



Istituto Nazionale di Astrofisica

Osservatorio astronomico di Brera



L'universo in fiore

Il Sole e le reazioni nucleari

Fabio Pizzolato
fabio@iasf-milano.inaf.it

28.11.2012

Alcune domande

- Quanto è grande il Sole?
- Di che cosa è fatto?
- Come mai il Sole brilla?





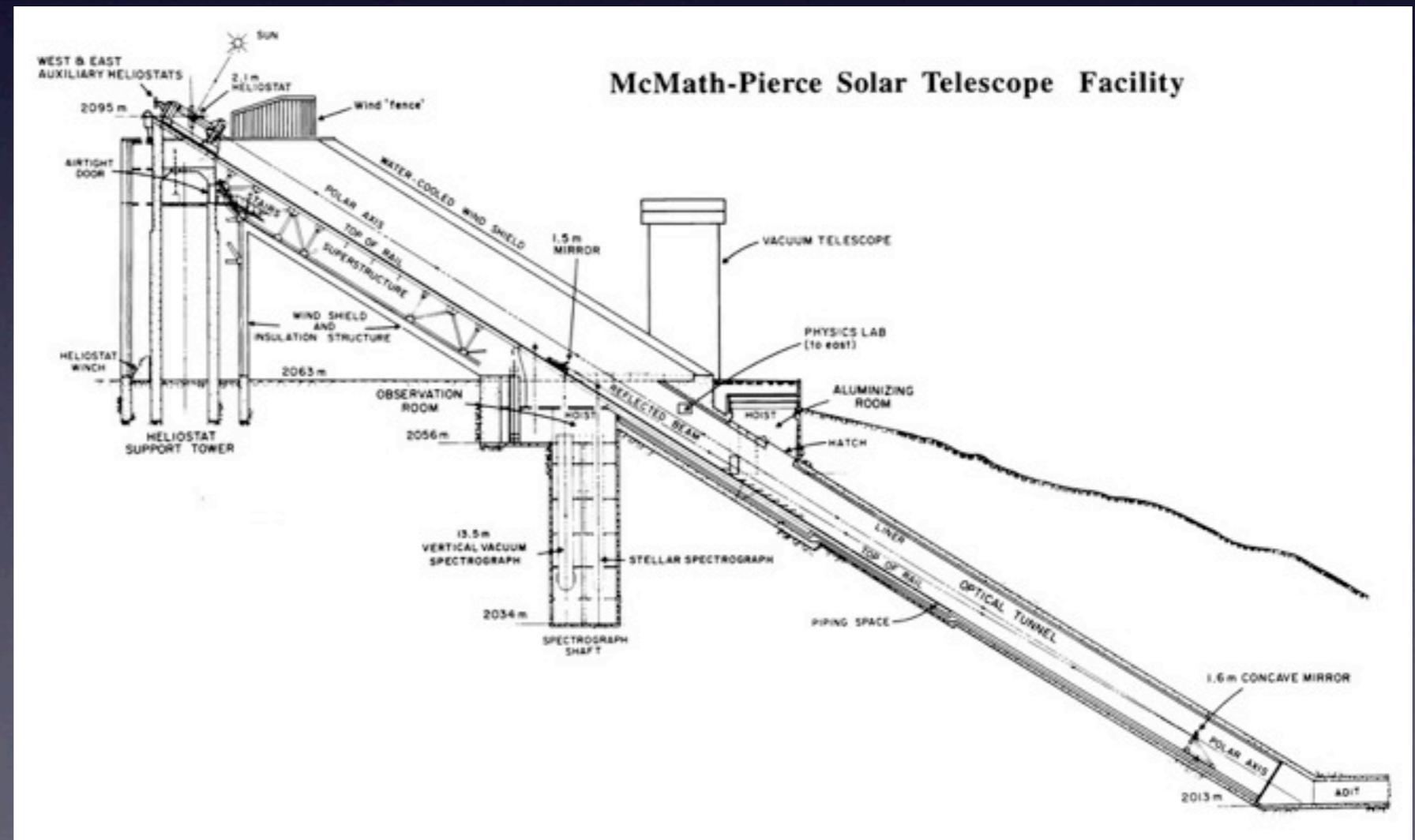
Sommario

- I nostri strumenti d'indagine: osservatori solari e sonde spaziali
- Alcune osservazioni generali
- Di cosa è fatto il Sole? La spettroscopia
- Un'occhiata all'`atmosfera` solare
- Esplorando l'interno: l'eliosismologia
- Che cosa fa brillare il Sole? La fornace nucleare
- I neutrini solari
- L'attività solare

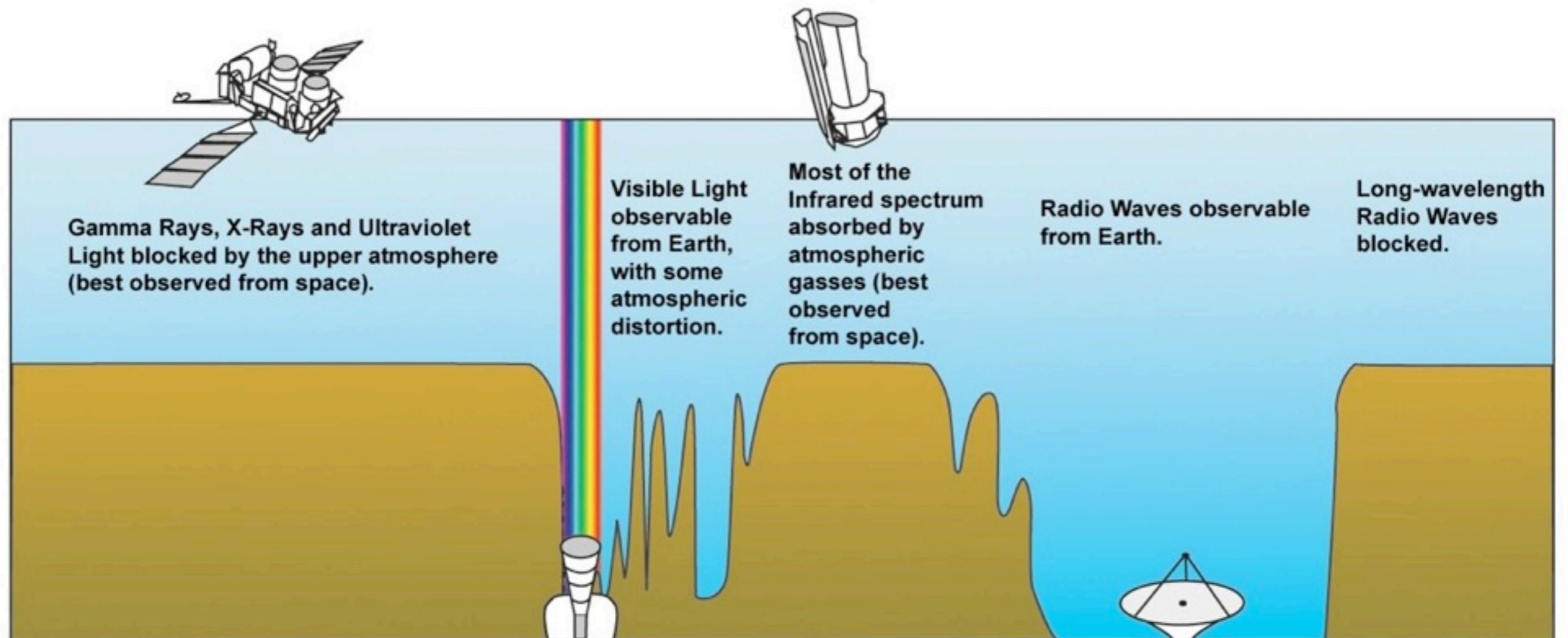
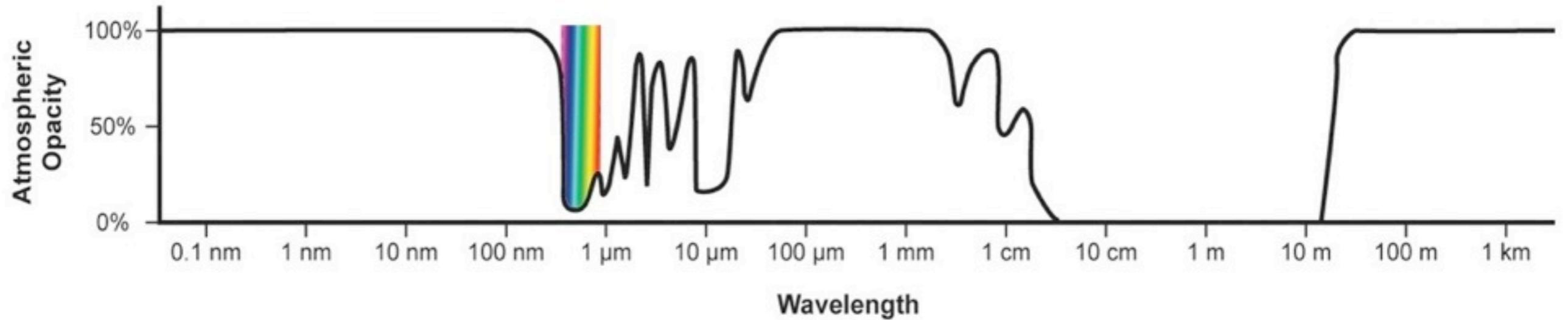
Gli strumenti



Telescopio solare McMath-Pierce (Kitt Peak, AZ)



L'atmosfera assorbe la maggior parte delle radiazioni!



Lancio del satellite SOHO



Wednesday 19 December 2012

Osservatori solari attivi nello spazio

- RHESSI (Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager): accelerazione di particelle e il rilascio di energia dai flare solari (dal 05.02.2002)
- SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory): studio del Sole dalle profondità all'”atmosfera” (dal 02.12.1995)
- TRACE (Transition Region and Coronal Explorer): immagini della corona e della regione di transizione , alta risoluzione spaziale e temporale (dal 01.04.1998)
- STEREO (Solar TERrestrial RELations Observatory): eliosfera e meccanismi dei Coronal Mass Ejections (2 satelliti: dal 25.10.2006)
- SDO (Solar Dynamics Observatory): studio dei fenomeni nell'atmosfera solare (dal 11.02.2011)
- HINODE (giapponese per “alba”): campi magnetici solari (dal 22.09.2006)

Il Sole e l'altre stelle

Il Sole

- Distanza dalla Terra: 149.6 milioni di km
- Diametro: 1.3 milioni di km (109 volte la Terra)
- Massa: 2×10^{30} kg (330.000 volte quella della Terra)

Il Sole

- Su un metro quadro sulla Terra “piovono” 1360 Watt
- Dalla distanza Sole-Terra trovo la luminosità totale: 3.8×10^{26} Watt (!)
- Dalla luminosità calcoliamo la temperatura superficiale di circa 6000 K (radiazione di corpo nero)

Radiazione di corpo nero



Radiazione di corpo nero

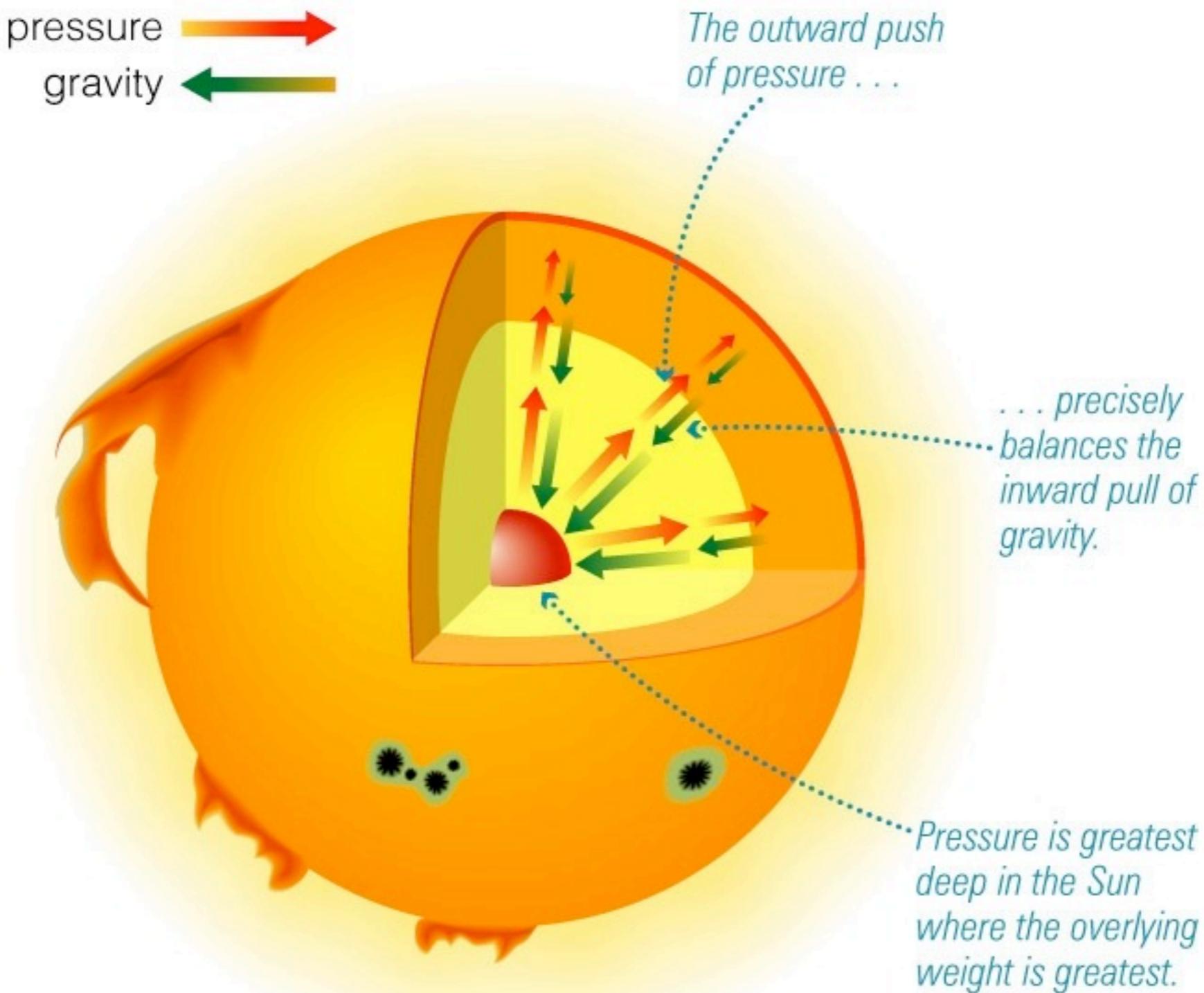
- La luminosità aumenta con la temperatura (legge di Stefan-Boltzmann)
- Il colore vira dal rosso, all'arancione, al giallo... man mano che la temperatura aumenta (legge di Wien)
- L'emissione dipende solo dalla temperatura (!), e non dalla composizione chimica, stato, ecc.
- Il Sole si comporta in prima approssimazione come un corpo nero (!)

?

- Dall'analisi della sua luce (corpo nero), sappiamo che il Sole è una sfera di gas caldi, ~6000 gradi alla “superficie” (molto di più nel nucleo!), praticamente immersa nel vuoto interstellare
- I gas caldi esercitano una (forte) pressione verso l'esterno
- Come mai il sole non si espande sotto la spinta della propria pressione?

Equilibrio “idrostatico”

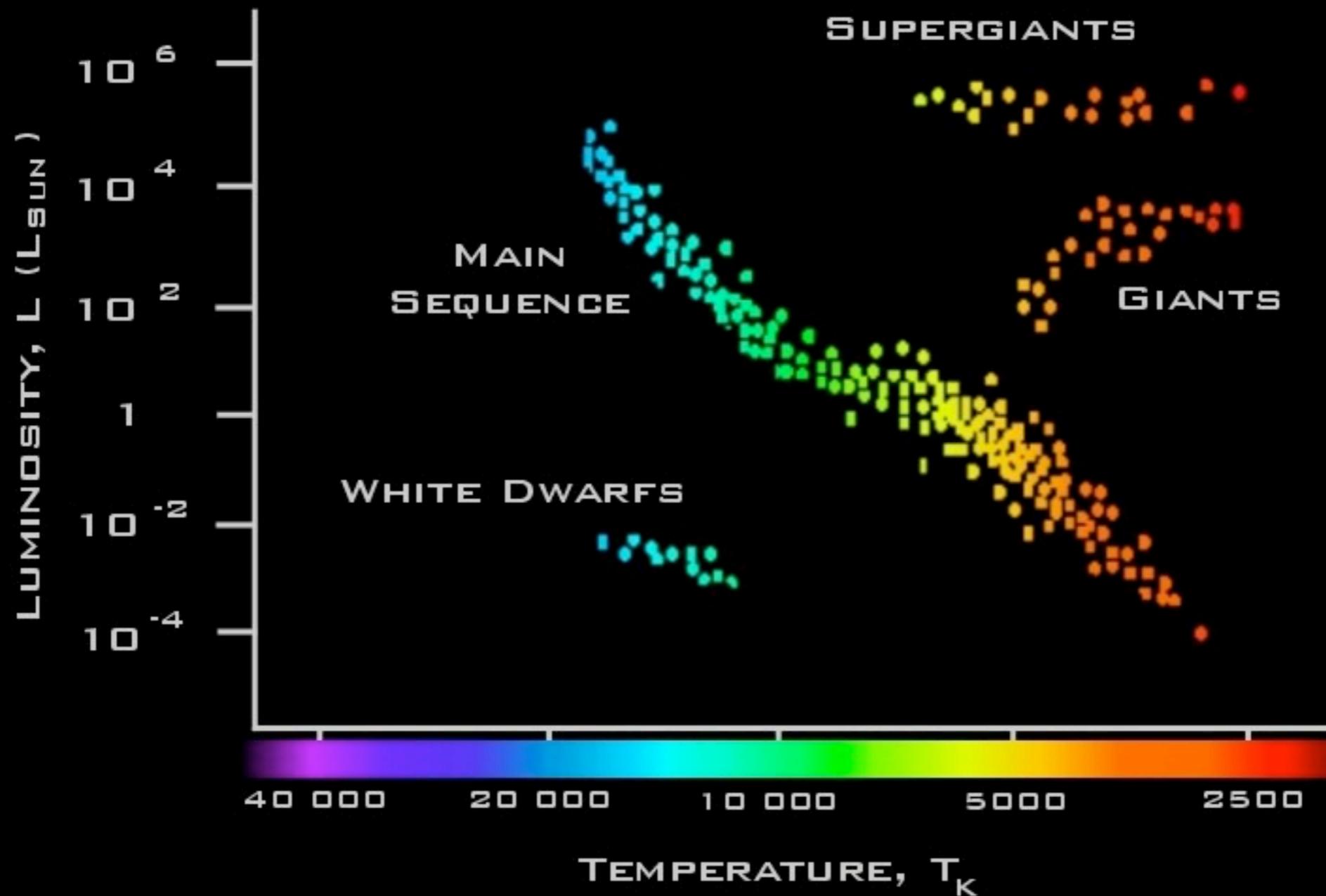
pressure 
gravity 



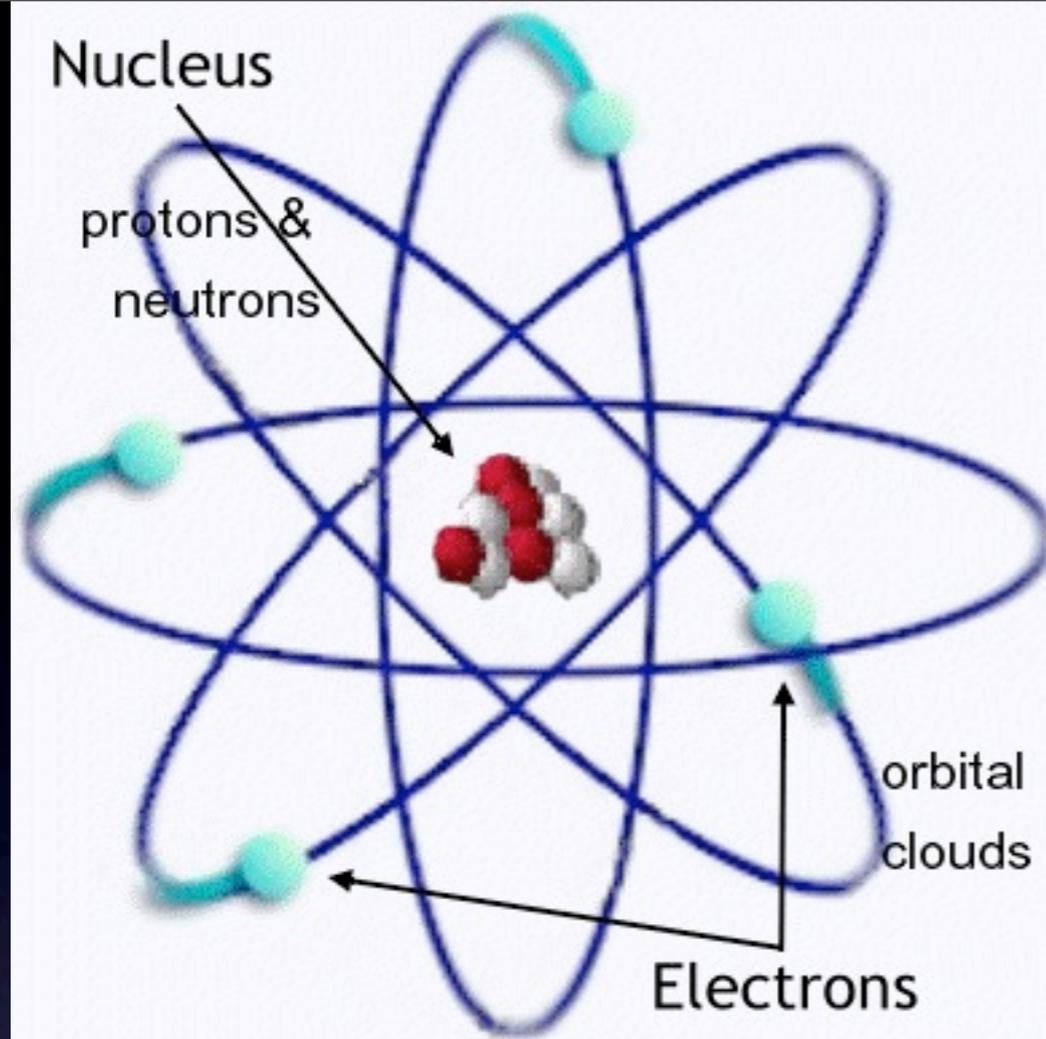
Equilibrio idrostatico

- Il concetto di equilibrio idrostatico vale per tutte le stelle come il Sole!
- Le stelle molto massicce esercitano un peso enorme sulle loro regioni centrali
- Per bilanciare questo peso occorre una pressione enorme, ossia una temperatura enorme
- Quindi le stelle più massicce sono anche le più calde

