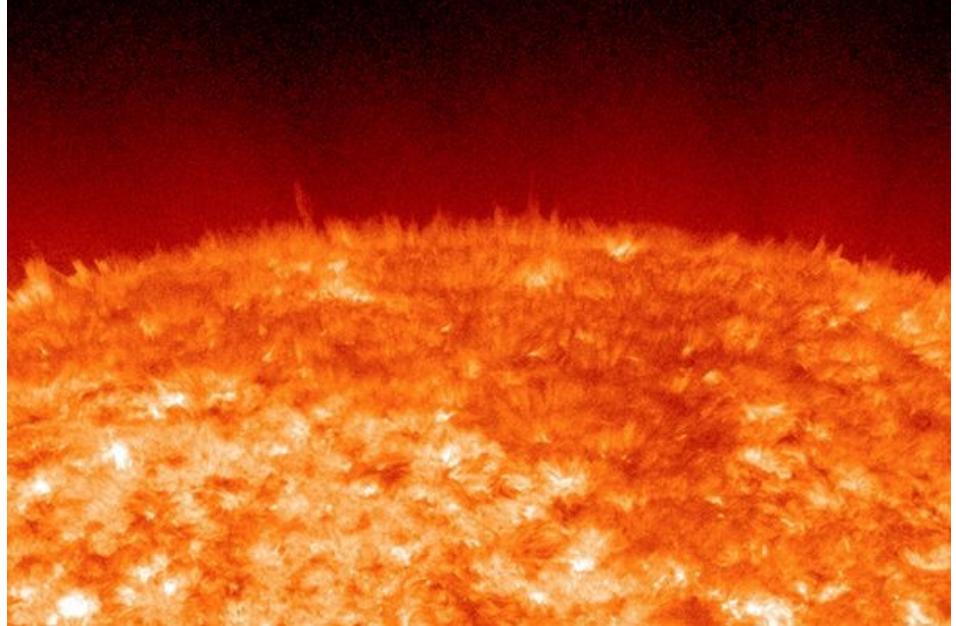
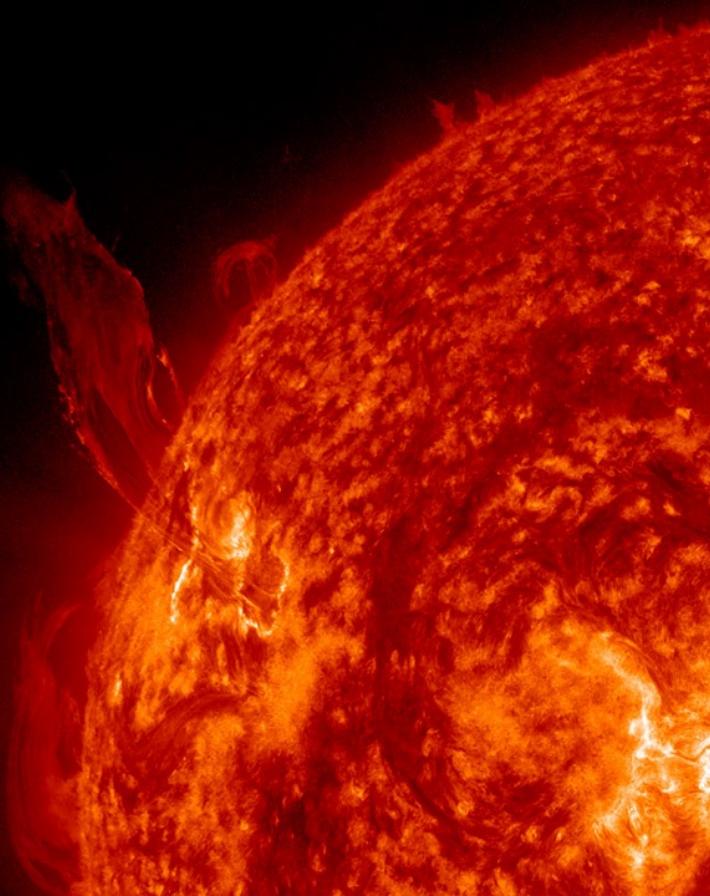
Si estende per circa 10.000 km al di sopra della fotosfera

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



Strutture dinamiche in cromosfera

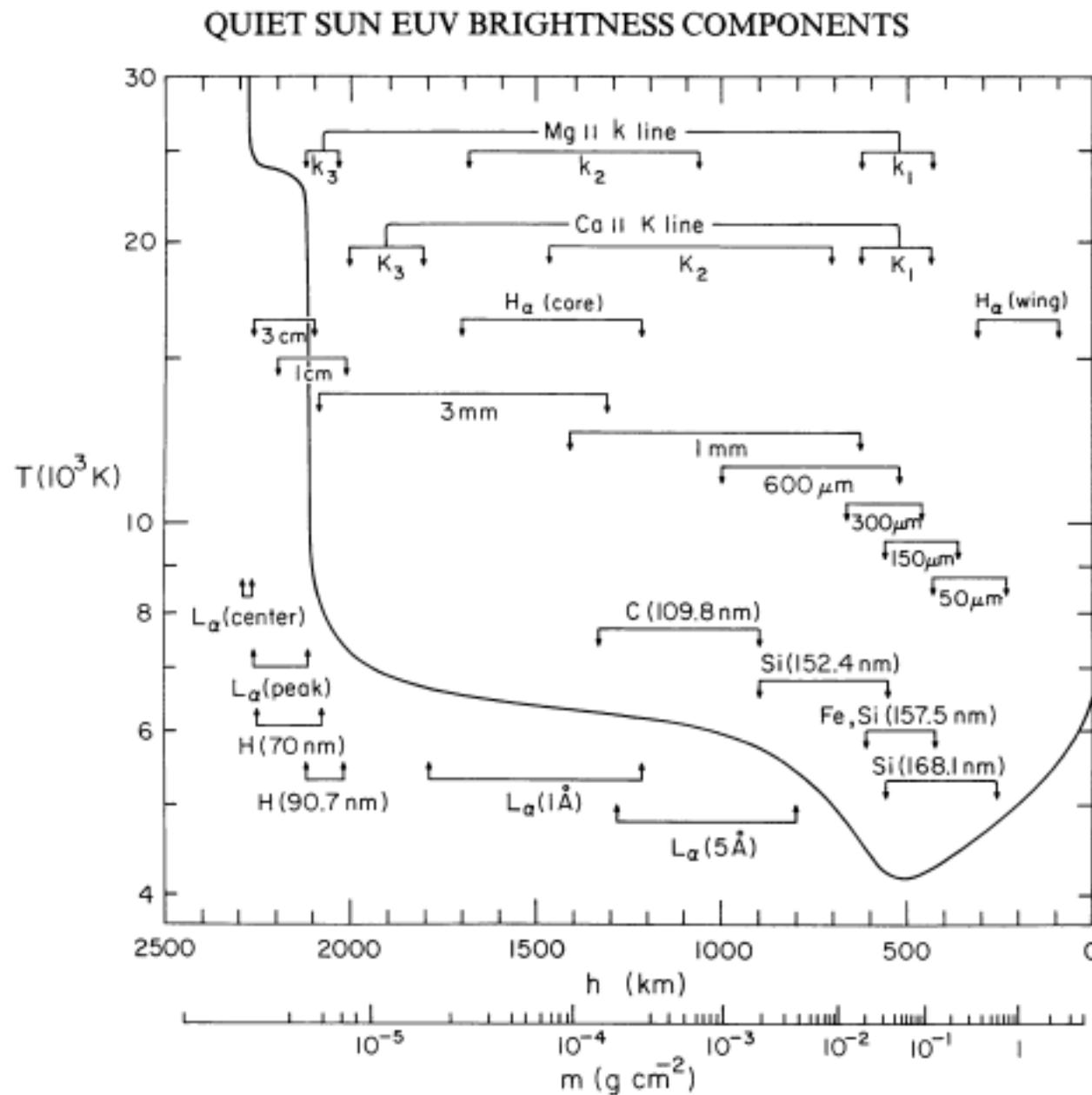
Spicole: getti di plasma di diametro di circa 1000 km che si propagano a velocità di 20-50 km/s. Durano pochi minuti.



