Il Sole: la nostra stella

Francesco Berrilli

Dipartimento Di Fisica – Solar Physics Group

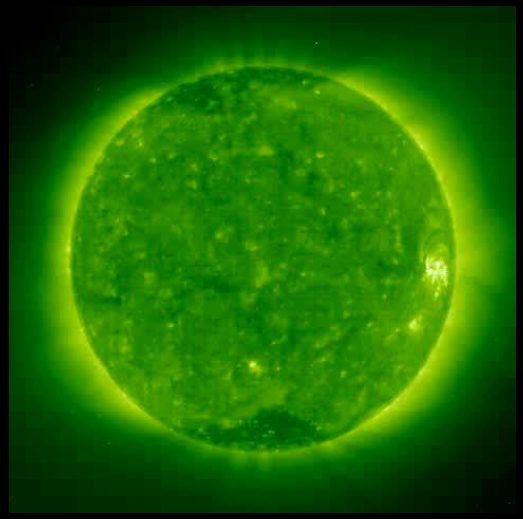
Università degli Studi di Roma Tor Vergata

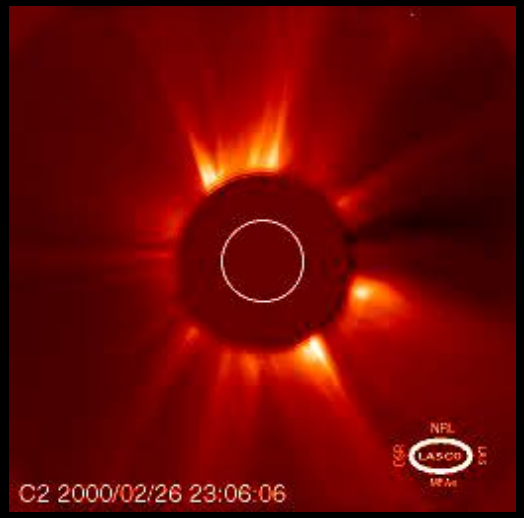
Mestre 9 Aprile 2010

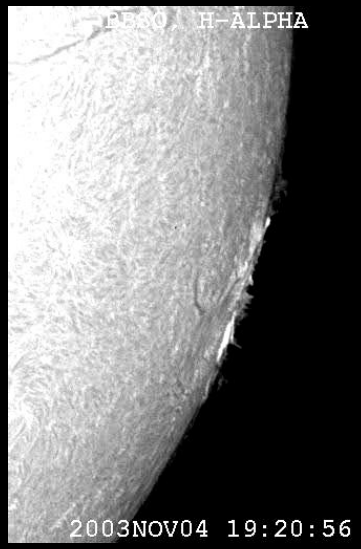
Il Sole...

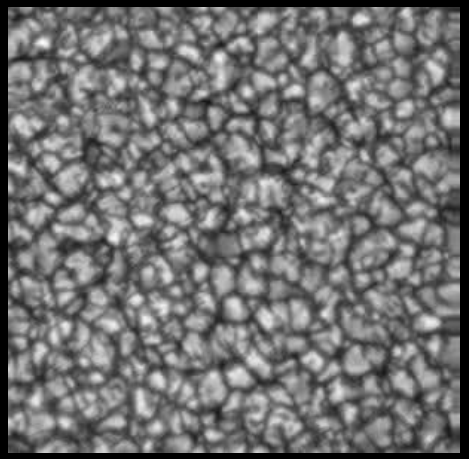
... un oggetto apparentemente semplice...

... o no?

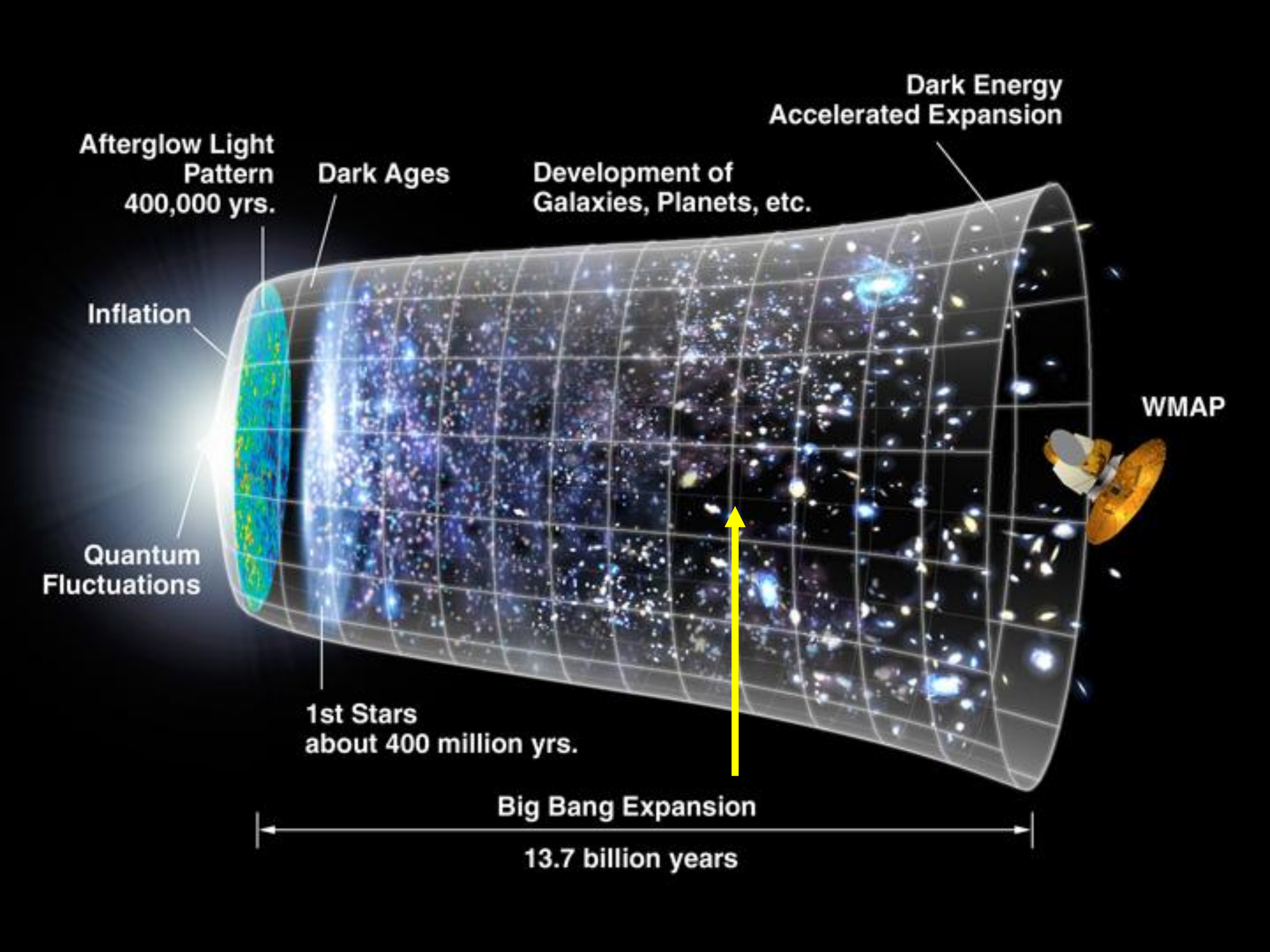


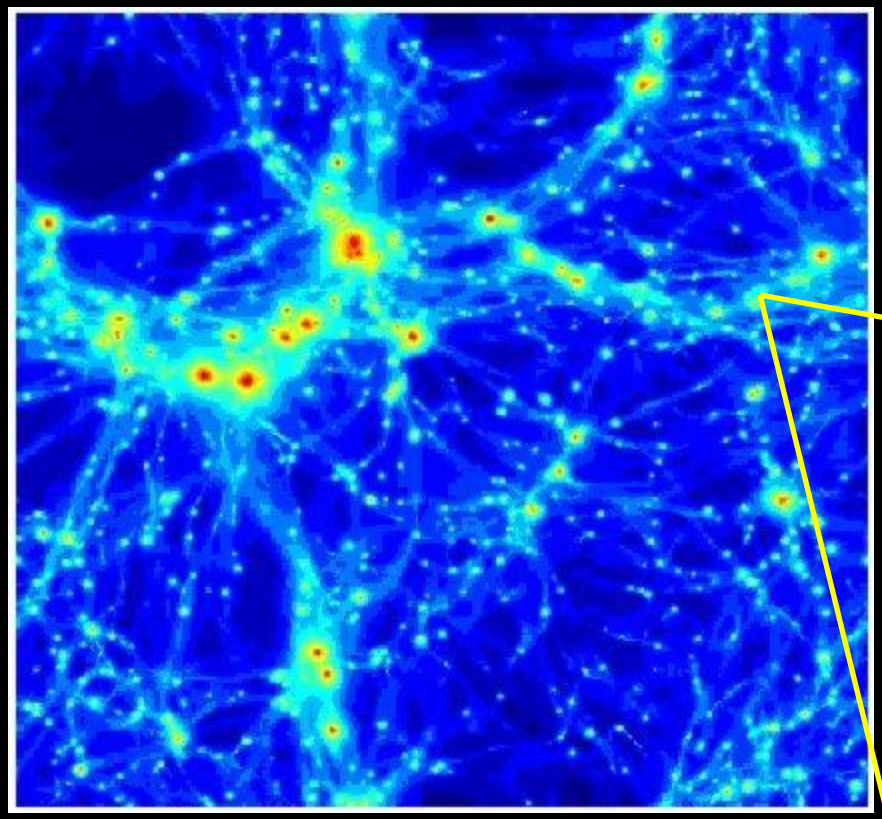


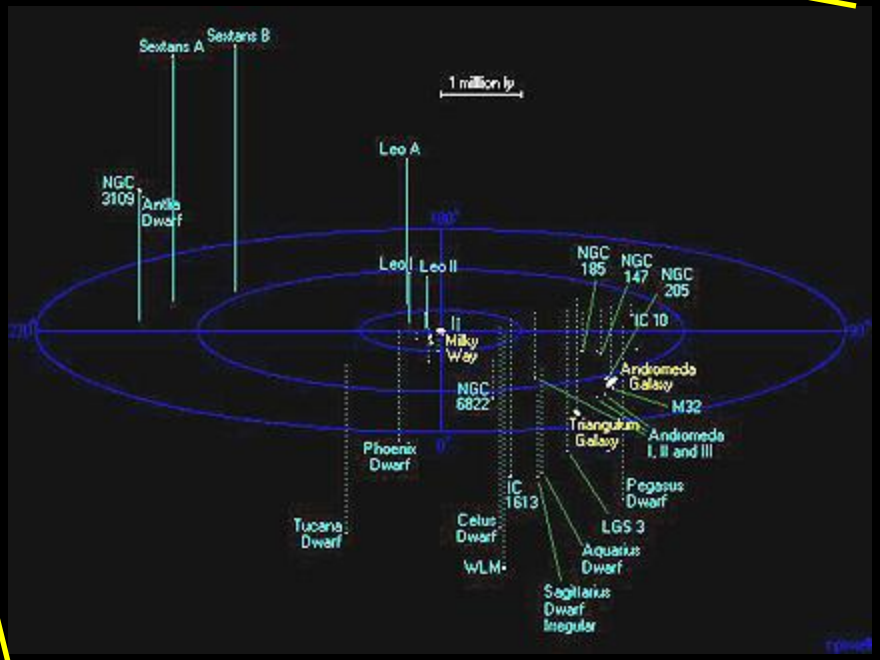




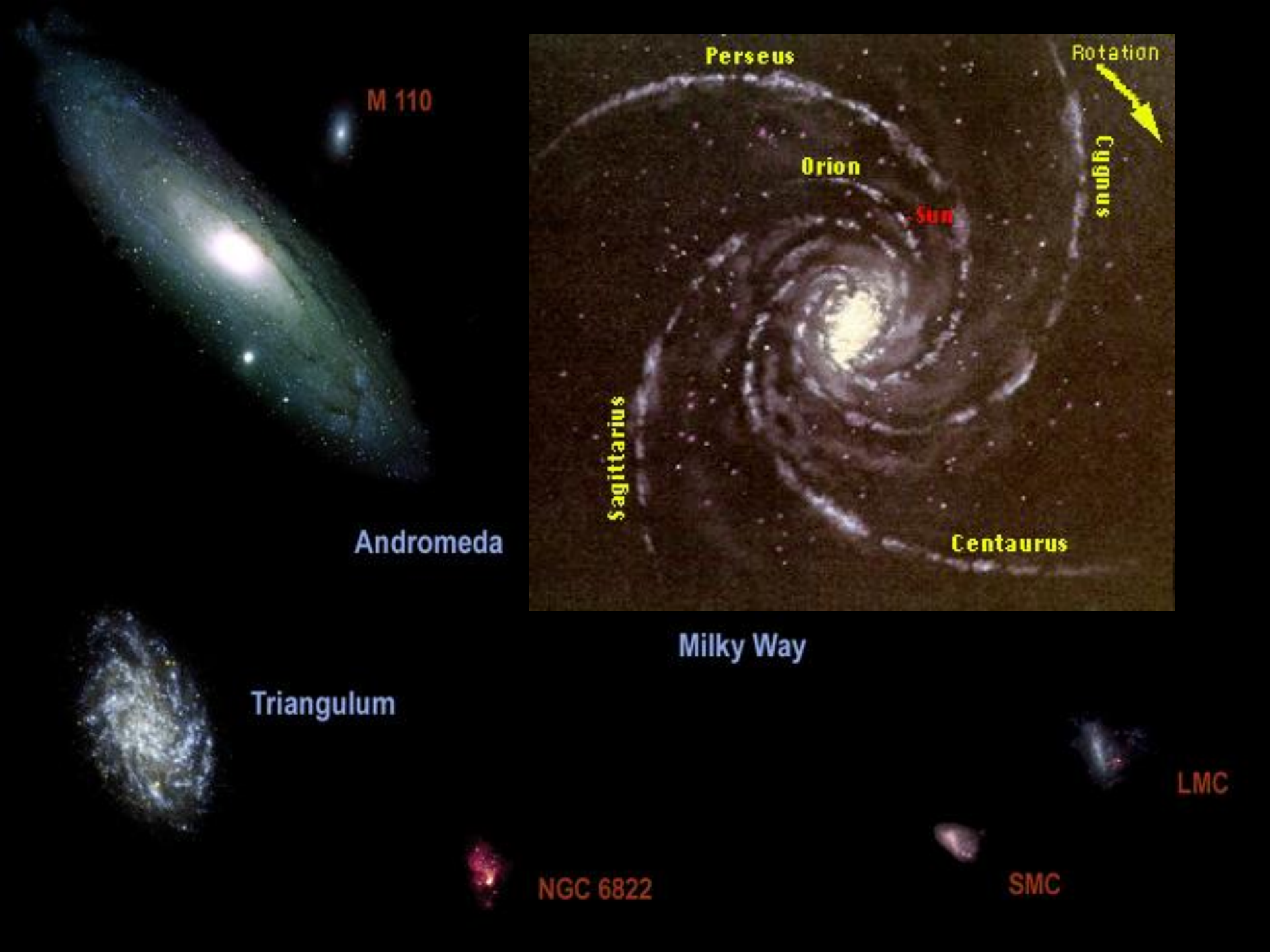
Filmati SOHO e Big Bear Solar Observatory

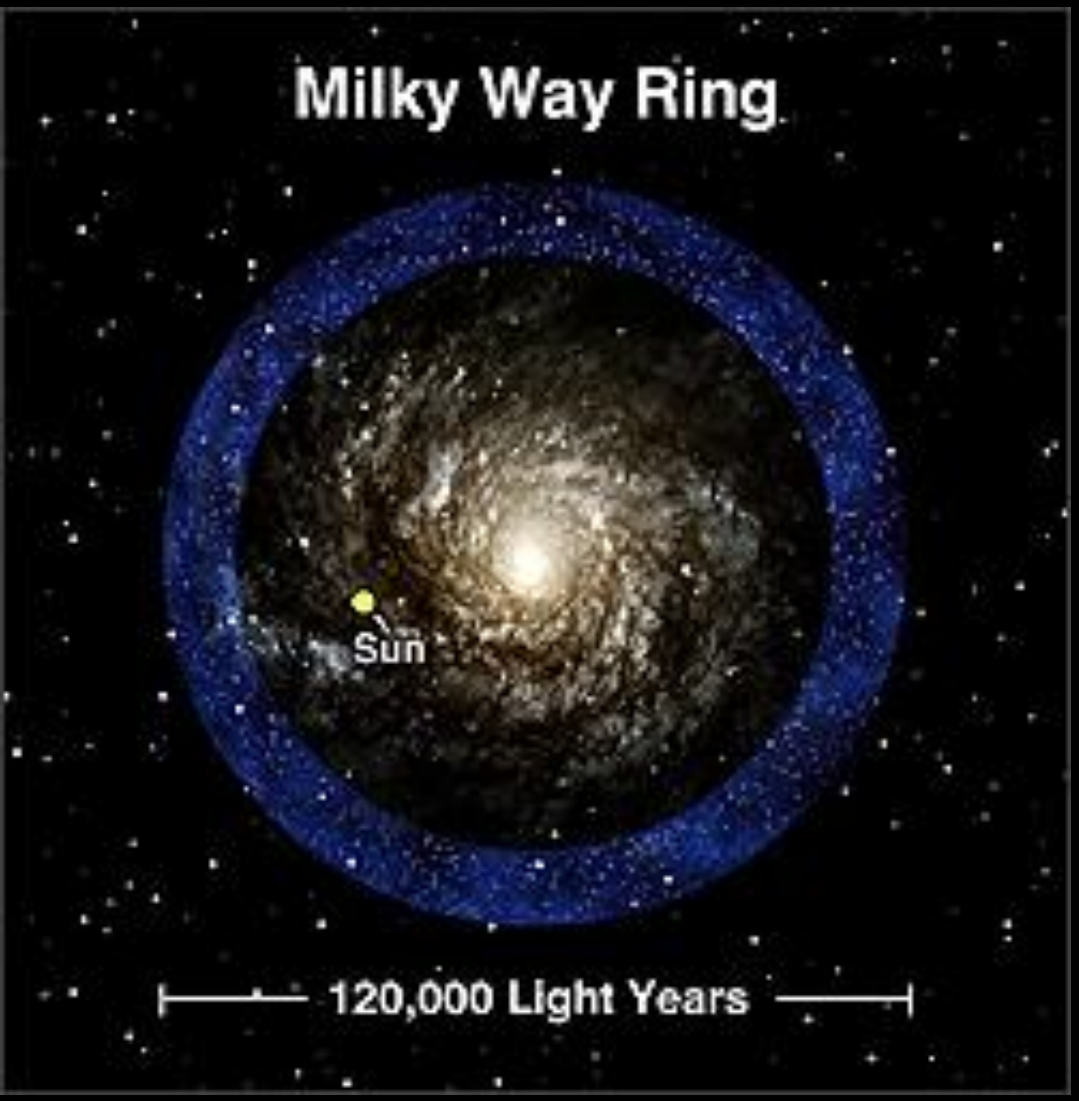

Dark Energy
Accelerated Expansion
Afterglow Light
Pattern
400,000 yrs.
Dark Ages
Development of
Galaxies, Planets, etc.
Inflation
WMAP
Quantum
Fluctuations
1st Stars
about 400 million yrs.
Big Bang Expansion
13.7 billion years





Simulazione che mostra la ragnatela cosmica di gas caldo come strutture filamentari azzurre. Negli addensamenti (gialli e rossi) si trovano gli ammassi ed i gruppi di galassie. L'immagine rappresenta un quadrato di lato pari a circa 60 milioni di a.l.

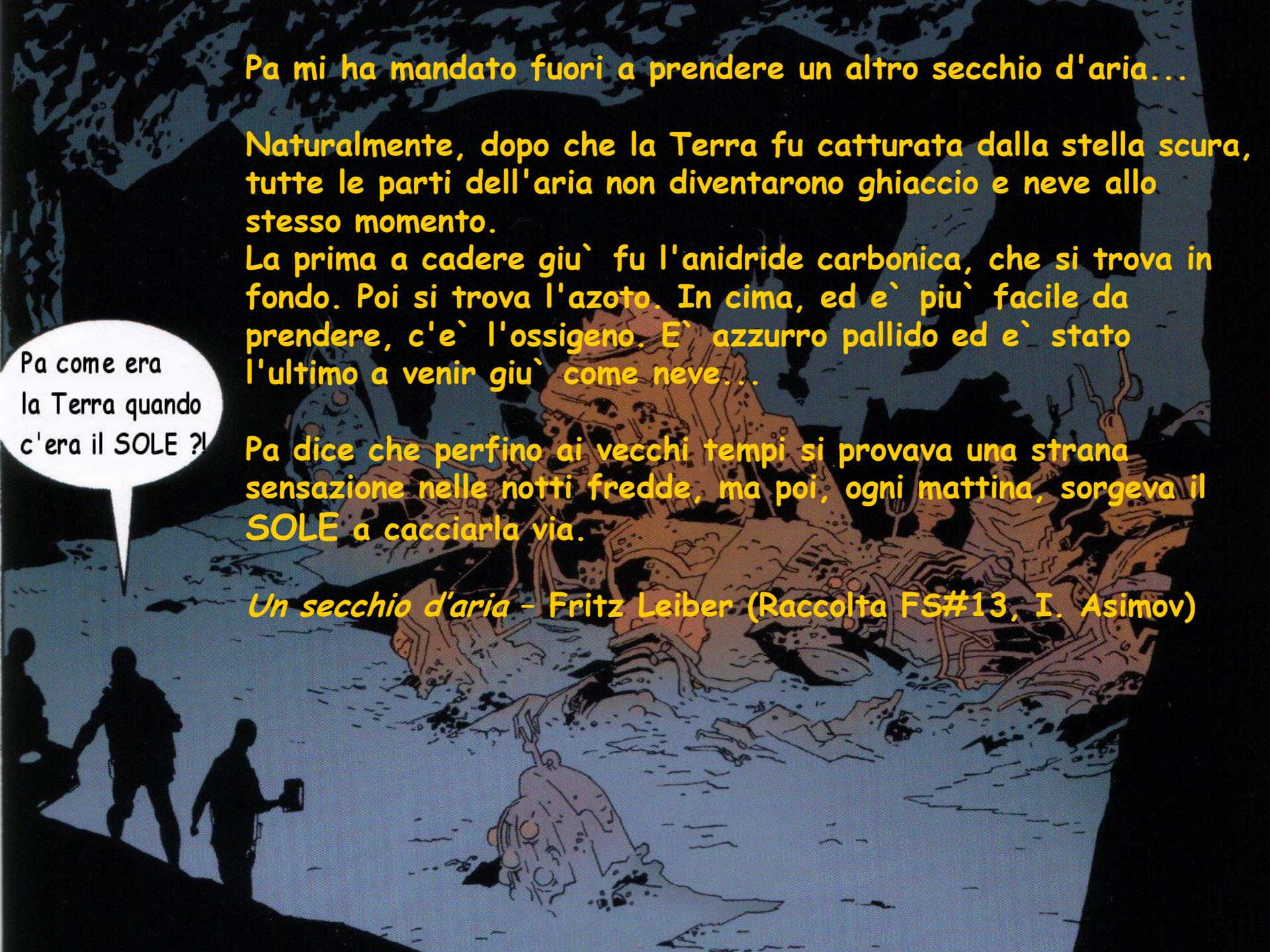

M 110
Andromeda
Perseus
Rotation
Orion
Cygnus
Sun
Sagittarius
Centaurus
Milky Way
Triangulum
LMC
NGC 6822
SMC



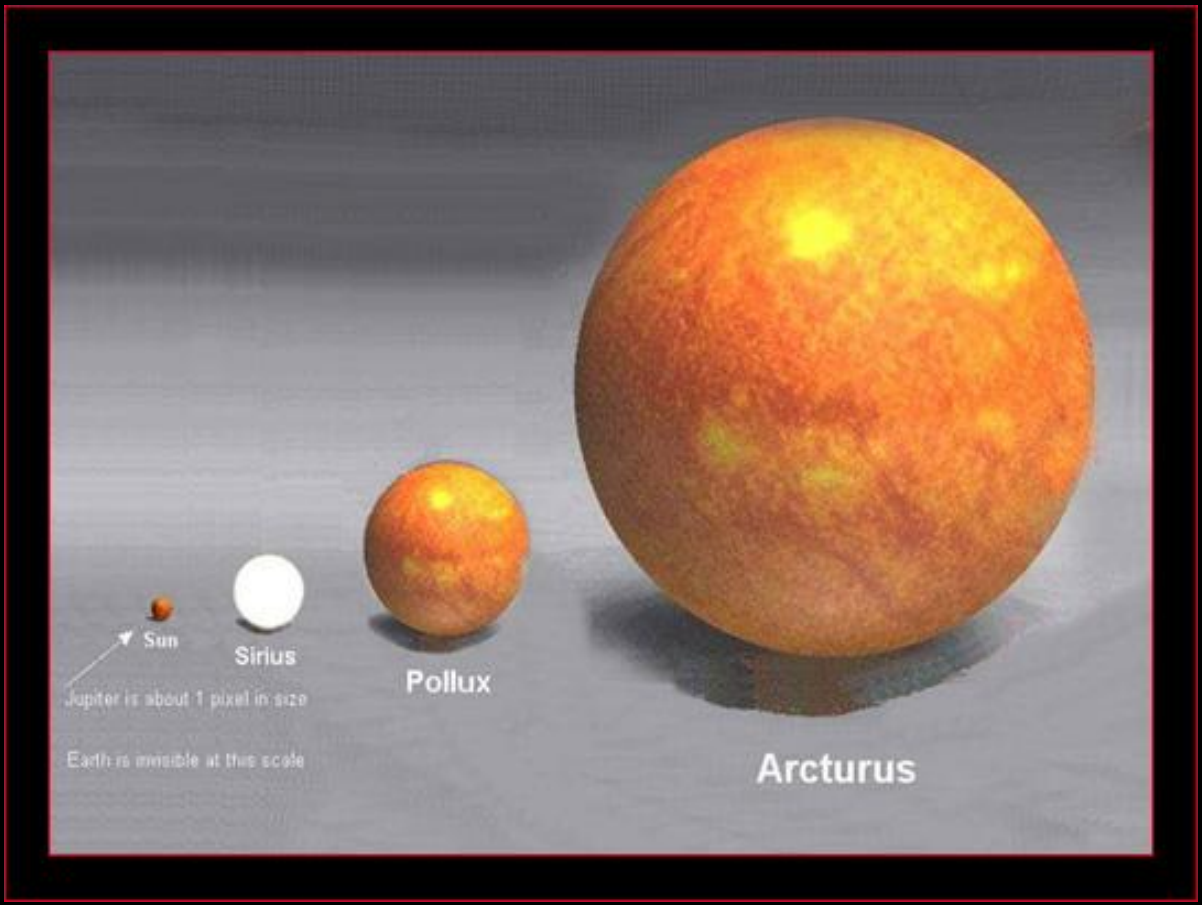
- Il Sole e` una stella, come altre 10^{11} nella nostra Galassia.
- Il Sole e` una stella "normale" , ma senza un esatto gemello.
- Il nostro sistema solare ruota attorno al nucleo della Galassia in ~$2x10^8$ anni attraversandone le strutture a braccio ad una velocita` di circa 828.000 km/h .