Il sole e l'altre stelle: il diagramma di Hertzsprung e Russell

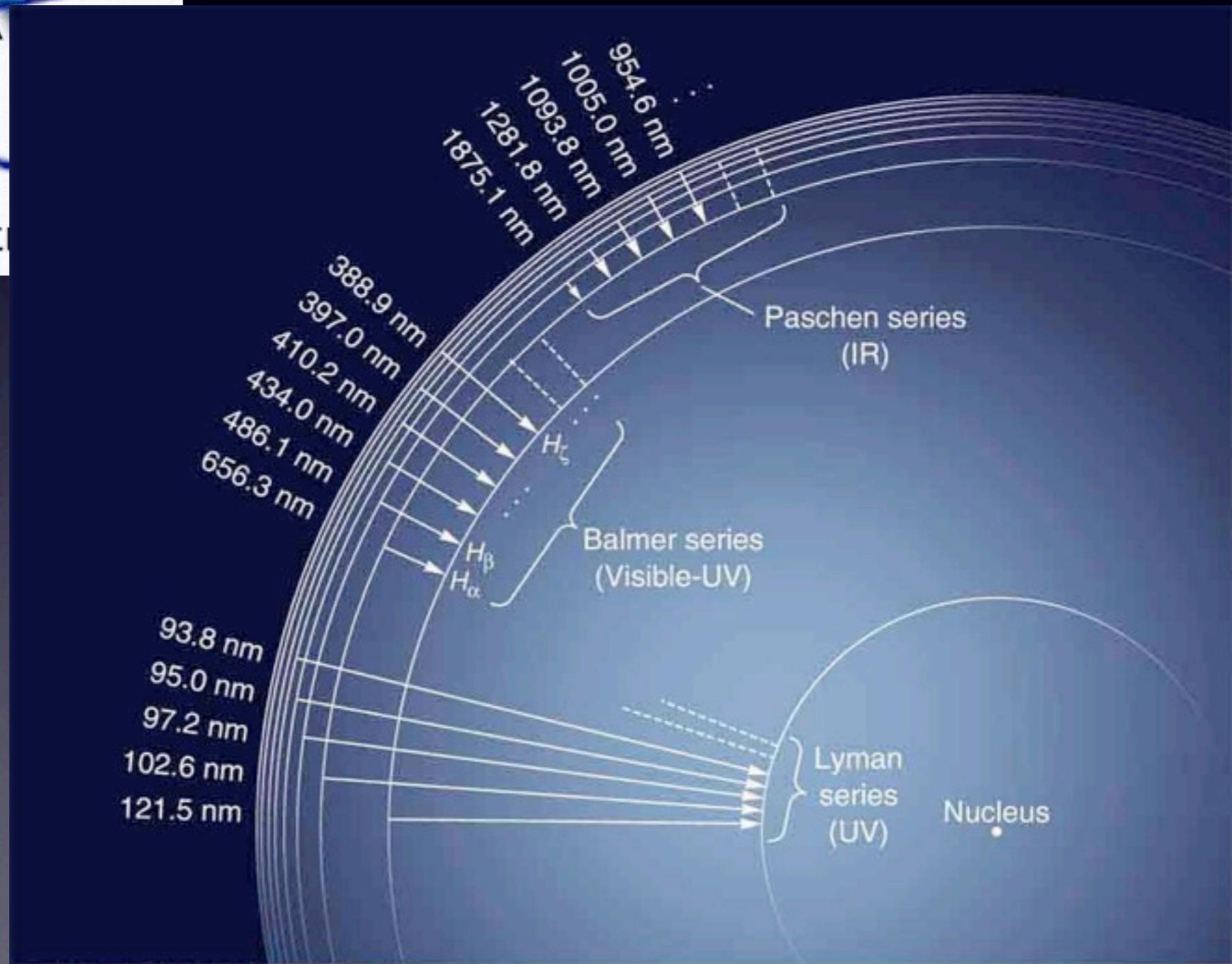
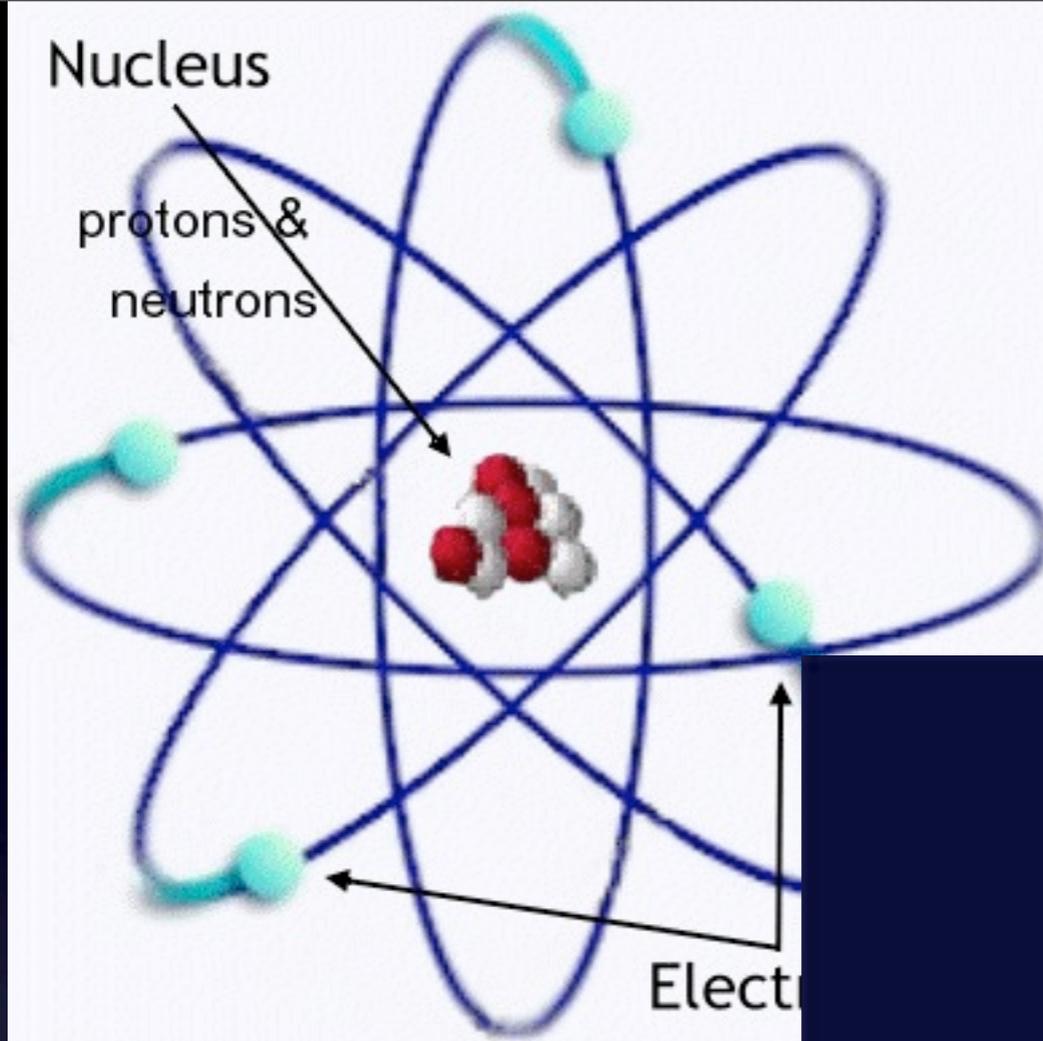


Di cosa è fatto il Sole?

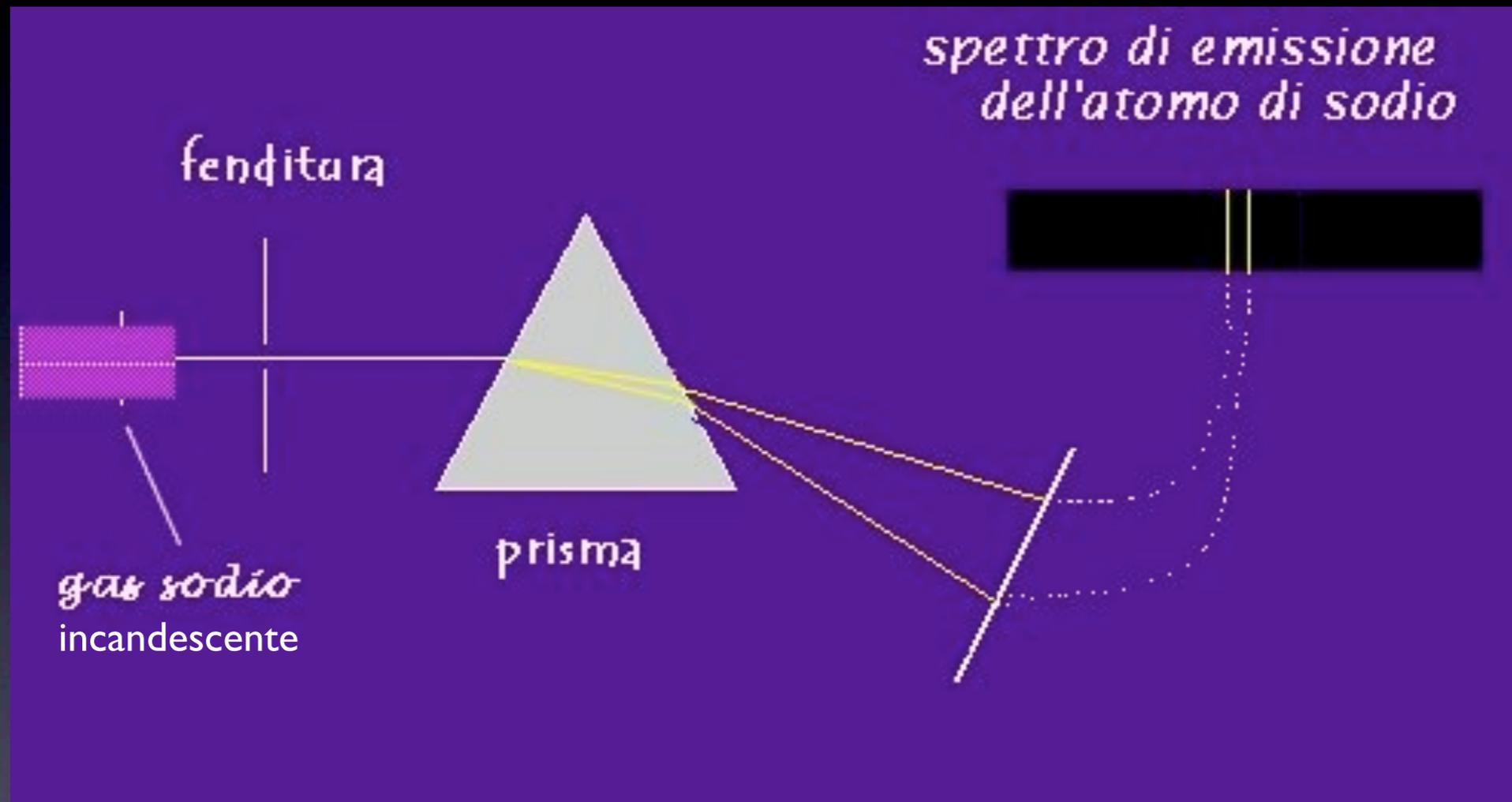


Struttura dell' atomo

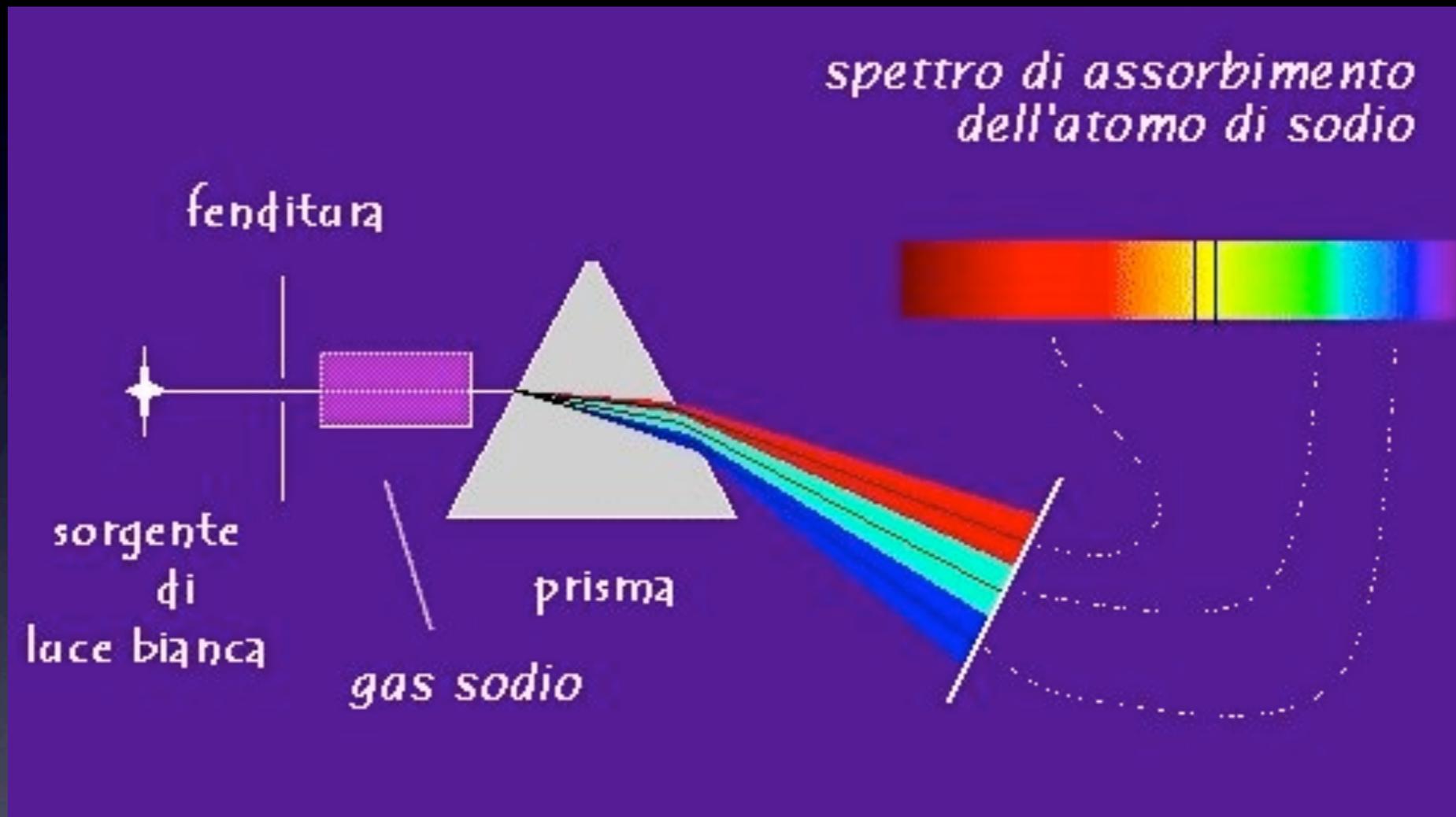
Struttura dell' atomo



Spettro di emissione



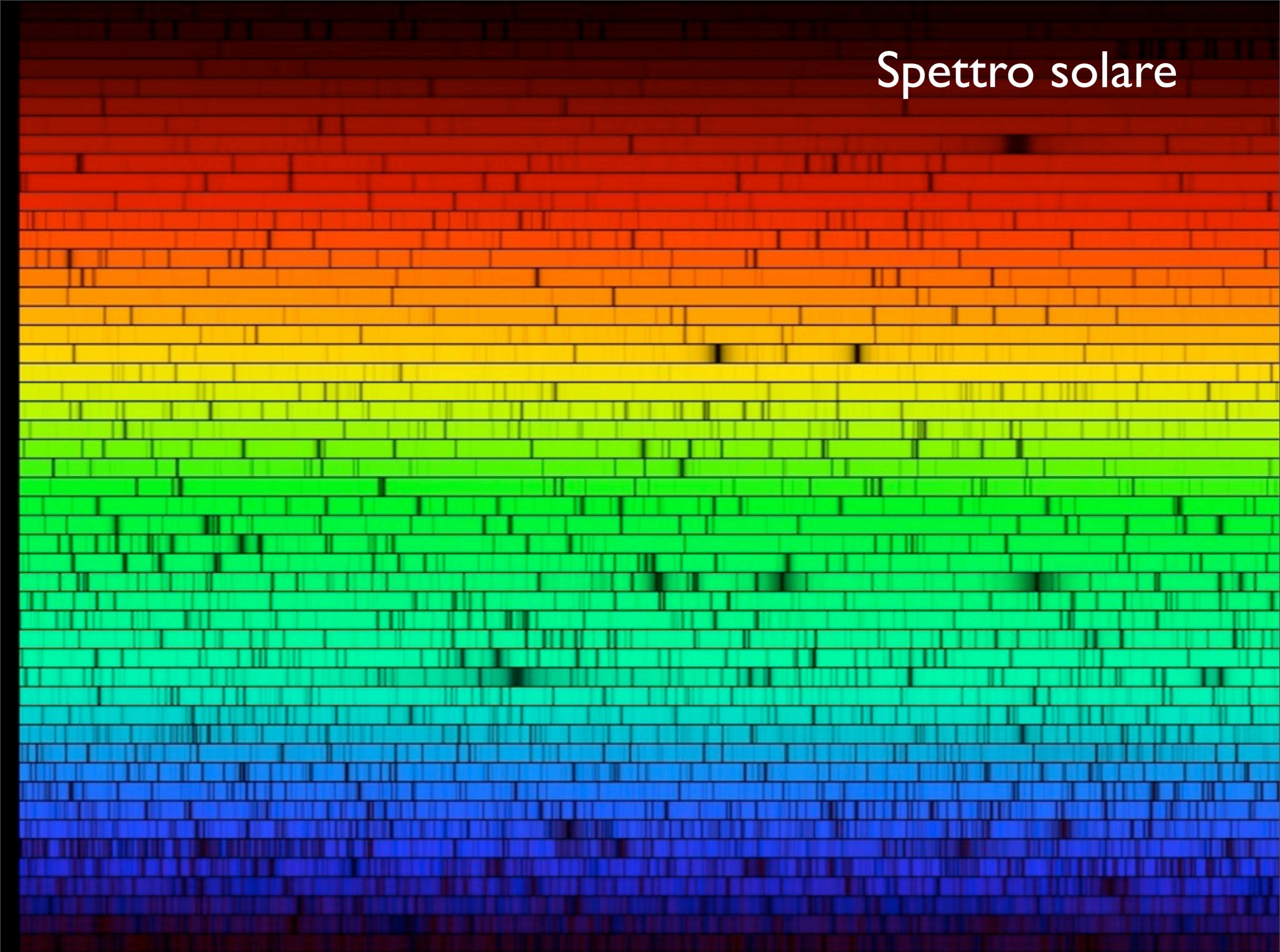
Spettro di assorbimento



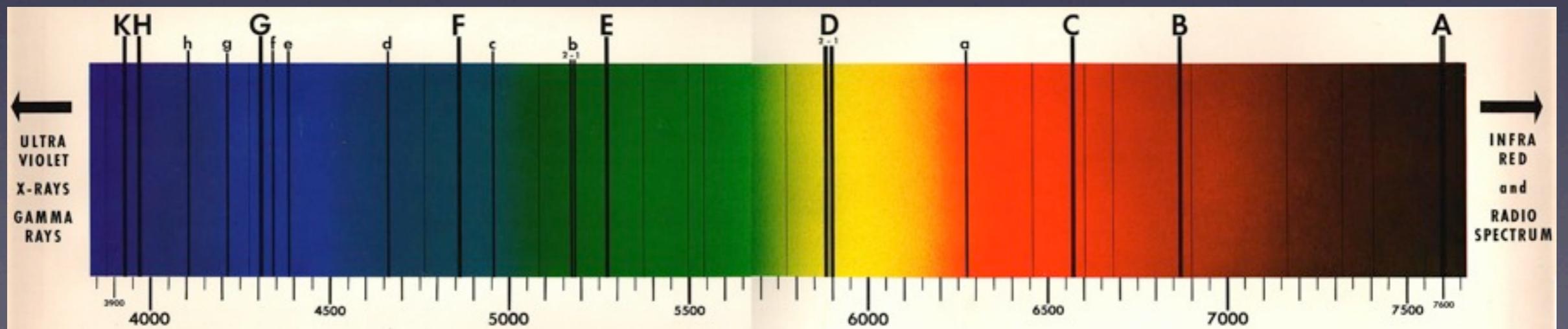
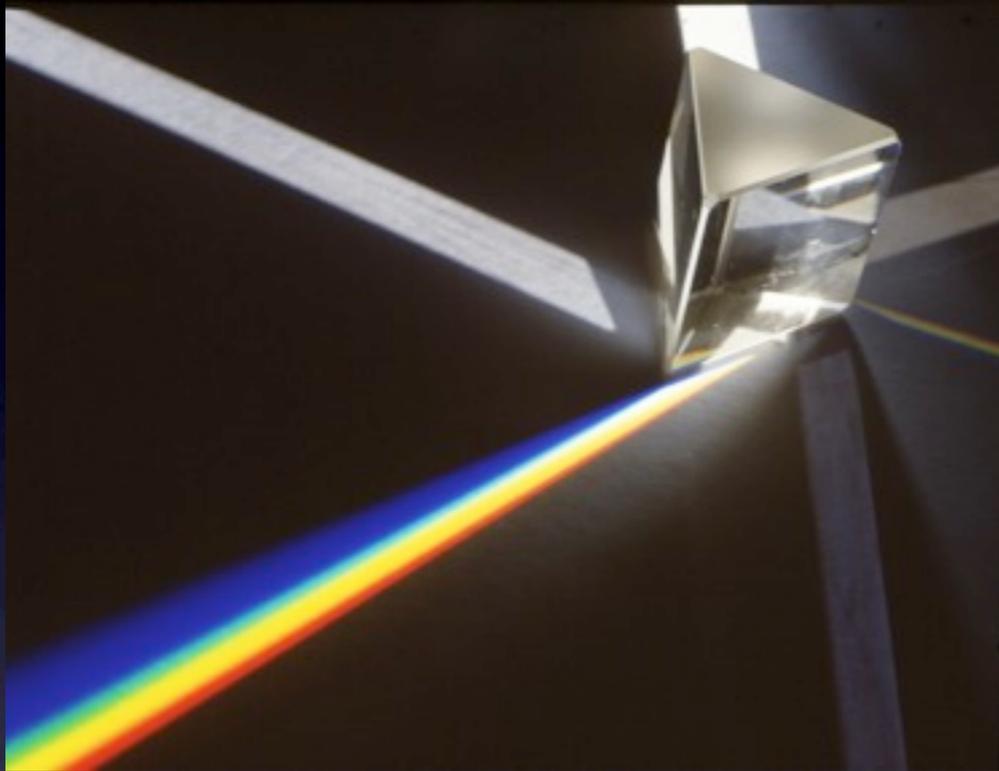
... inoltre...