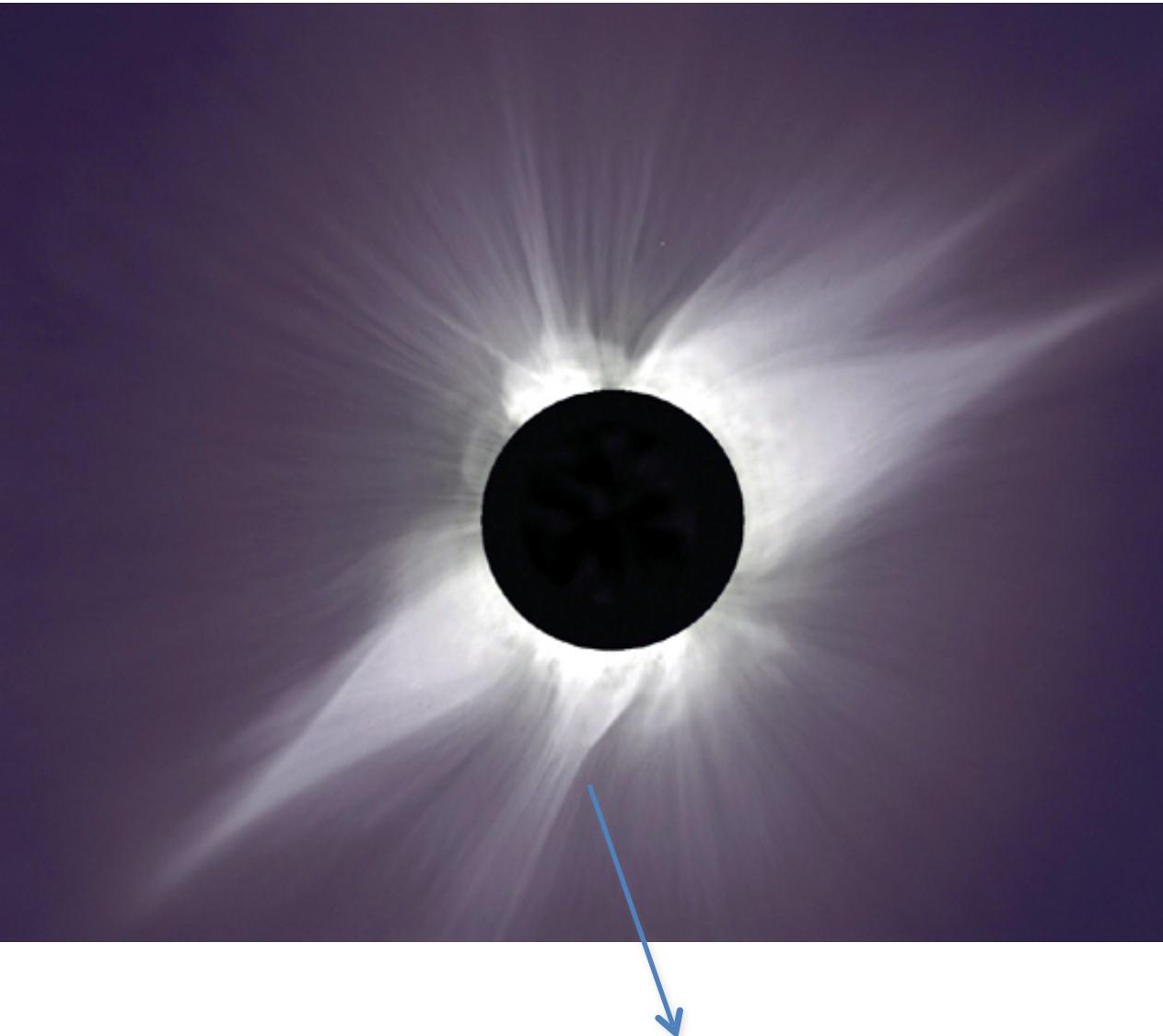
Protuberanze: getti di plasma molto luminosi che si estendono dalla cromosfera a gli strati più alti dell'atmosfera solare. Possono persistere per alcune settimane.
L'equilibrio è dovuto a