Il SOLE

La nostra stella non solo ci fornisce la luce, permettendo la vita sul pianeta, ma ha affascinato l'uomo durante la sua storia: lo abbiamo immaginato come un dio, ne abbiamo studiato il passaggio attraverso la sfera celeste, e da sempre proviamo a capirne il funzionamento ed a predirne il comportamento.


Pa mi ha mandato fuori a prendere un altro secchio d'aria...
Naturalmente, dopo che la Terra fu catturata dalla stella scura, tutte le parti dell'aria non diventarono ghiaccio e neve allo stesso momento.
La prima a cadere giu` fu l'anidride carbonica, che si trova in fondo. Poi si trova l'azoto. In cima, ed e` piu` facile da prendere, c'e` l'ossigeno. E` azzurro pallido ed e` stato l'ultimo a venir giu` come neve...
Pa dice che perfino ai vecchi tempi si provava una strana sensazione nelle notti fredde, ma poi, ogni mattina, sorgeva il SOLE a cacciarla via.
Un secchio d'aria – Fritz Leiber (Raccolta FS#13, I. Asimov)
Pa come era la Terra quando c'era il SOLE ?!

... E’ una piccola stella ...



Il Sole in confronto con Sirio (Alpha Canis Majoris) Pollux (Beta Geminorum) e Arcturus (Alpha Bootis)

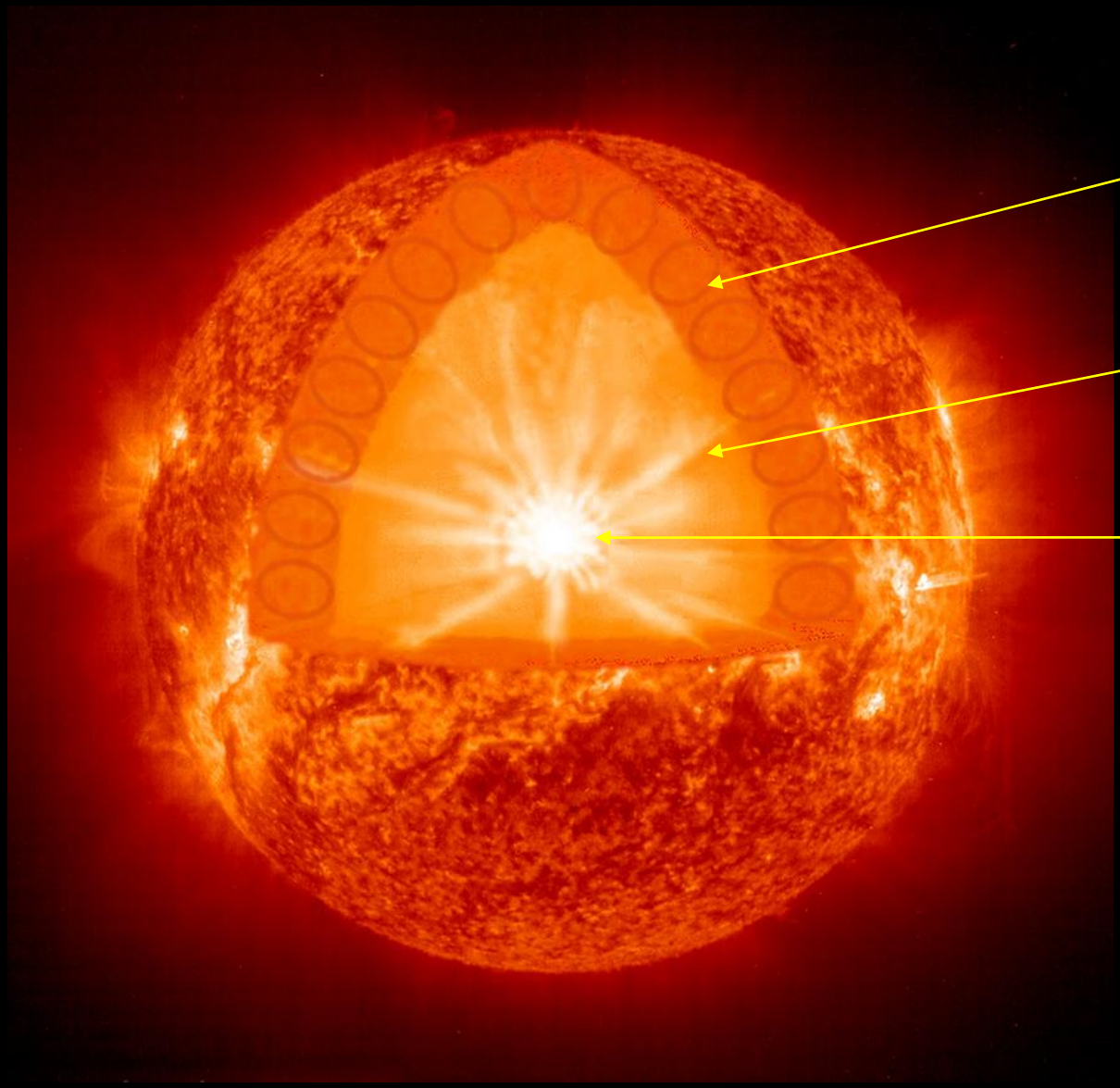
... ma è l'unica che osserviamo così bene!

Carta d' identita` del Sole

	SOLE	TERRA
Eta`	$4.6\ 10^9$	$4.5\ 10^9$
<Distanza>	$1.49\ 10^8$ km	-
Diametro	$1.4\ 10^6$ km	$1.2\ 10^4$ km
Massa	$2.0\ 10^{30}$ kg	$6.0\ 10^{24}$ kg
$\langle\rho\rangle$	1.4 g/cm^3	5.5 g/cm^3
Energia emessa(*)	**$3.9\ 10^{23}$ kW**	-
Velocita` fuga	618 km/s	11.15 km/s
Temperatura cent.	$15\ 10^6$ K	6000 (?) K

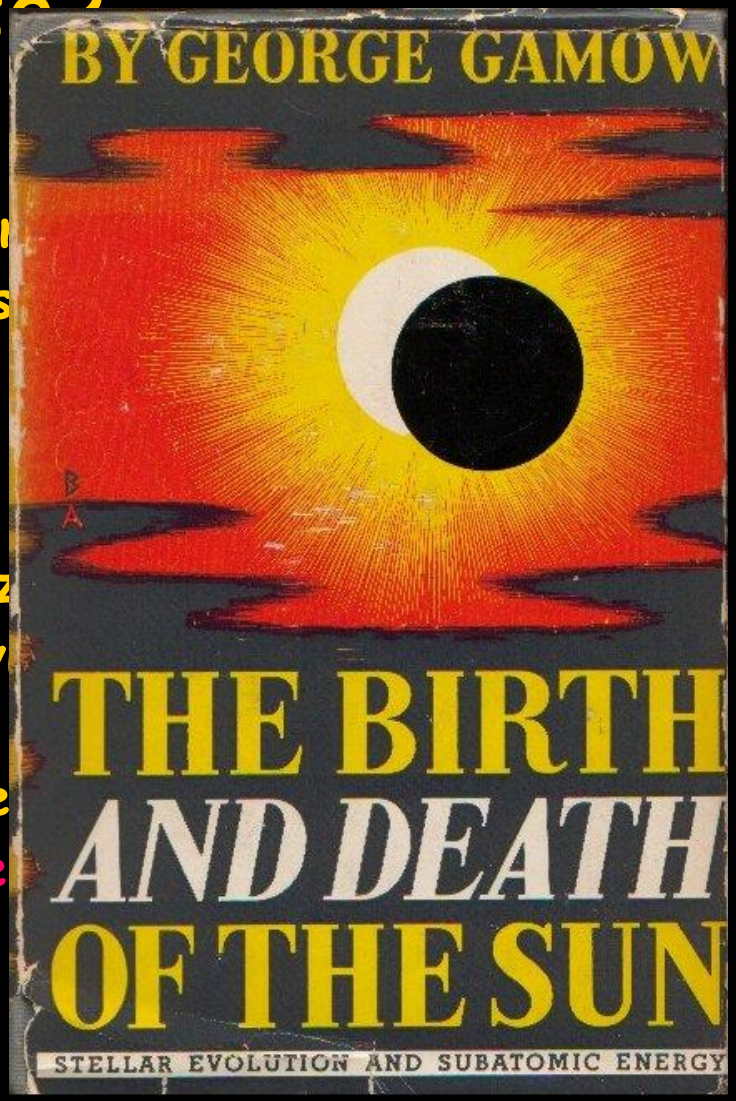
(*) 1sec energia necessaria agli USA per 4000000 di anni.

Struttura interna del Sole



Quale processo permette al Sole di essere cosi` luminoso?

1672: dimensione e distanza (G.D. Cassi
1837: misura della costante solare (Hers
Reazioni chimiche?
Contrazione gravitazionale del Sole (Von
Ipotesi meteorica (Lord Kelvin)
1920: composizione terrestre? Annichilaz
1925: Il sole e` fatto di H – Cecilia Pay
1928: Effetto Tunnel (G. Gamow)
Costruzione di elementi pesanti (Oppenhe
1936: La catena protone-protone (Bethe



Nelle normali reazioni chimiche interagiscono le componenti esterne dell'atomo, gli elettroni. Le reazioni nucleari sono un tipo di reazione "chimica" in cui ad interagire sono i nuclei degli atomi, piuttosto che i gusci elettronici esterni. Le interazioni a livello nucleare richiedono una gran quantita` di energia per iniziare la reazione, ma allo stesso tempo rilasciano un'incredibile quantita` di energia durante la reazione. Nelle stelle, le reazioni nucleari consistono principalmente nella fusione di nuclei di idrogeno per formare nuclei di elio.

L'incredibile temperatura al centro del sole e` di 15,000.000 di gradi. A questa temperatura gli atomi di idrogeno sono distrutti, risultando in una mistura di nuclei di idrogeno e di elettroni carichi negativamente che non fanno piu` parte di atomi. Il nucleo di idrogeno e` una particella carica postivamente chiamato protone.

Una storia che inizia al centro del Sole

Immaginiamo di trovarci in un laboratorio di Fisica al centro del Sole:

- T ~ 15.000.000 K. Tutti gli elementi sono dissociati e molti atomi hanno perso i loro elettroni.
- <ρ> 160 volte piu`densa dell'acqua.
- Ci sono H, e, N ed He che si muovono a ~ 100/1000 km/s.

$^{1}H + ^{1}H \Rightarrow ^{2}H + e^{+} + \nu_e$

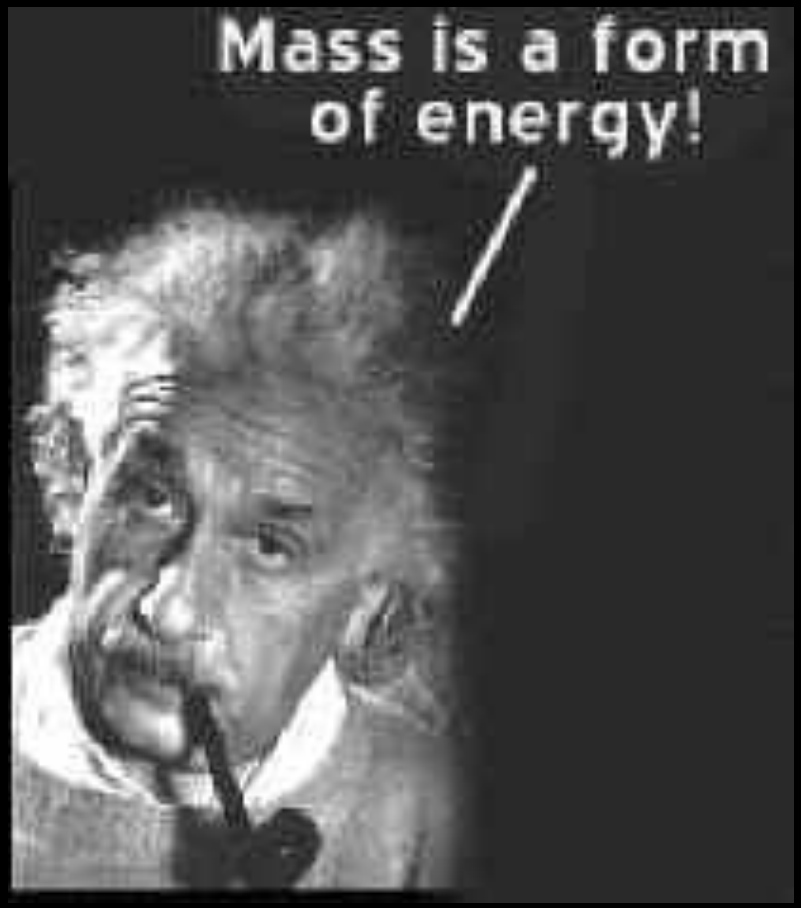
$^{2}H + ^{1}H \Rightarrow ^{3}He + \gamma$

γ (hard X-ray)

$^{3}He + ^{3}He \Rightarrow ^{4}He + 2\,^{1}H$

Una storia che inizia al centro del Sole

- La ragione fondamentale per cui l'energia viene rilasciata risiede nel fatto che le quattro particelle che formano il nucleo di He hanno una massa leggermente maggiore, prima di combinarsi. La perdita di massa *m* equivale ad una perdita di energia *E* in accordo alla famosa equazione di Einstein:
- $$E = mc^2$$
- c = 300000000 m/s



Temperatura

~2×10^8 °K

C'e` il bruciamento di He

$3\ {}^4He \rightarrow {}^{12}C + \gamma$

${}^4He + {}^{12}C \rightarrow {}^{16}O + \gamma$

${}^4He + {}^{16}O \rightarrow {}^{20}Ne + \gamma$

${}^4He + {}^{20}Ne \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$

~5×10^8 °K

Bruciamento di C

${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$

${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{23}Na + {}^1H$

${}^{12}C + {}^{12}C \rightarrow {}^{20}Ne + {}^4He$

~10×10^8 °K

C'e` una kiriade di reazioni

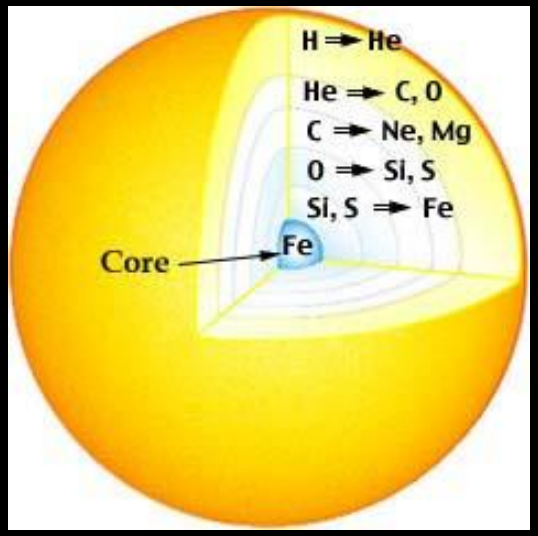
${}^{20}Ne \rightarrow {}^4He + {}^{16}O$

${}^{20}Ne + {}^4He \rightarrow {}^{24}Mg + \gamma$

$2\ {}^{20}Ne \rightarrow {}^{16}O + {}^{24}Mg + \gamma$

${}^{24}Mg + {}^4He \rightarrow {}^{28}Si + \gamma$

${}^{44}Ca + {}^4He \rightarrow {}^{48}Ti + \gamma$

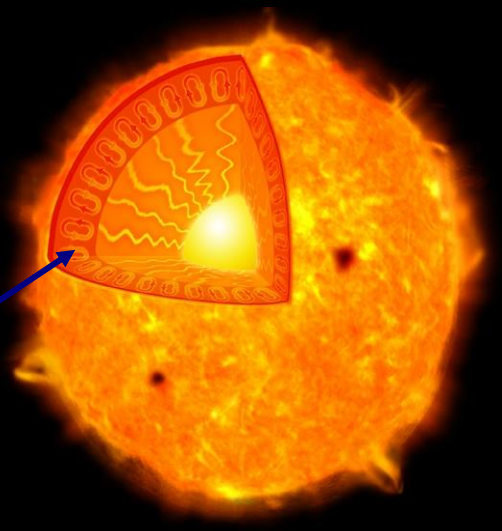


La zona convettiva

Temperatura: 6600 K

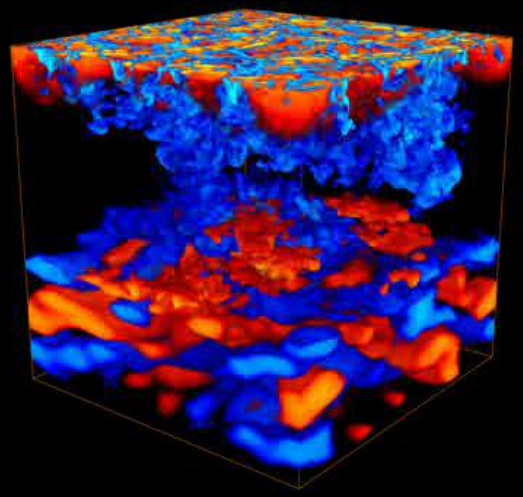
Densità: 1 – 10^{-6} g/cm^3

Raggio: da 490.000 a 700.000 Km

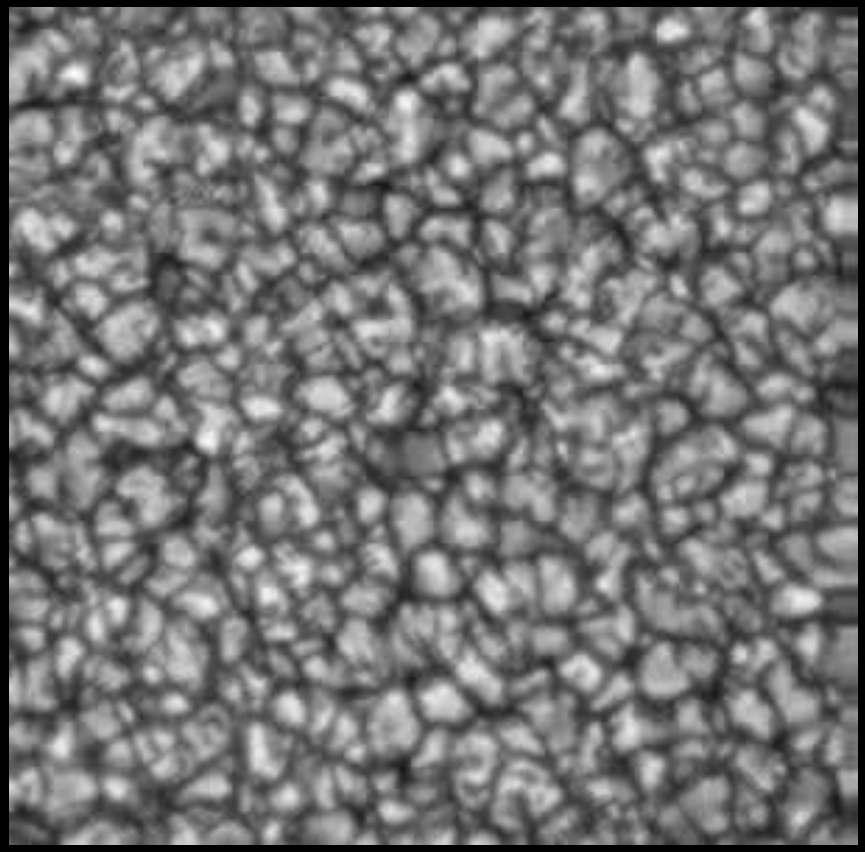


In questa zona la materia è troppo fredda ed opaca per far passare la radiazione degli strati inferiori.