- Forma e posizione delle righe sono influenzate dalla presenza di forze magnetiche (effetto Zeeman): dalla forma delle righe possiamo calcolare la forza dell'eventuale campo magnetico in cui il gas è immerso
- Se una riga è spostata rispetto alla sua posizione aspettata, questo è dovuto ai movimenti del gas (effetto Doppler)

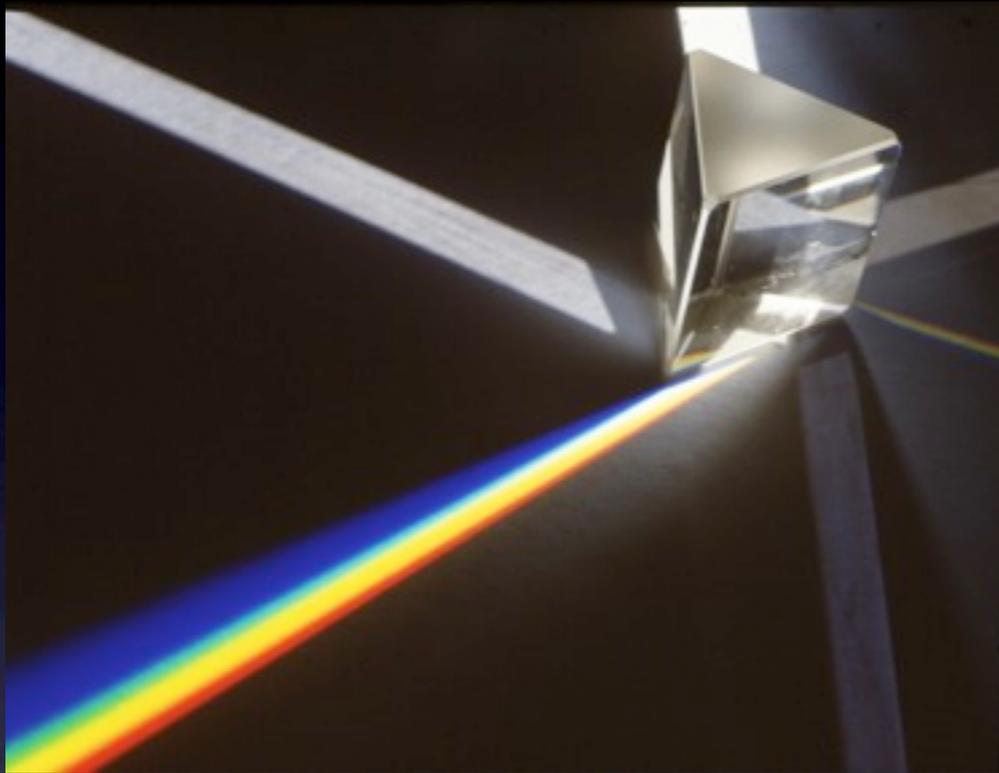
Spettro solare



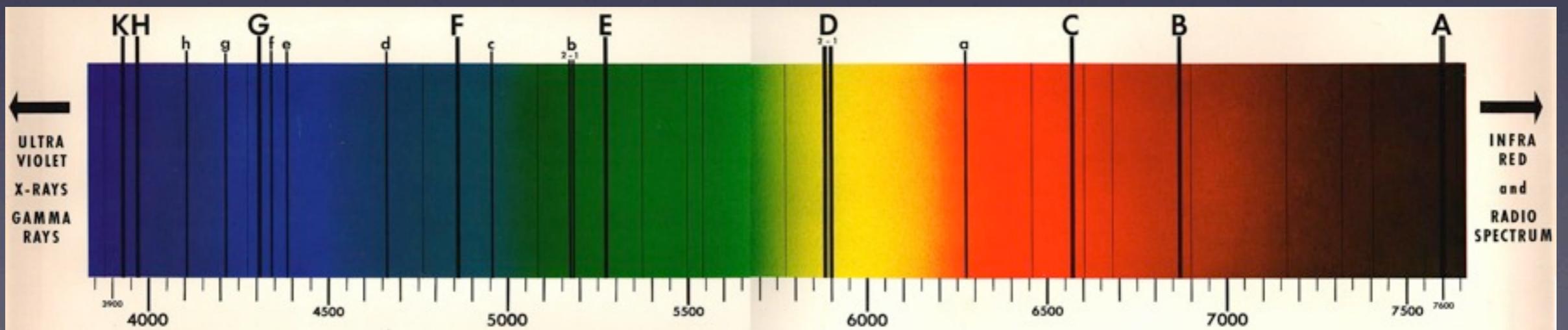
Di cosa è fatto il Sole?



Di cosa è fatto il Sole?

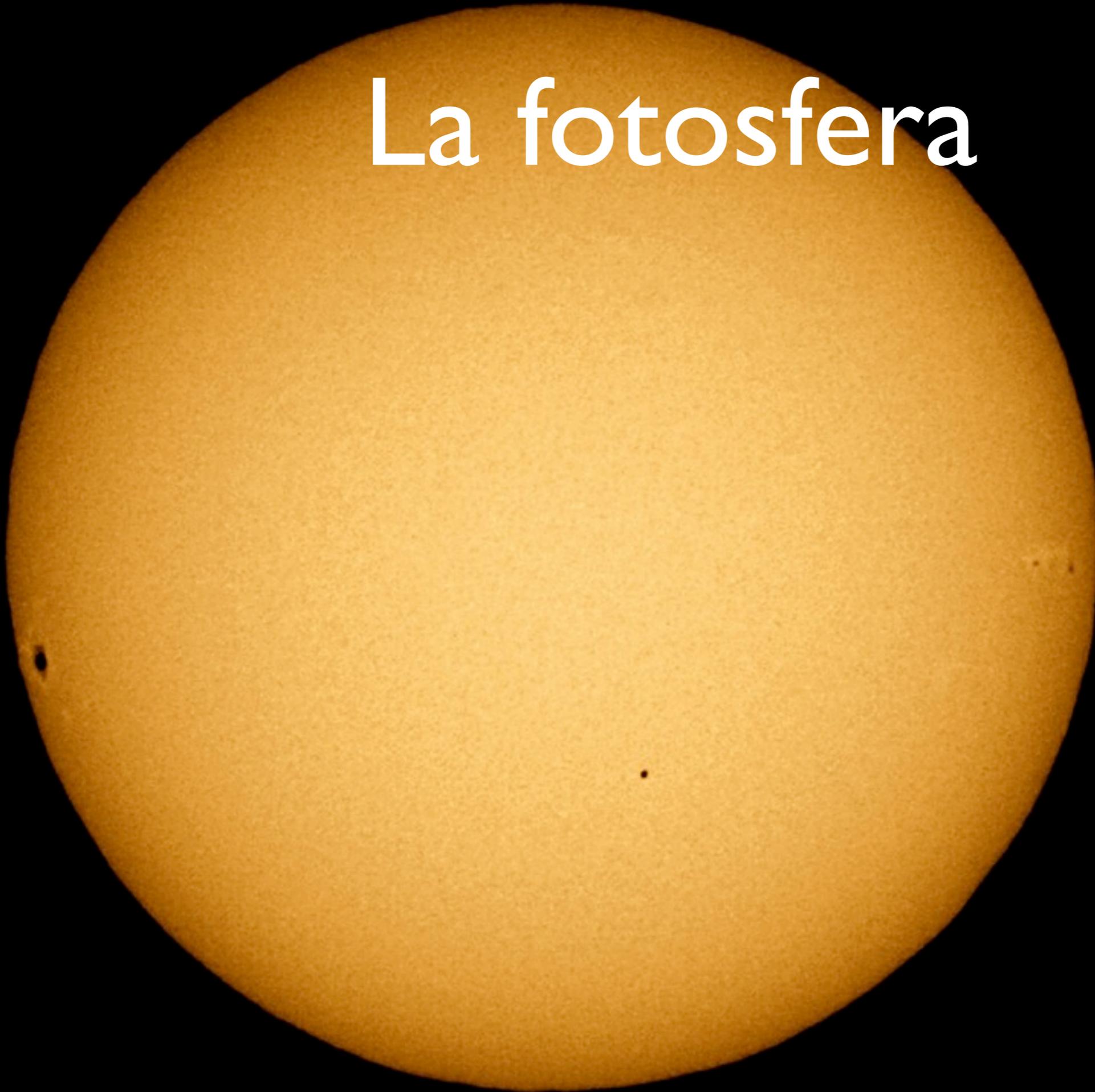


Elemento	(per milione di atomi di H)
H	1,000,000
He	85,100
O	676
C	331
Fe	32



La “atmosfera” solare

La fotosfera



La cromosfera

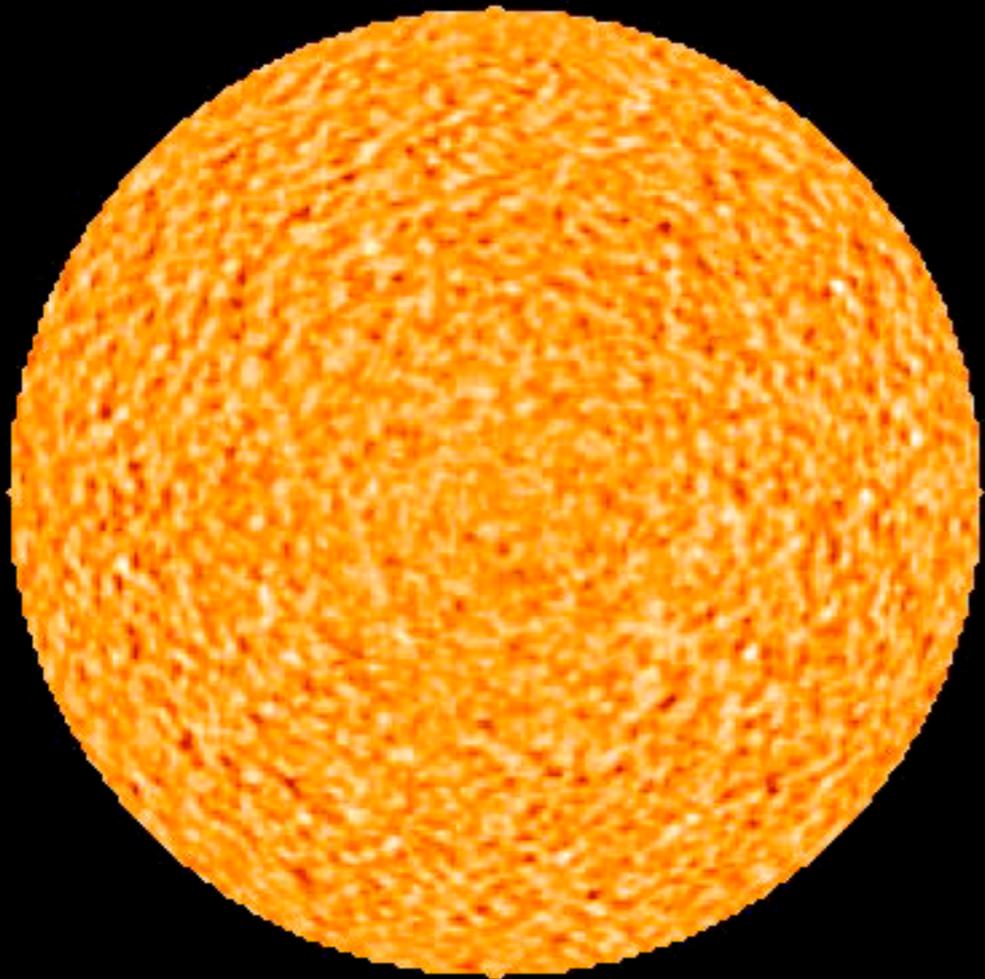


La corona solare

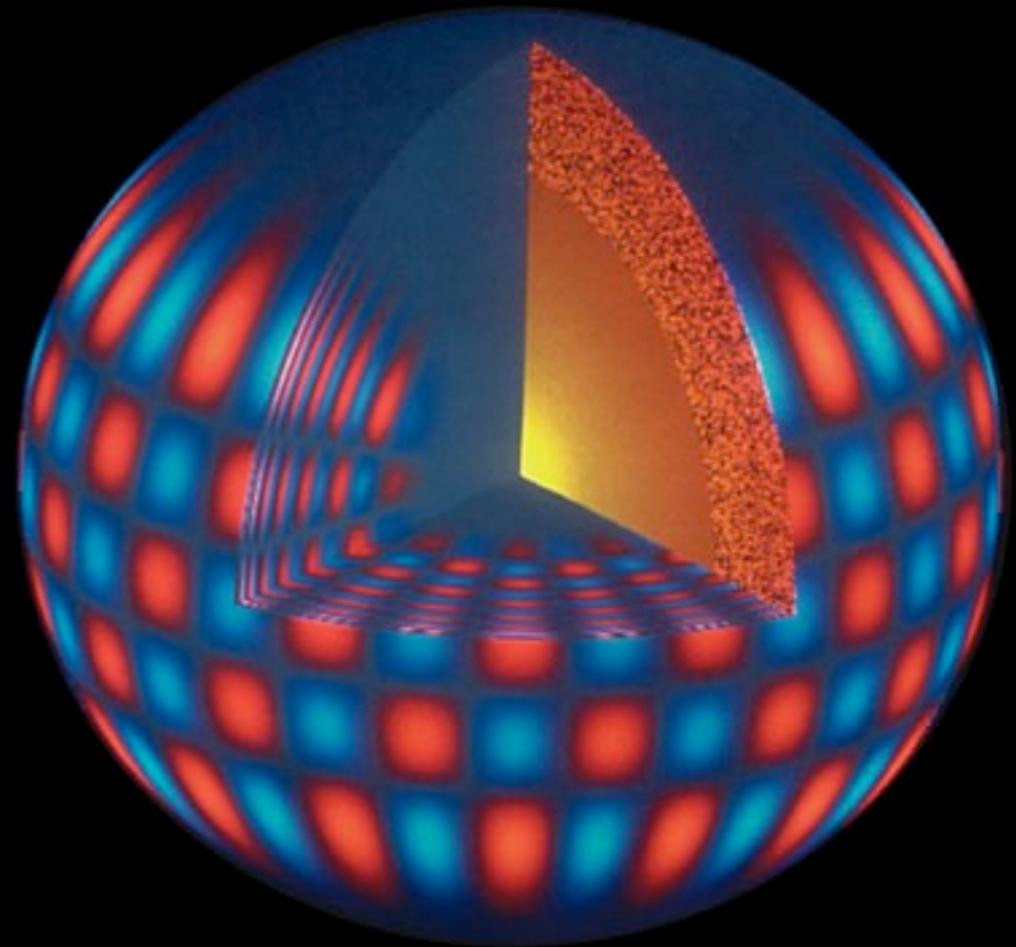
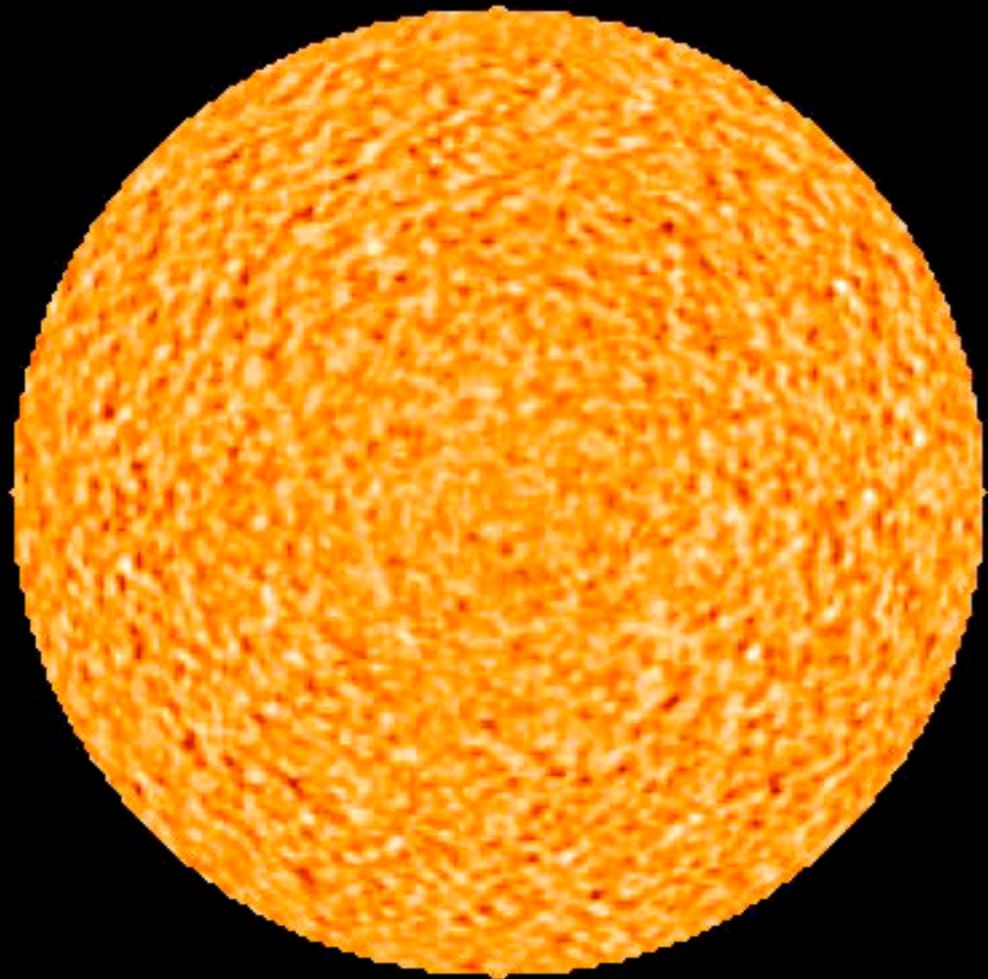