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

Andamento della temperatura



La corona solare



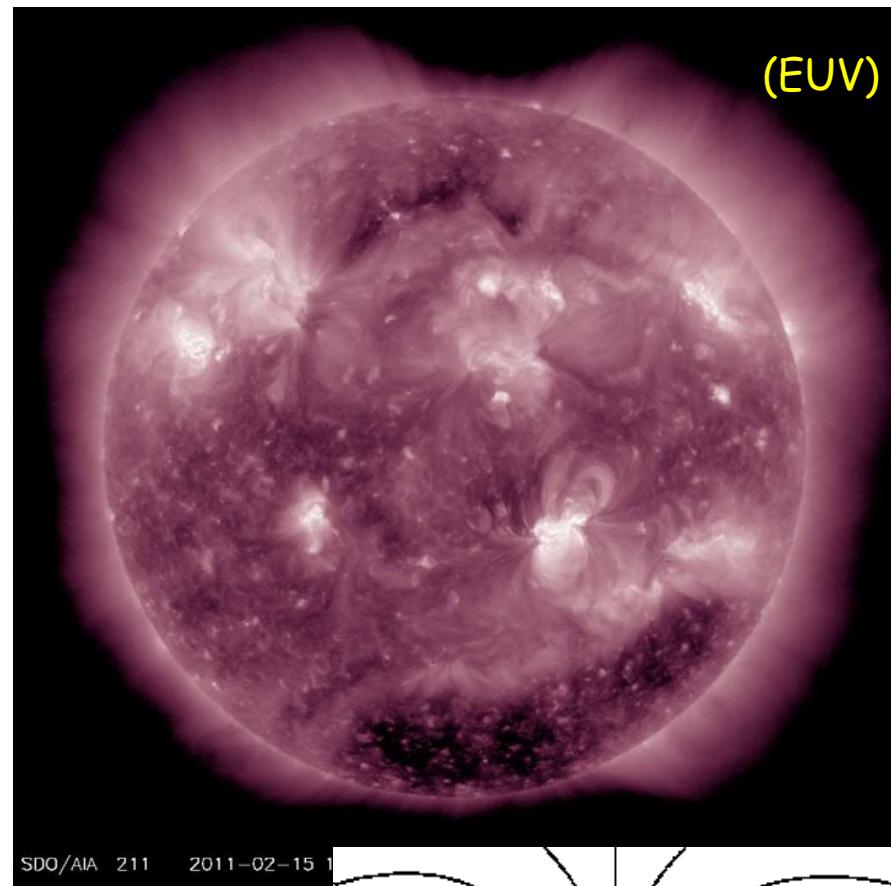
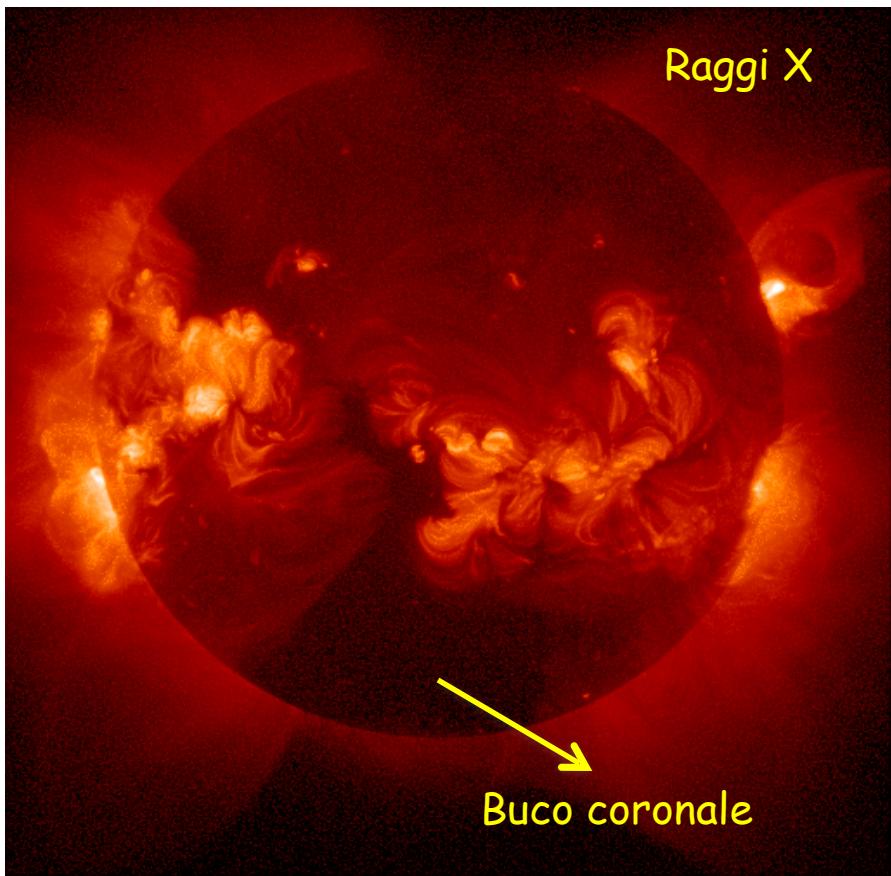
Corona in luce visibile

E' la parte più esterna dell'atmosfera solare.

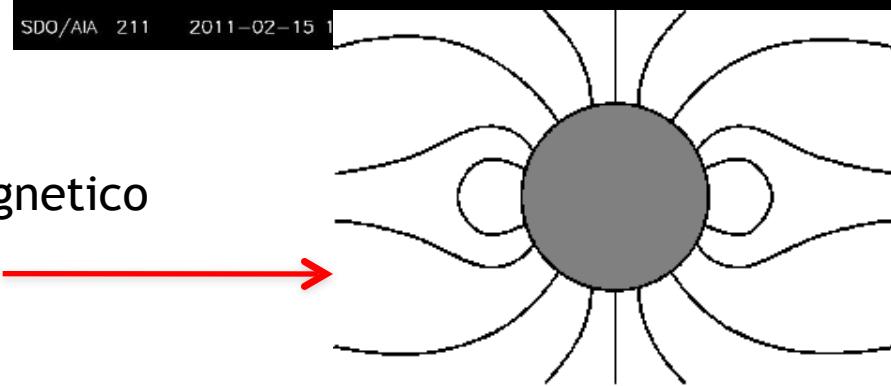
E' formata da un gas molto tenue che si estende per decine di raggi solari. Radiazione fotosferica diffusa dagli elettroni in corona.

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

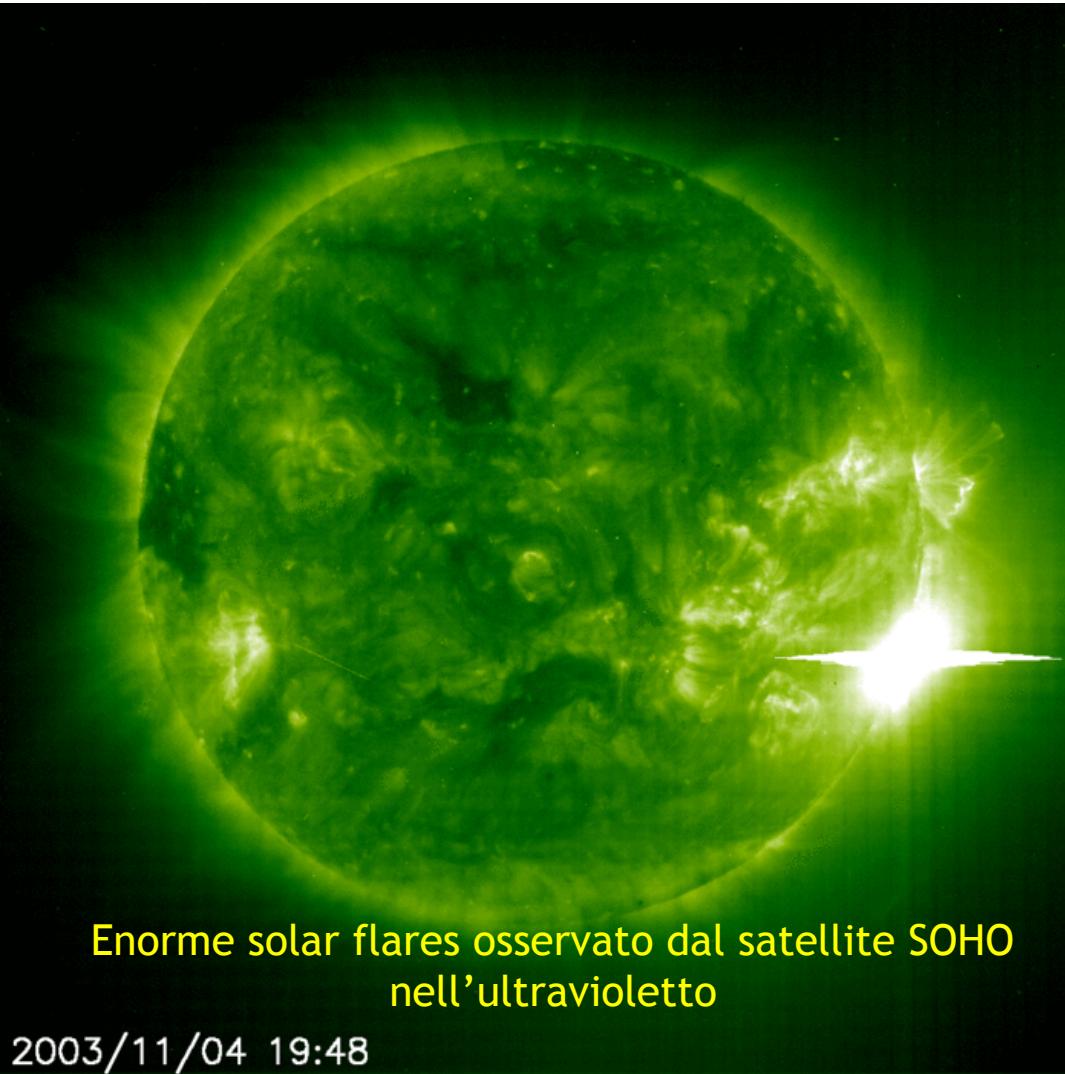
La corona in alcune bande dello spettro elettromagnetico