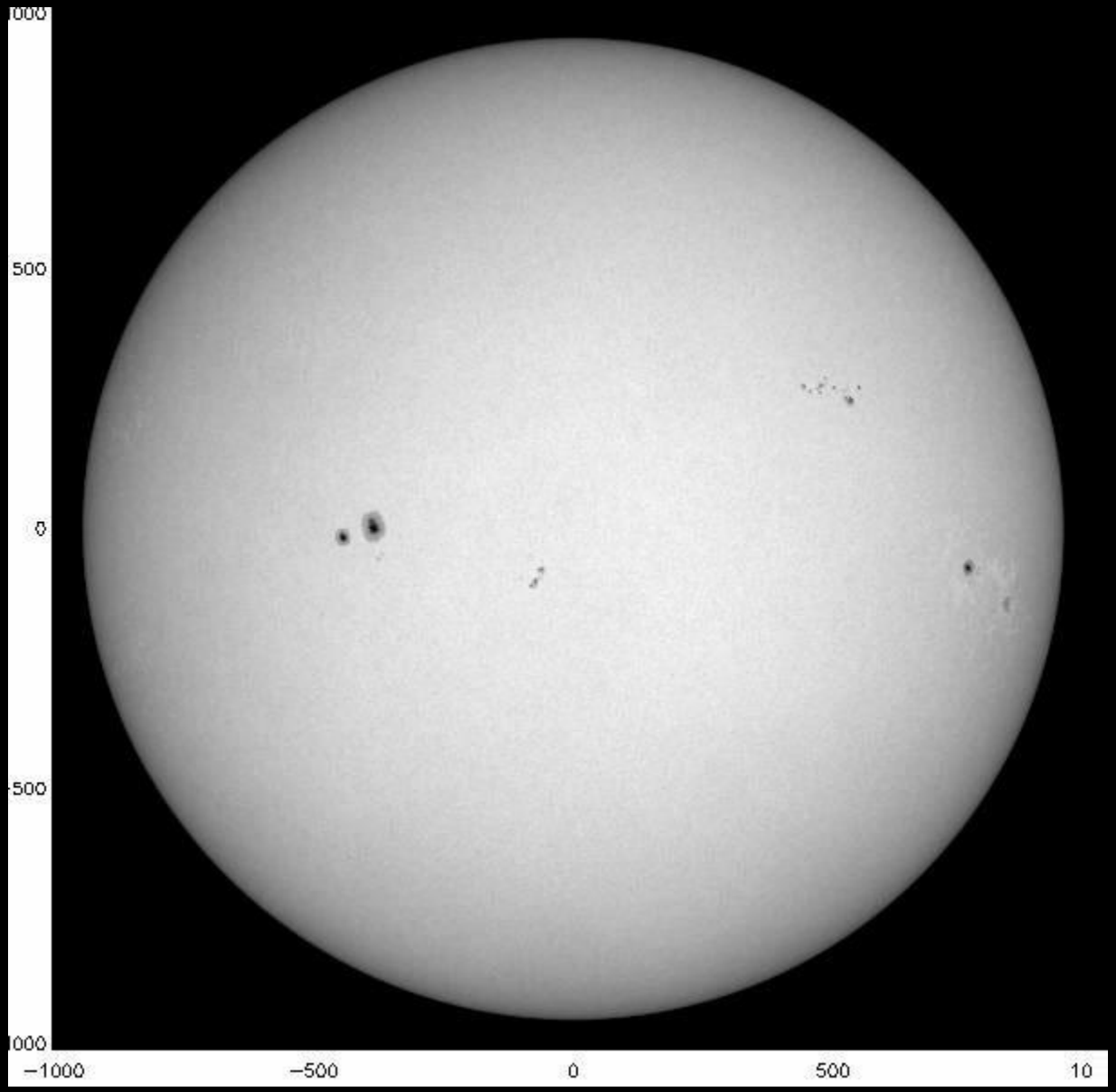
L'energia accumulata deve essere smaltita in altri modi. Si instaurano quindi enormi **correnti convettive.**



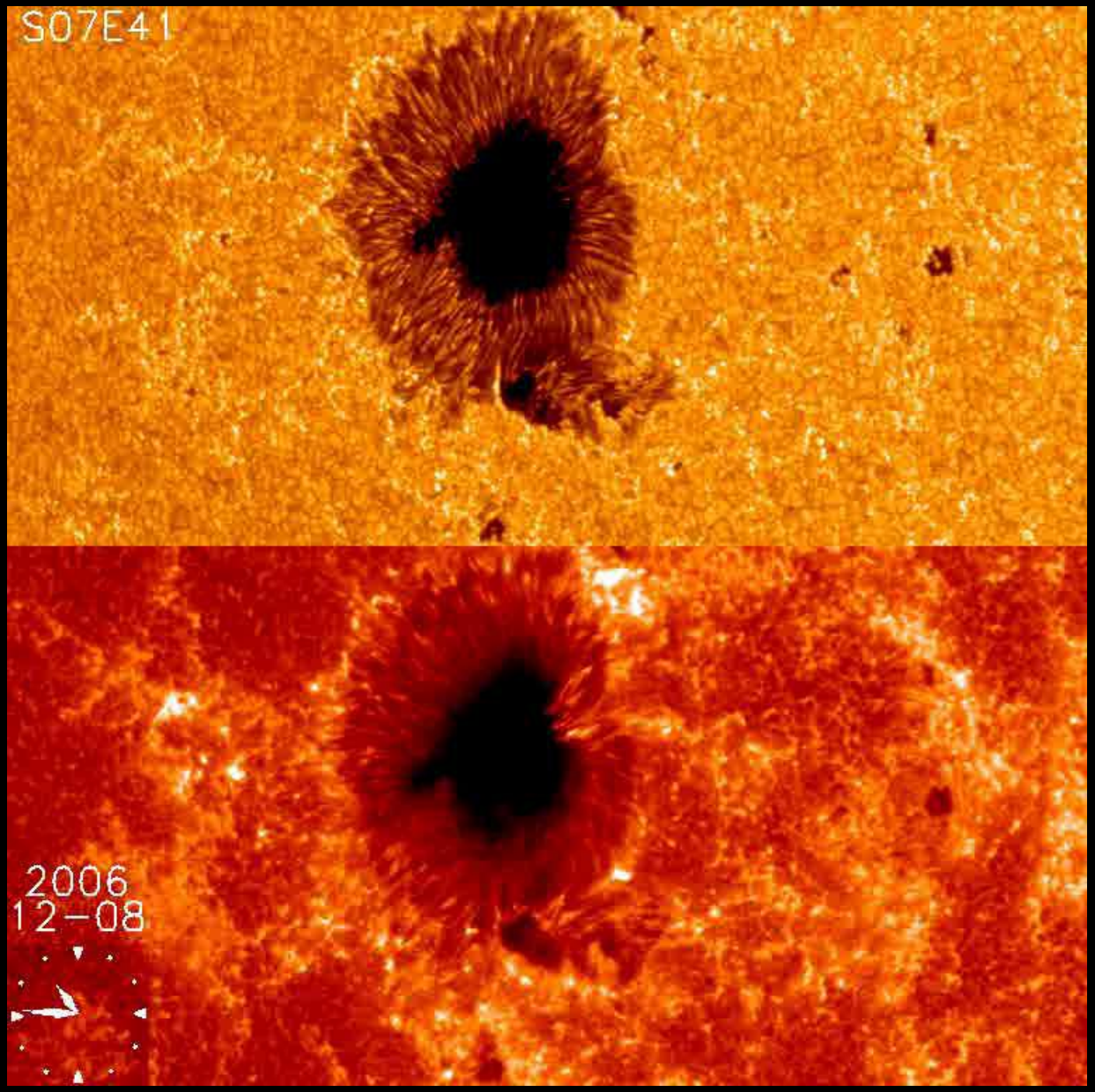
Simulazione di convezione



La granulazione: l’effetto della convezione sulla superficie solare.



Come e` il sole ad alta risoluzione?

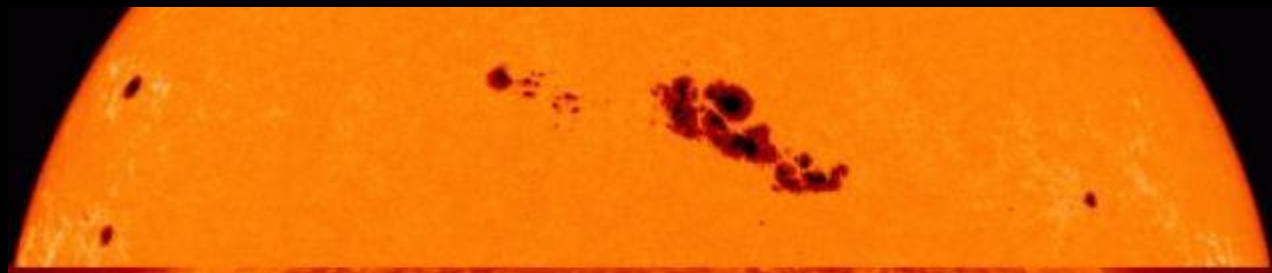


La superfice

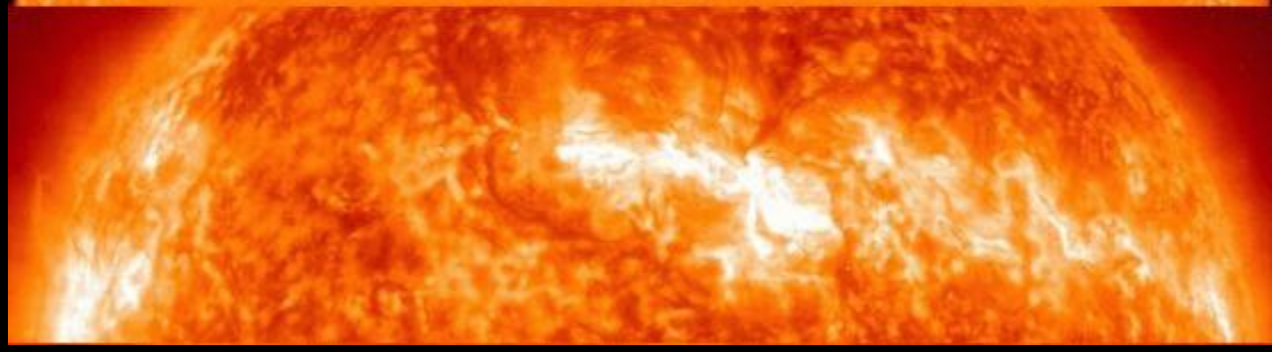
Osservazioni continue della regione attiva, con numerosi flare, NOAA 10930. La regione e` osservata da SOT a bordo del satellite Hinode nel periodo 6-19 dicembre 2007.

Sopra: G-band (fotosfera), Sotto: Ca II H (Cromosfera)

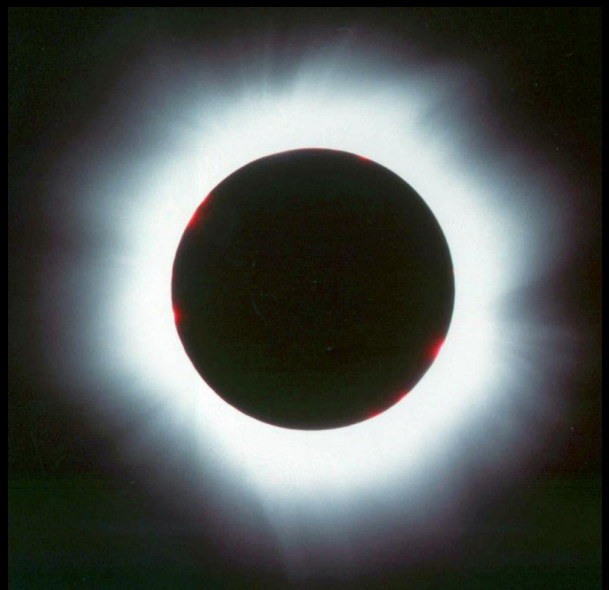
Fotosfera
dominio del plasma



Cromosfera
dominio dei campi magnetici



Corona
sede di processi ad alta energia, dominati dal campo magnetico.

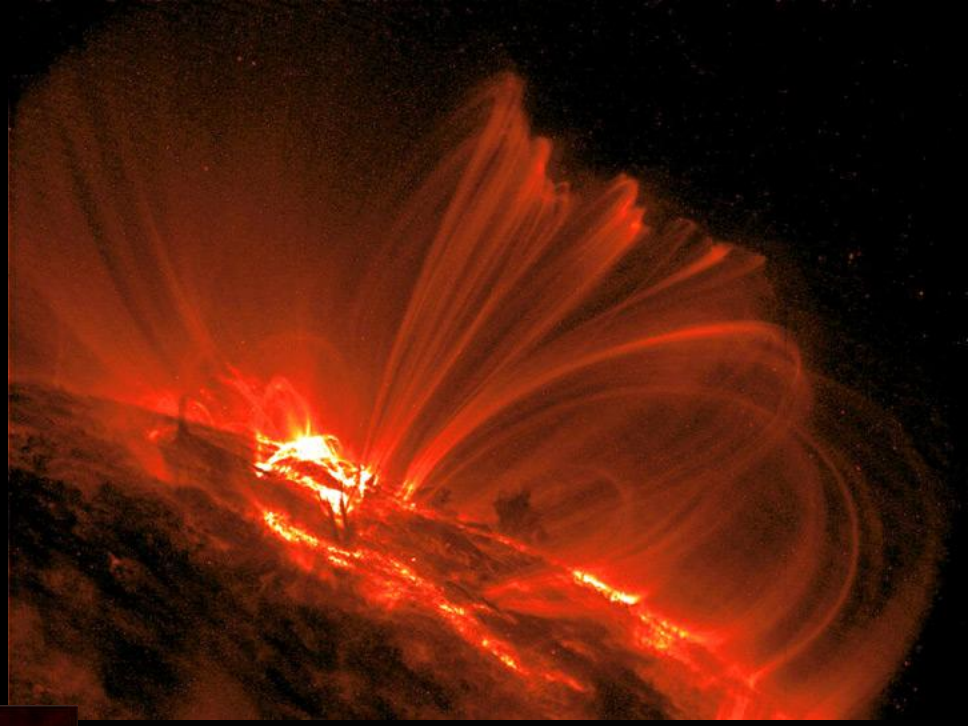


Il Sole ruota più rapidamente all'equatore che ai poli.

Il campo magnetico viene "attorcigliato" ed emerge sulla superficie come arcate.

“Loop” magnetici

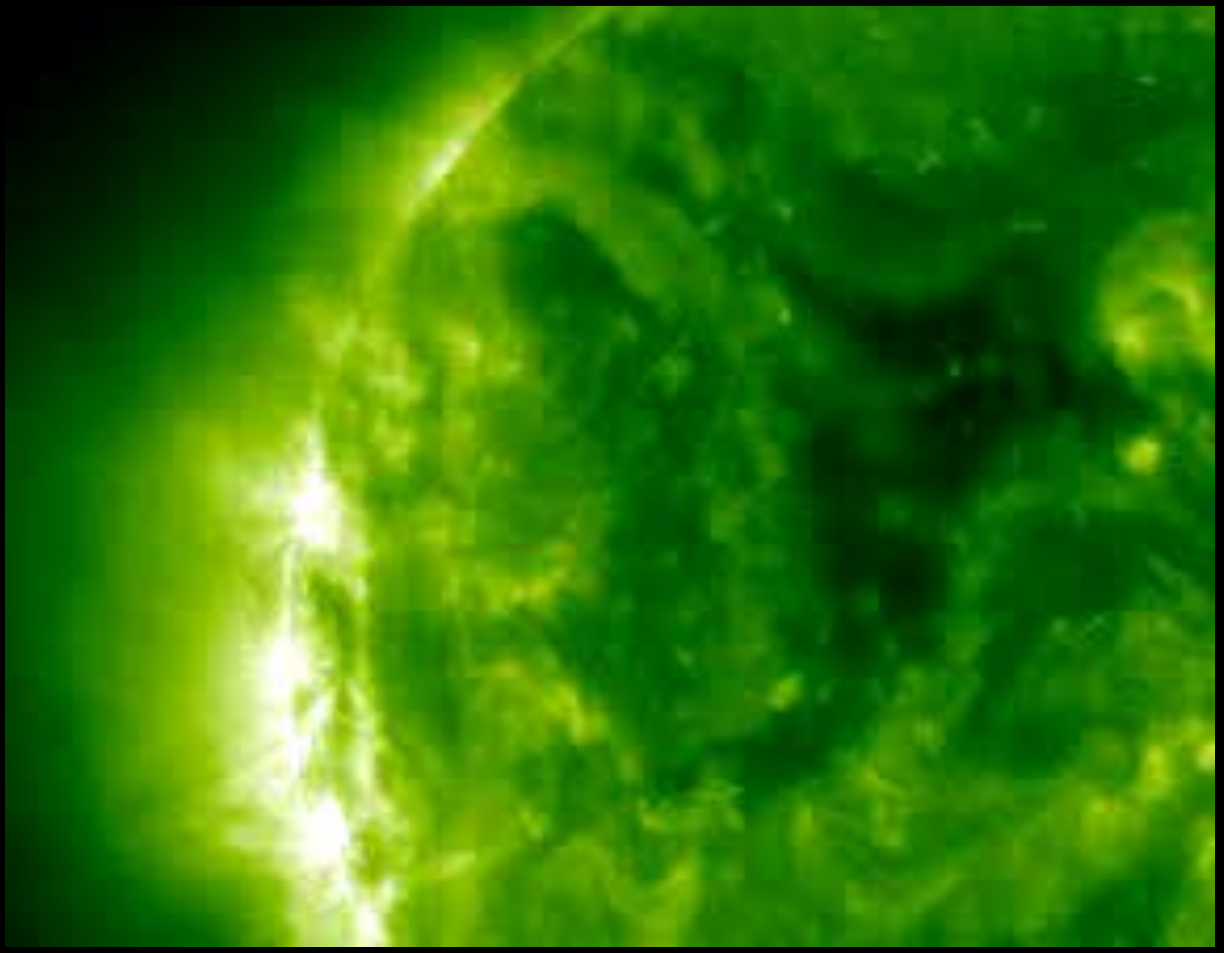
Le linee di campo magnetico si innalzano da zone polarizzate positivamente e si ripiegano su se stesso verso regioni di polarità opposta.



Filamenti

Il plasma viene trascinato dai loop magnetici a cui è congelato e li rende visibili. I filamenti si innalzano per migliaia di km sulla superficie del Sole.

Il campo magnetico sul Sole



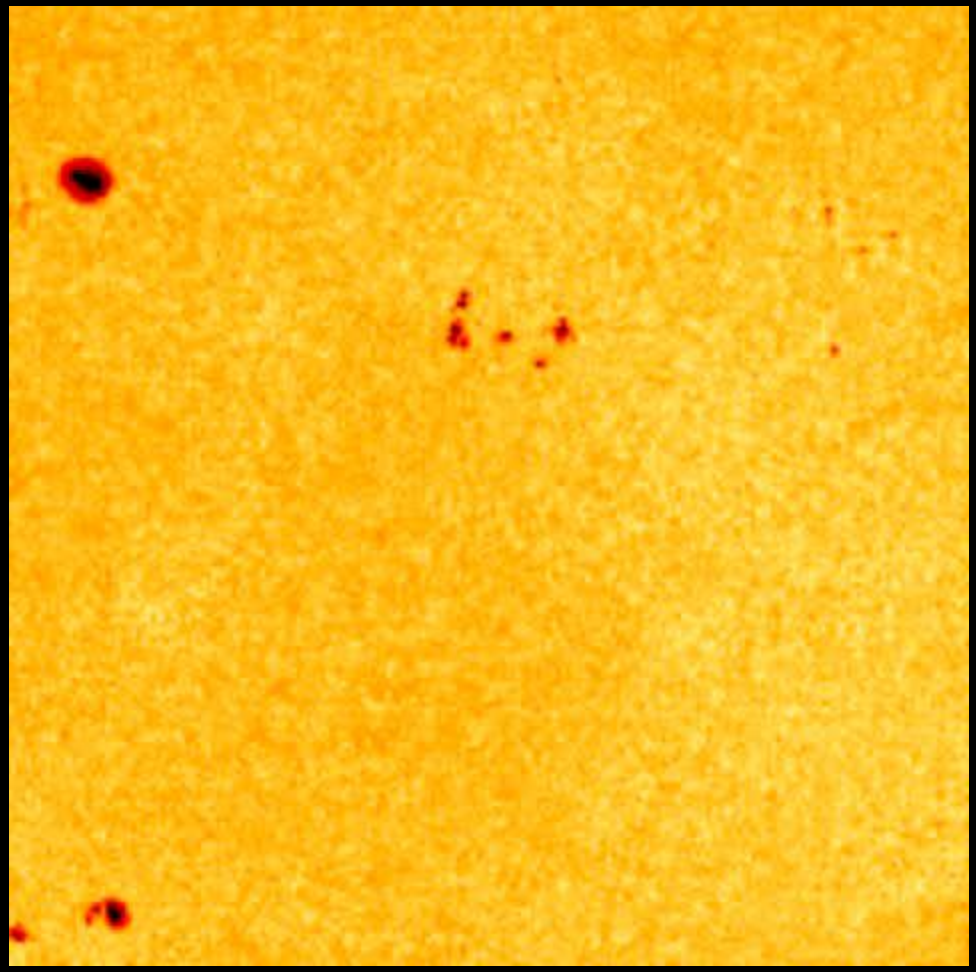
Filmato SOHO-EIT

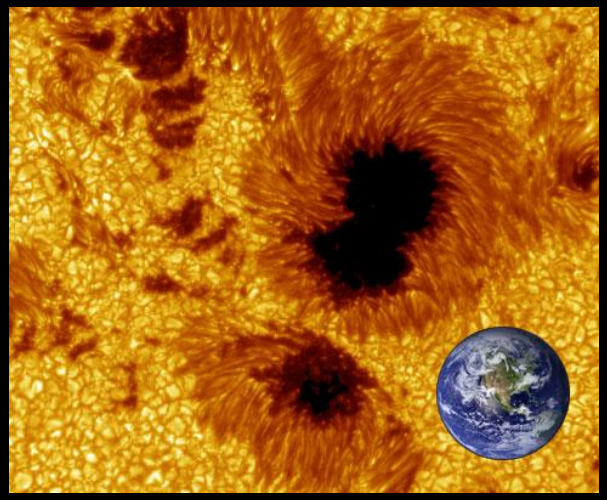
Il campo magnetico solare è fondamentale per capire i processi che avvengono sul Sole.

Simulazione della formazione di due macchie solari.

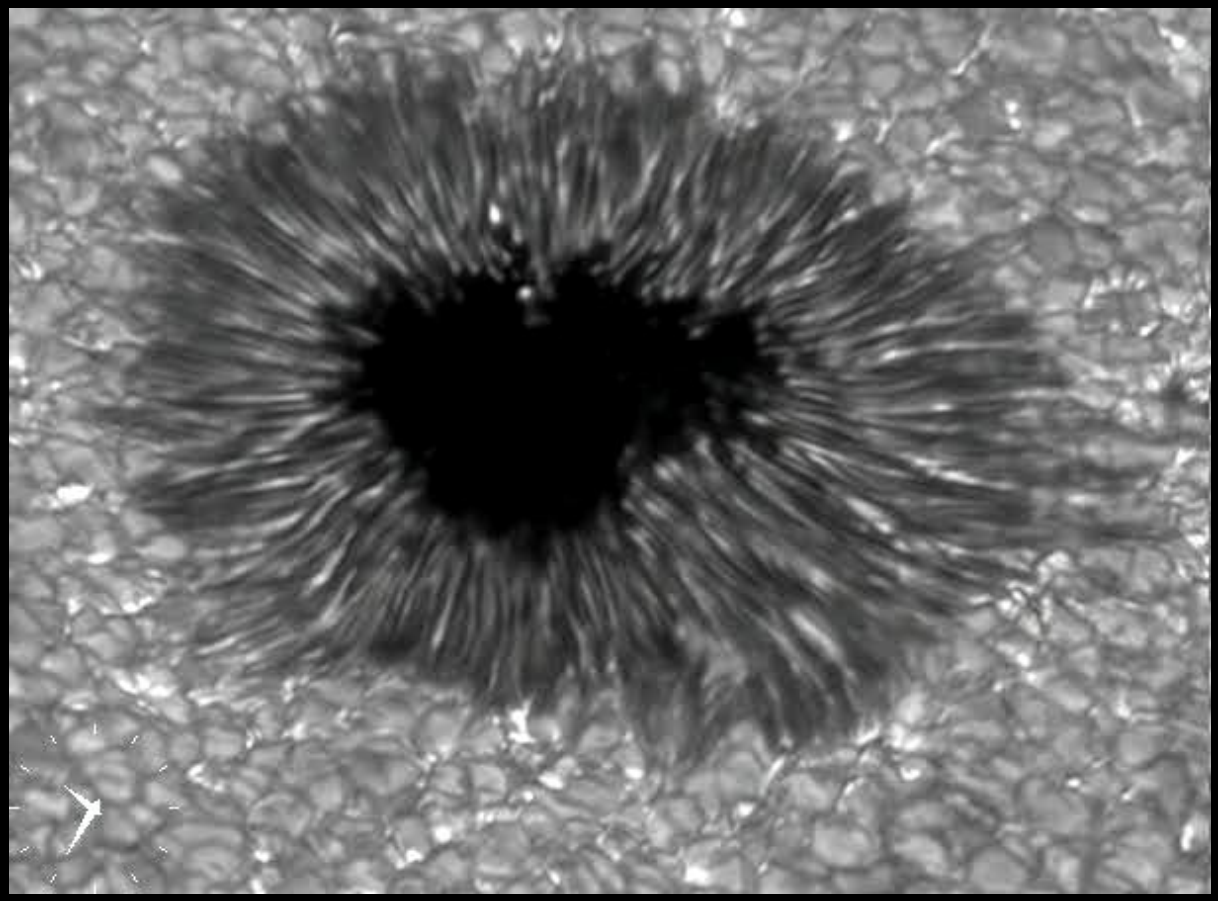
Un loop magnetico emerge dalla fotosfera e forma due zone di polarità opposta: le macchie solari.