Un tuffo in profondità

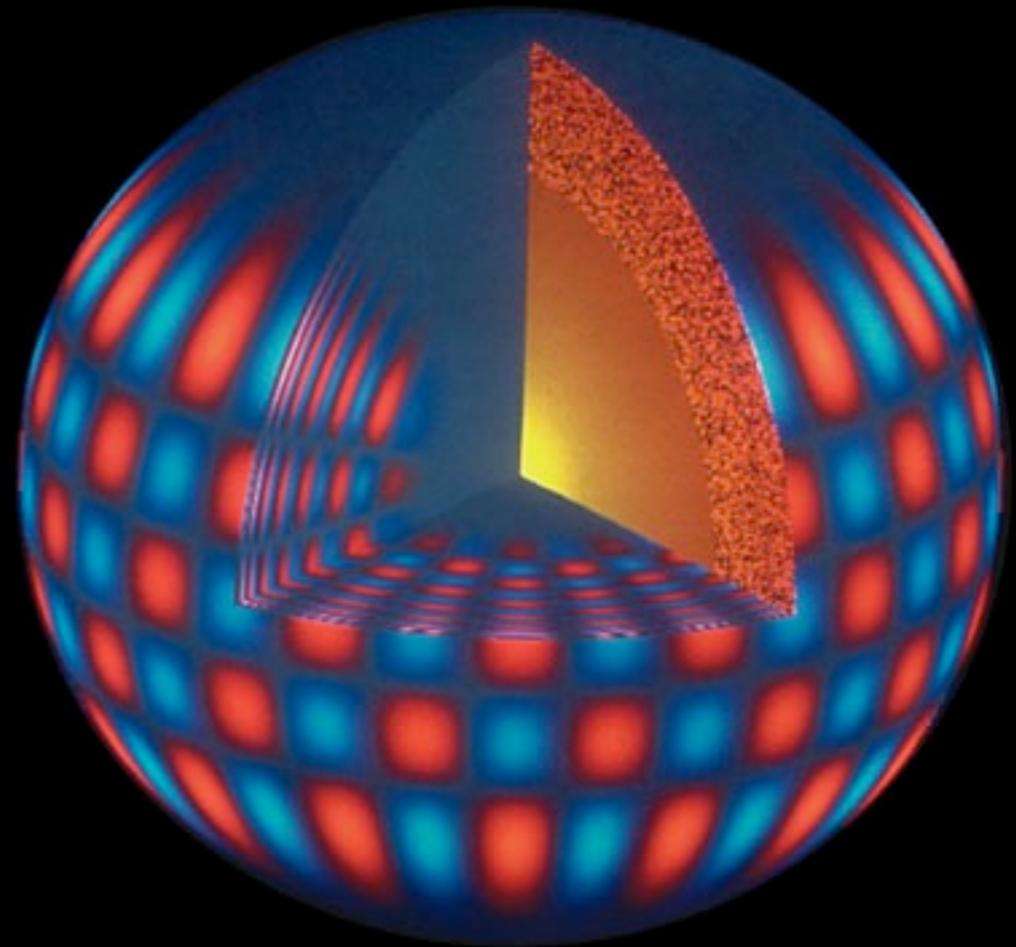
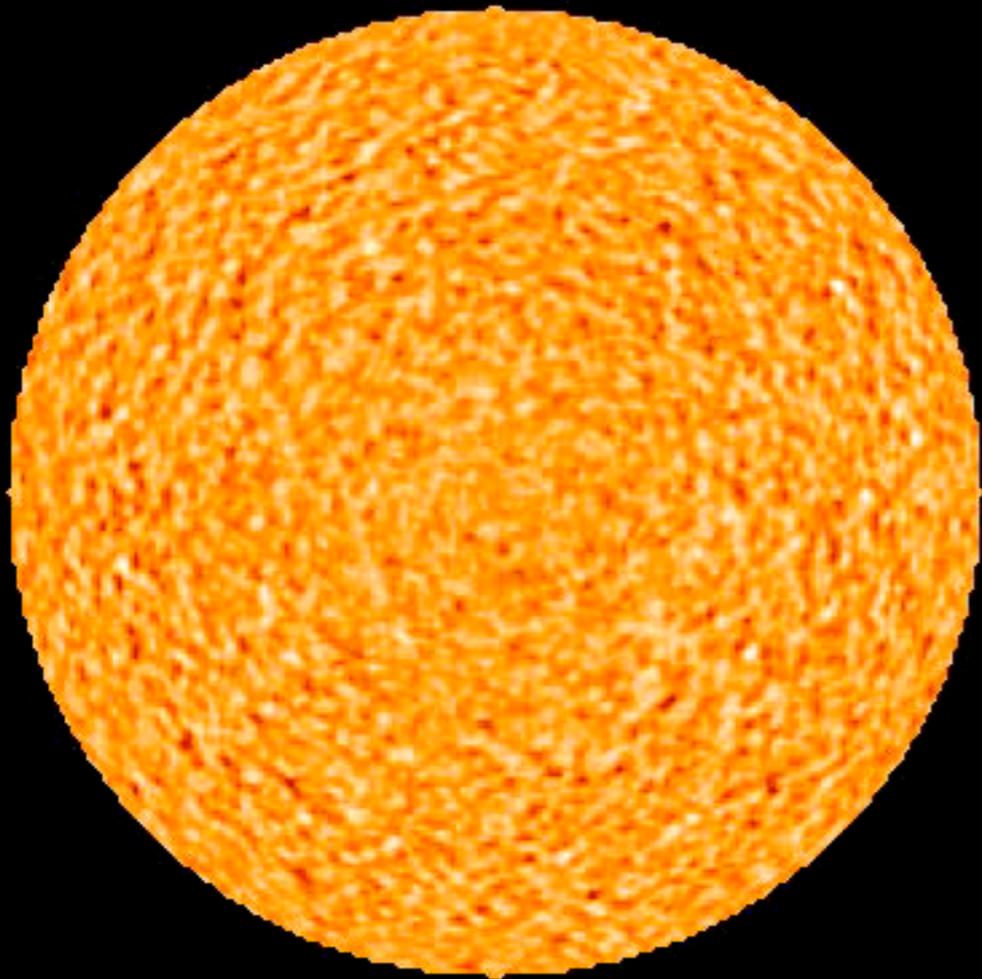
Interno del sole e l'eliosismologia



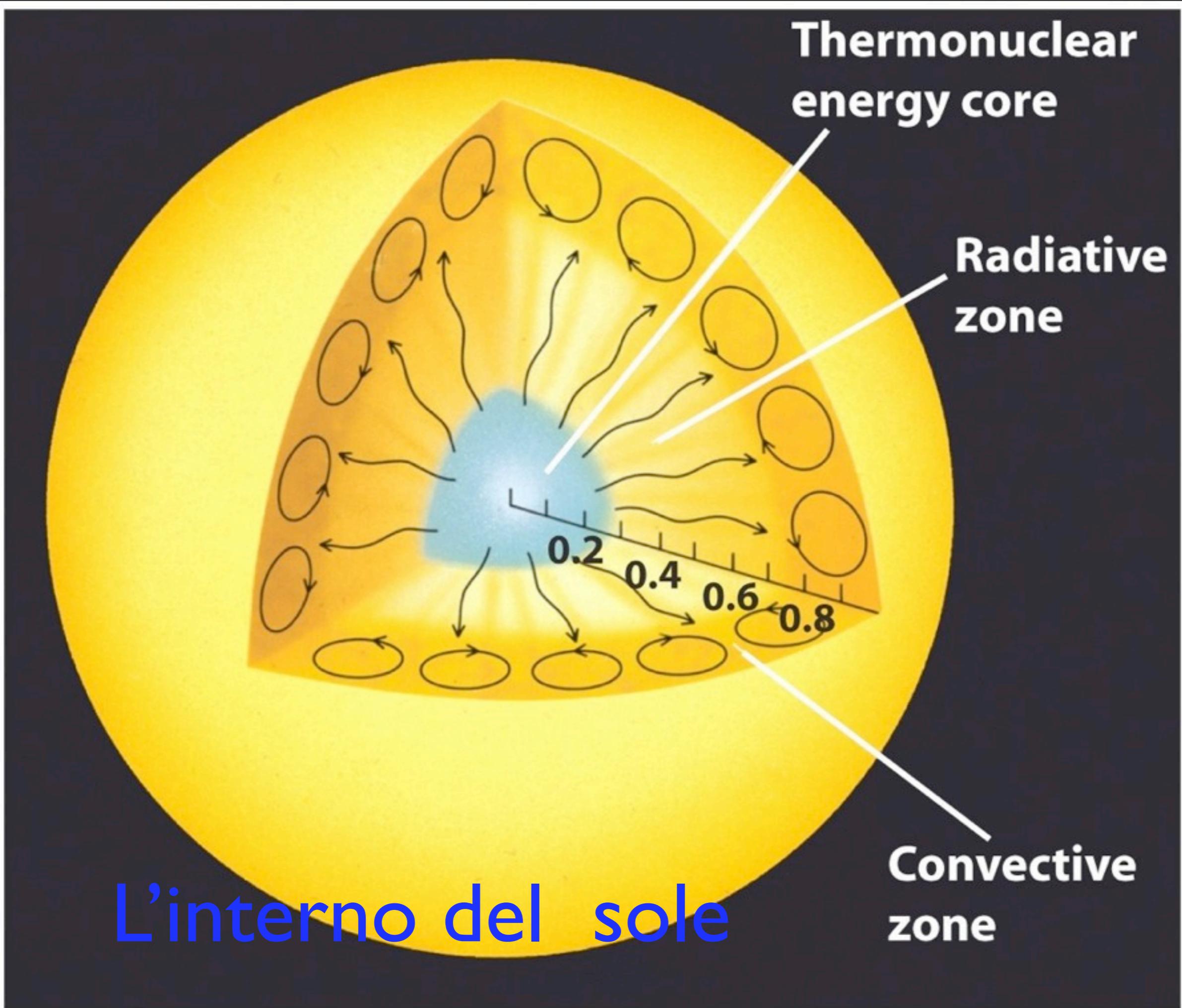
Interno del sole e l'eliosismologia



Interno del sole e l'eliosismologia



Lo studio delle oscillazioni solari permette
di studiare l'interno del Sole!
Profili di temperatura, densità e pressione



L'interno del sole

Energia dal Sole:
perchè il Sole brilla?

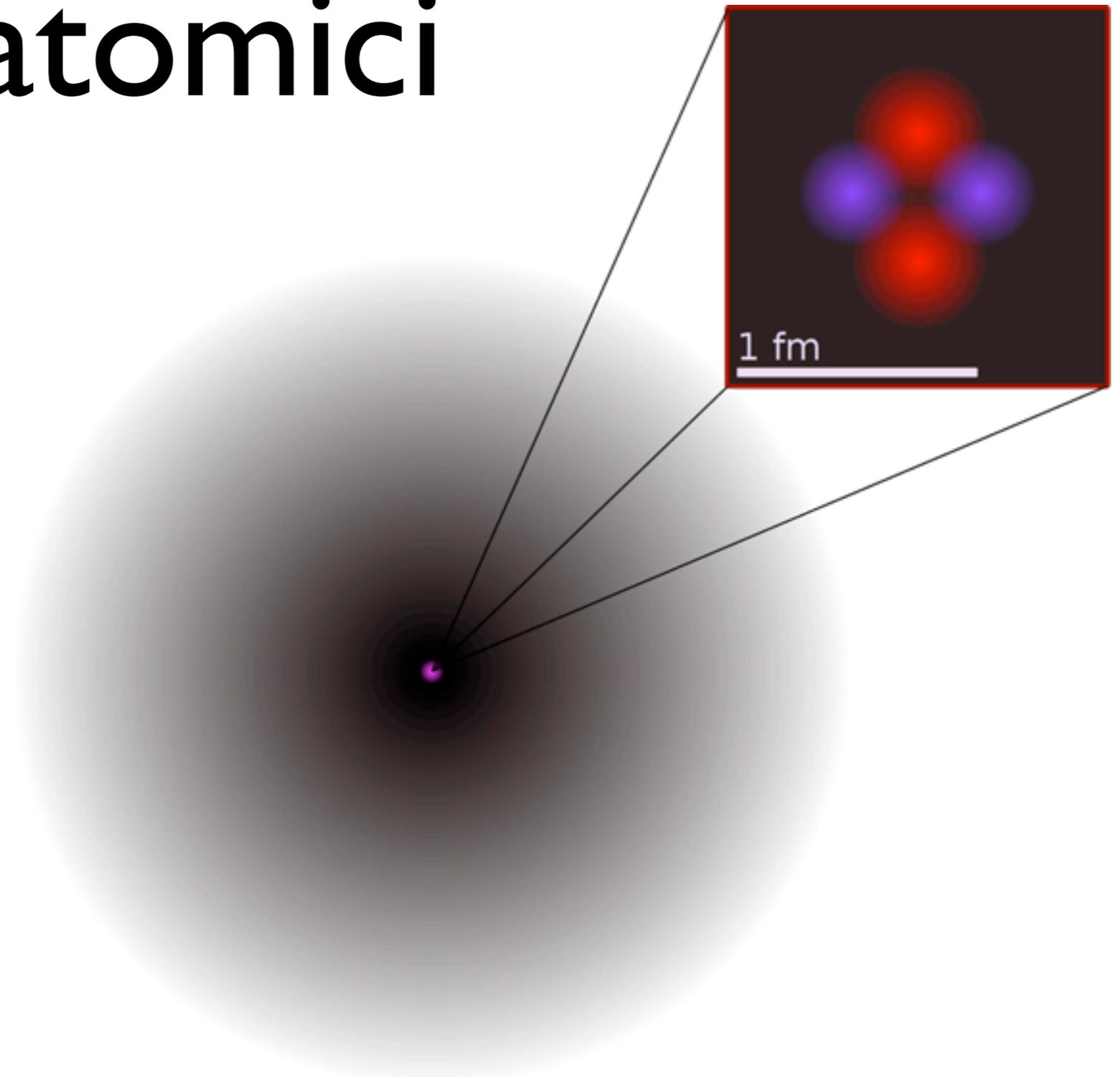
Energia dal Sole

- Il Sole ha una luminosità di $4 \times 10^{26} \text{ W}$
- Da evidenze geologiche sappiamo che la Terra ha un'età di almeno 4.5 miliardi di anni
- La luminosità del Sole non è variata di molto nel corso delle ere geologiche
- Il “motore” del Sole deve fornire la luminosità che osserviamo oggi per miliardi di anni!

Alcune (vecchie) idee

- Reazioni chimiche?
- Contrazione gravitazionale?
- ??? (fino al 1938, quando Hans Bethe suggerì l'esistenza delle “reazioni nucleari”)

I nuclei atomici



$$1 \text{ \AA} = 100,000 \text{ fm}$$



Cosa tiene insieme i nuclei?

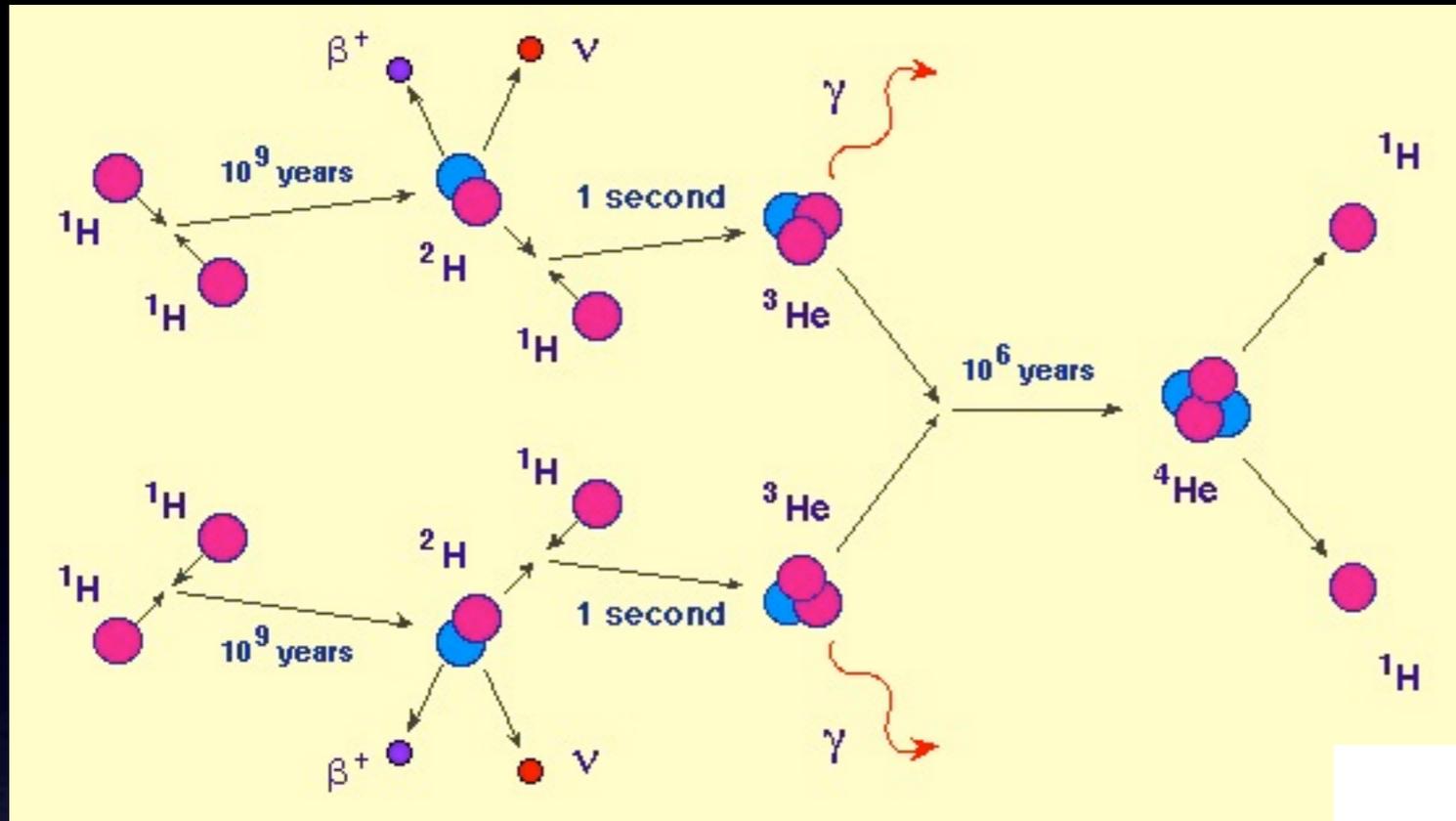
- Scala “atomica” (10^{-8} cm): interazione “elettromagnetica”, attrattiva fra particelle di carica opposta, tiene assieme gli atomi ma non può legare insieme i nuclei (i protoni hanno tutti la stessa carica elettrica!)
- Scala “nucleare” (10^{-13} cm): interazione “nucleare forte”: attrattiva, con una intensità che supera di ~100 volte la repulsione elettrica

Condizioni per la “fusione” nucleare

- Per legare (o “fondere”) due protoni dobbiamo prima avvicinarli a una distanza dove possano interagire con la forza forte
- Ad altissime temperature (15.6 milioni di gradi nel nucleo del Sole) le velocità dei protoni sono così alte che questi possono vincere la repulsione elettrostatica e “agganciarsi” tramite la loro interazione forte

Difetto di massa ed energia liberata

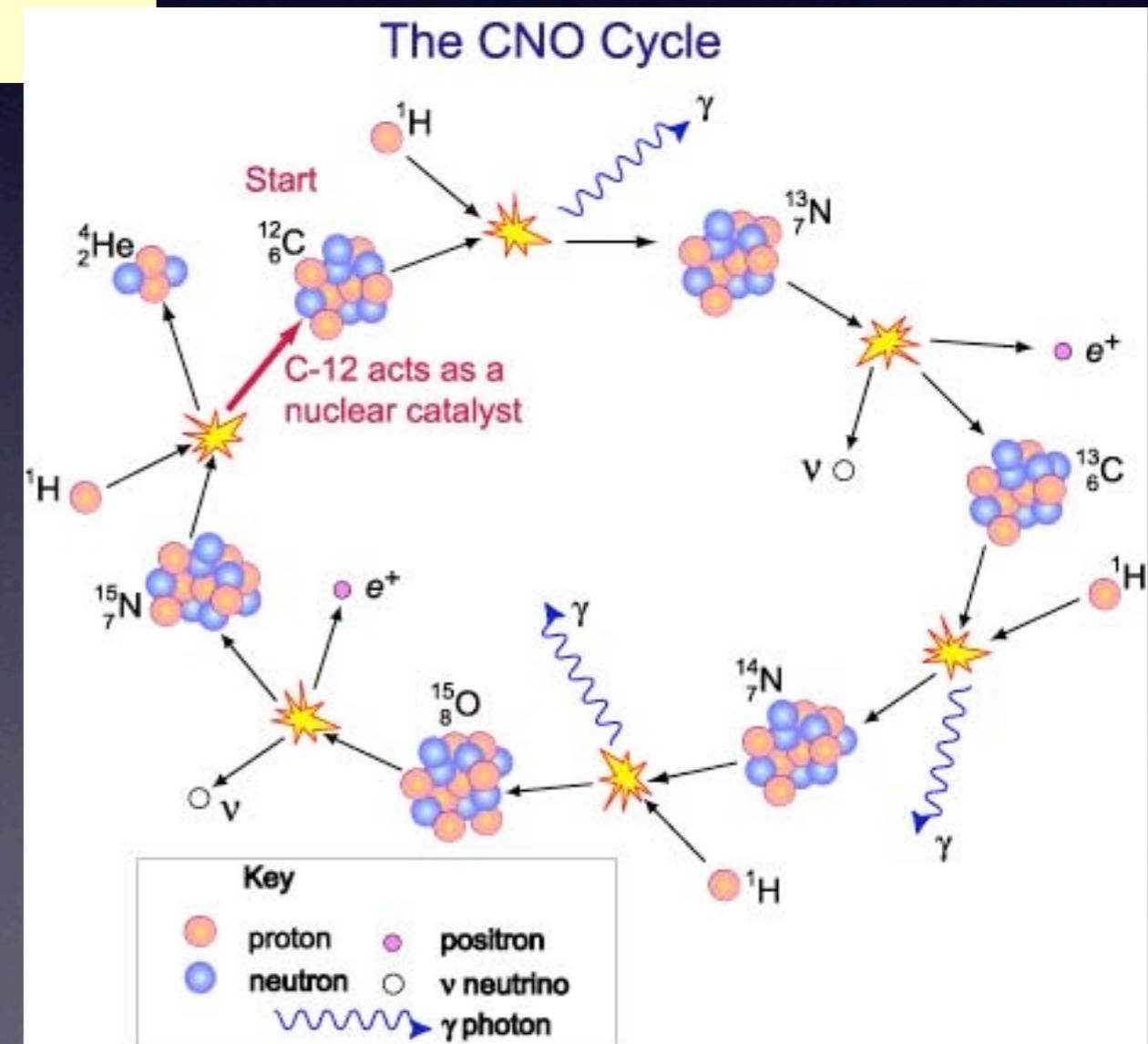
- Nella catena protone-protone, quattro protoni (nuclei di H) in vari passaggi danno vita a un nucleo di elio-4
- Il nucleo di elio è più leggero della massa dei 4 protoni di circa lo 0.8%
- Questo “difetto di massa” è trasformato in energia secondo la nota formula di Einstein $E = \Delta m * c^2$