Schema semplificativo del campo magnetico solare a grande scala



Solar Flares



Enorme solar flares osservato dal satellite SOHO
nell'ultravioletto

2003/11/04 19:48

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

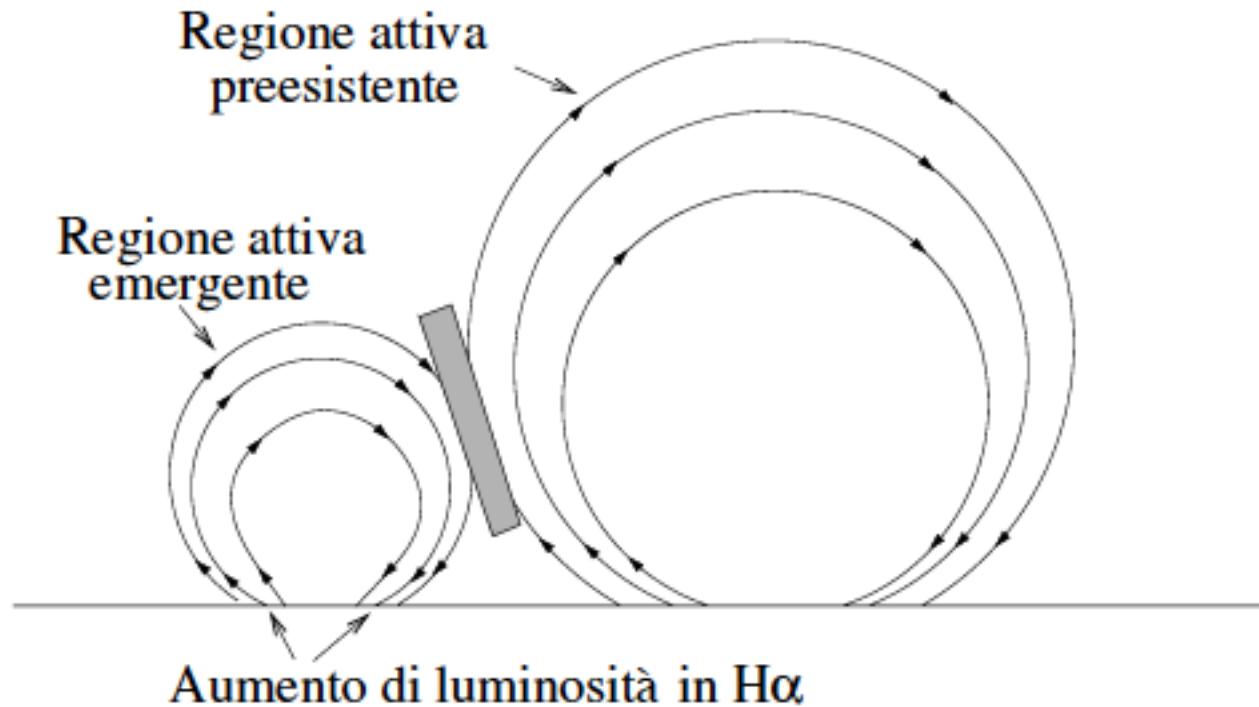
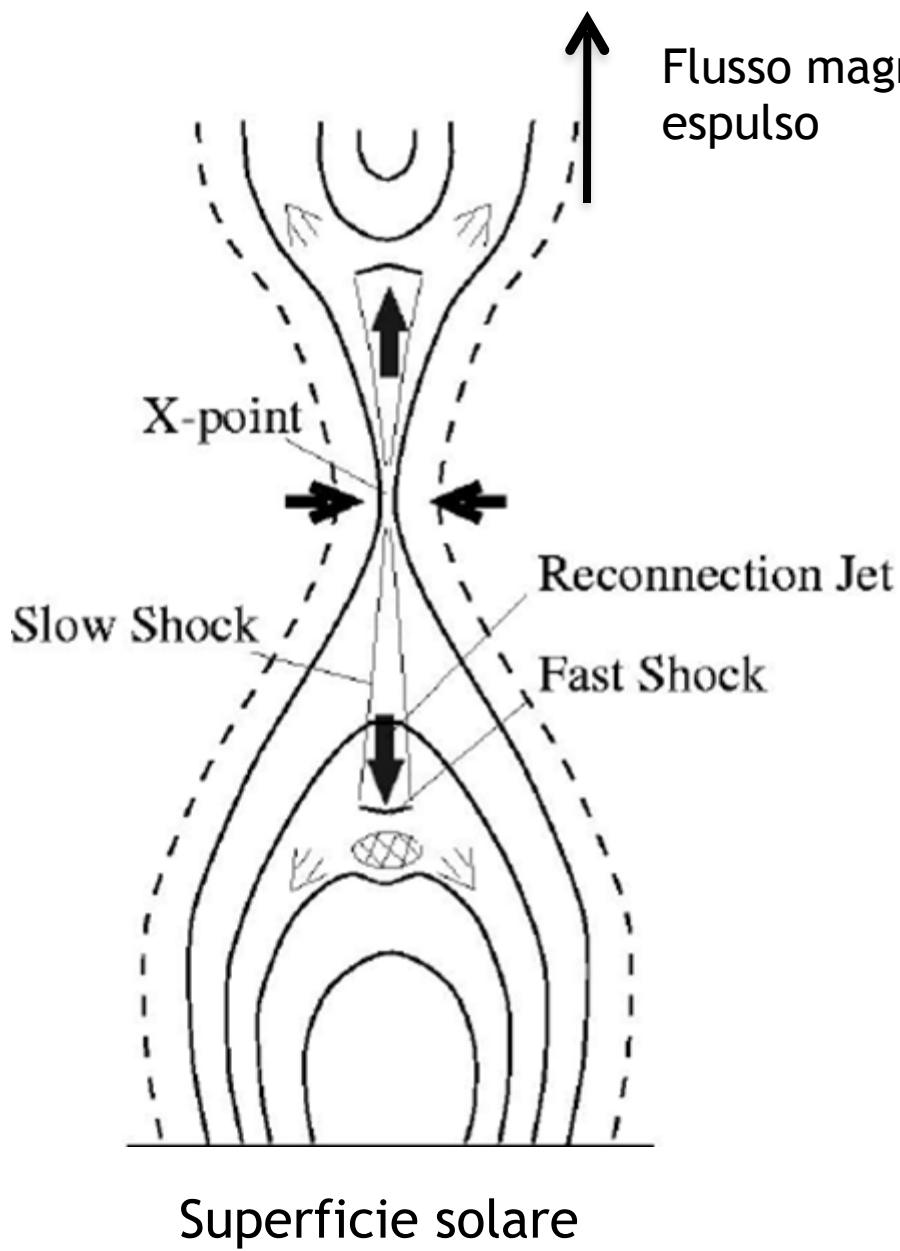