Effetti del campo magnetico 1: le macchie solari.





Filmato Swedish Solar Telescope



Le macchie hanno un nucleo scuro centrale chiamato *umbra* e una zona attorno chiamata *penombra*.

Nella penombra sono molto chiari i tubi di flusso magnetico che escono dalla macchia.

Nel filmato si vedono anche piccoli punti brillanti (*bright points*) attorno alla macchia: sono anch'essi strutture magnetiche.

Immagine SOHO-EIT

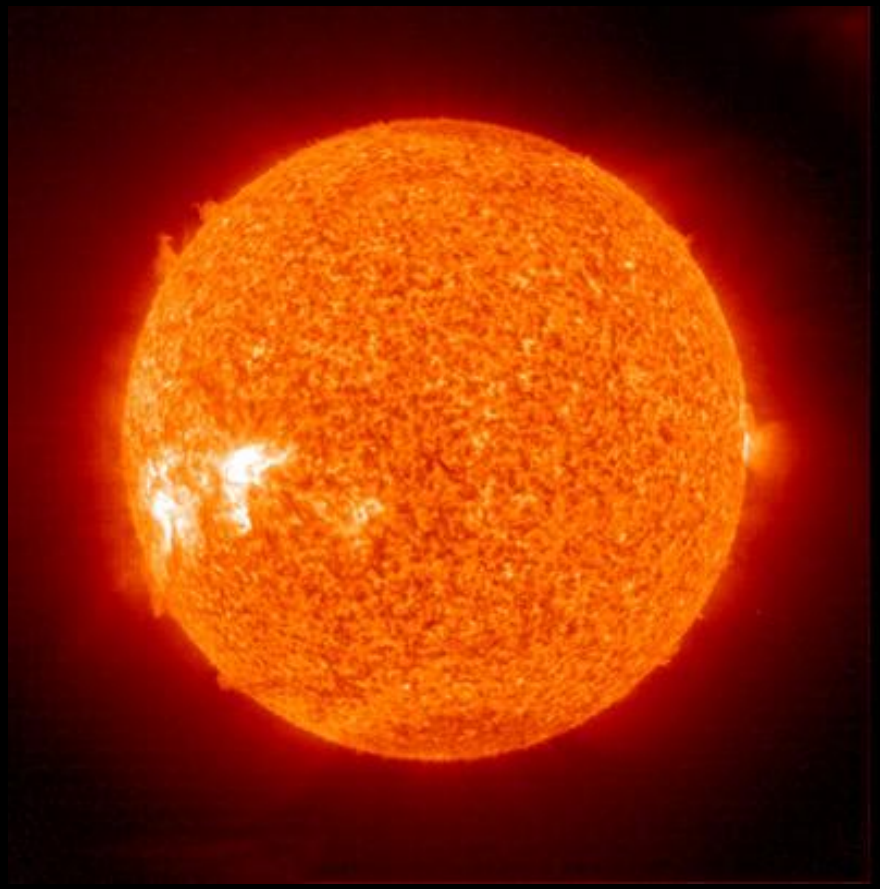


Immagine SOHO-MDI

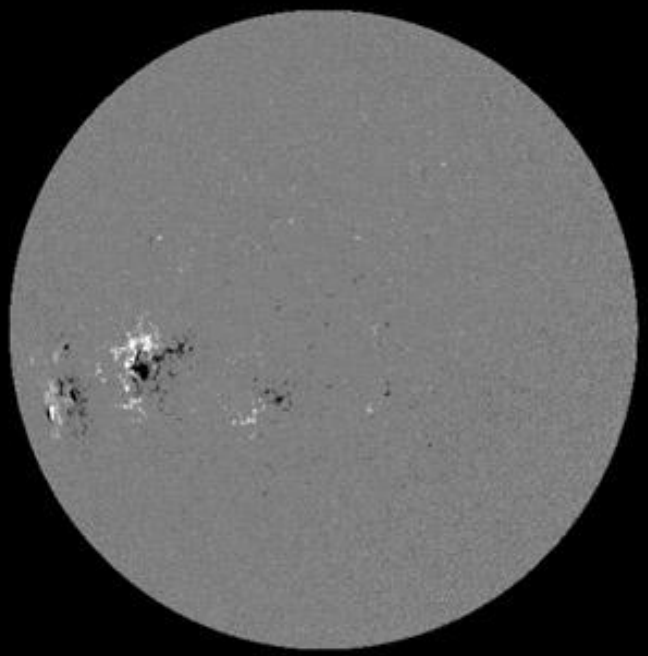
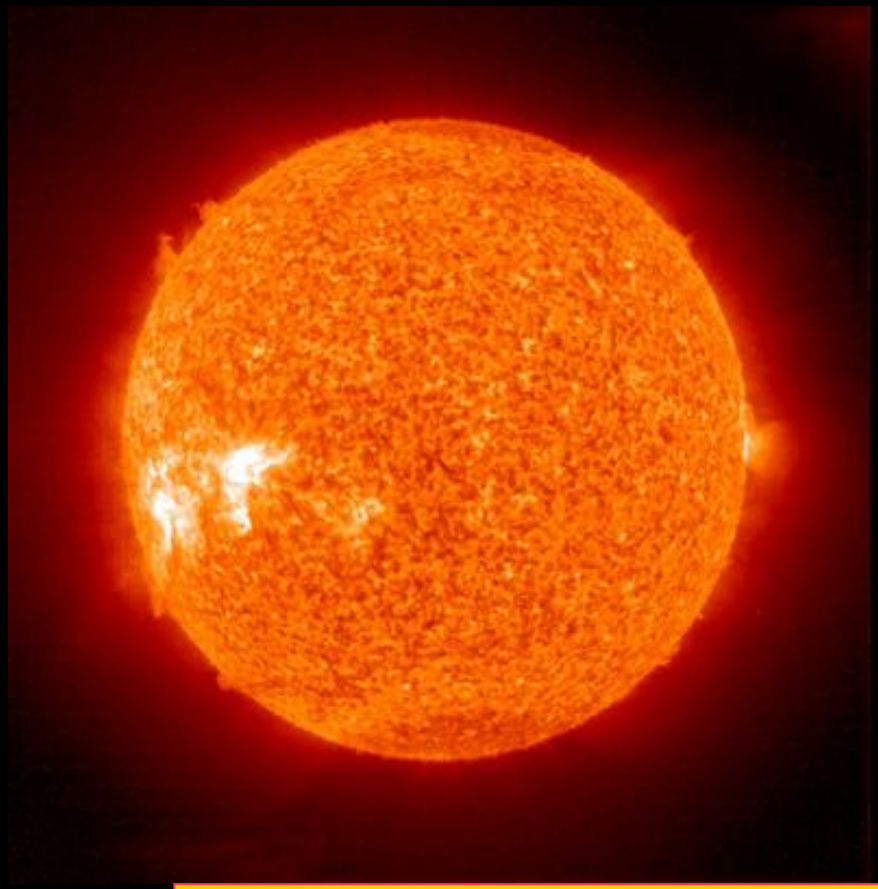
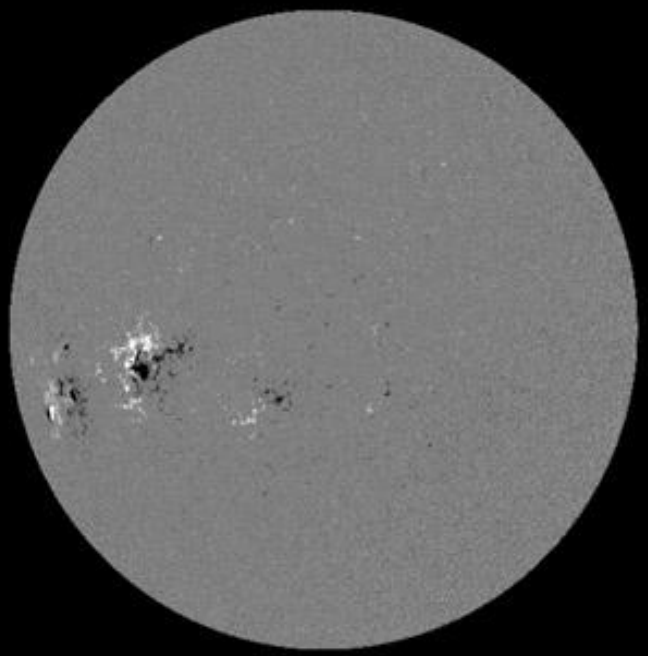


Immagine della corona solare: le regioni più attive (tra cui le macchie) sono bianche.

Magnetogramma:

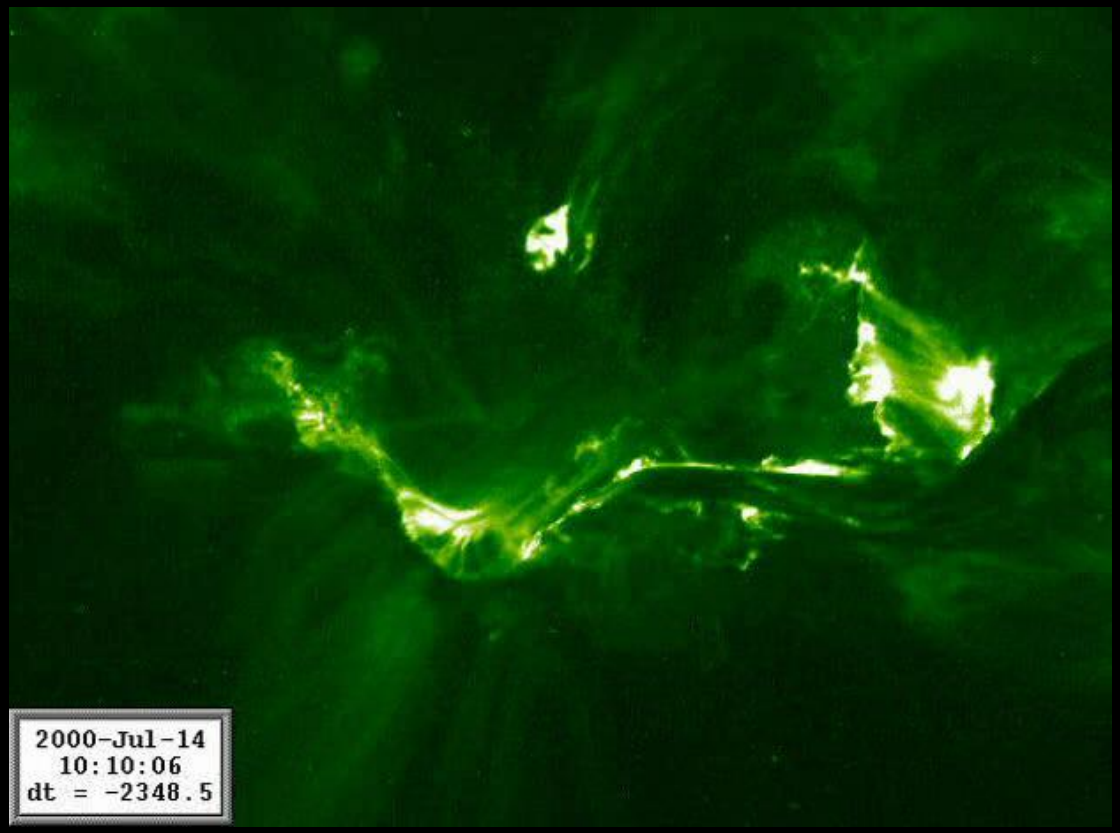
- bianco: campo magnetico forte verso l'alto (positivo)
- nero: campo magnetico forte verso il basso (negativo)
- grigio: campo nullo o debole





Quando un’immagine delle macchie solari o di regioni attive viene messa a confronto con l’immagine (in bianco e nero) dell’intensità del campo magnetico solare, le strutture combaciano quasi perfettamente.

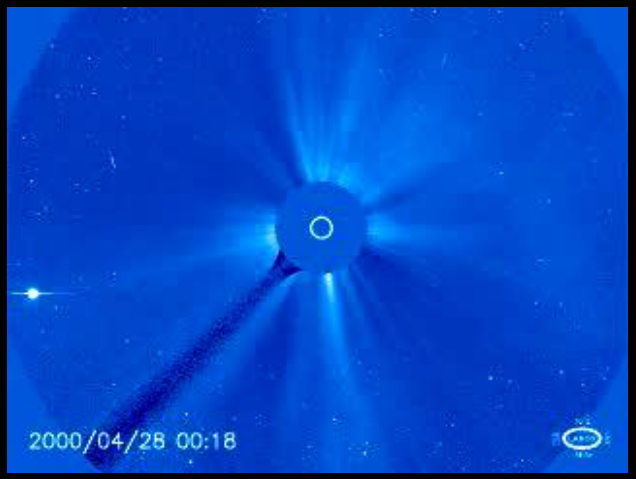
Le macchie compaiono sempre a coppie di polarità opposta.

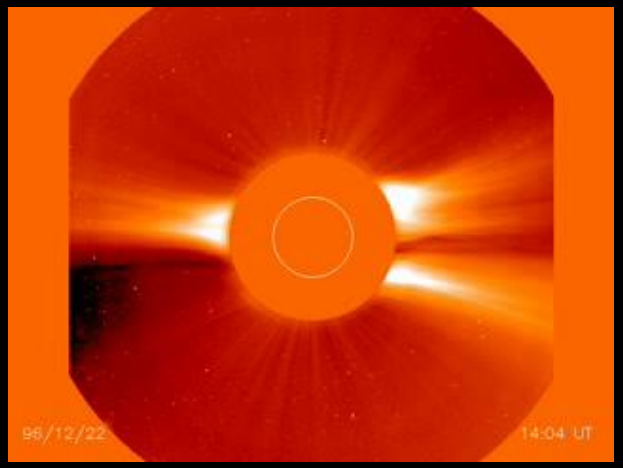


Filmato SOHO-EIT

Il flare del giorno della Bastiglia: 14 luglio 2000.

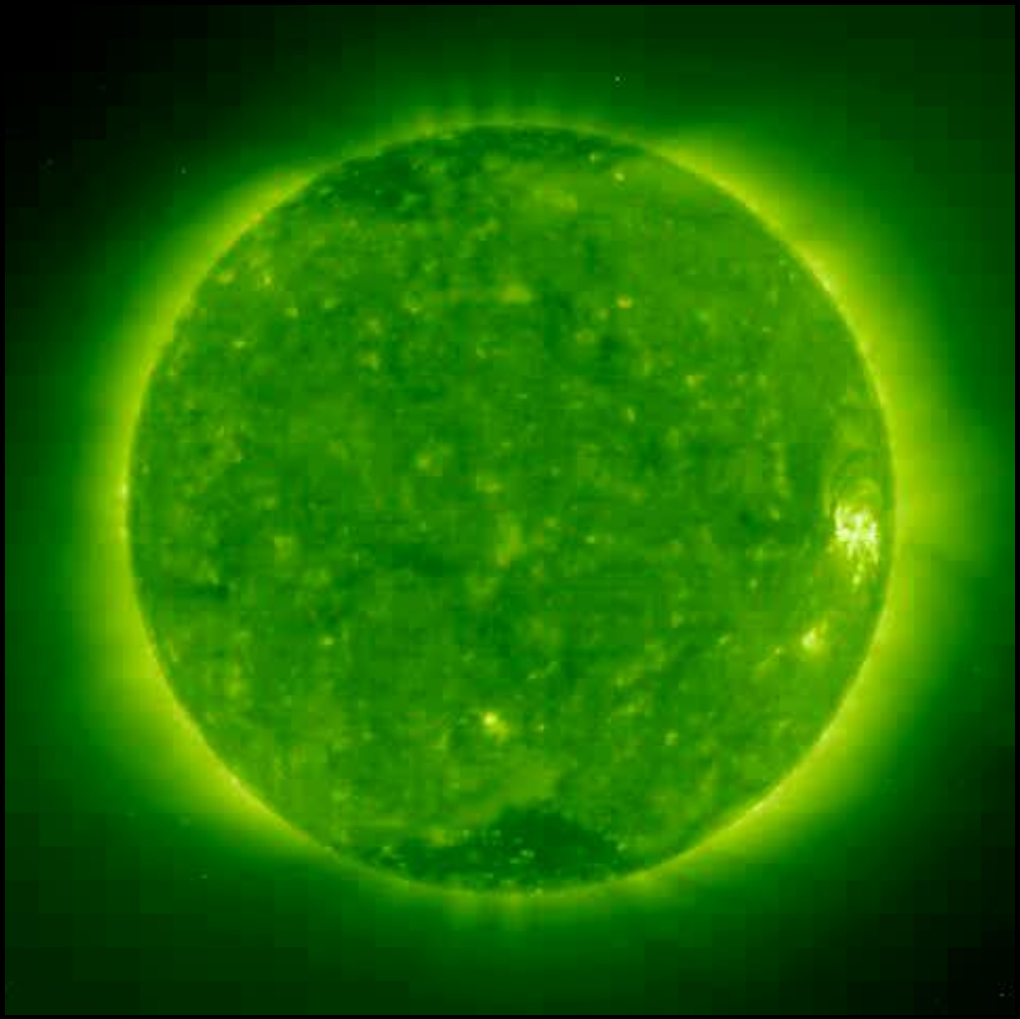
Effetti del campo magnetico: CORONA





LASCO C3: featuring the Sun moving in front of the galactic center, a sungrazing comet and a coronal mass ejection.

Il Ciclo Solare



Filmato SOHO-EIT

Il Sole ciclicamente passa da un massimo ad un minimo di attività.

Il Ciclo Solare

Campo magnetico a forma di dipolo (“dipolare”) rivolto verso l’alto.

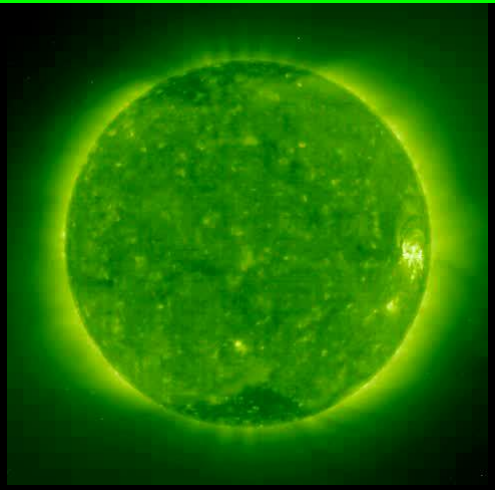
Bassa attività, poche macchie.

5-7 anni

5-7 anni

Campo magnetico “disordinato” (“multipolare”).

Alta attività, molte macchie, flare, CME.



Campo magnetico “disordinato” (“multipolare”).

Alta attività, molte macchie, flare, CME.

5-7 anni

Campo magnetico a forma di dipolo (“dipolare”) rivolto verso il basso.

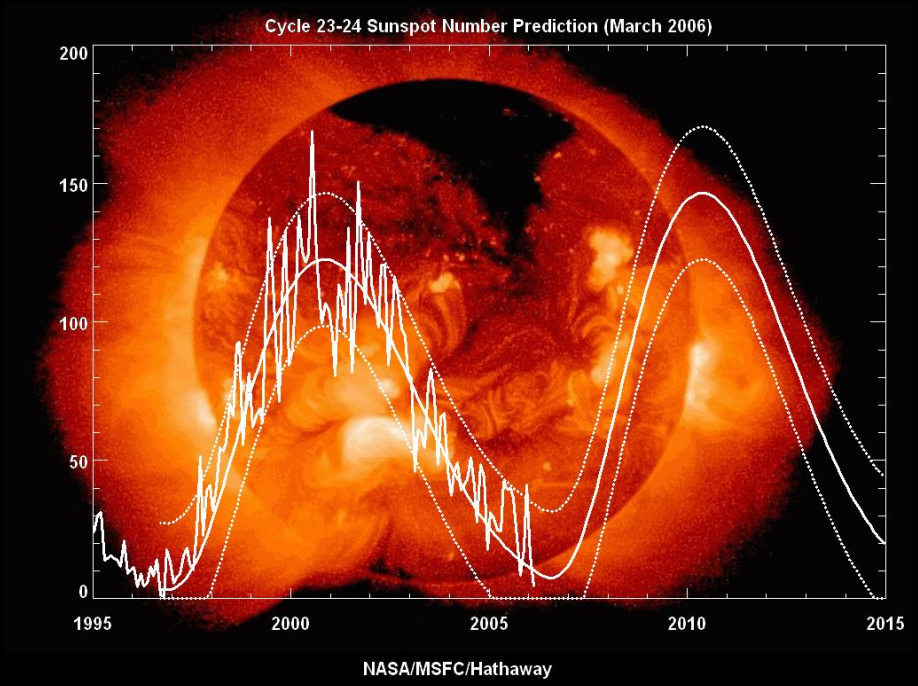
Bassa attività, poche macchie.