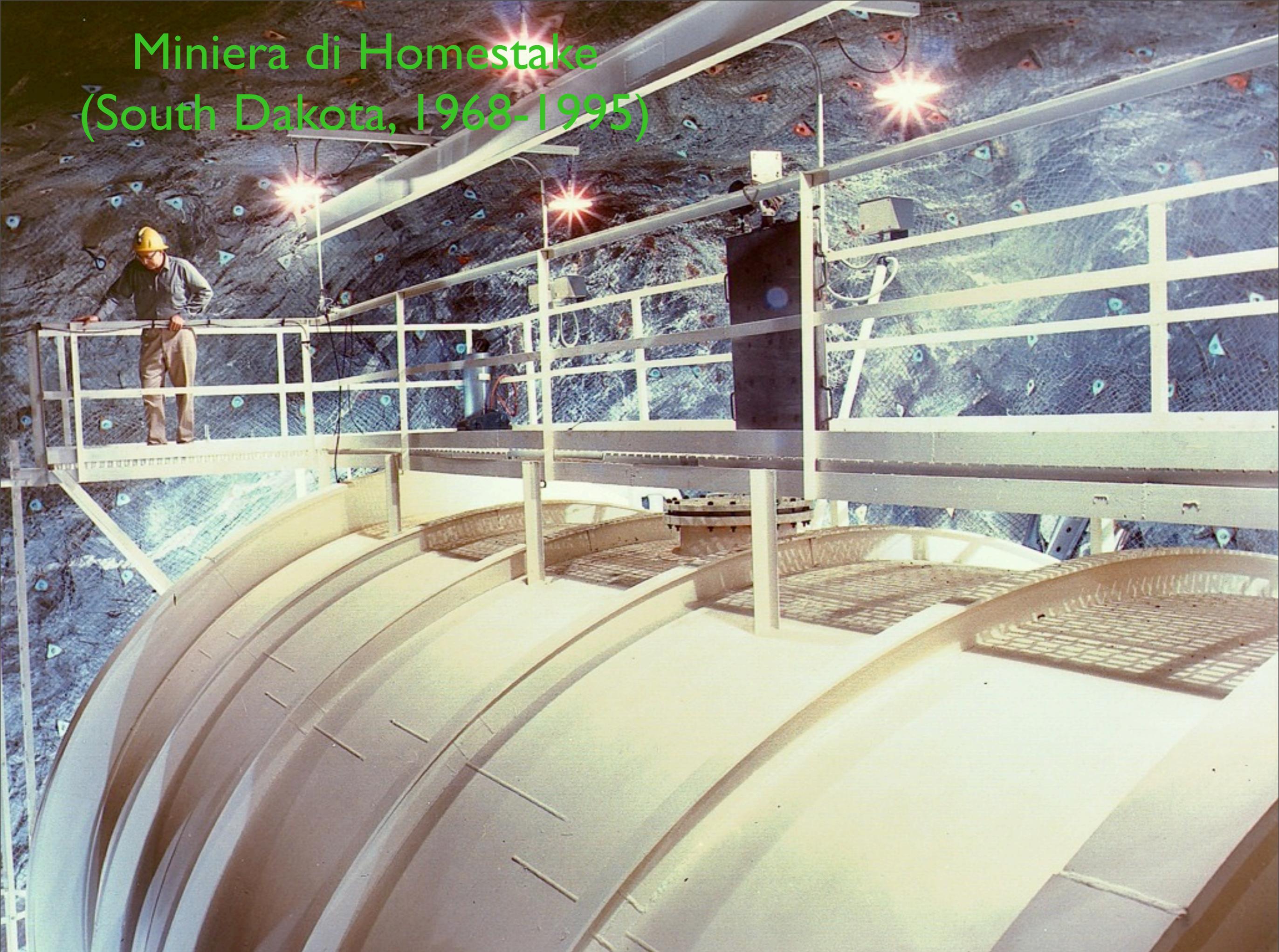
ciclo p-p

ciclo CNO

Energia dal Sole



Miniera di Homestake (South Dakota, 1968-1995)



Miniera di Homestake (South Dakota, 1968-1995)

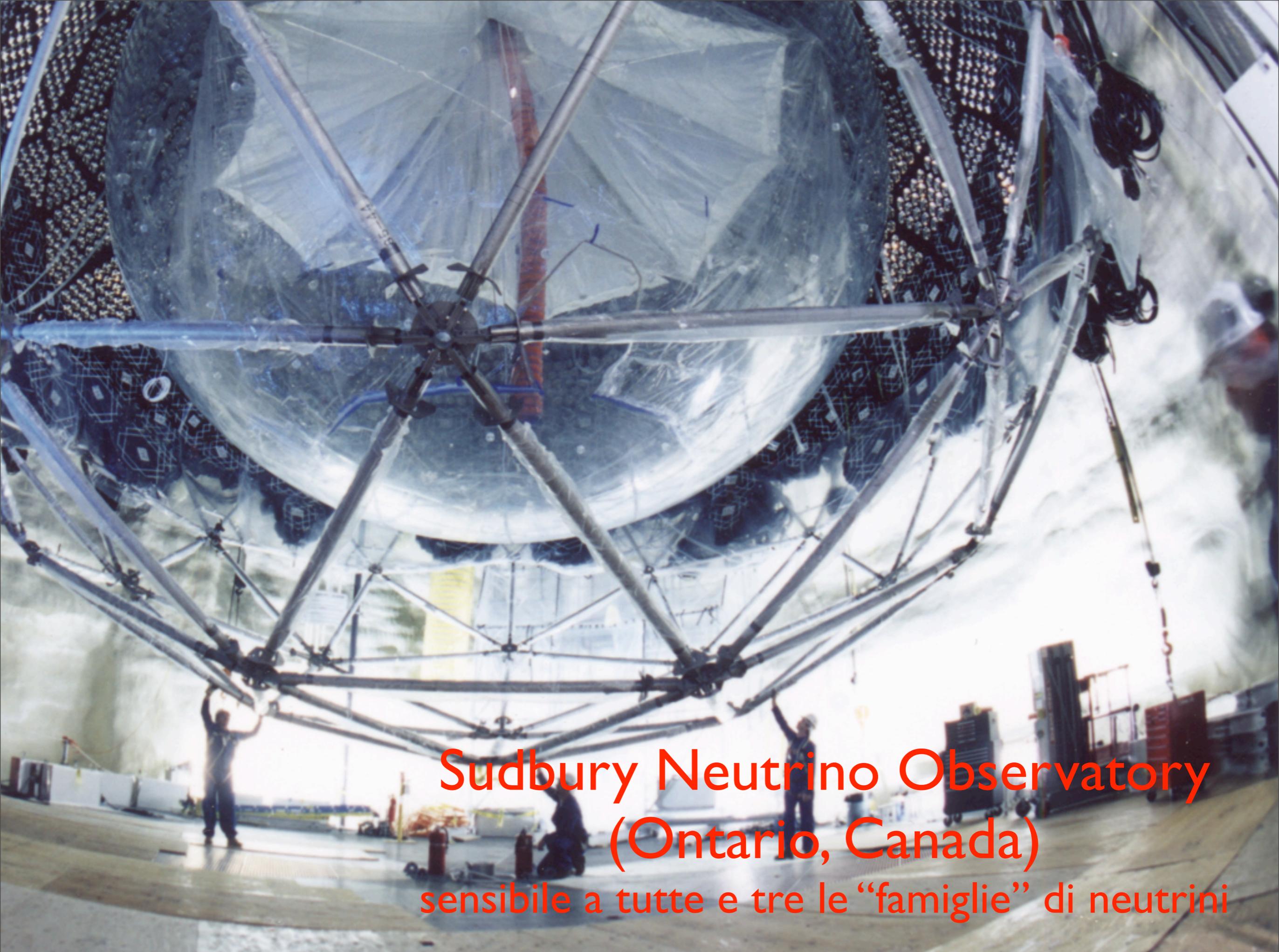


Si trovano solo $1/3$ dei neutrini aspettati:
dove sono gli altri?

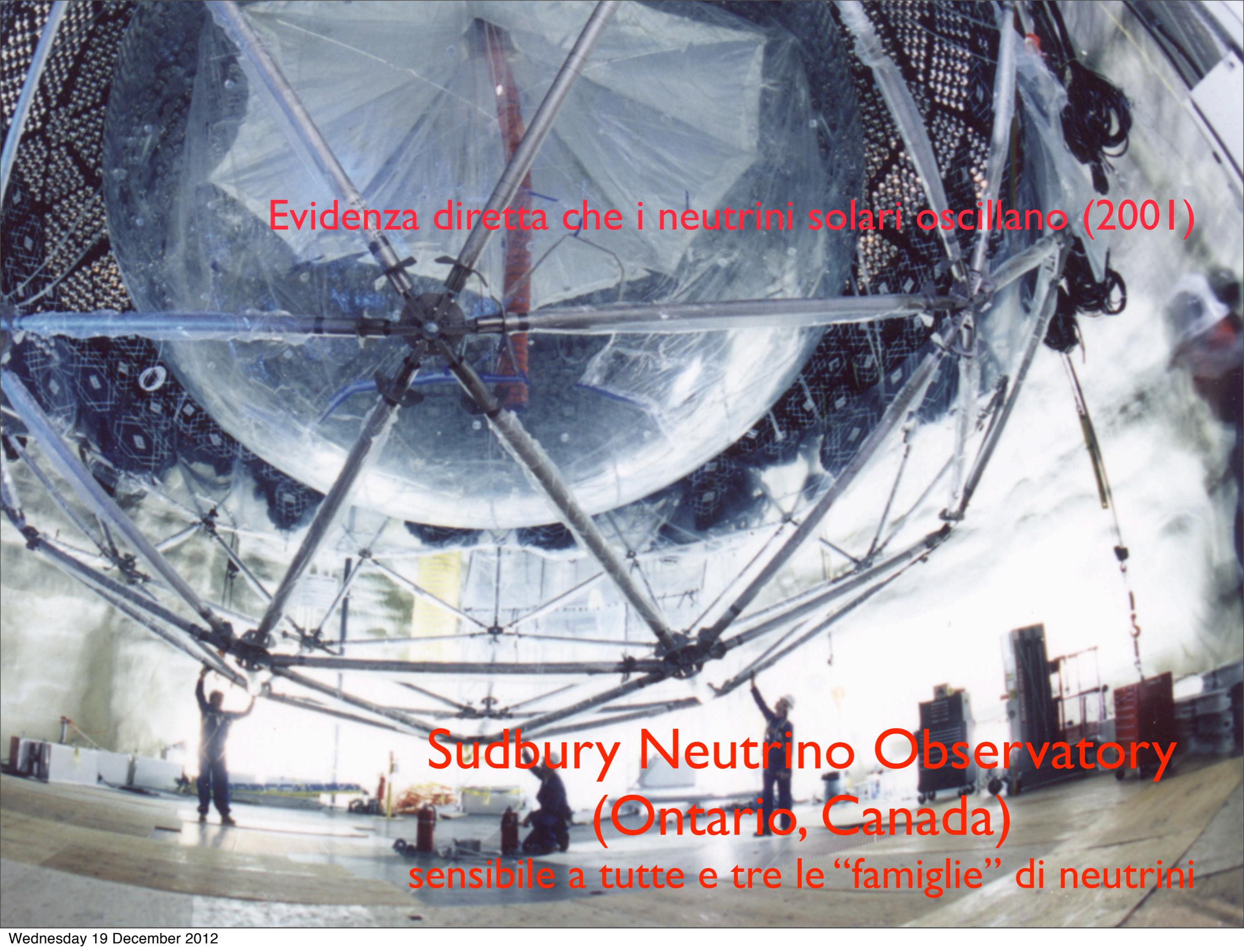
Oscillazioni del neutrino

(B. Pontecorvo 1957, 1967)

- Esistono in natura tre famiglie (o “sapori” di neutrini: elettronici, μ e τ)
- Se i neutrini hanno massa, un neutrino di un sapore può tramutarsi in un neutrino di un altro sapore
- I neutrini solari nascono come elettronici, ma durante il viaggio $1/3$ diventano μ , $1/3$ τ
- L'esperimento di R. Davis @ Homestake è sensibile solo ai neutrini elettronici, così ne mancano $2/3$ all'appello!



Sudbury Neutrino Observatory
(Ontario, Canada)
sensibile a tutte e tre le “famiglie” di neutrini



Evidenza diretta che i neutrini solari oscillano (2001)

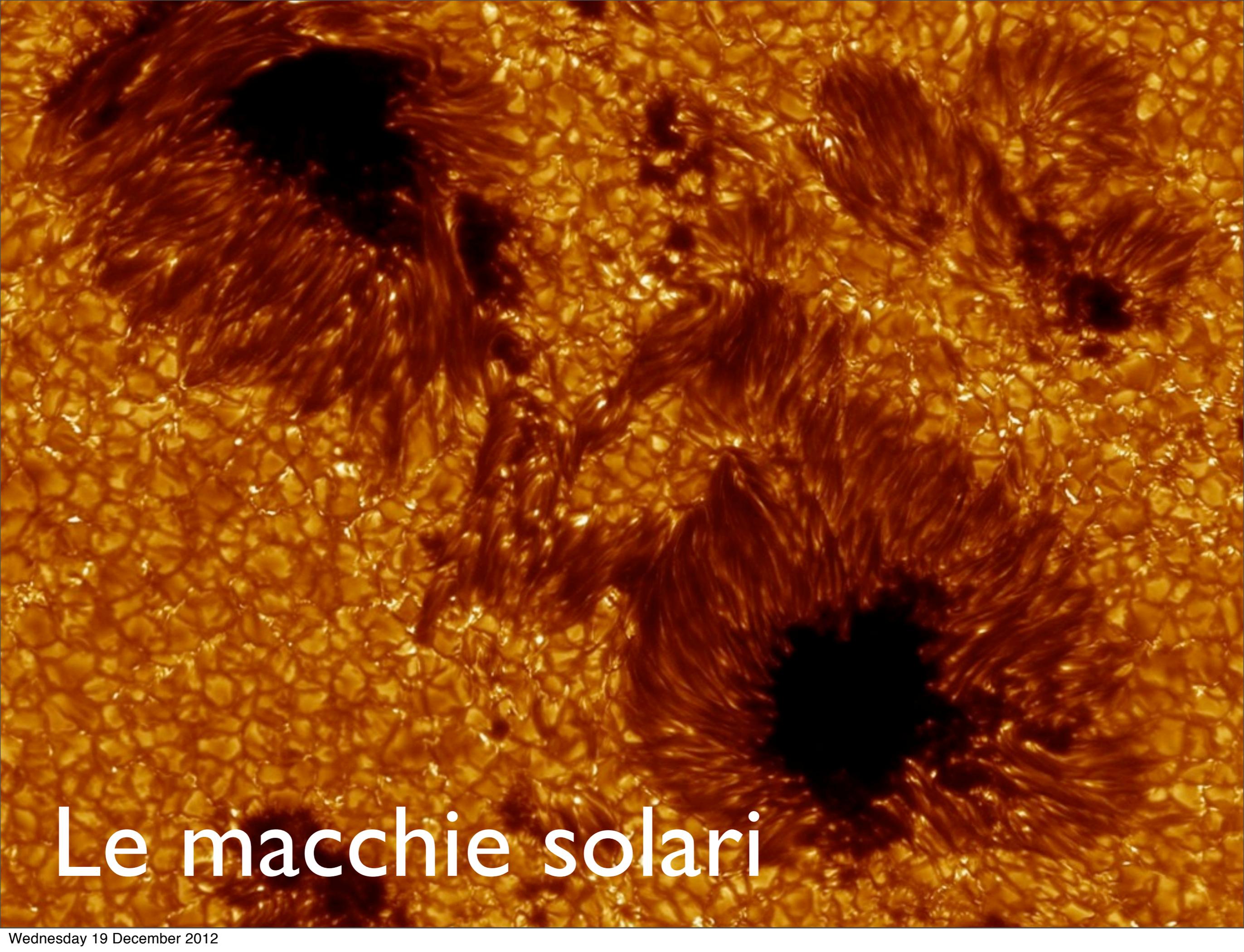
Sudbury Neutrino Observatory
(Ontario, Canada)
sensibile a tutte e tre le “famiglie” di neutrini