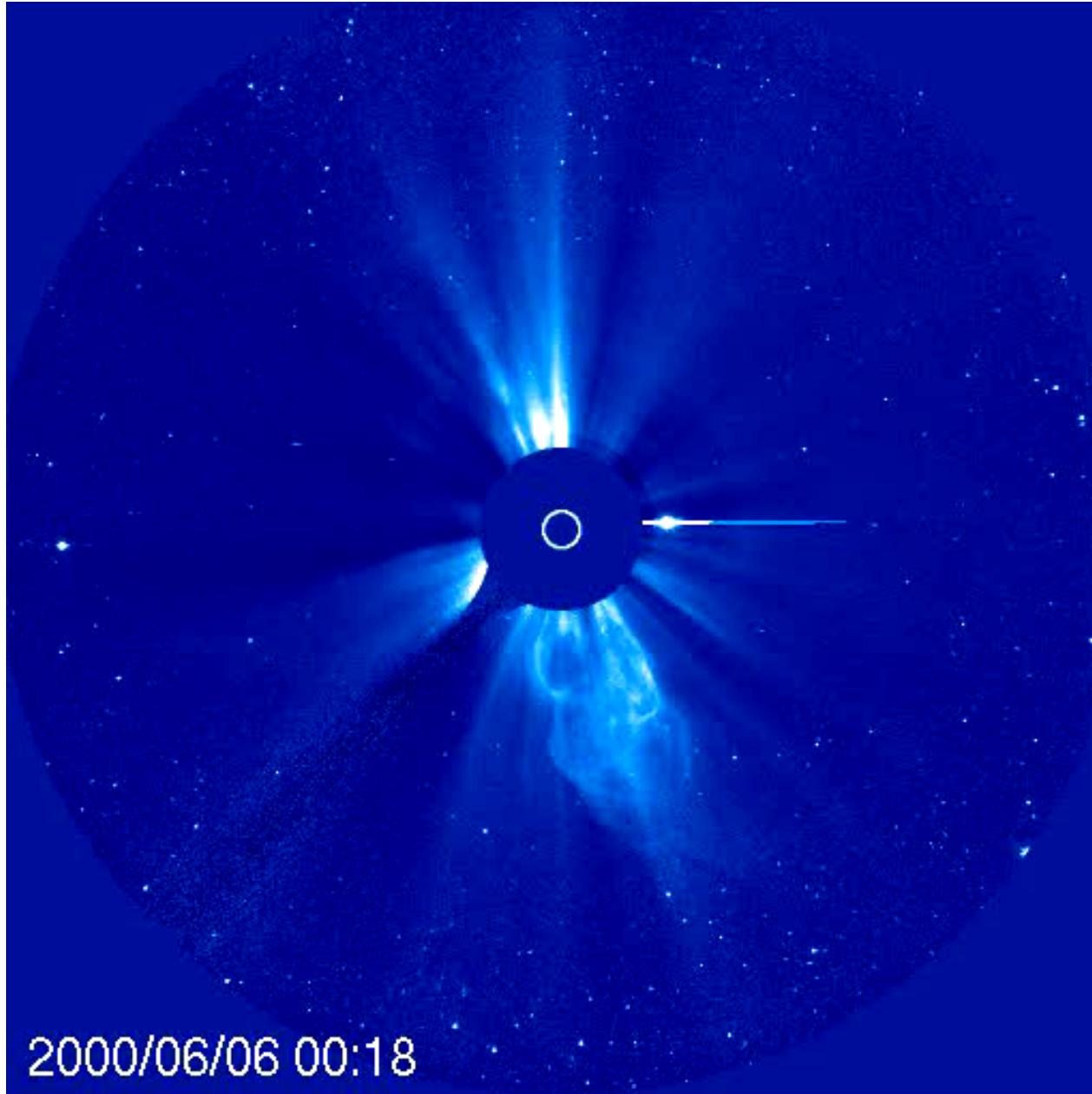
Fig. 5.25. Illustrazione schematica di un modello di flare. L'emersione di una nuova regione magnetica fa entrare in contatto campi magnetici di polarità opposta. Nella regione tratteggiata avviene il fenomeno di riconnessione magnetica con produzione di energia e di fasci di particelle accelerate. Le 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 α come un flare a due nastri.



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

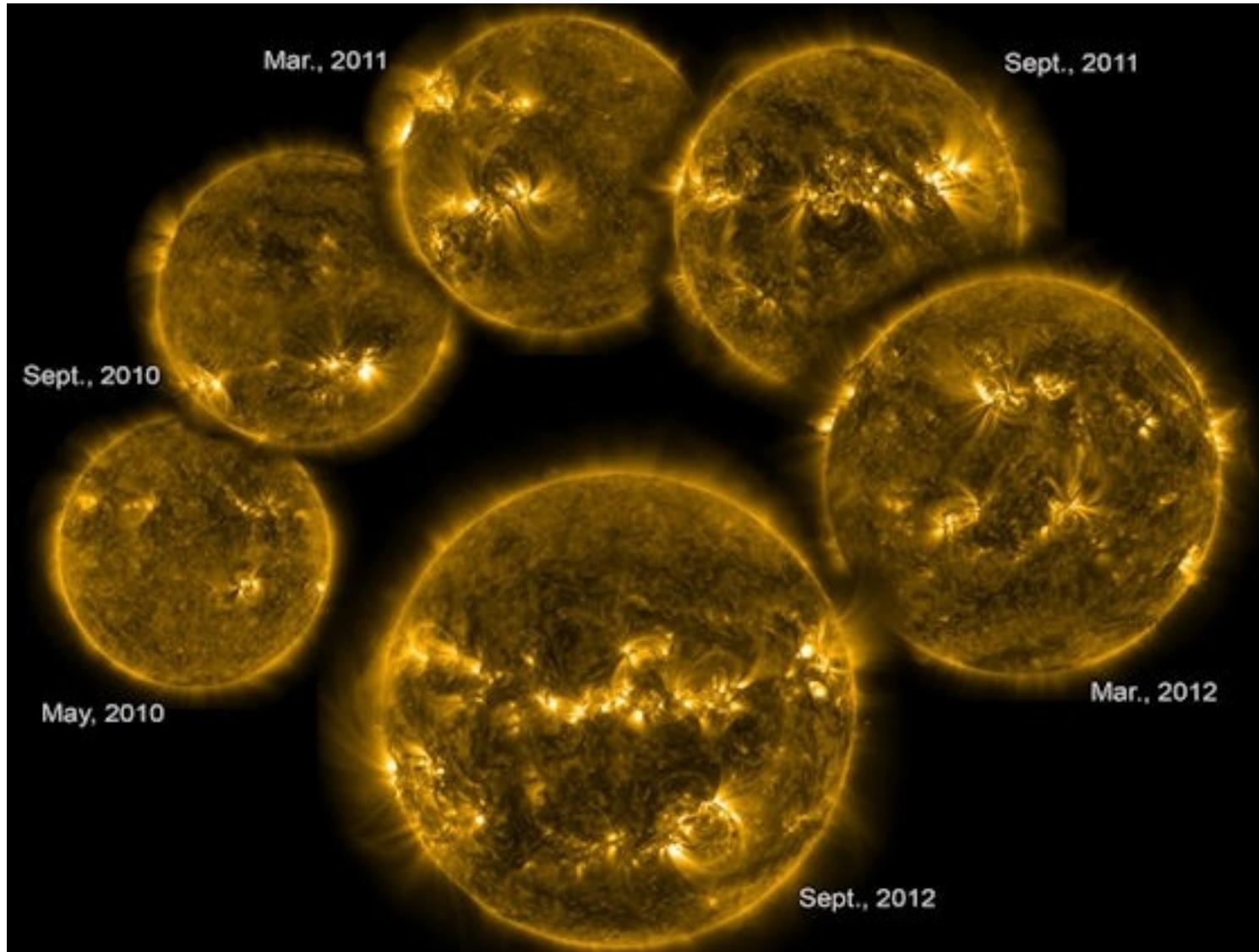
Circa 10^{13} kg di materiale viene espulso nel mezzo interplanetario ad una velocità di circa 500 km/s