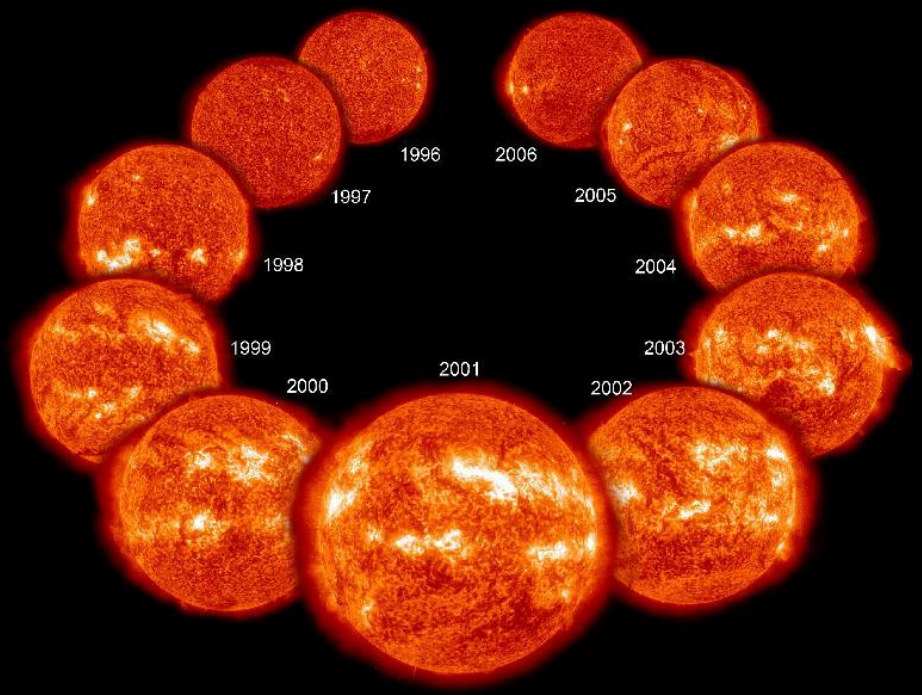
5-7 anni

Il Ciclo Solare

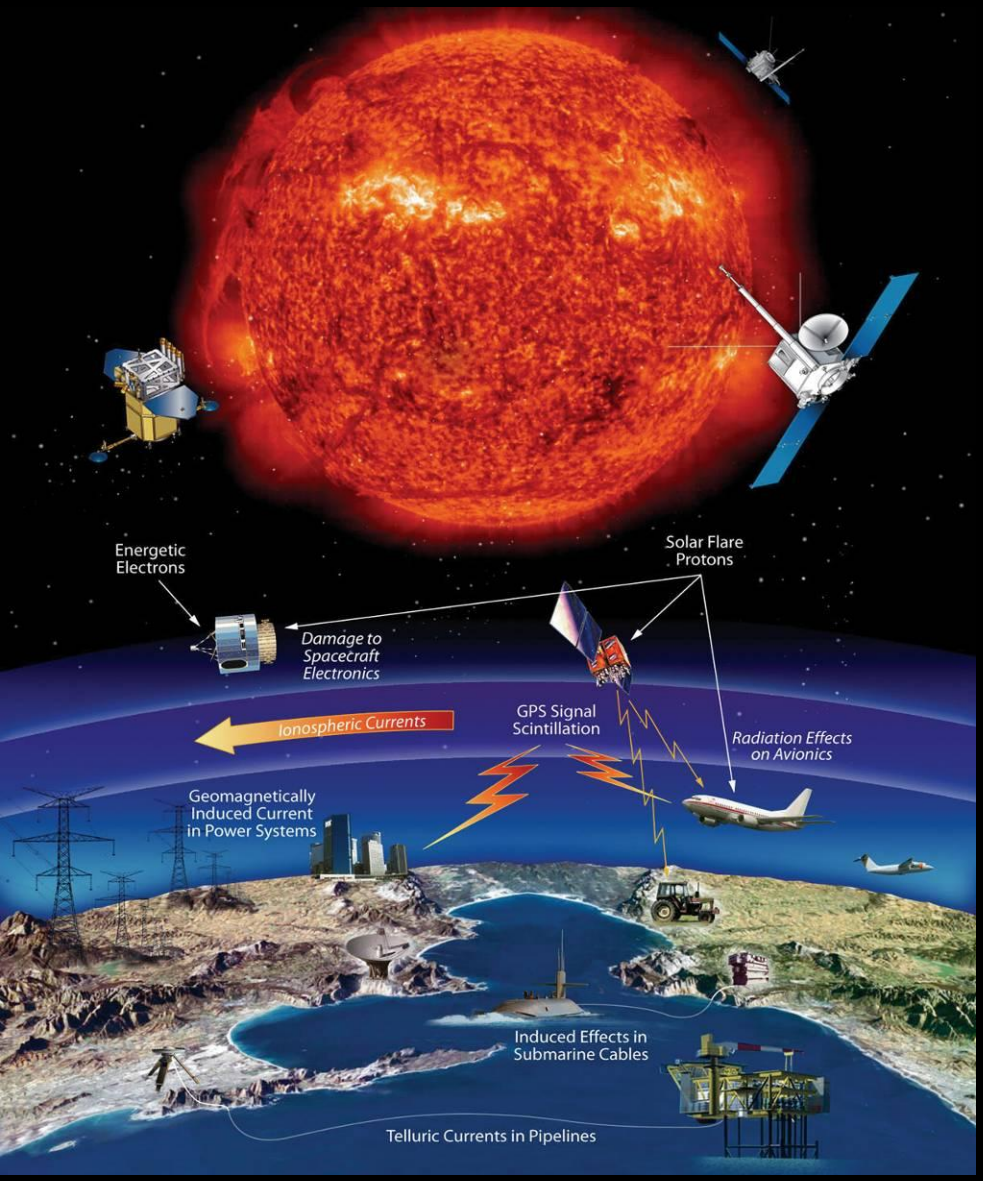
Circa 11 anni fra un massimo e l'altro.

Circa 22 anni il ciclo completo.

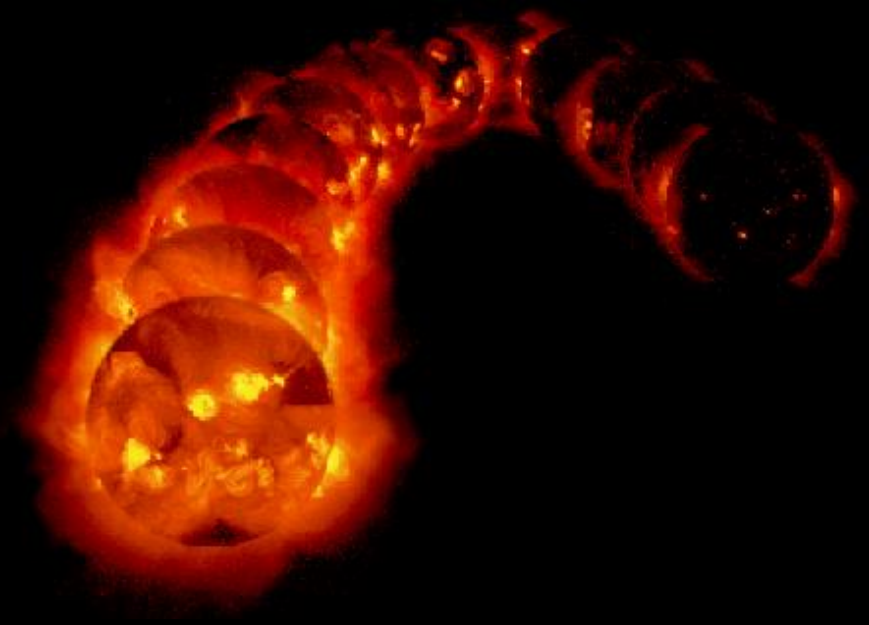


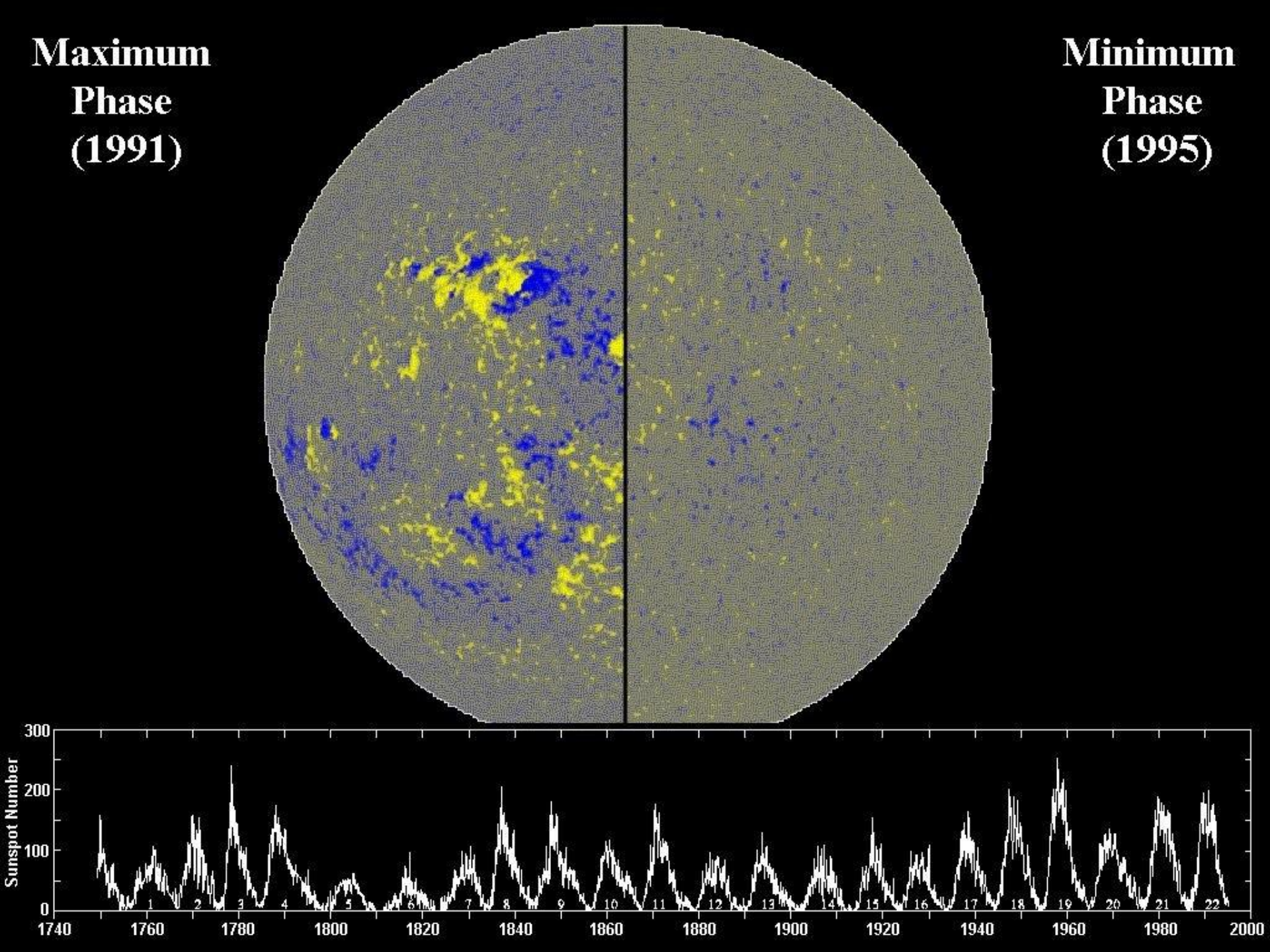


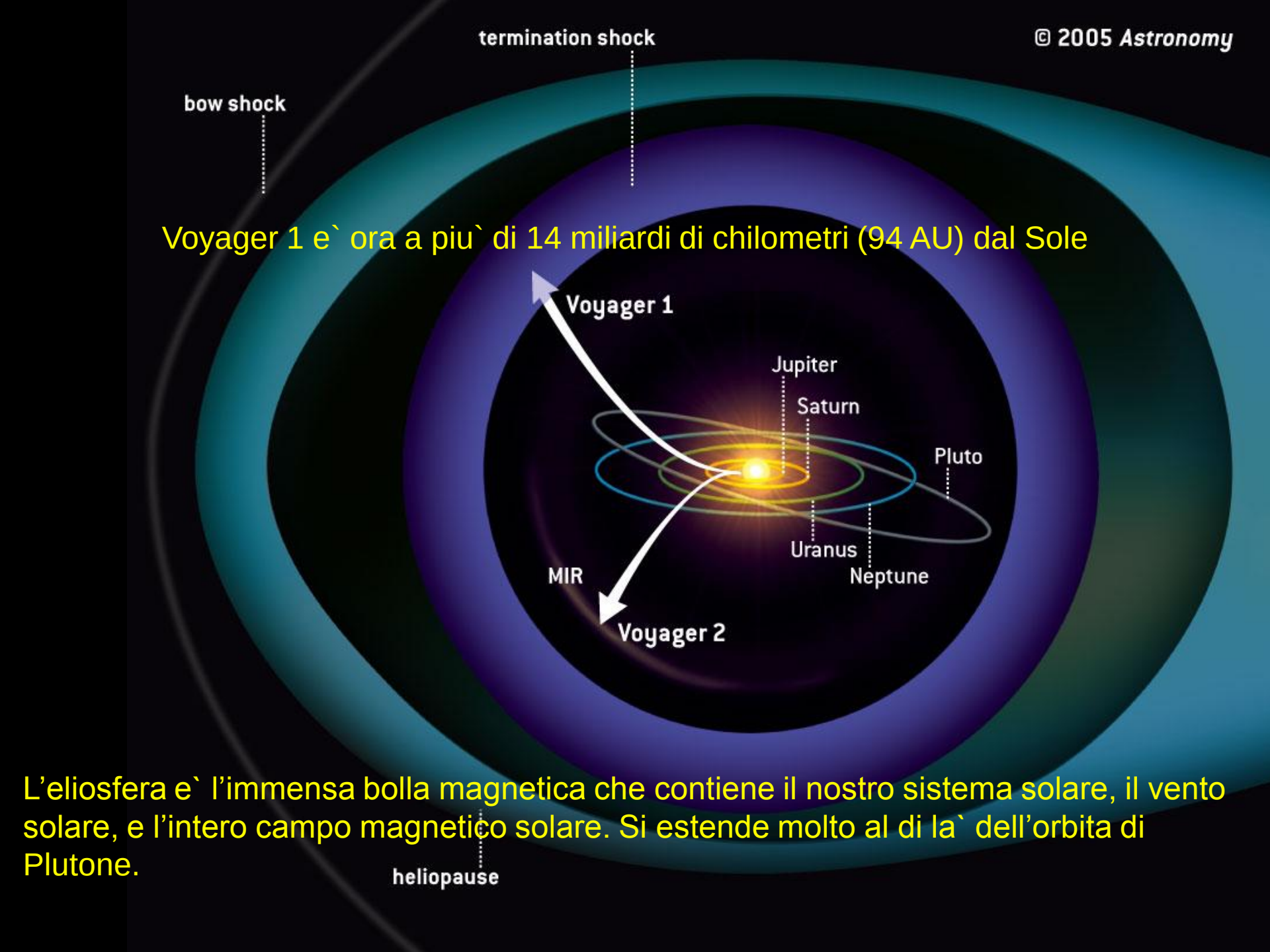
Il prossimo ciclo solare, il **24°**, dovrebbe culminare attorno al 2010/2011.



Comprendere il sole variabile ed i suoi effetti sulla vita e sulla societa`

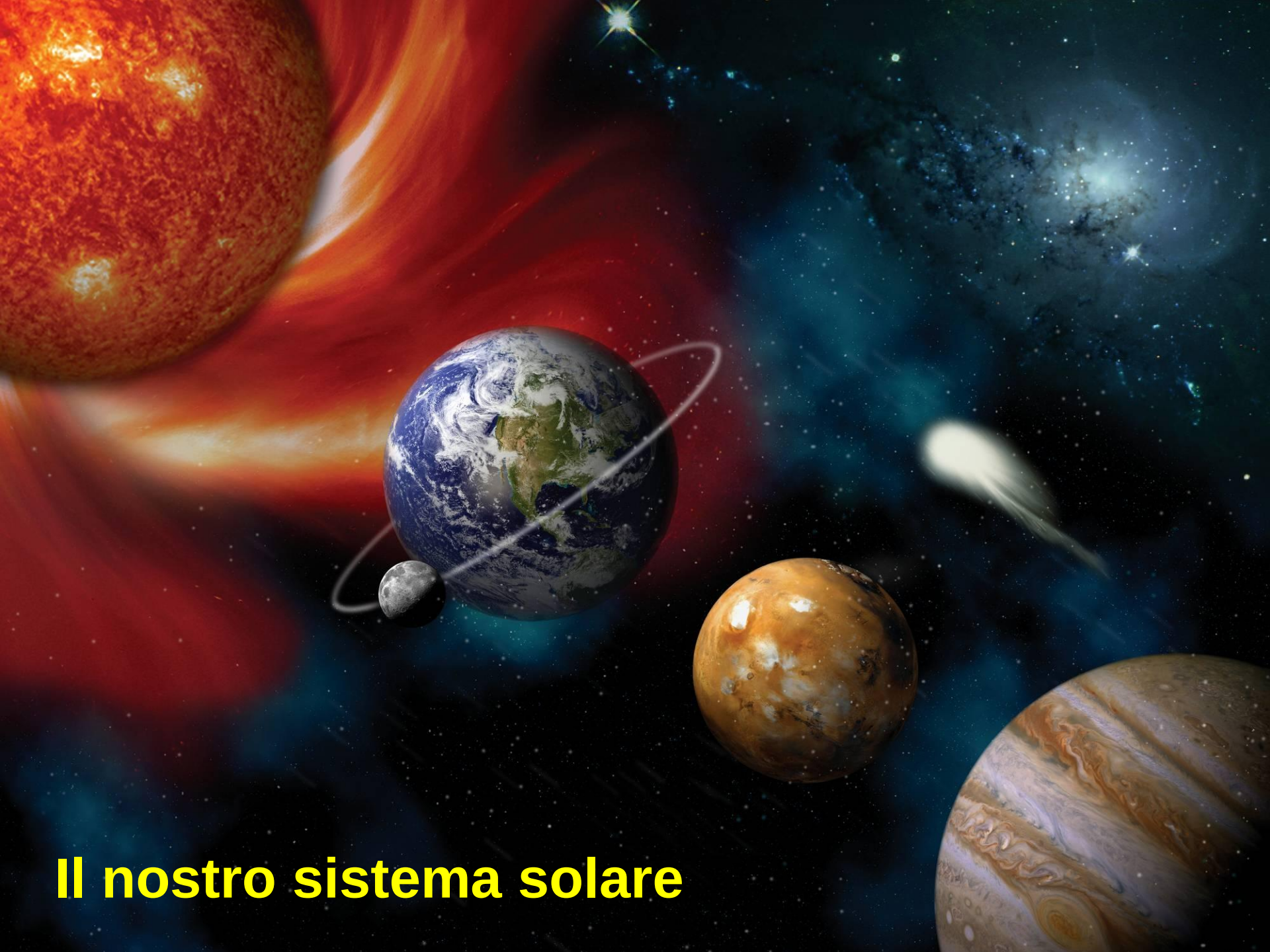



Maximum Phase (1991)
Minimum Phase (1995)
Sunspot Number
300
200
100
0
1740
1760
1780
1800
1820
1840
1860
1880
1900
1920
1940
1960
1980
2000
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22

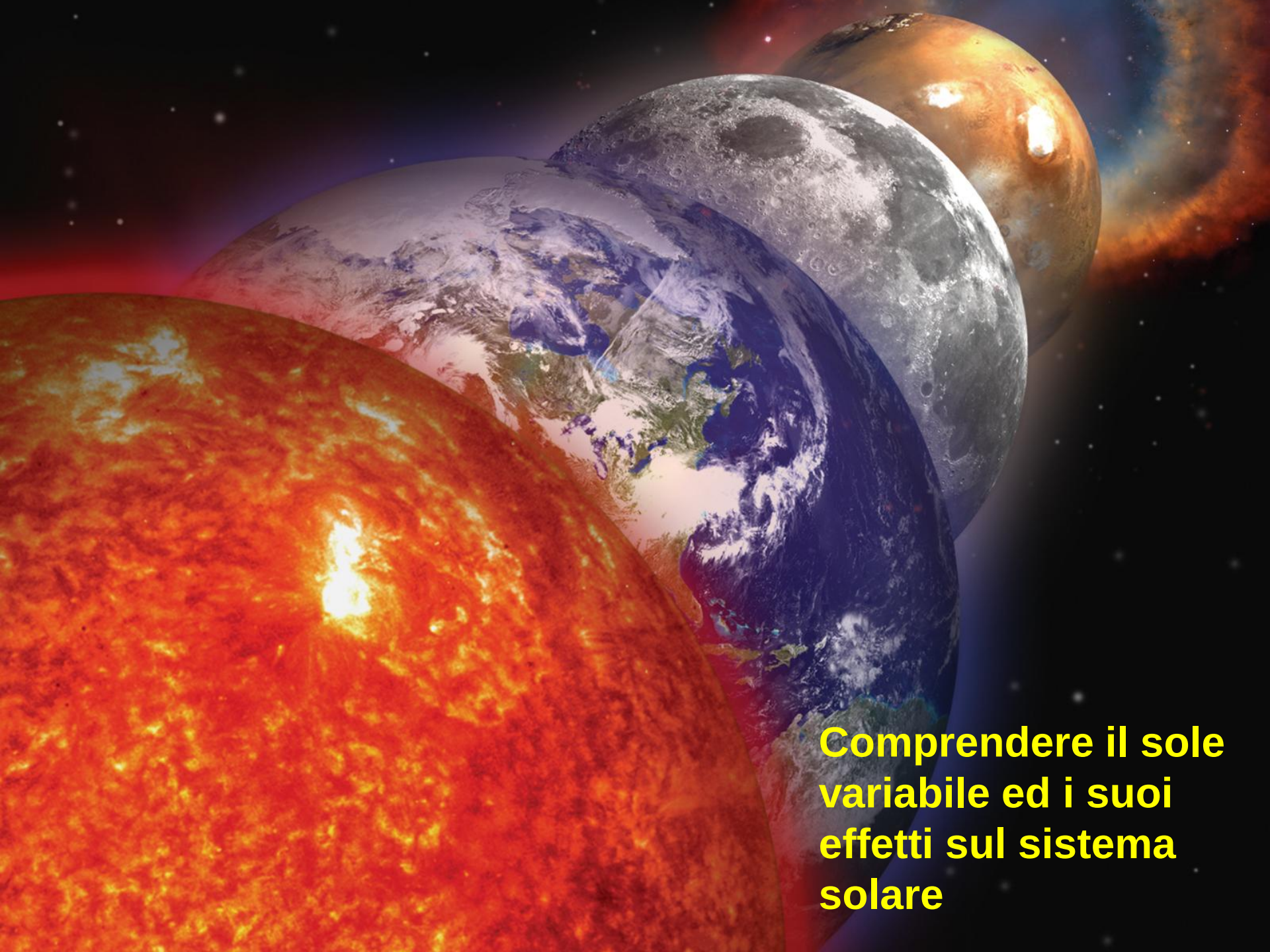


Voyager 1 e` ora a piu` di 14 miliardi di chilometri (94 AU) dal Sole

L'eliosfera e` l'immensa bolla magnetica che contiene il nostro sistema solare, il vento solare, e l'intero campo magnetico solare. Si estende molto al di la` dell'orbita di Plutone.