L'attività solare

La fotosfera: macchie e facole

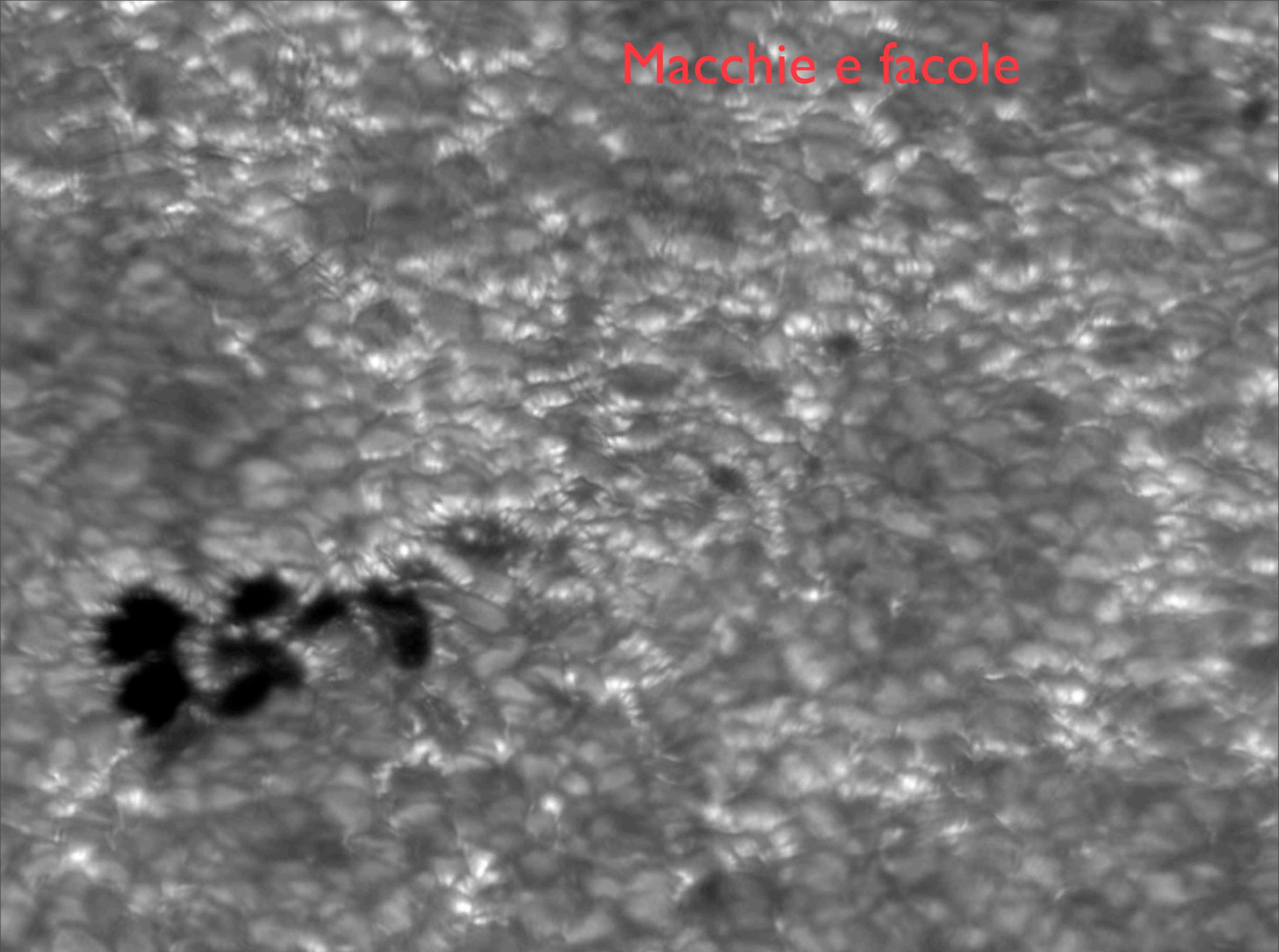


2001/03/27 12:48 UT



Le macchie solari

Macchie e facole



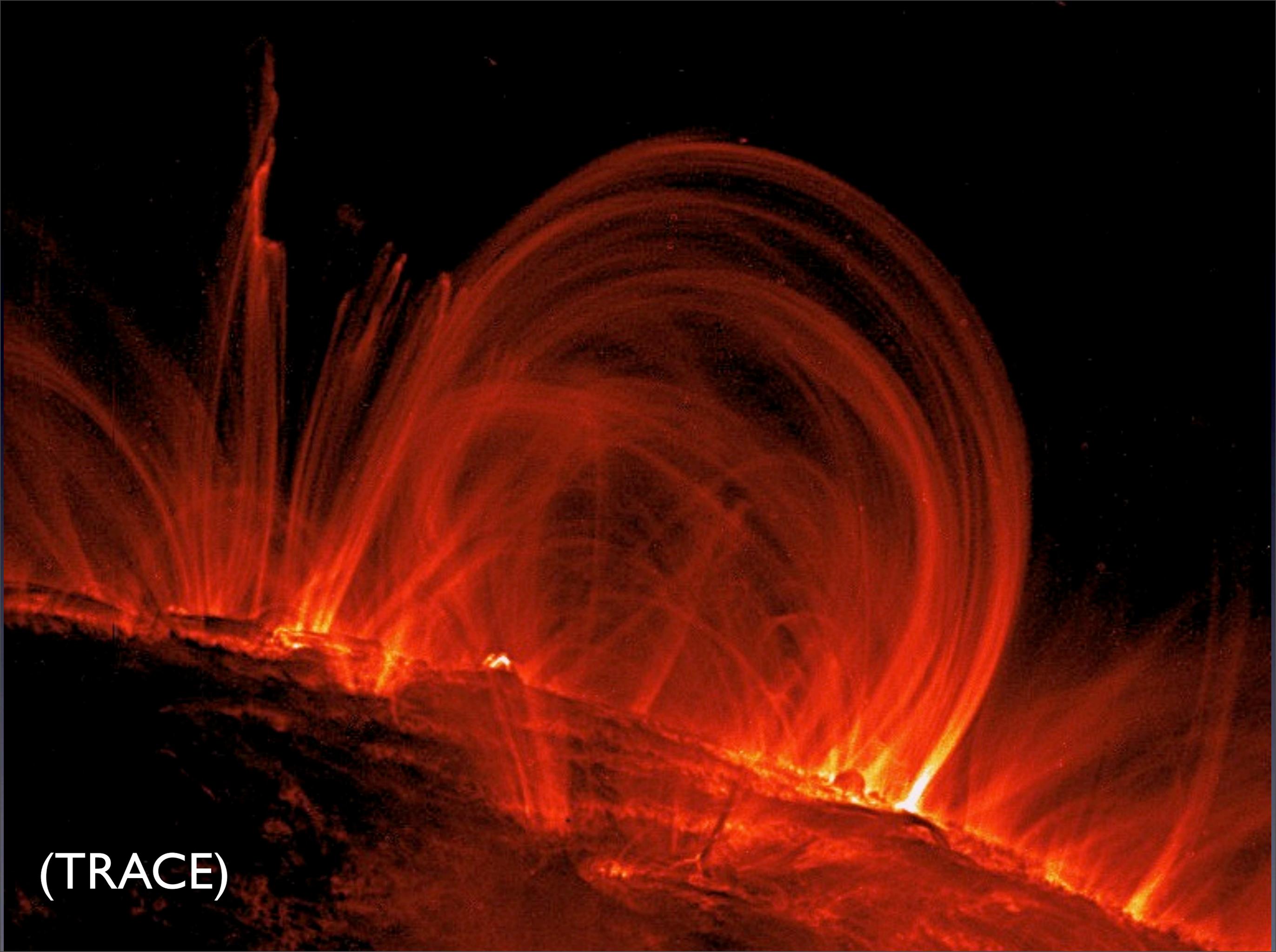
Perchè le macchie sono scure?

- Legge di corpo nero: la luminosità cresce con la temperatura
- Le macchie solari sono relativamente fredde: hanno temperature di circa 4000 K, ossia 2000 K in meno della fotosfera circostante.
- Appaiono quindi più scure per contrasto
- La domanda diventa: perchè le macchie sono fredde?
Il ruolo del campo magnetico locale

Come è fatta una macchia?

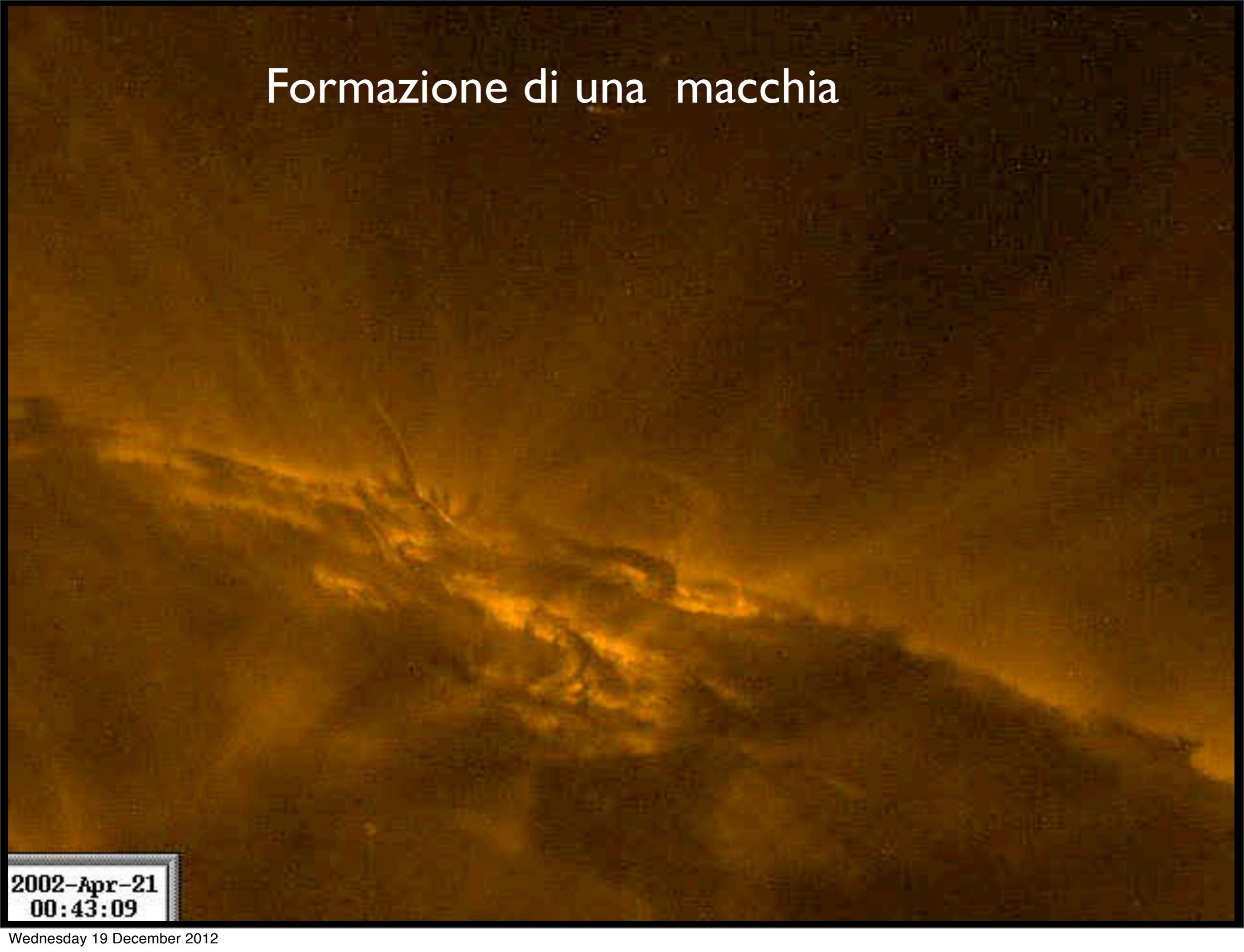


SOHO/MDI



(TRACE)

Formazione di una macchia



2002-Apr-21
00:43:09

Riconnessione magnetica





Solar Flare

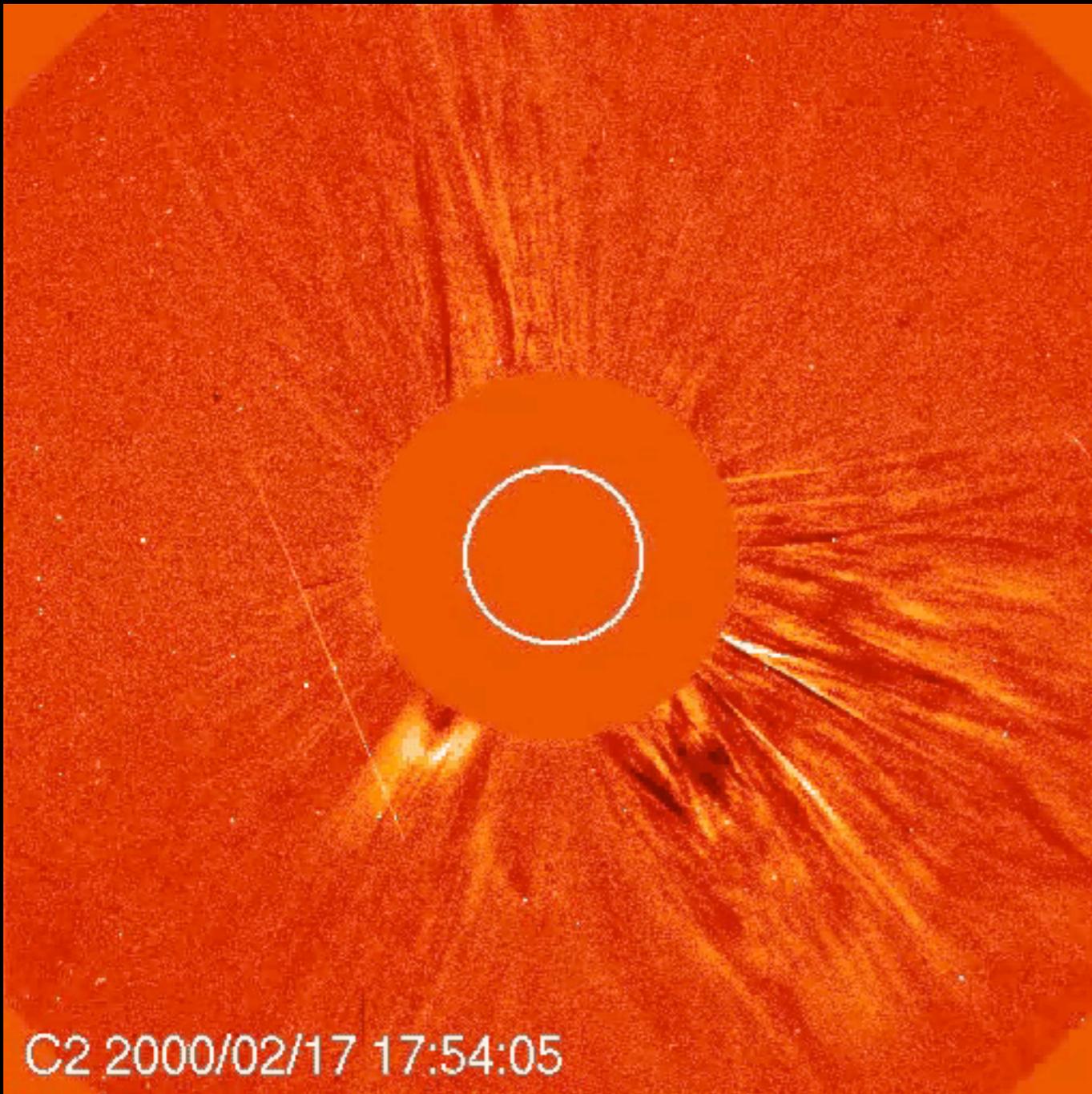
1971 October 10

Big Bear Solar Observatory



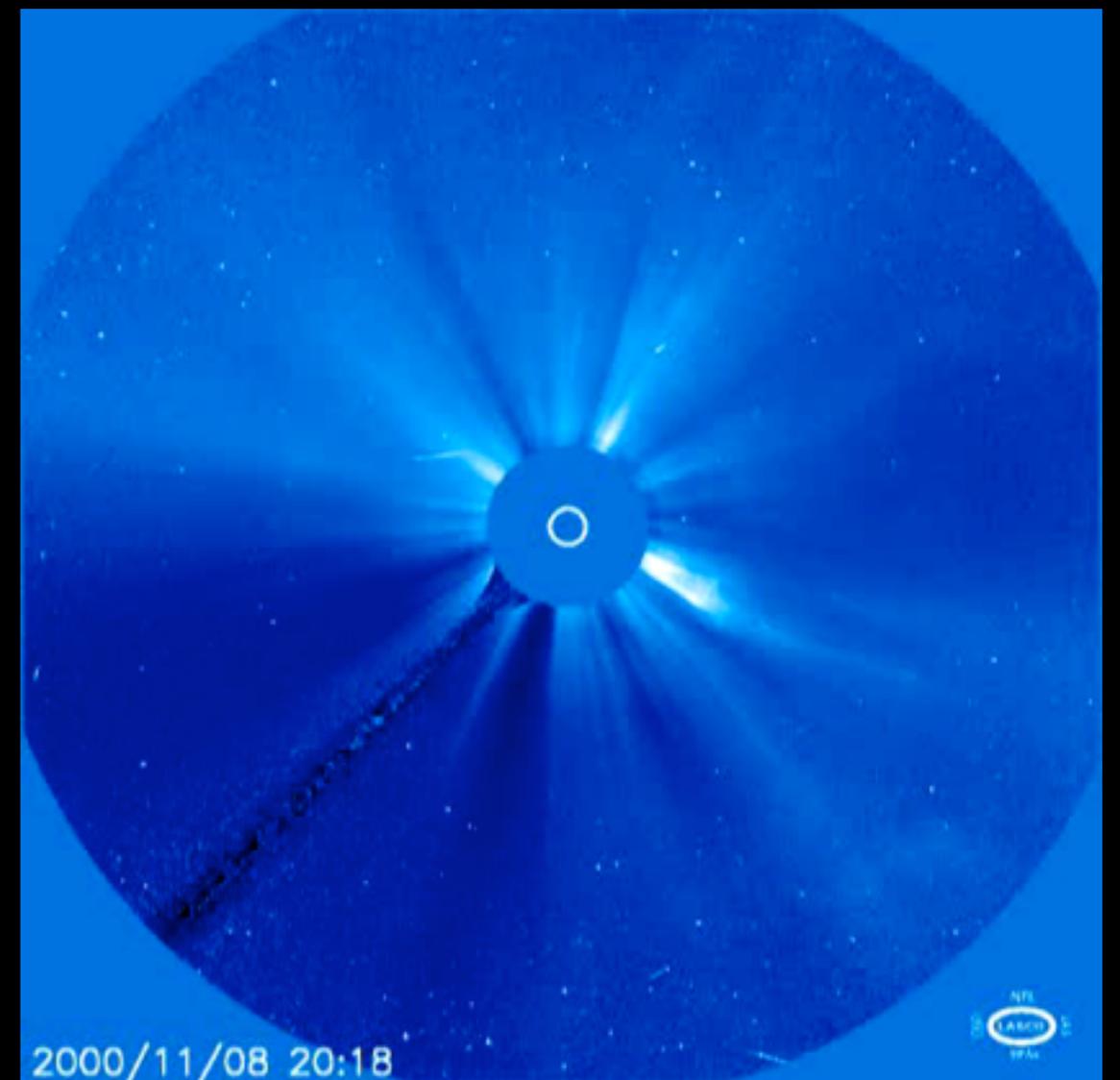
L'attività solare nella cromosfera e nella corona

L'attività solare nella cromosfera e nella corona

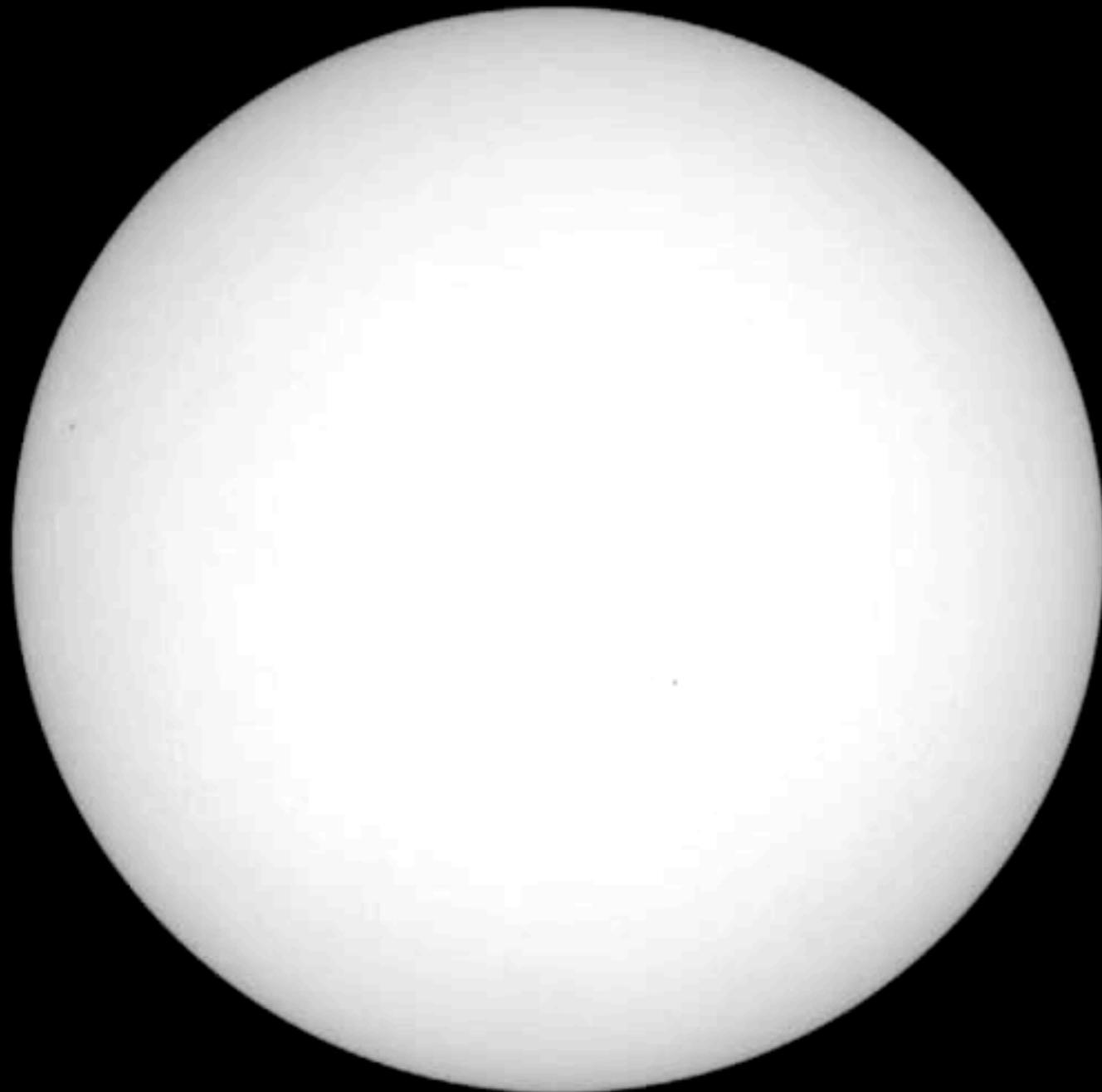


C2 2000/02/17 17:54:05

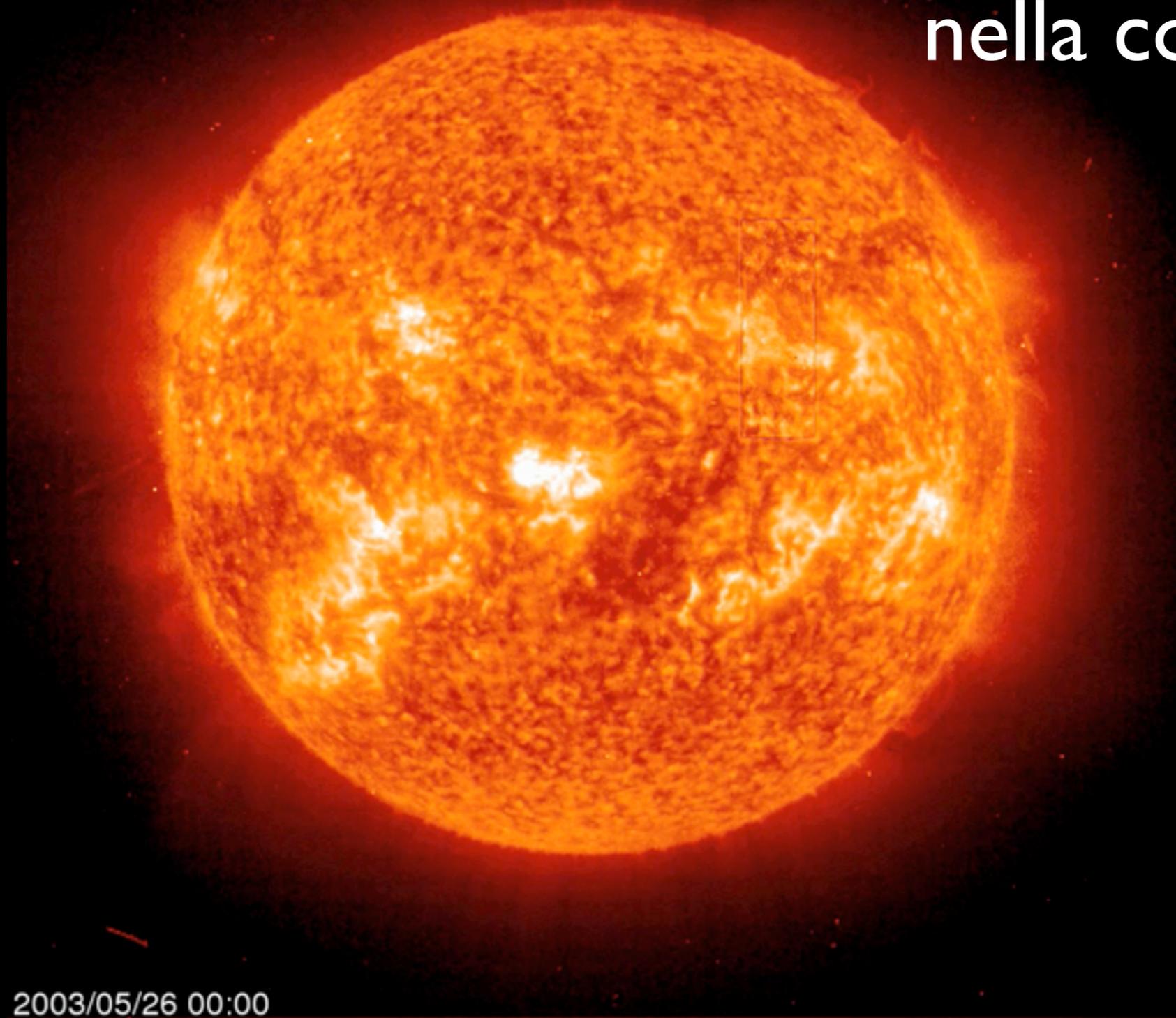
L'attività solare nella cromosfera e nella corona