Coronal Mass Ejections



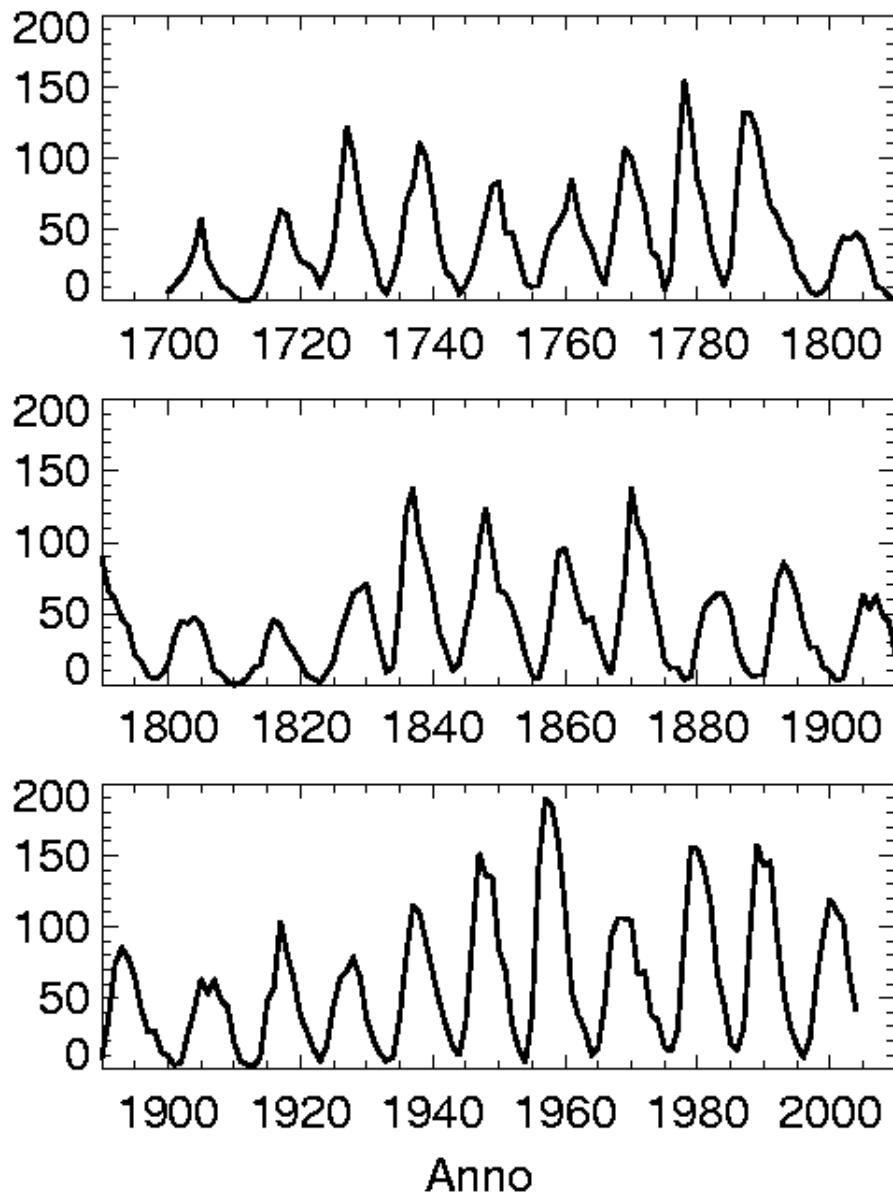
2000/06/06 00:18

Ciclo solare



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

Ciclo dell'attività solare



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

m = # di macchie