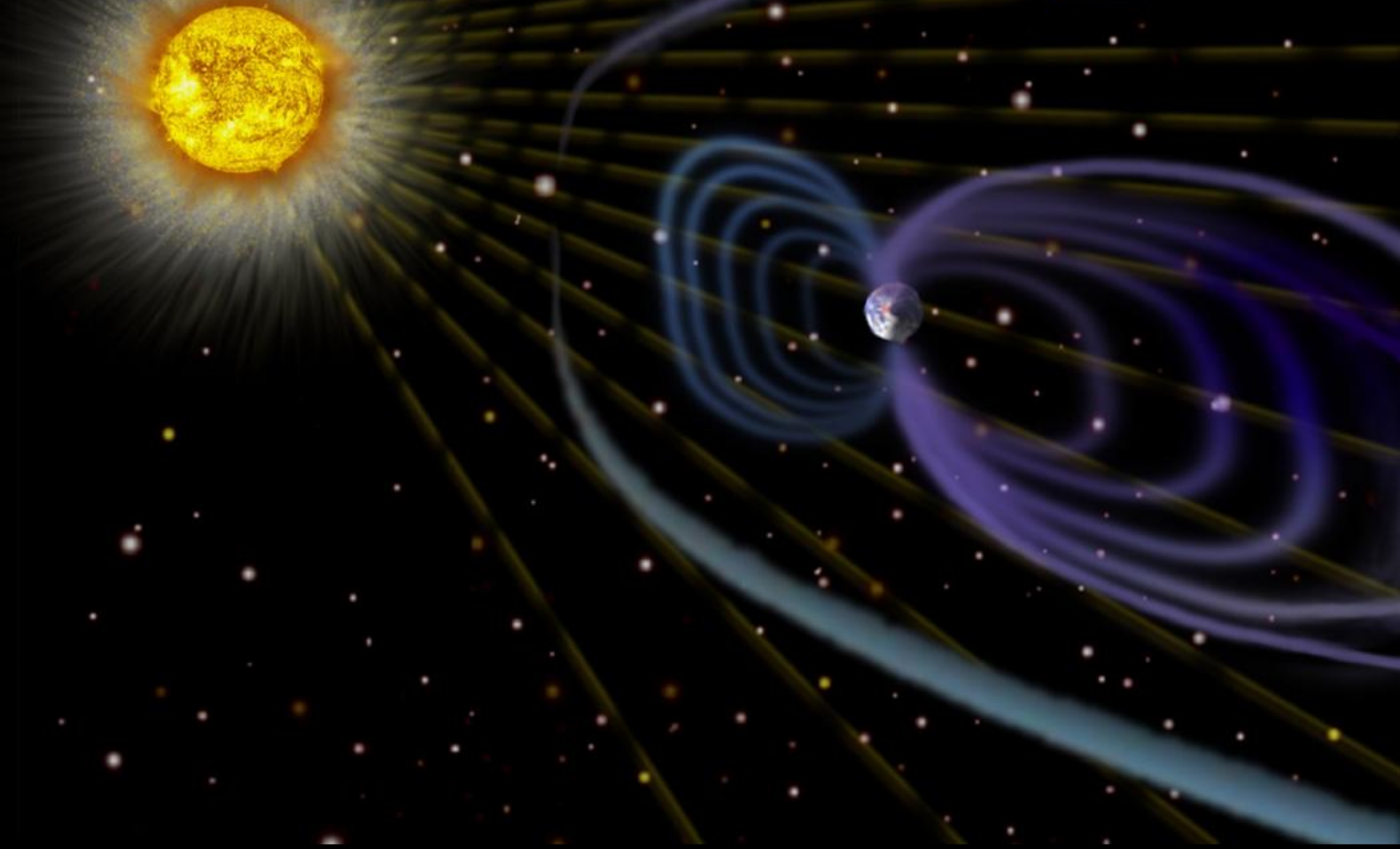


Il nostro sistema solare

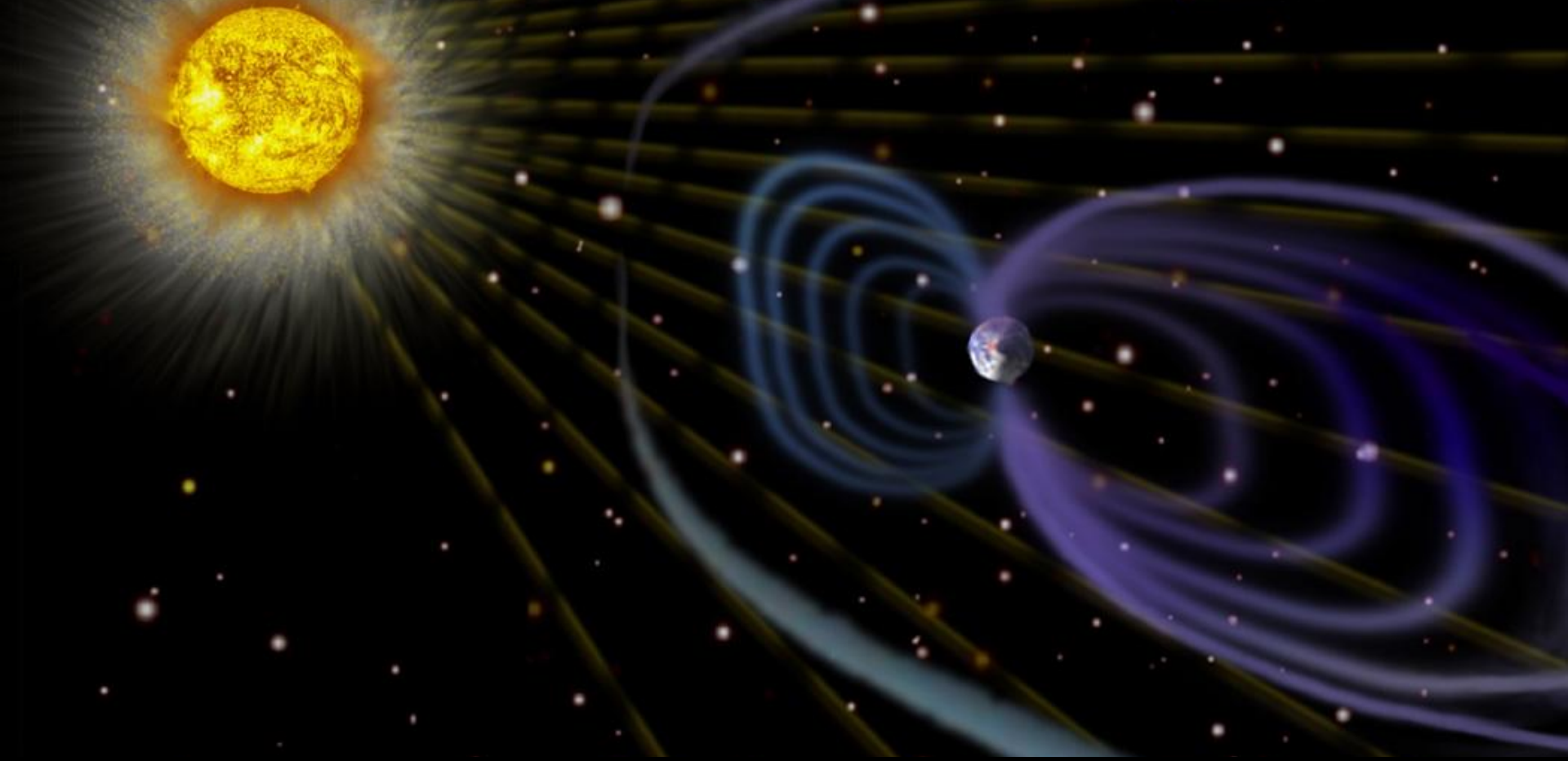


Comprendere il sole variabile ed i suoi effetti sul sistema solare

ADAHELI: un progetto ASI



Earth's magnetic field, or magnetosphere, protects us from the constant solar wind.



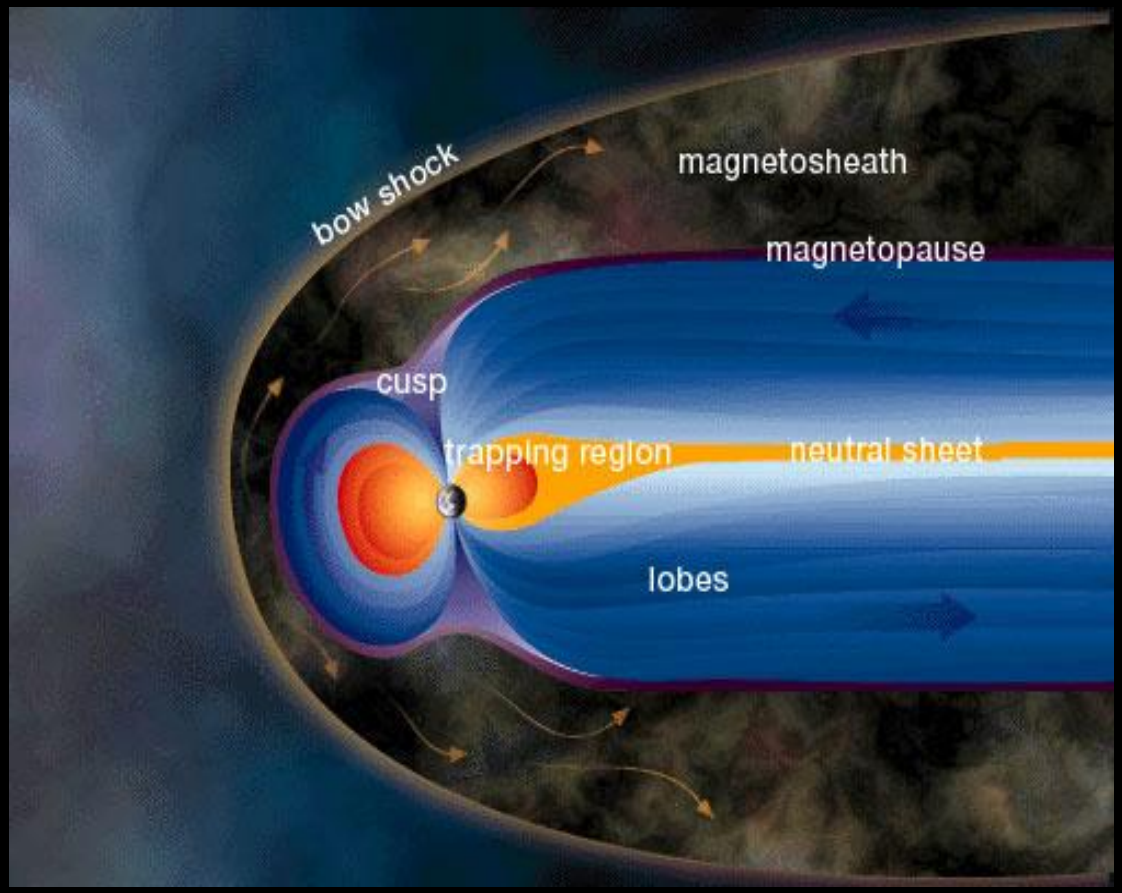
Il vento solare e` un flusso di particelle cariche emesso da Sole in tutte le direzioni ad una velocita` di circa 3 milioni km/h.

Sebbene la nostra stella sia attualmente poco attiva, il numero di flare di eruzioni solari crescera` fino a raggiungere un nuovo massimo nel 2011 o 2012. Vi sono gruppi di ricercatori che ritengono il prossimo ciclo piu` intenso dei piu` recenti.

Effetti del campo magnetico: il vento solare.

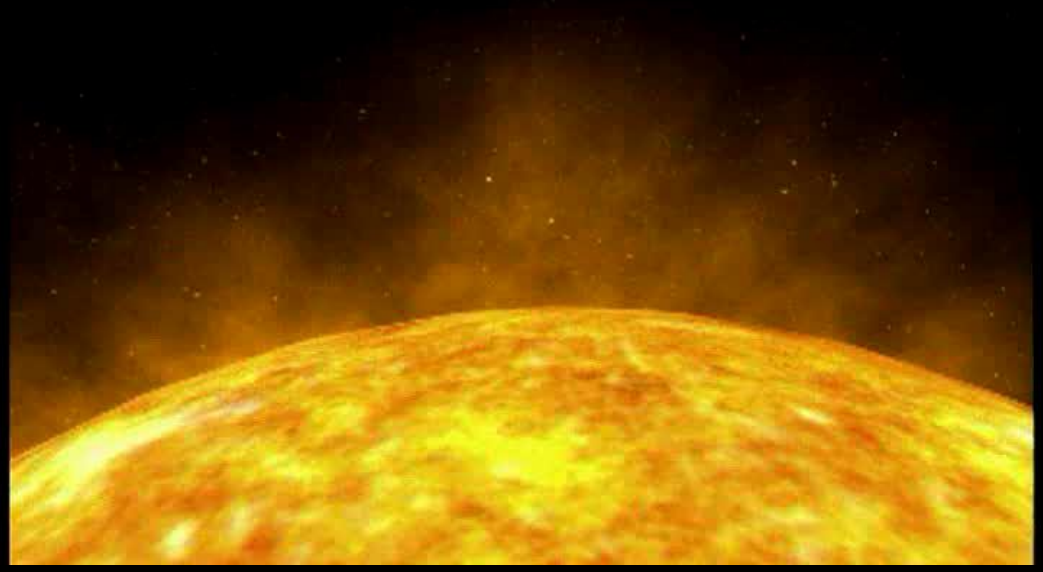
E' il costante flusso di particelle cariche e radiazioni che dal Sole si espande in tutto il Sistema Solare.

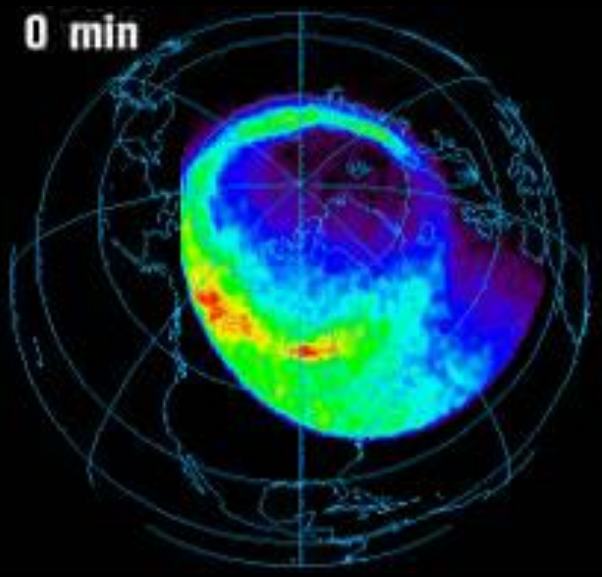
La Terra possiede un campo magnetico dipolare che si estende fino a 57.000km nello spazio.



Impedisce alla maggior parte delle particelle emesse dal Sole di arrivare sulla Terra.

Il vento solare lo deforma, schiacciandolo sul lato rivolto al Sole.





Il campo magnetico terrestre ci protegge da radiazioni e particelle.

Seguendo le linee del campo alcune particelle vengono “guidate” verso i poli: si formano le aurore boreali (e australi!).

Gli astronauti nella Space Station non sono in immediato pericolo per l’orbita, relativamente bassa, di questa missione. Devono piuttosto fare attenzione a non accumulare troppa radiazione durante le passeggiate spaziali.

Il flare molto intenso del 7 agosto 1972 si verifico` tra la missione Apollo 16 (Aprile) ed Apollo 17 (Dicembre), durante gli ultimi viaggi sulla Luna.

Le particelle energetiche provenienti da un flare o da un CME possono essere pericolose per un astronauta in missione sulla Luna ....

…. o su Marte.

Si ritiene che un viaggio di andata e ritorno per Marte possa portare, per gli astronauti, ad un rischio a lungo termine elevato di contrarre il cancro.

Vivere con una stella: il Sole

- Irradianza solare
  - Effetti orbitali
  - Variabilita`
  - Clima globale

- Brillamenti

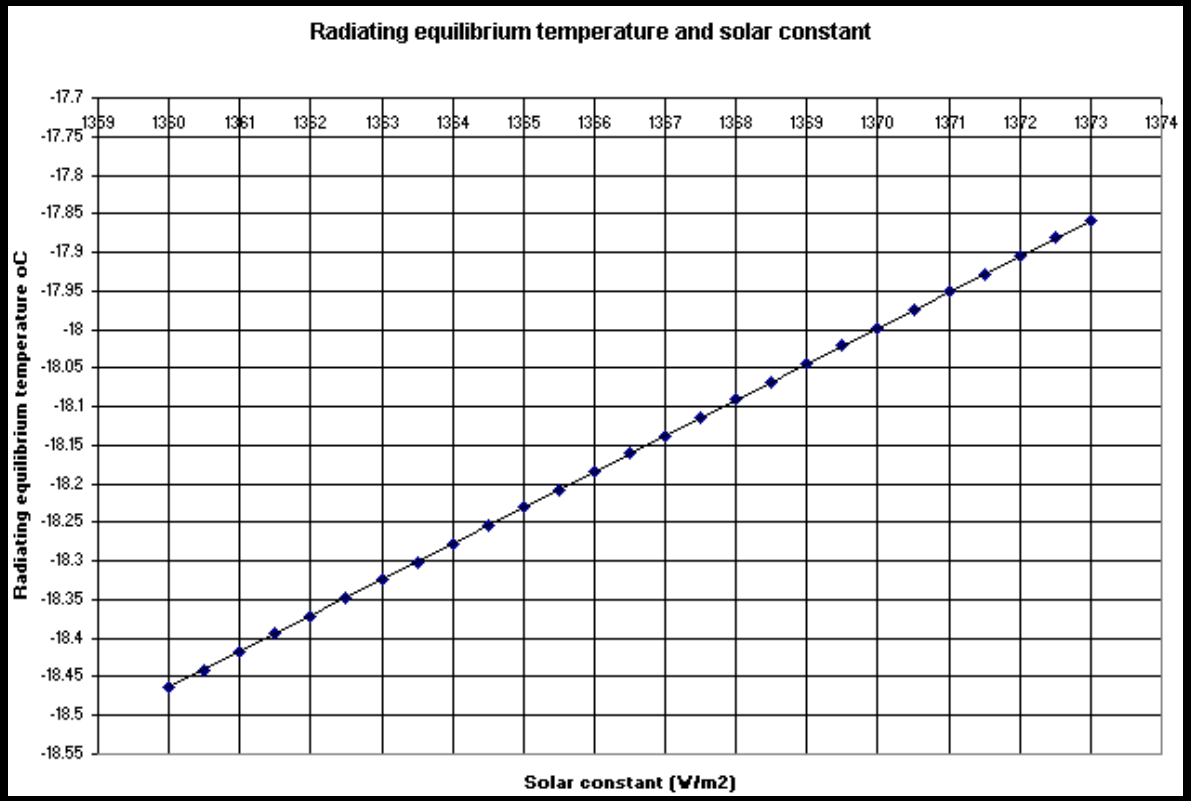
Temperatura d'equilibrio della Terra (So = 1367 W/m²)

$$T = \sqrt[4]{\frac{\frac{So}{4} \cdot 0.7}{5.67 \times 10^{-8}}}$$

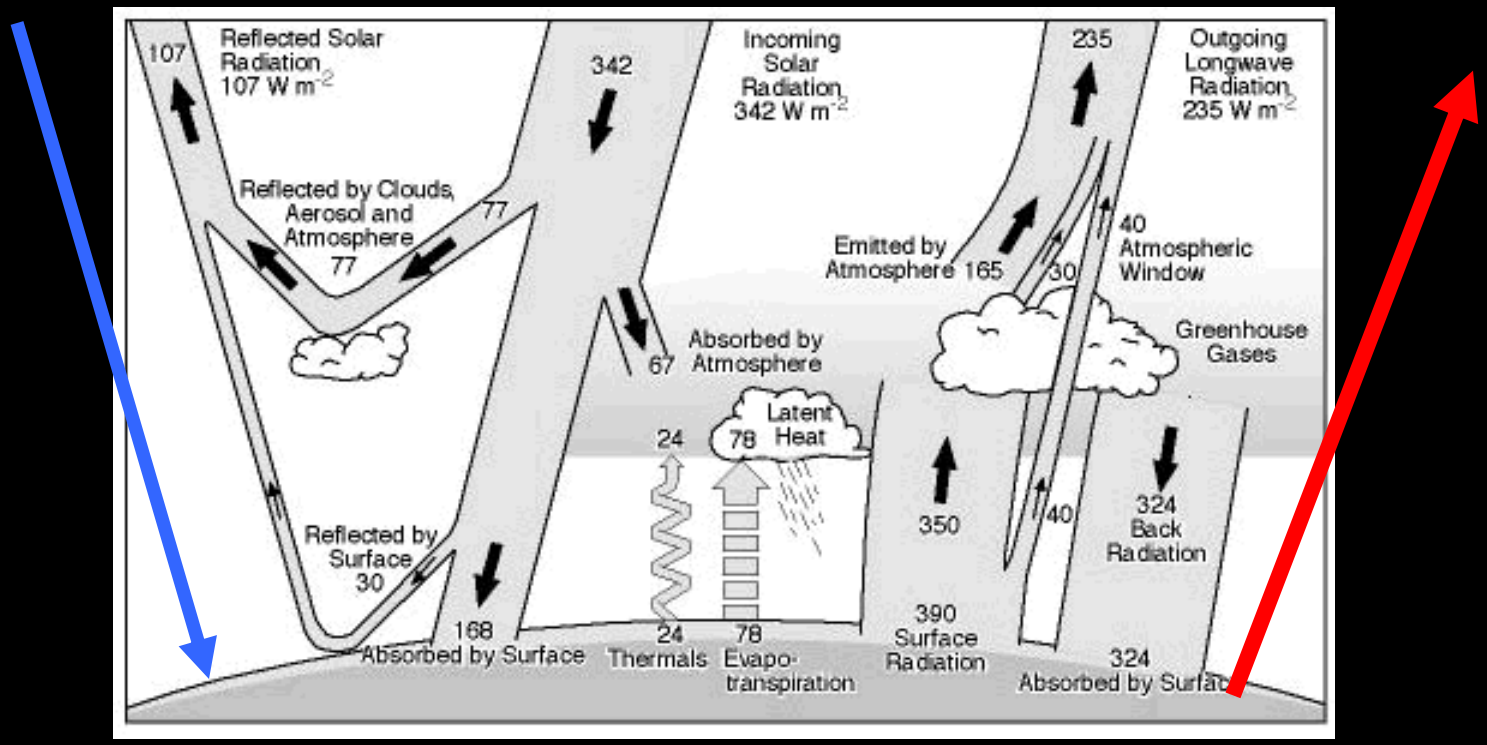
$$T = \sqrt[4]{\frac{239.23}{5.67 \times 10^{-8}}}$$

$$= 254.86\ K$$

or, $-18.14\ ^{o}C$

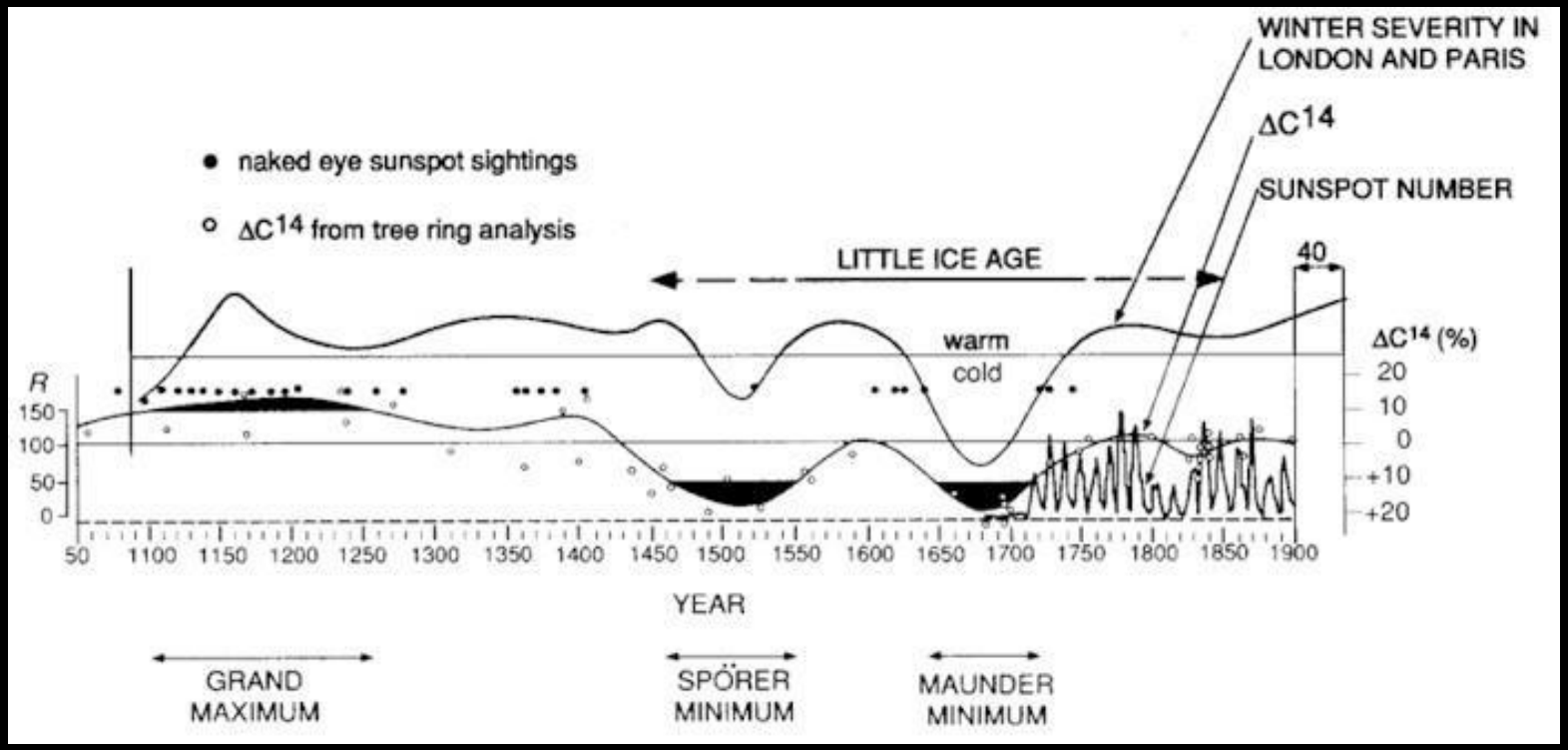


Temperatura d'equilibrio della Terra (So = 1367 W/m^2)