L'attività solare nella cromosfera e nella corona



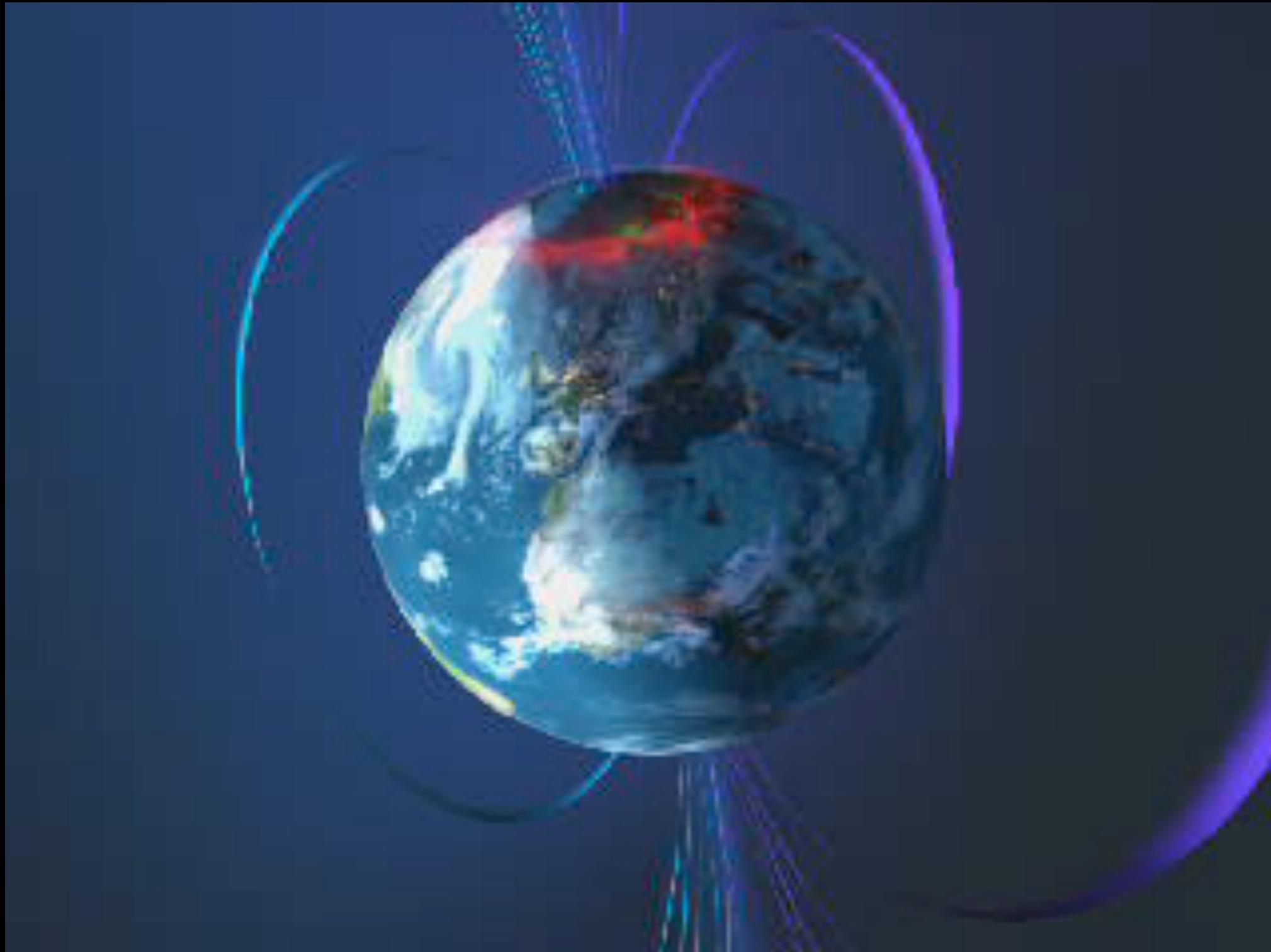
L'attività solare nella cromosfera e nella corona



2003/05/26 00:00

L'attività solare nella cromosfera e nella corona

Effetti sulla Terra?



Le aurore polari



Le aurore polari



Le aurore polari



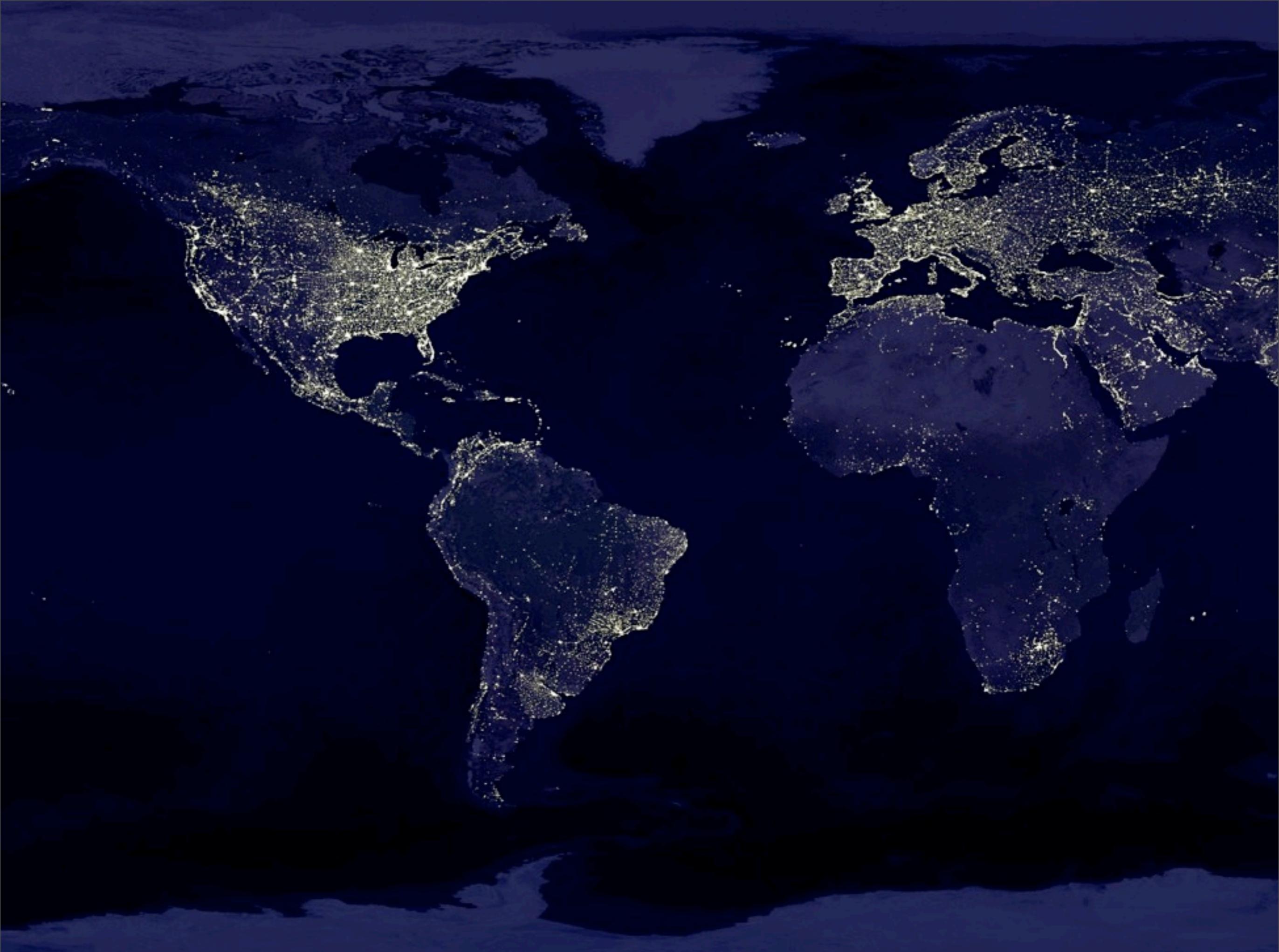
Le aurore polari



Le aurore polari



Le aurore polari



Wednesday 19 December 2012









Quebec, 13 marzo 1989

dal New York Times (13 Marzo 1989)

Large Solar Flares Erupt Anew

New York Times (1857-Current file); Mar 13, 1989; ProQuest Historical Newspapers The New York Times
pg. B5

Large Solar Flares Erupt Anew

HOLLOMAN AIR FORCE BASE, N.M., March 12 (AP) — A series of large solar flares, each with the potential to disrupt radio transmissions, have erupted in a wake of an unusually large blast, researchers at this base say.

A blast 36 times the size of Earth that occurred Thursday on the sun's northeast quarter was possibly the largest ever recorded, the researchers said.

Staff Sgt. Leroy Kirkegard said Saturday that the huge eruption of gas from the surface of the sun was followed by another large explosion Friday morning and three more on Saturday. The flares were all big enough to disrupt long-range communications on Earth, like shortwave transmissions and satellite links.

"That's uncommon — to have that many big flares in the same region in the same day," Sergeant Kirkegard said.

"It's a very disturbed area — prob-

ably two to three Earths in diameter," said Tom Folkers, a technical specialist and telescope operator at Kitt Peak National Observatory near Tucson, Ariz.

The solar flare on Thursday extended about 70,000 miles into space, said researchers at Sacramento Peak, just east of Holloman.

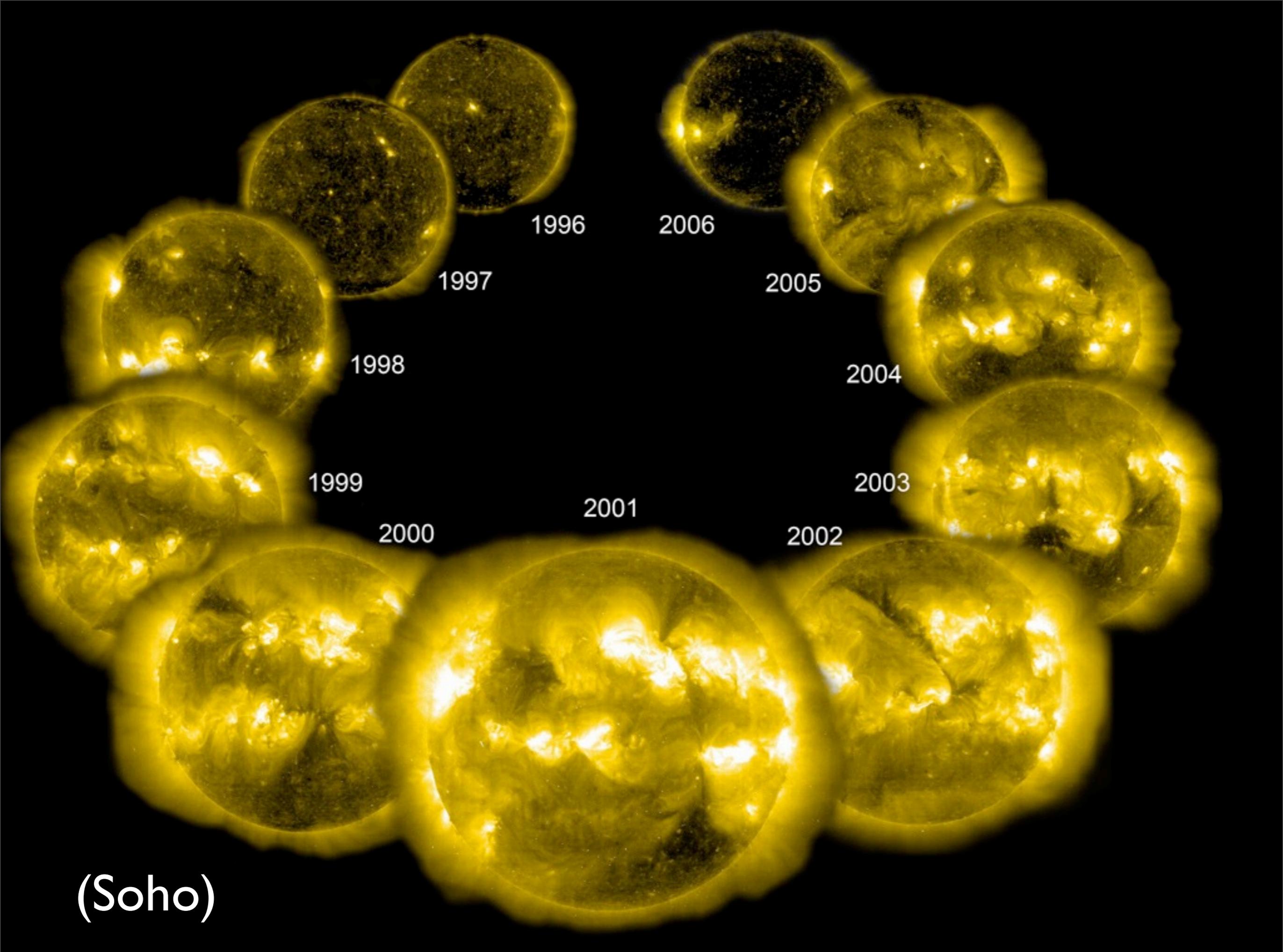
Tom Duvall, an astronomer at Kitt Peak, said researchers at Sacramento Peak told him that "it's the largest one they've seen — ever." He added, "This is pretty exciting for us up here."

Air Force Maj. James B. Near Jr., commander of Holloman's solar observatory in the Sacramento Mountains, said Friday that the flare was the size of 36 Earths.

Mr. Folkers said ultraviolet radiation and X-rays hit the Earth's upper atmosphere at noon Thursday, just eight minutes after the solar blast. Such radiation travels at the speed of light, he said.

Reproduced with permission of the copyright owner. Further reproduction prohibited without permission.

Il ciclo solare



1996

2006

1997

2005

1998

2004

1999

2003

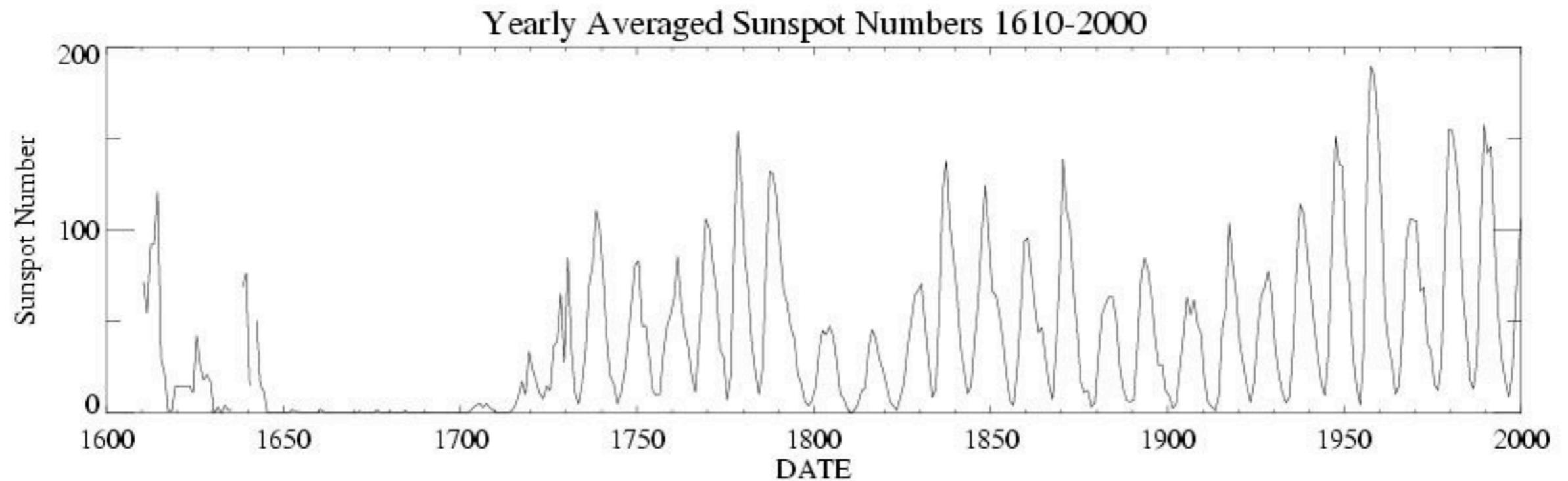
2000

2001

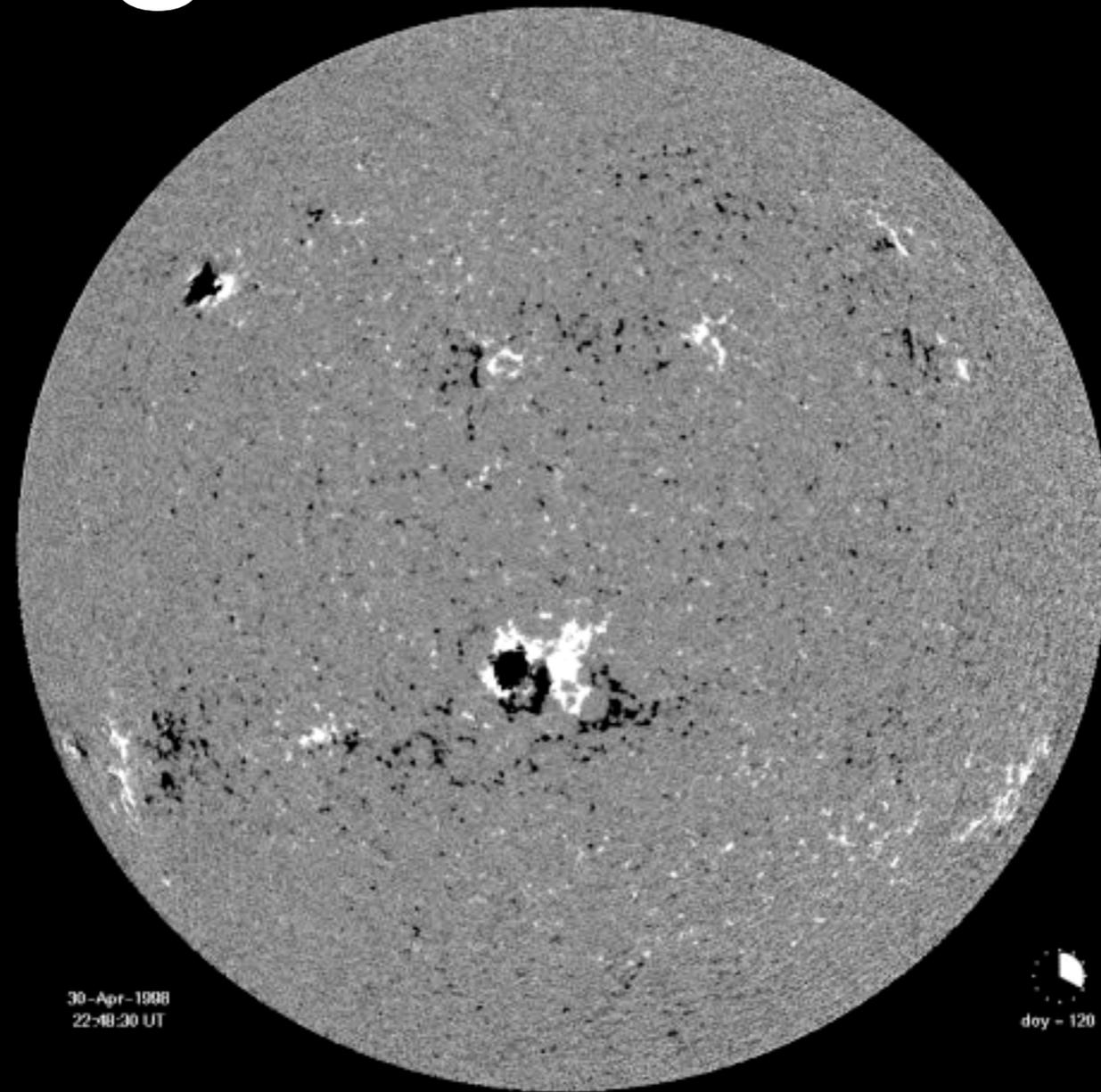
2002

(Soho)