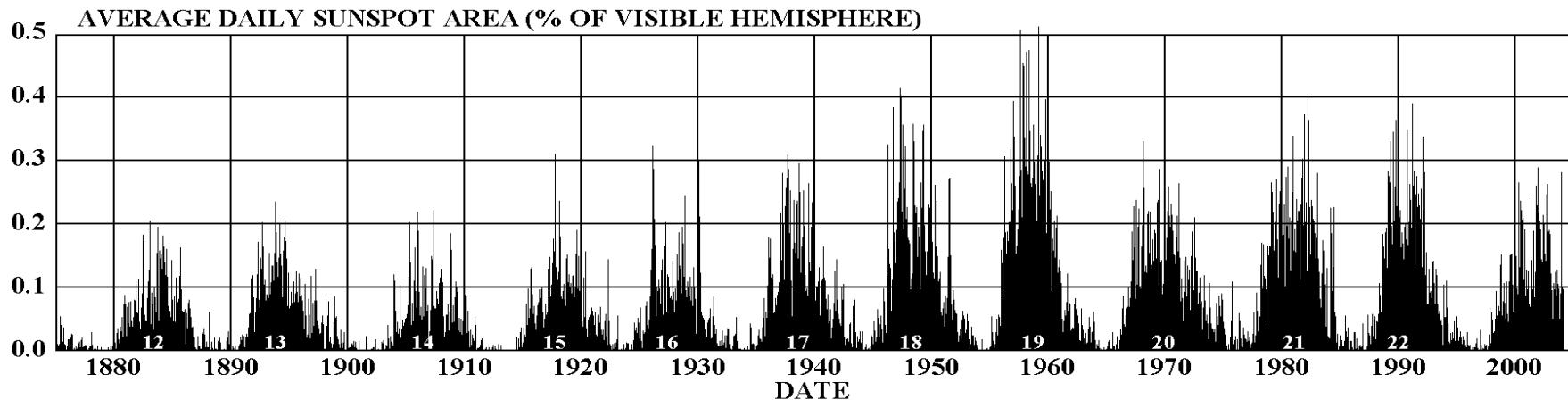
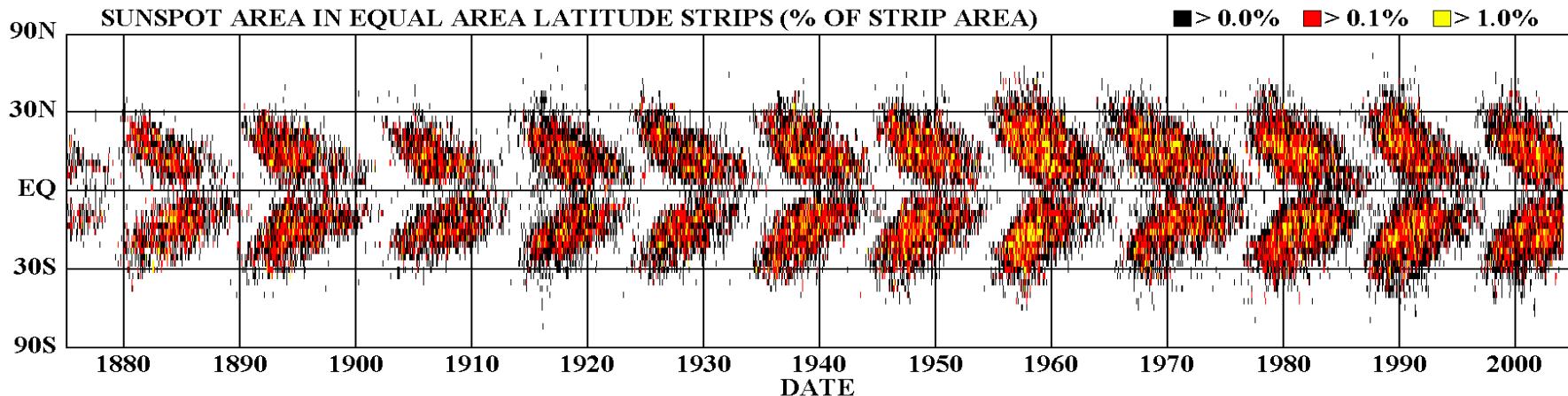
g = # di gruppi di macchie

k fattore correttivo

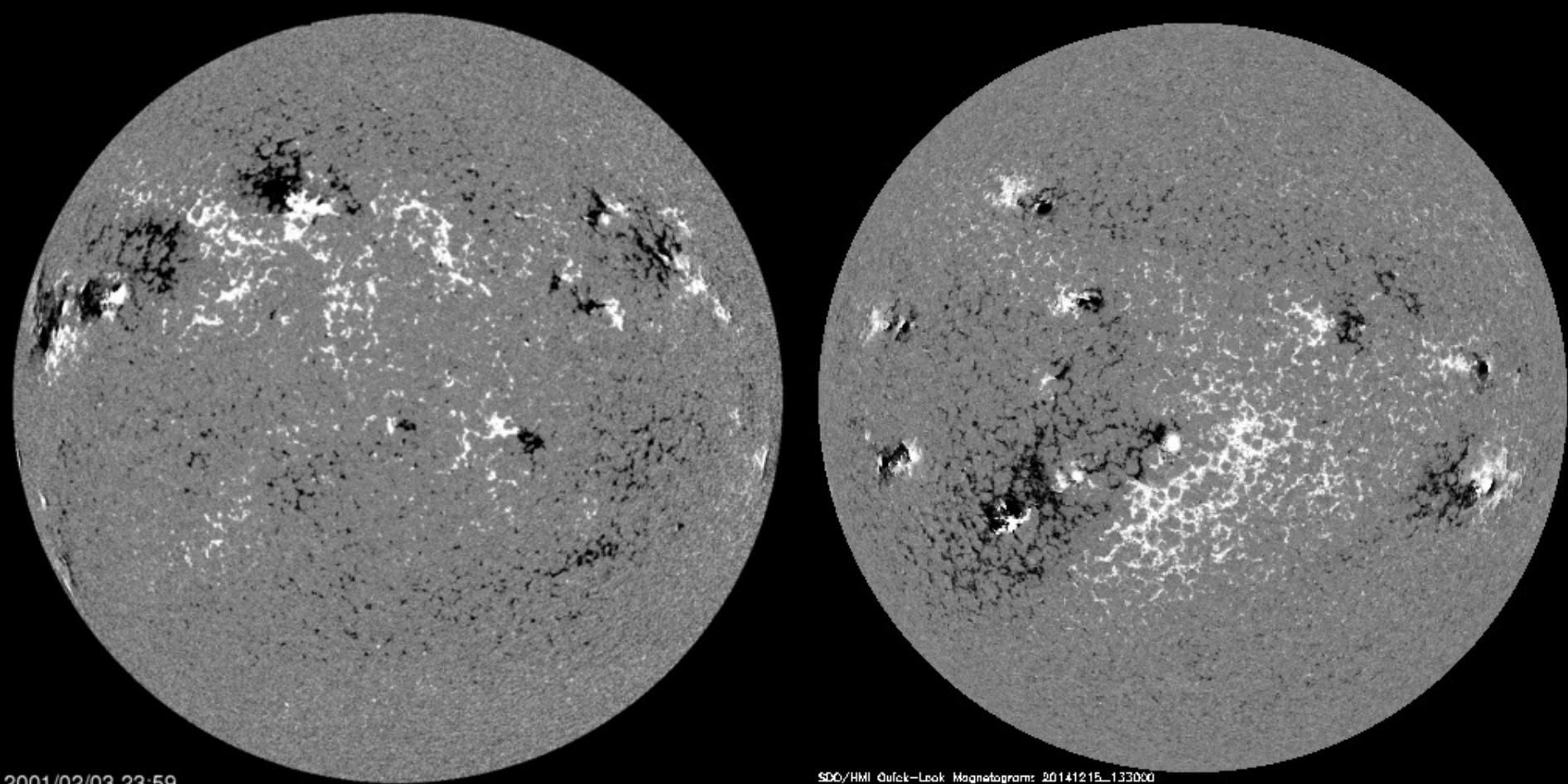
Il periodo che intercorre tra due massimi (o tra due minimi) è di circa 11 anni