L'effetto dell'atmosfera: effetto serra

Attivita` solare e clima sono correlati

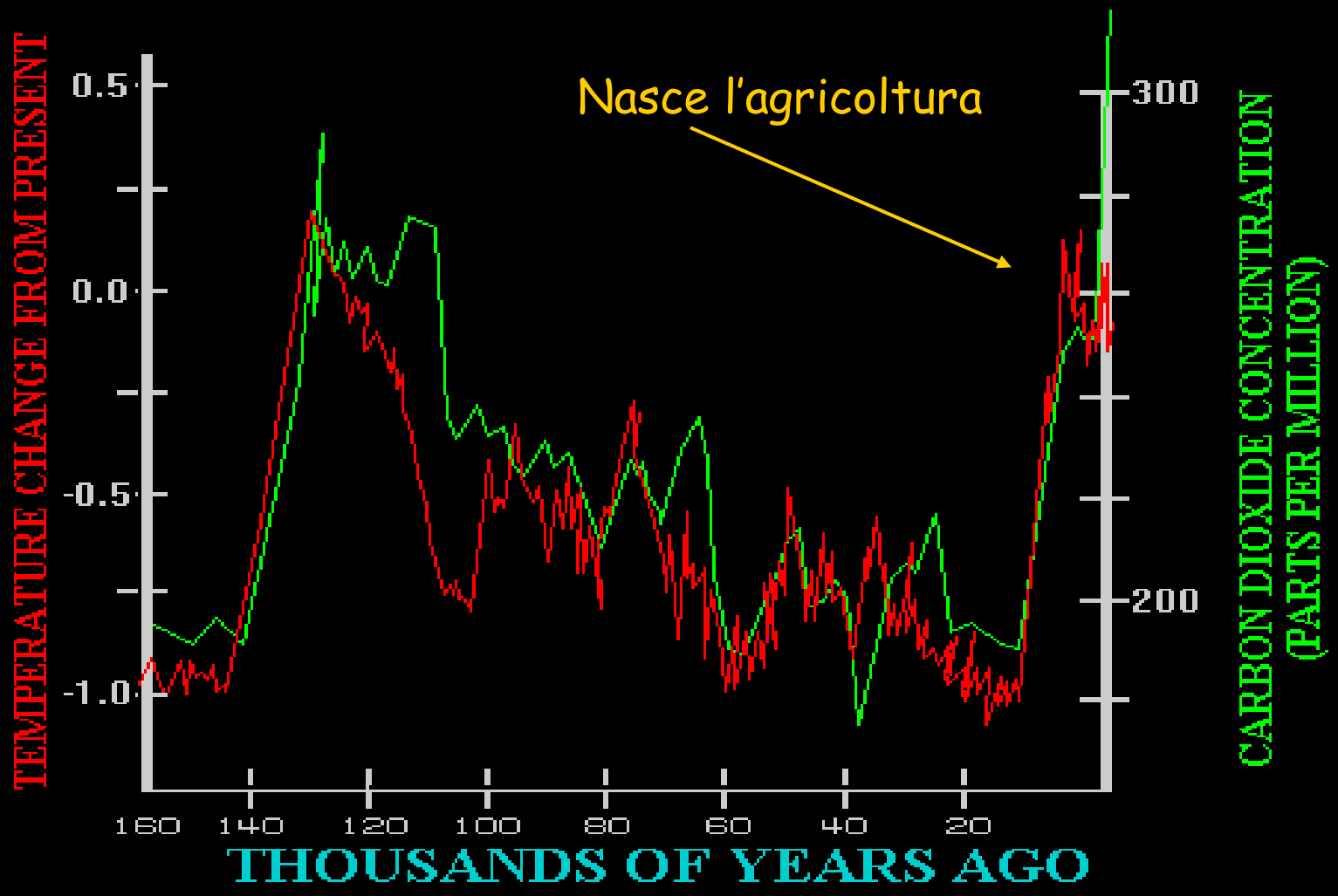


La correlazione tra attivita` solare e clima e` poco conosciuta, probabilmente include variazioni nell'irragiamento (visibile , UV,...) e raggi cosmici.

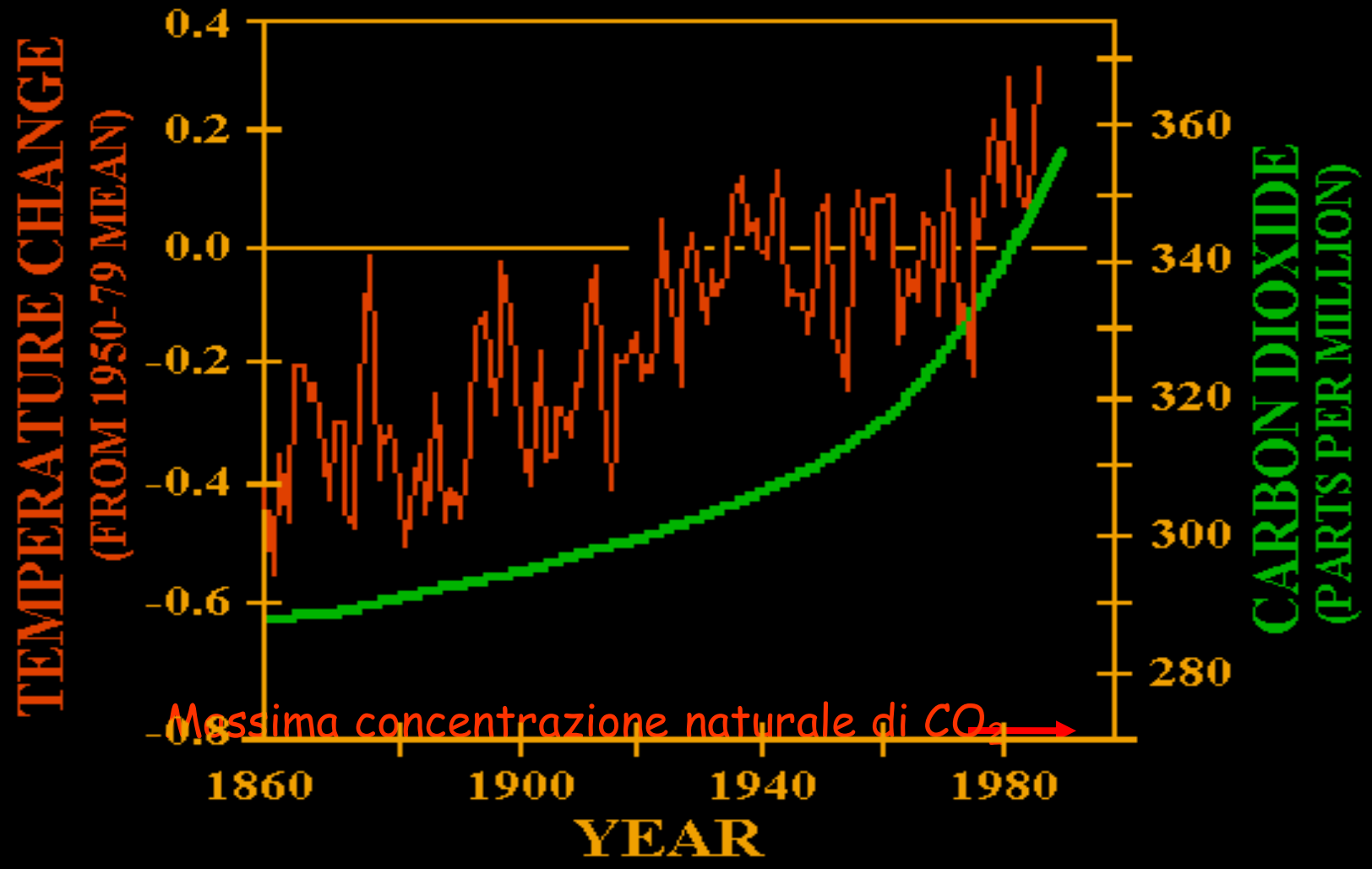
Certamente sono importanti meccanismi di amplificazione (SI varia <0.1% e l'albedo di Nettuno varia del 4% in antifase all'attivita` solare).

Devono esistere meccanismi di aggiustamento (il sole giovane era 25% meno luminoso, e anche piu` variabile su brevi tempi scala).

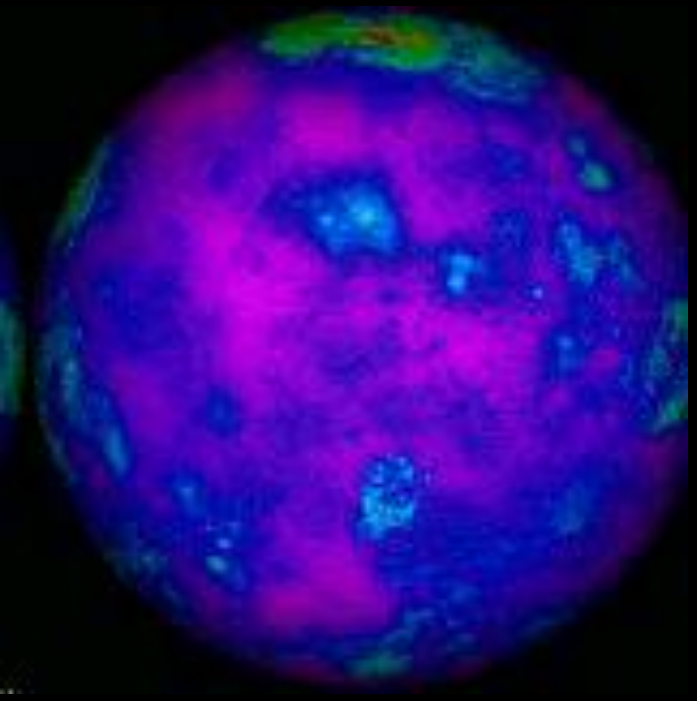
Riscaldamento globale: Sole?



Riscaldamento globale: Uomo?



Riscaldamento globale: Venere

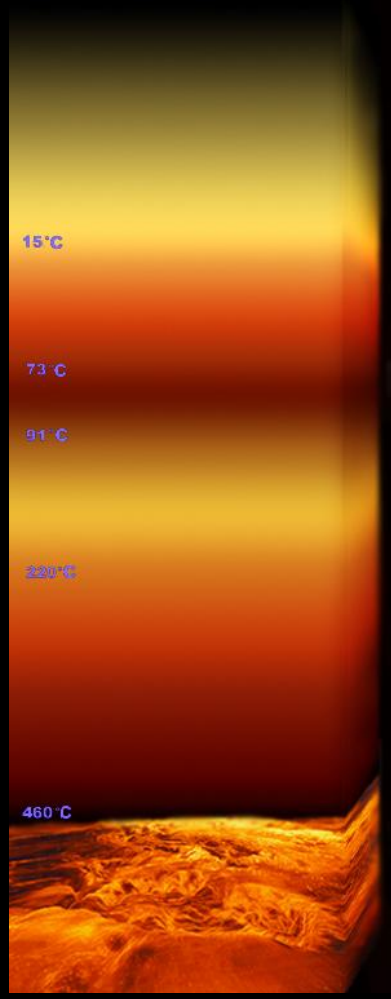


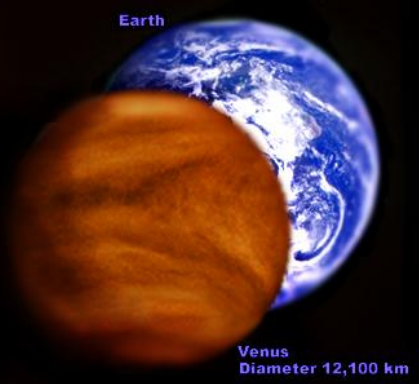
ATMOSPHERIC COMPOSITION

96.5% Carbon Dioxide

3.5% Nitrogen

Trace amounts of Sulfer Dioxide, Argon, Water, Carbon Monoxide, Helium, and Neon.



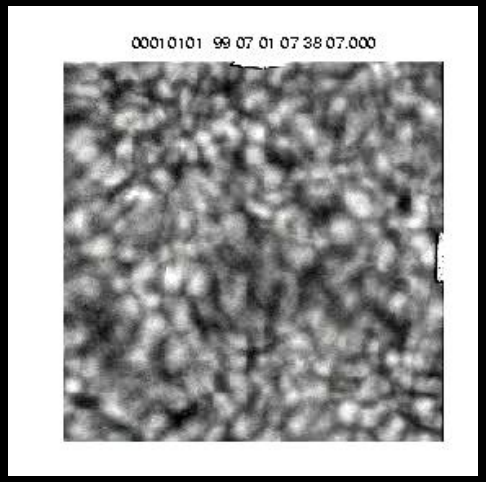


Il clima nello spazio

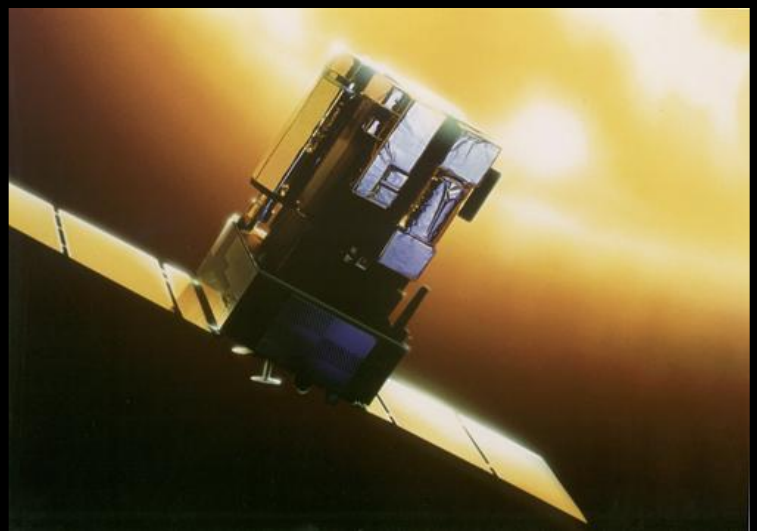
Immense fratture nel campo magnetico della Terra rimangono aperte per ore permettendo al vento solare di entrare nelle regioni circumterrestri e provocare tempeste magnetiche (space weather).

Gli strumenti per osservare

Telescopi da terra: vedono tutte le lunghezze d'onda, tranne quelle bloccate dall'atmosfera.



Satelliti: vedono anche le lunghezze d'onda bloccate dall'atmosfera.



European Solar Telescope

Telescopio europeo da 4m

Baseline design proposal

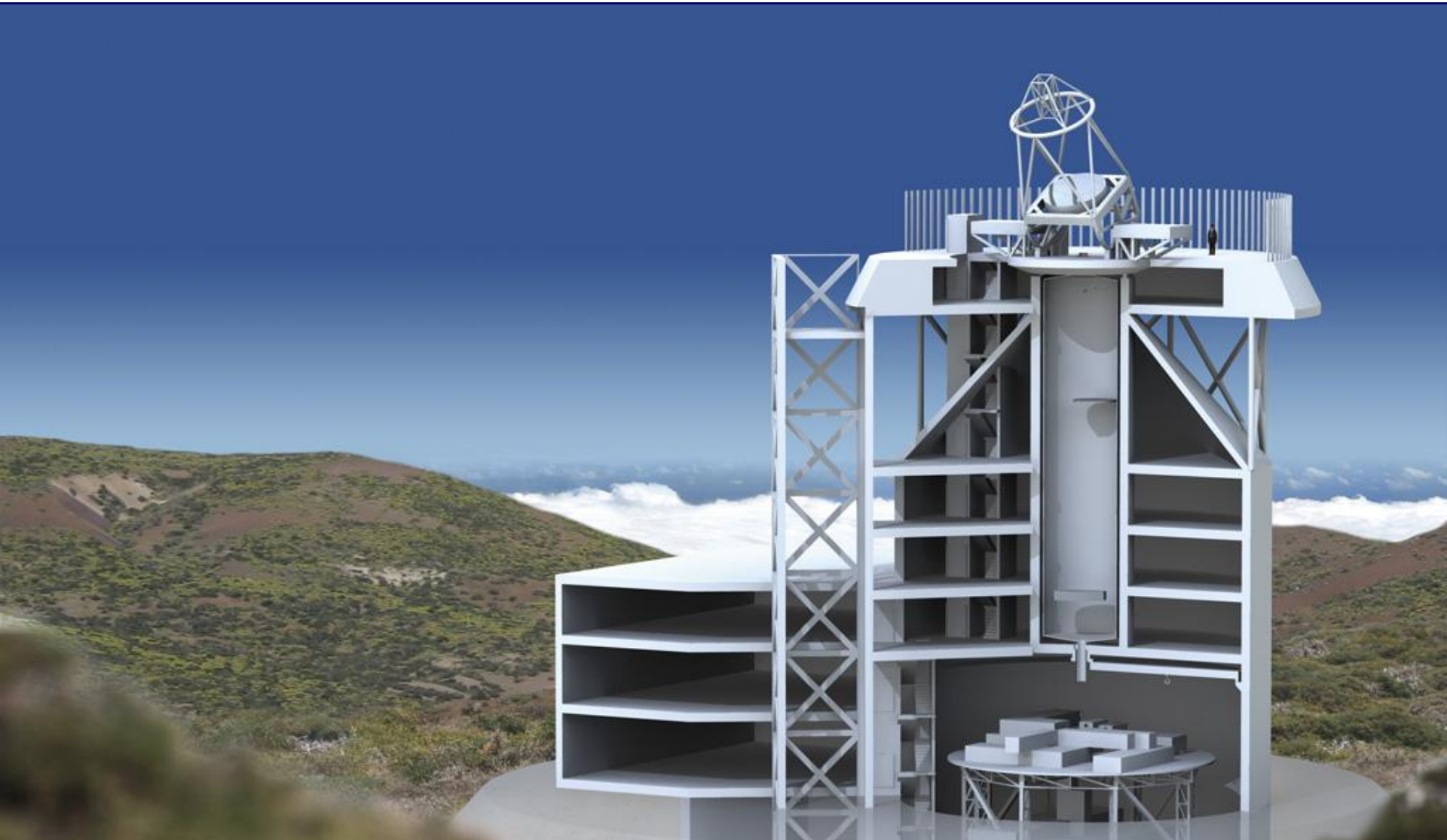
Optical design 14 mirrors (improvement under study)

Lightweighted 4m Primary Mirror M1

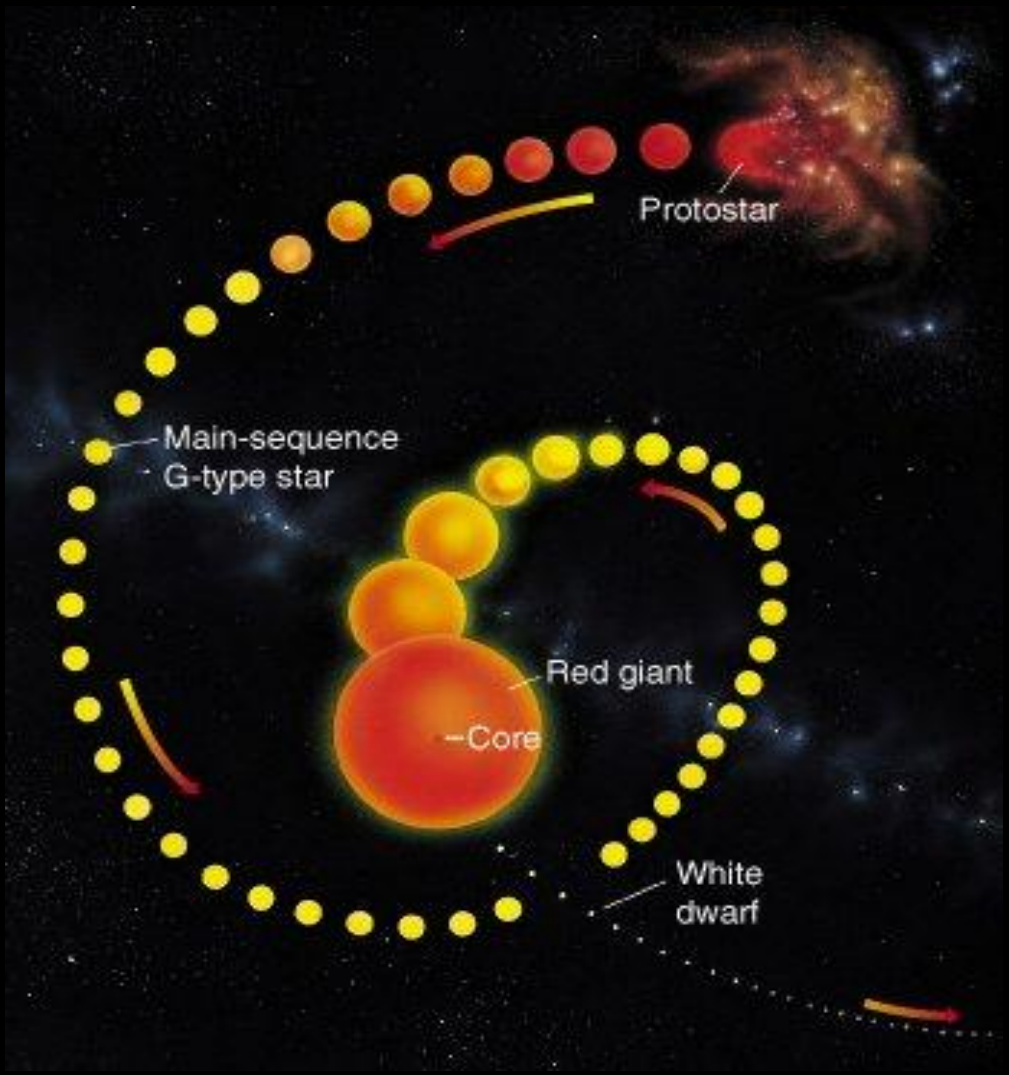
Open enclosure + wind shield

Active M2

Reflective heat stop



Come andra` a finire...



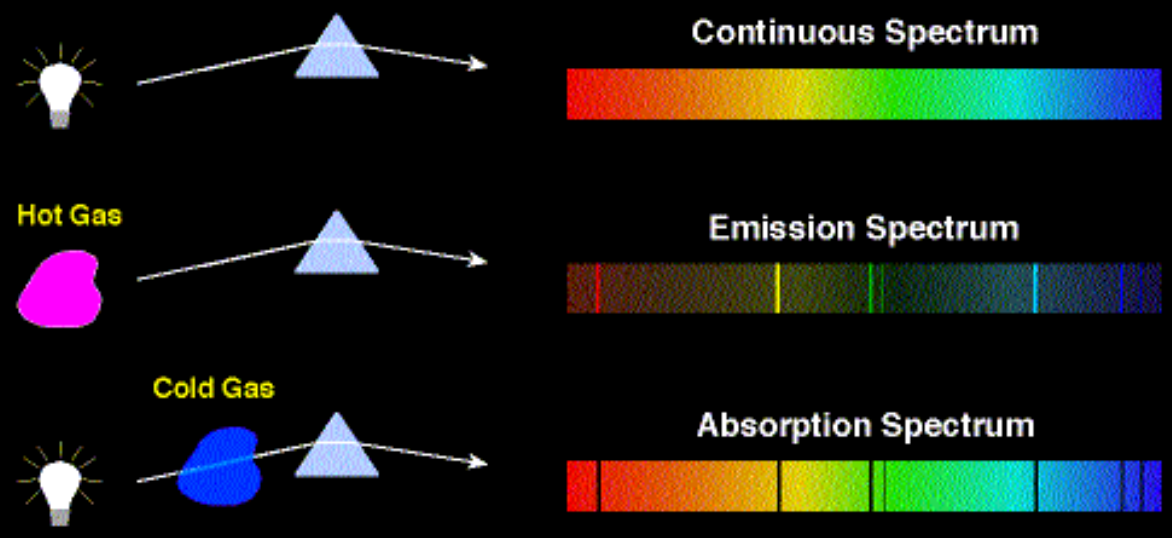
... ma, tranquilli, abbiamo ancora 5 miliardi di anni...

L' evoluzione di una stella come il Sole

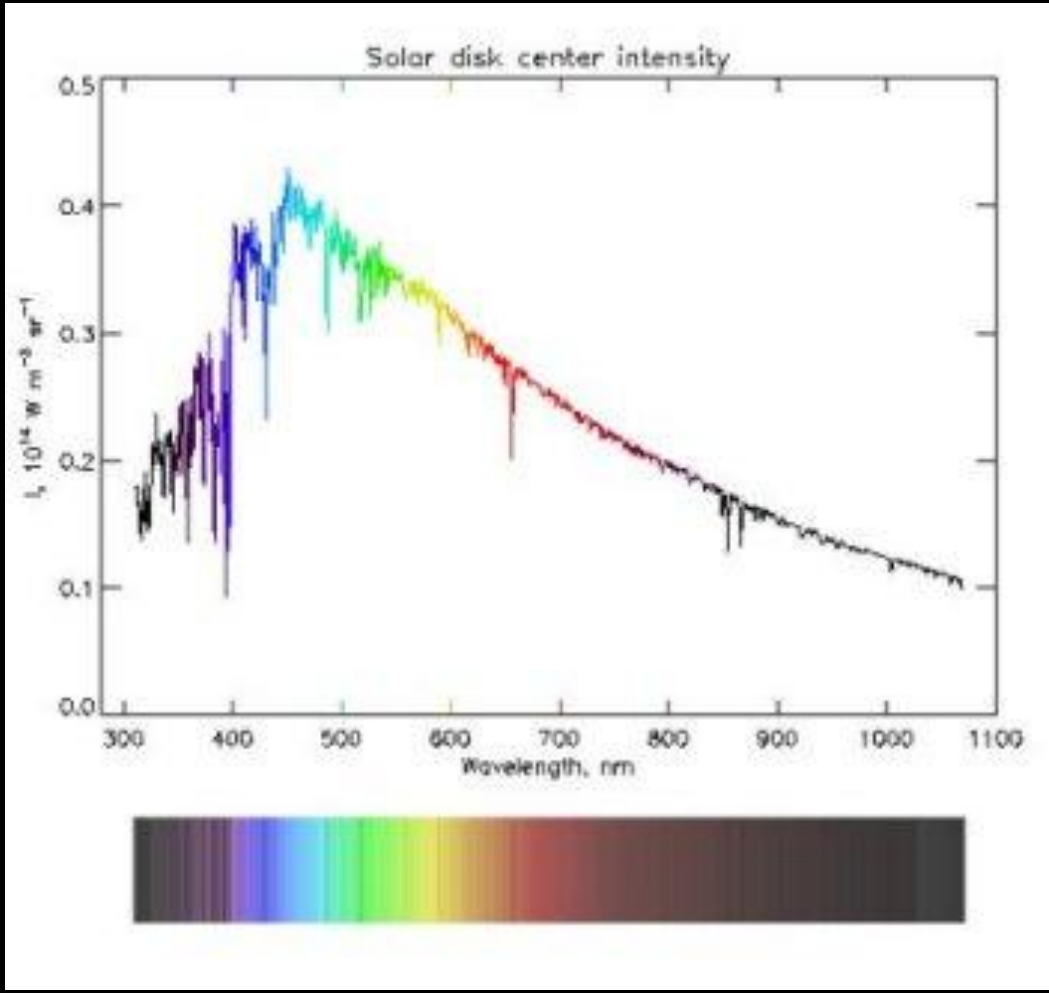
Spettroscopia

Ciascun elemento chimico, se riscaldato, emette luce in determinate lunghezze d'onda.

Si chiama *spettro* di quell'elemento.



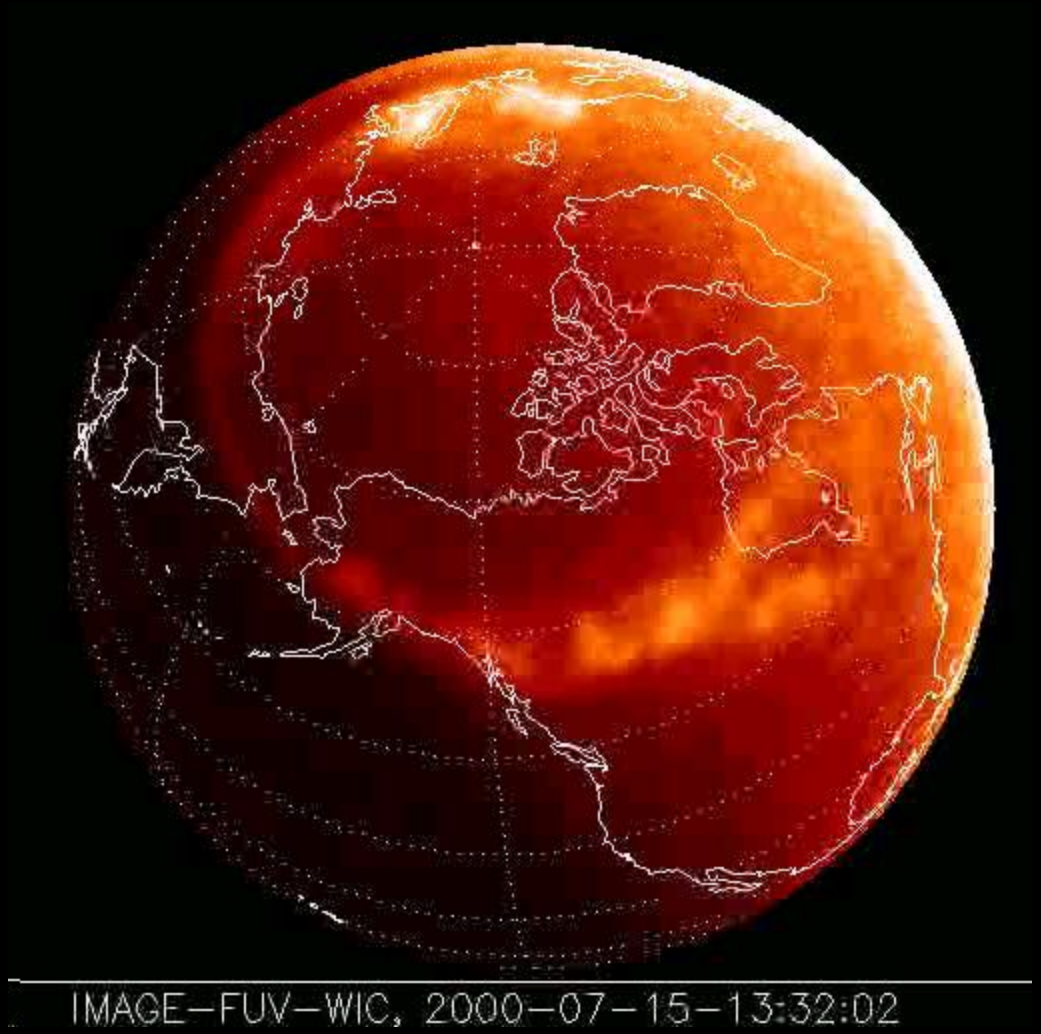
Se una nuvola di gas di quell'elemento è attraversata dalla luce, assorbe luce nelle stesse lunghezze d'onda.

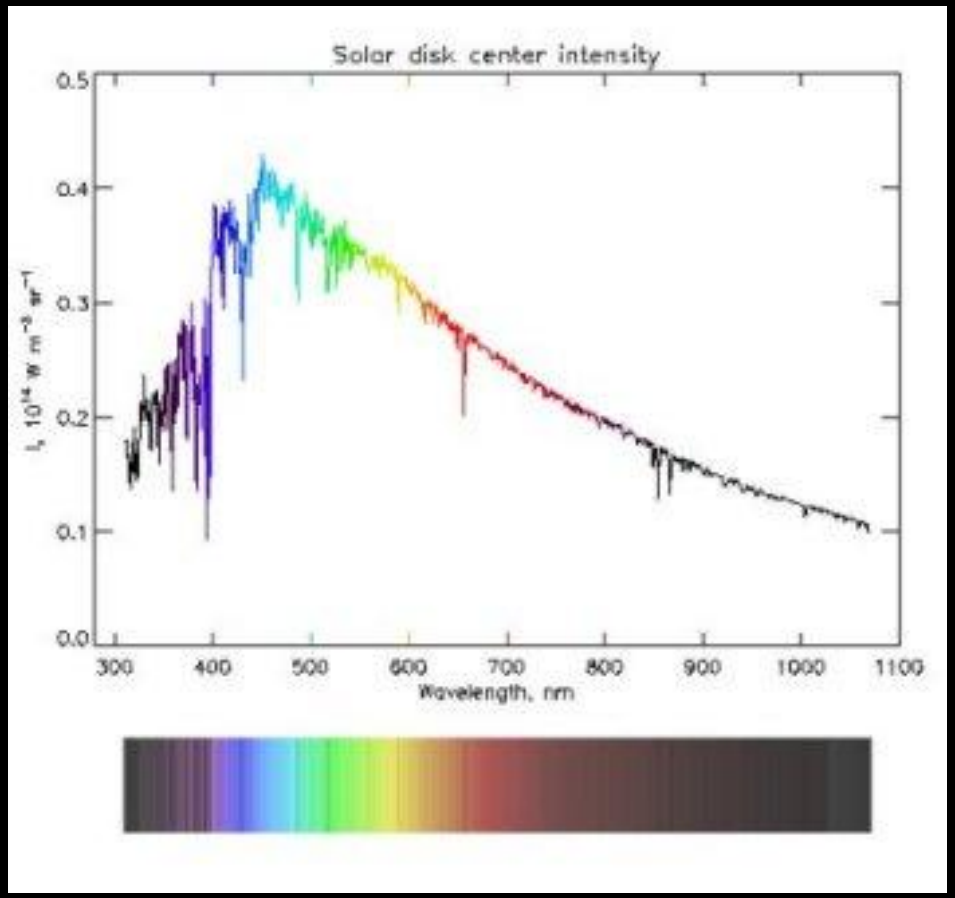


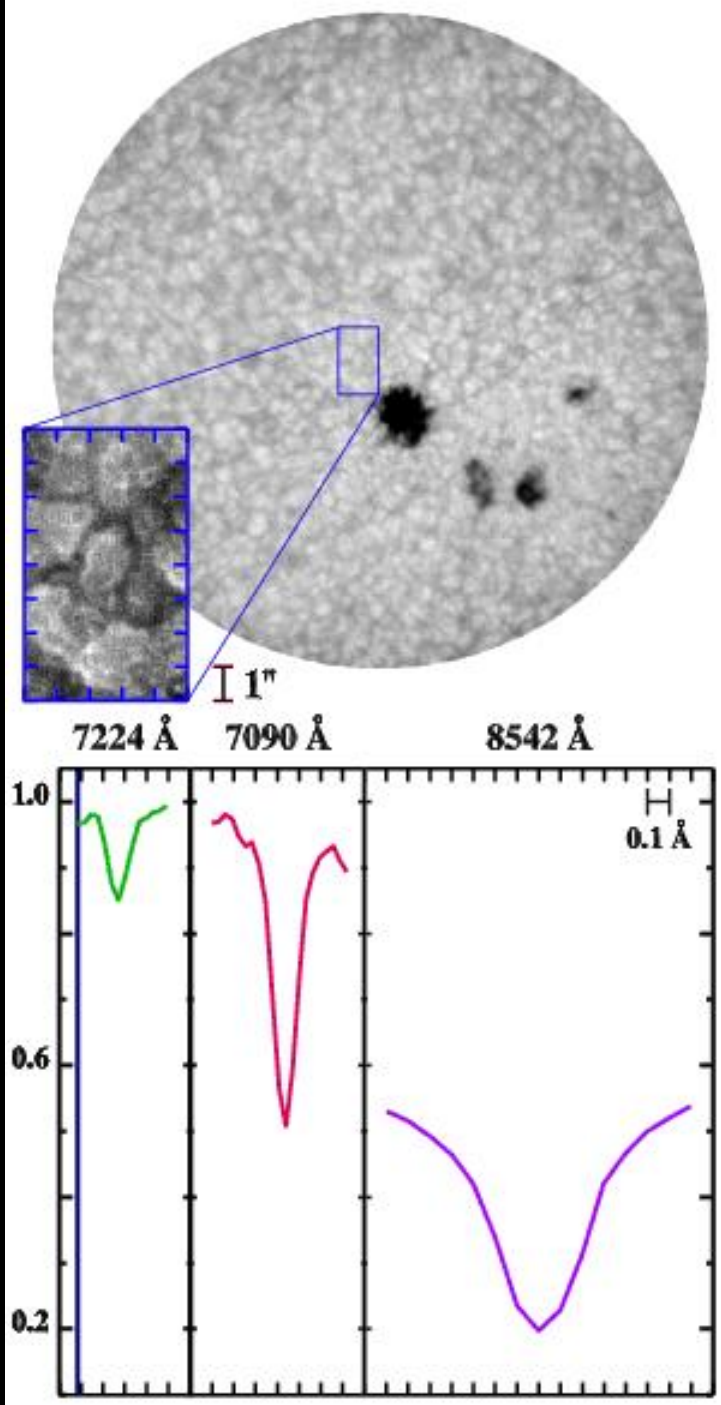
Lo spettro del Sole:

tutti gli elementi presenti nella sua atmosfera contribuiscono ad assorbire alcune lunghezze d'onda della luce emessa dalla superficie.

Il clima nello spazio & la Terra





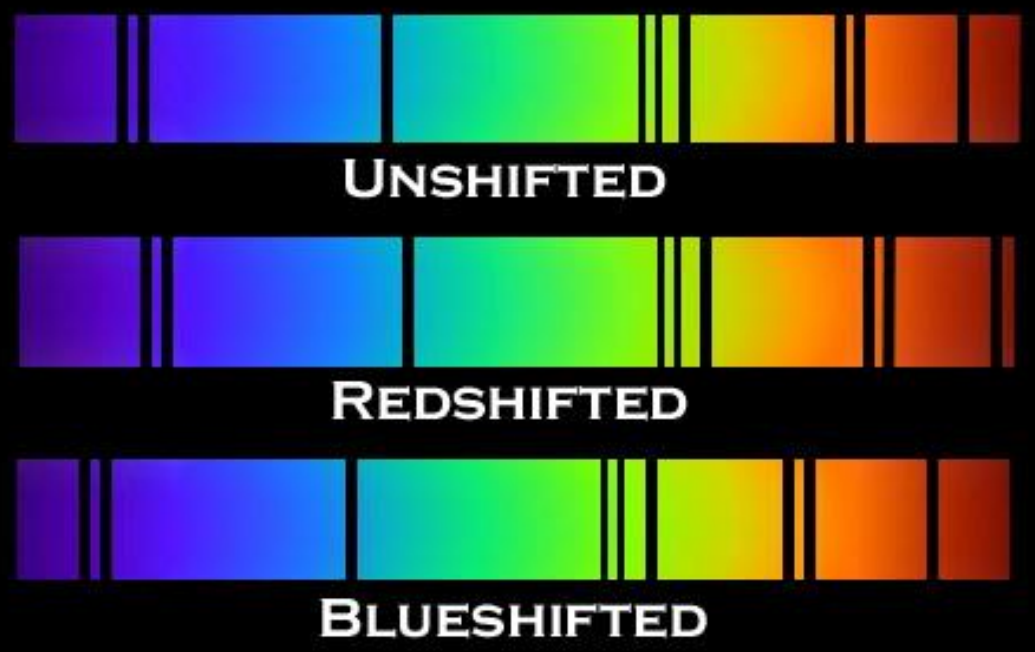


Se i processi di emissione o assorbimento di quella luce avvengono ad una certa quota nell'atmosfera del Sole, possiamo osservare "quella" quota.

Scansione di righe con lo strumento IBIS, Dunn Solar Telescope, New Mexico.

Campi di velocità / Effetto Doppler

Effetto Doppler (o della sirena dell'ambulanza):



Lunghezze d'onda corte ("blu").

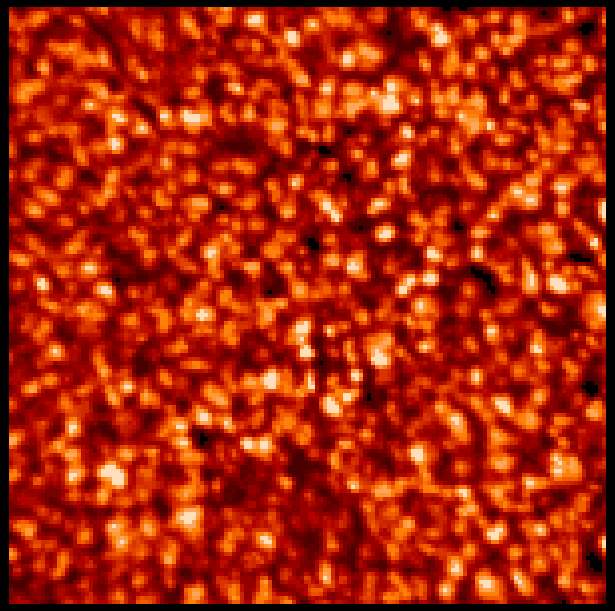
Lunghezze d'onda

Lunghezze d'onda lunghe ("rosso").

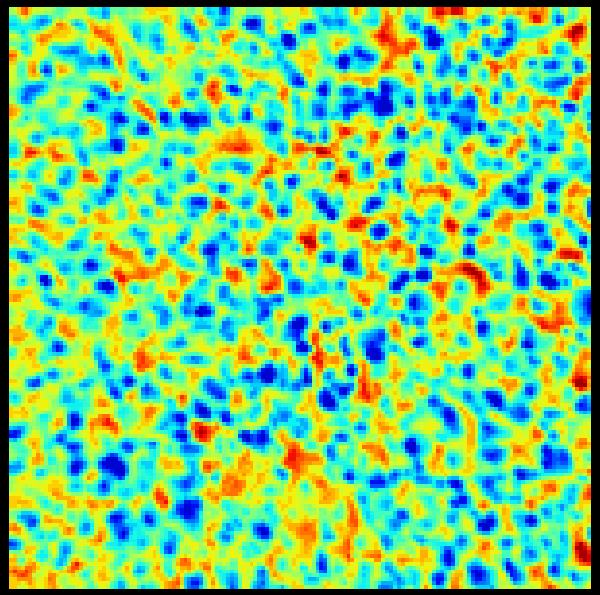
Se una riga è spostata verso il blu, il plasma che la produce si sta avvicinando a noi.

Se una riga è spostata verso il rosso, il plasma che la produce si sta allontanando da noi.

Possiamo creare delle mappe di velocità, che ci dicono dove il plasma sta salendo e dove sta scendendo.



Immagini di partenza



Mappa di velocità

Blu: velocità verso di noi (verso l'alto)

Rosso: velocità via da noi (verso il basso)

RA: Il Dio Sole (~ 2000 AC)

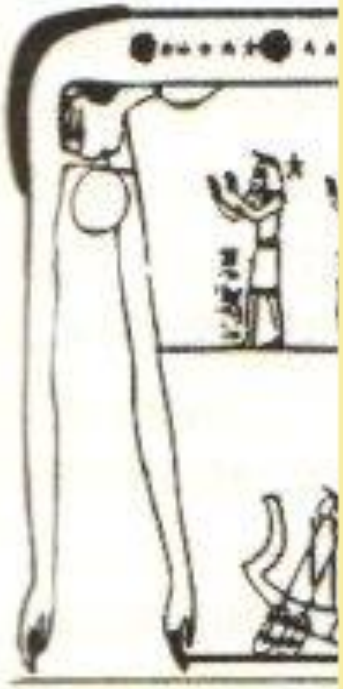
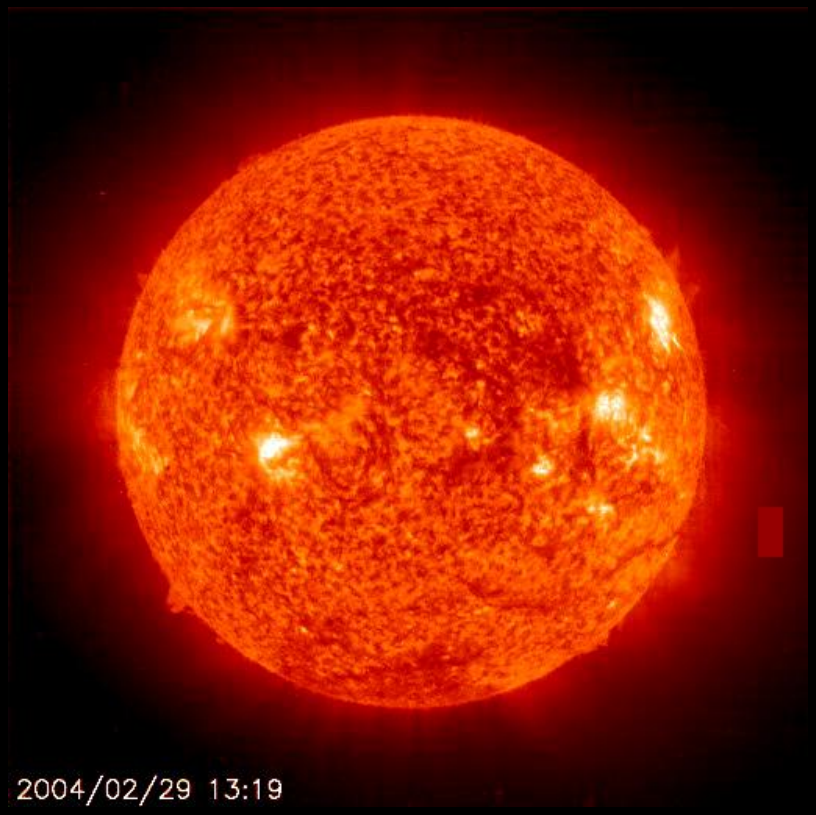
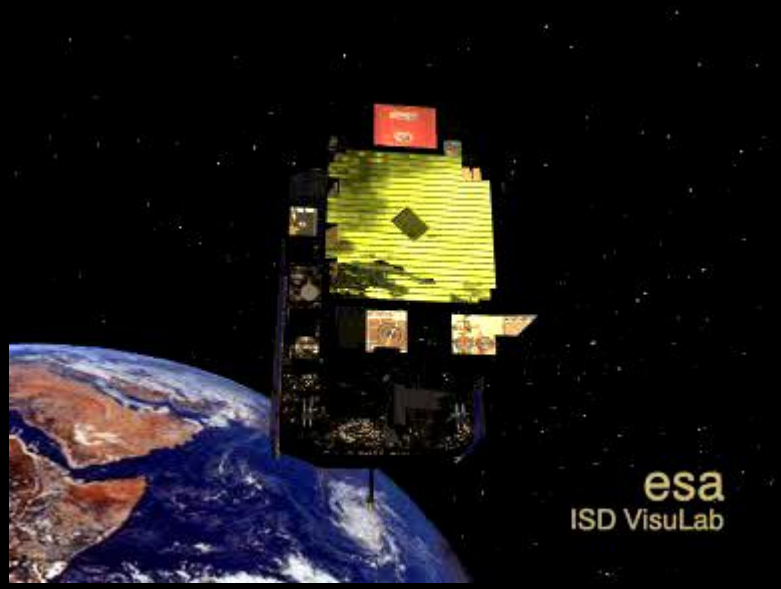


Fig. 2.13. Il via
del Giorno e de
XX dinastia.

SOHO: Il Sole (~2000 DC)