Il diagramma a farfalla

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



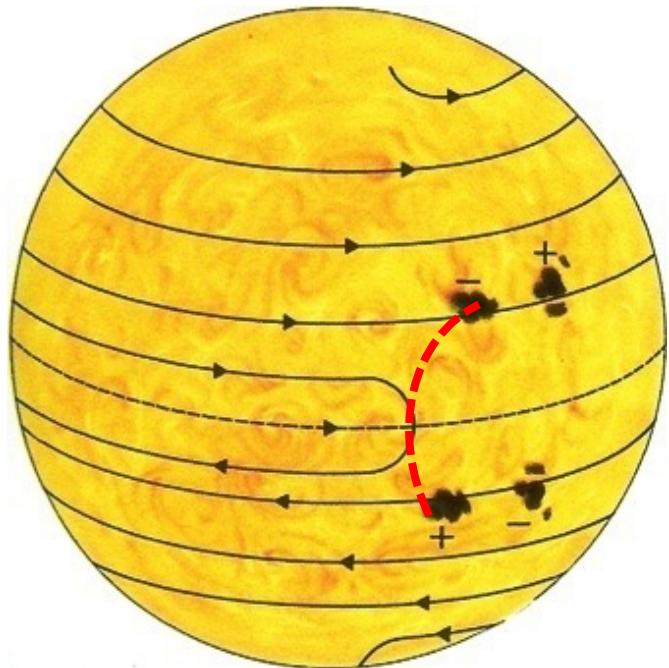
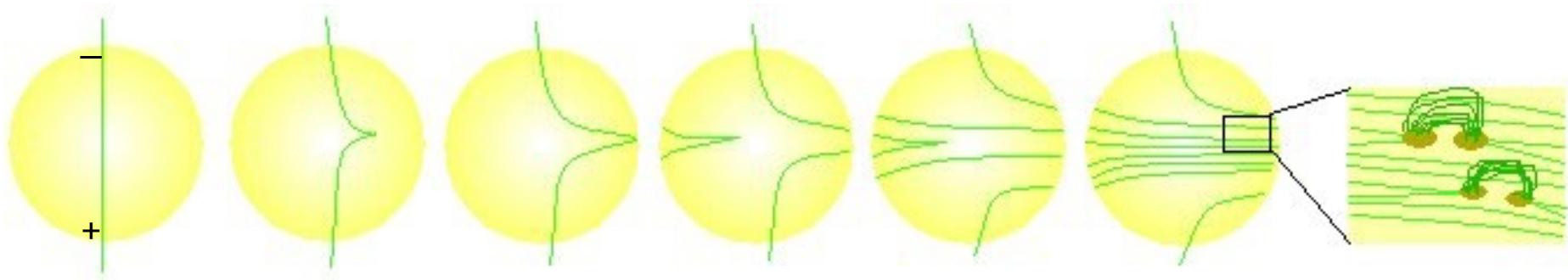
Prima della fase di massima attività le macchie sono a latitudini intermedie ($\approx 30^\circ$), quindi ‘migrano’ verso la zona equatoriale



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

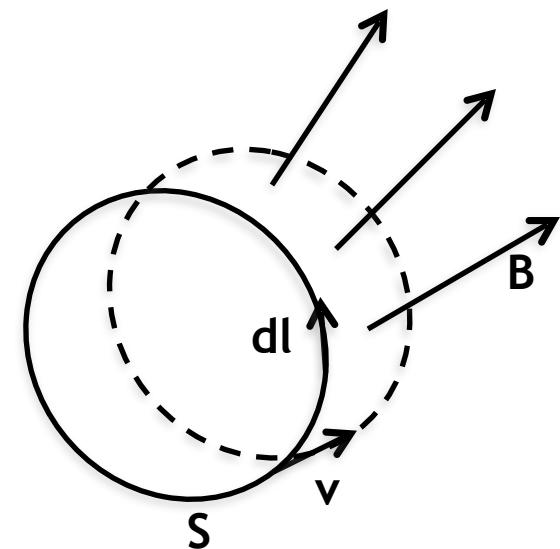
Le linee di campo magnetico sono ‘congelate’ nel plasma (conseguenza del teorema di Alfvèn)

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

Equazione di induzione per il campo magnetico

$$\eta = \frac{c^2}{4\pi\sigma\mu}$$

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 $\eta \rightarrow 0$

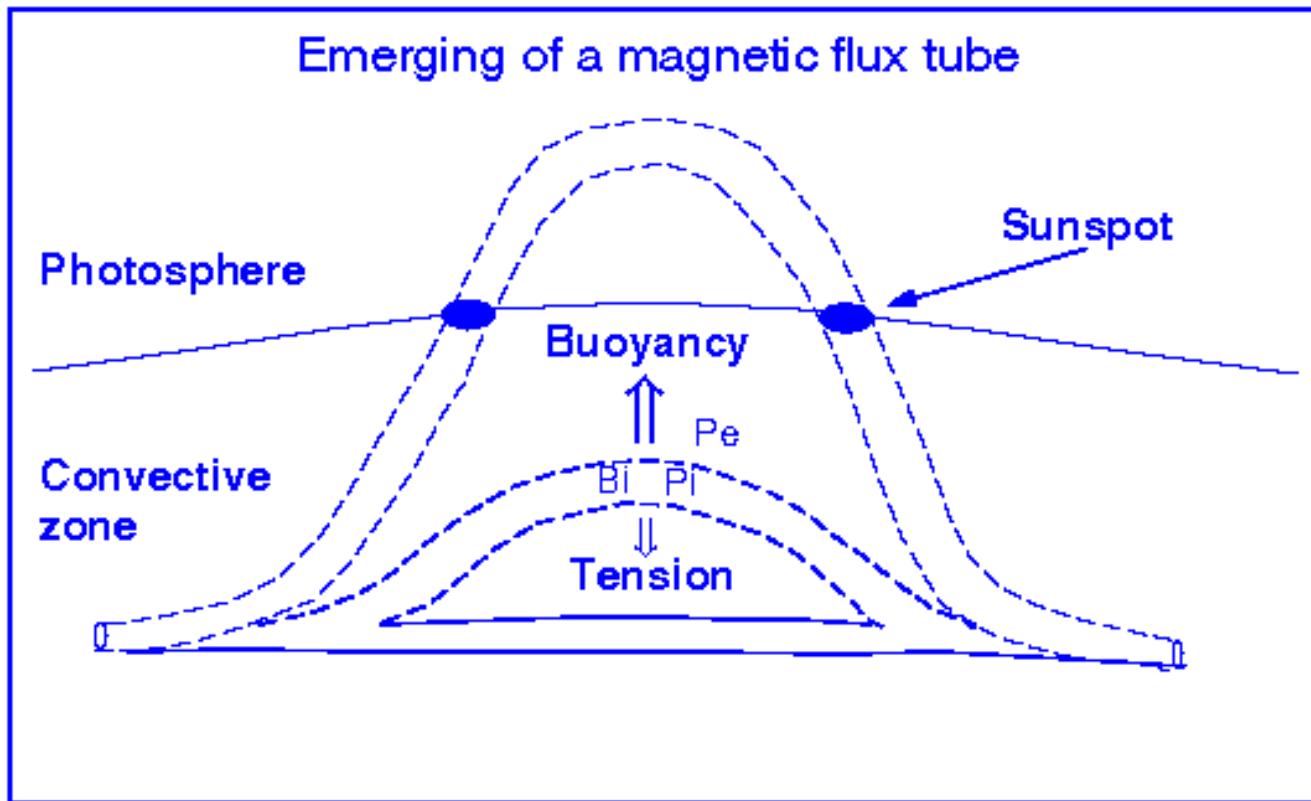
$$\begin{aligned} \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \hat{n} dS &= \int_S (\vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B})) \cdot \hat{n} dS = \oint (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = \\ &= - \oint \vec{B} \cdot (\vec{v} \times d\vec{l}) \end{aligned}$$

In un tempo dt verrà spazzata una superficie $v dt d\vec{l}$

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

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)