Andamento ciclico delle macchie

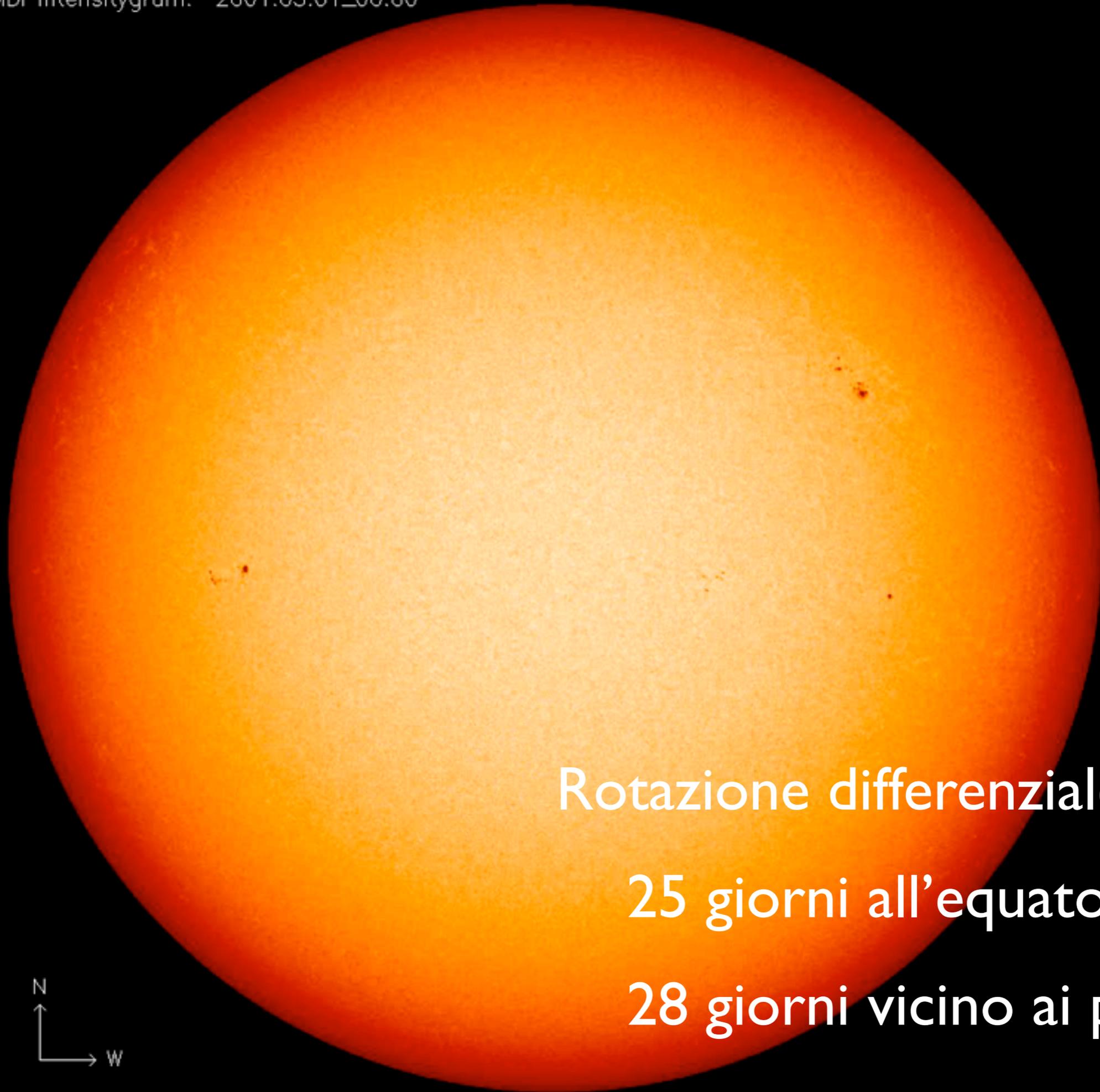


Il ruolo del campo magnetico solare



30-Apr-1988
22:48:30 UT

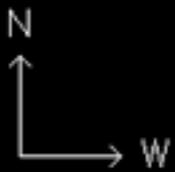
day - 120



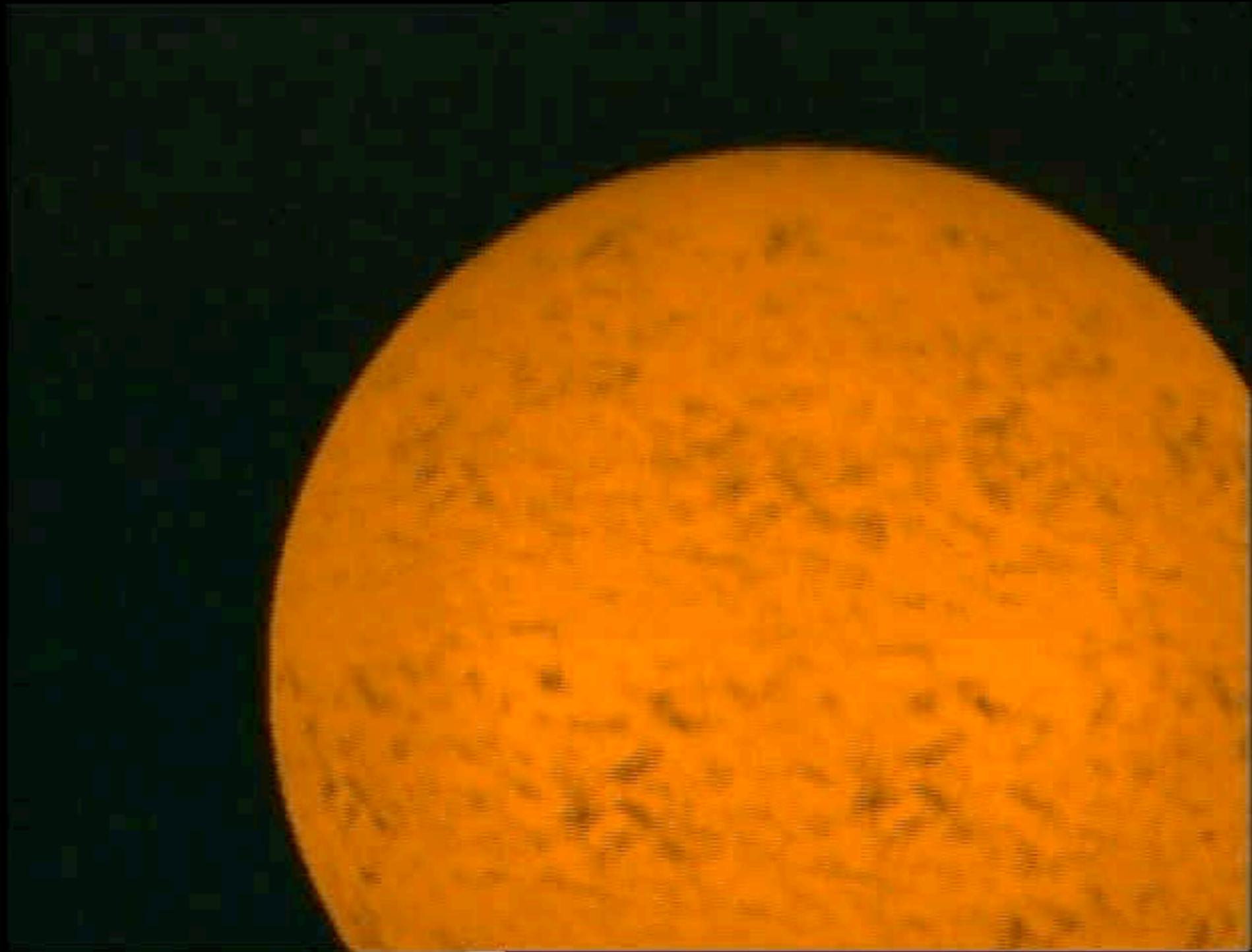
Rotazione differenziale del Sole

25 giorni all'equatore

28 giorni vicino ai poli



Il modello a dinamo

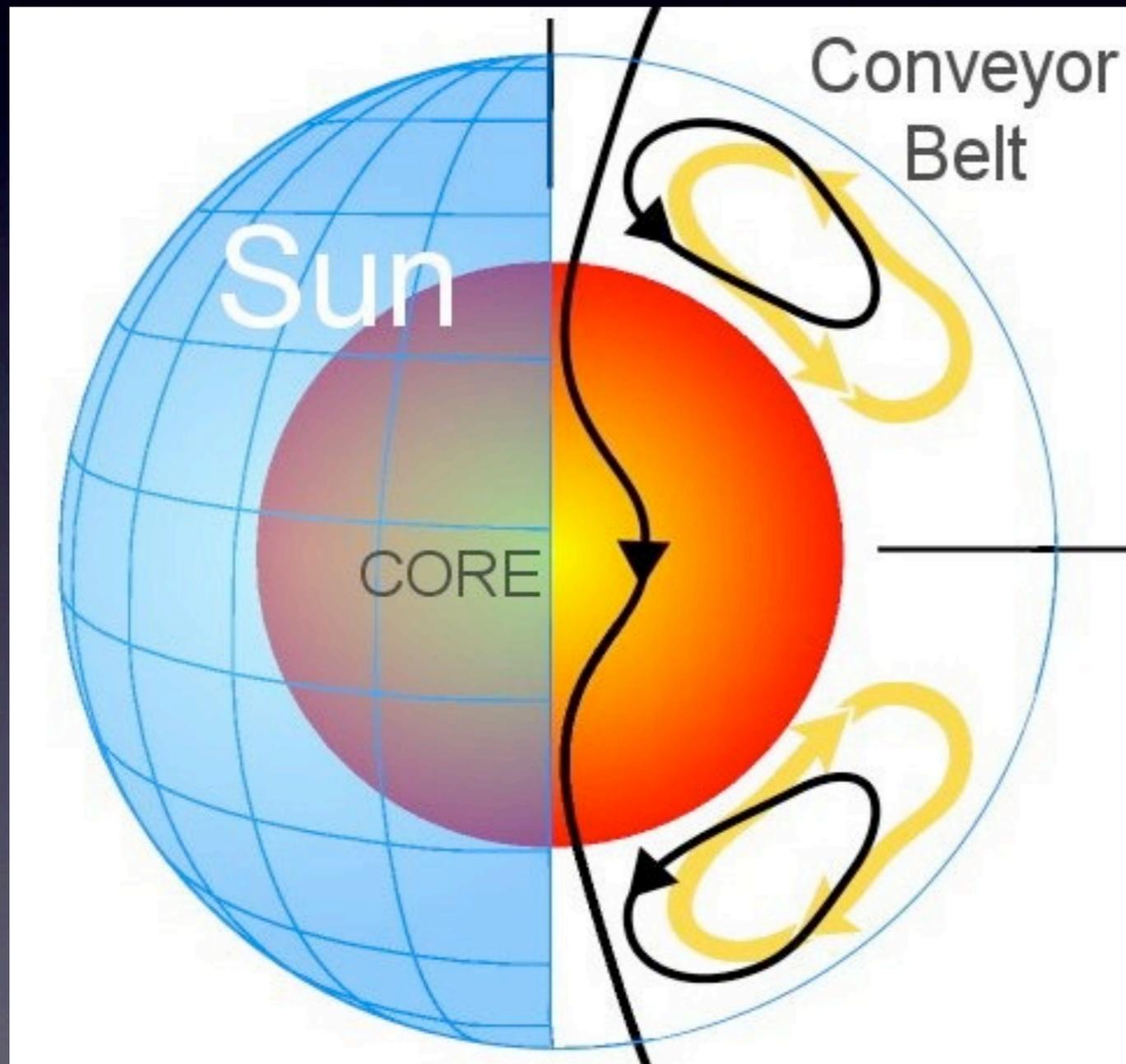


Il modello a dinamo

(Babcock, 1961)

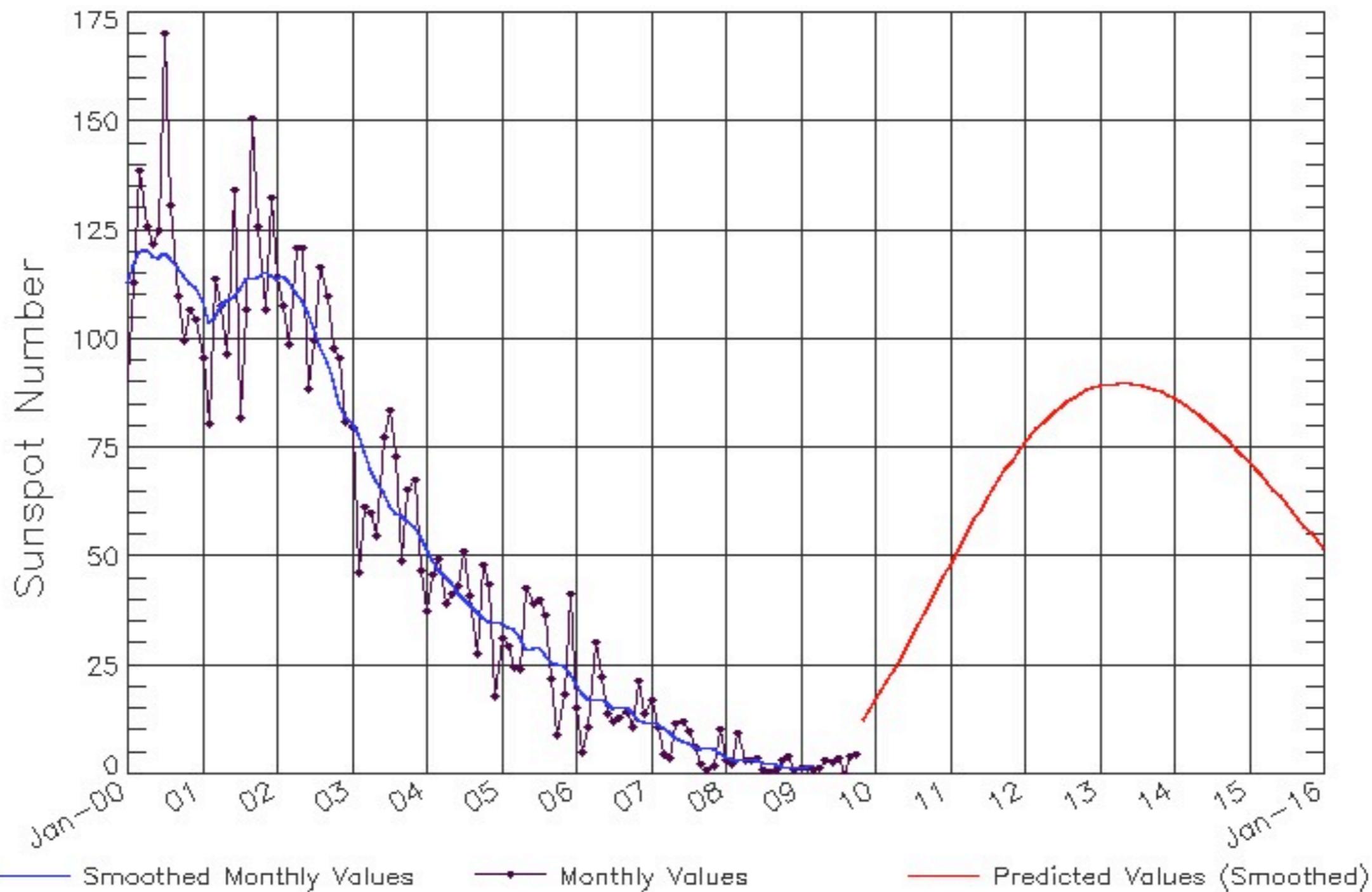
- Il ciclo solare è dovuto ai campi magnetici del Sole: nel corso degli anni si rinforzano alle medie latitudini, emergono (macchie solari) e infine si riconnettono
- Questo processo complicato porta alla inversione dei poli magnetici del sole ogni 11 anni circa
- (...non succede solo nel 2012...)

La “conveyor belt” e il prossimo ciclo solare



ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression

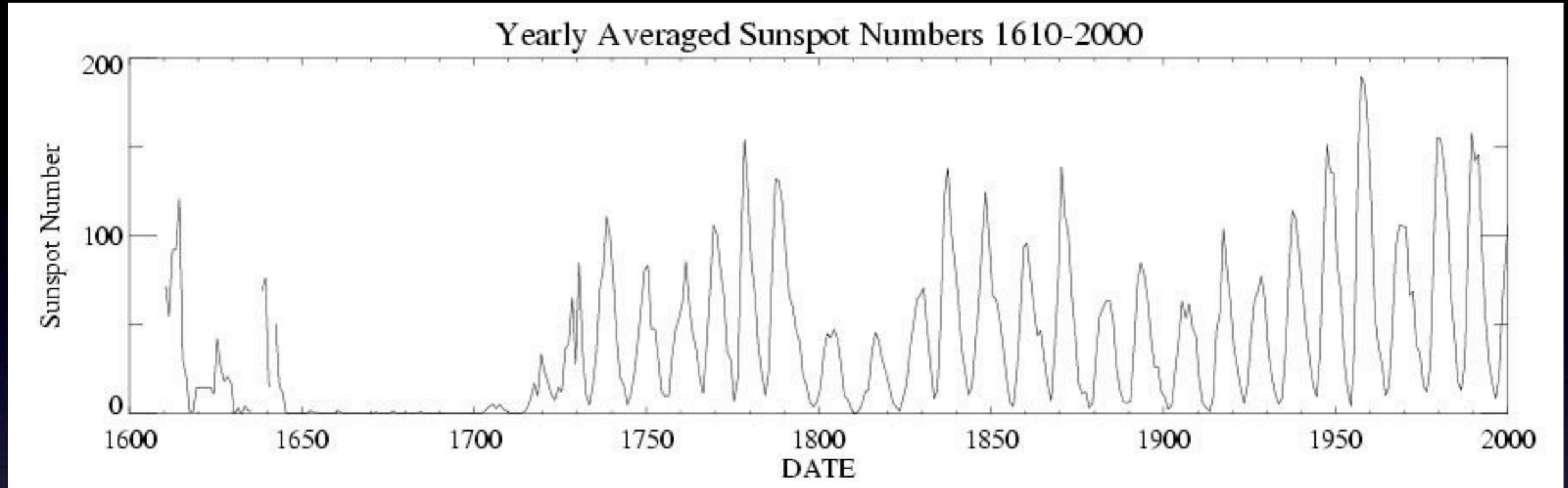
Data Through Oct 09



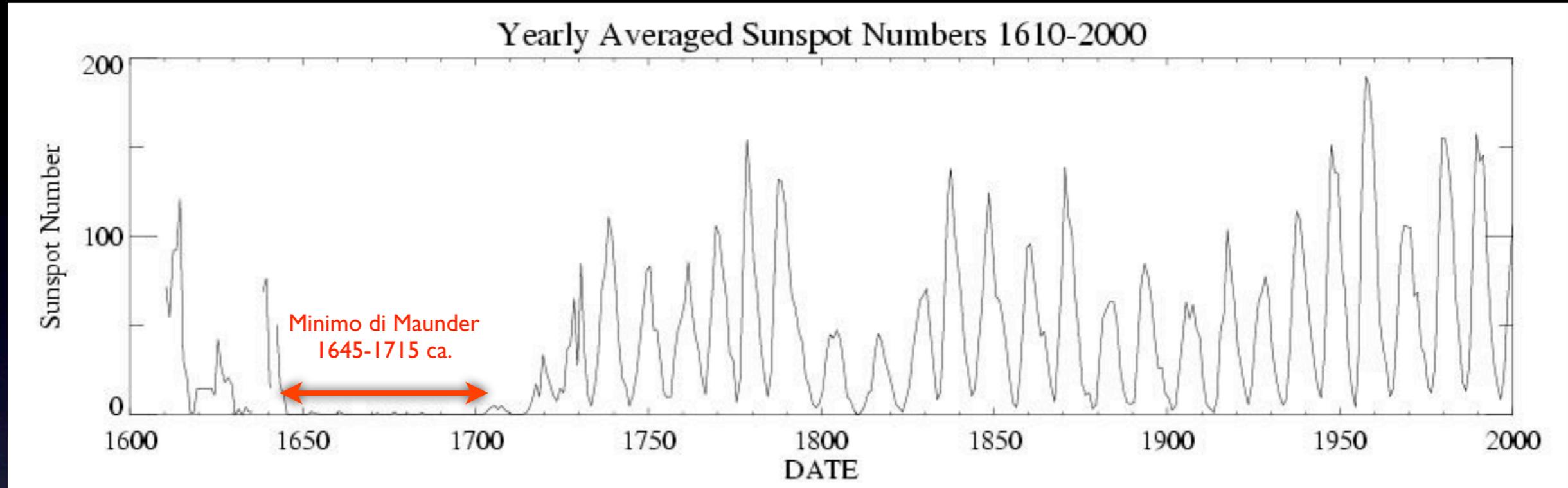
Updated 2009 Nov 2

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

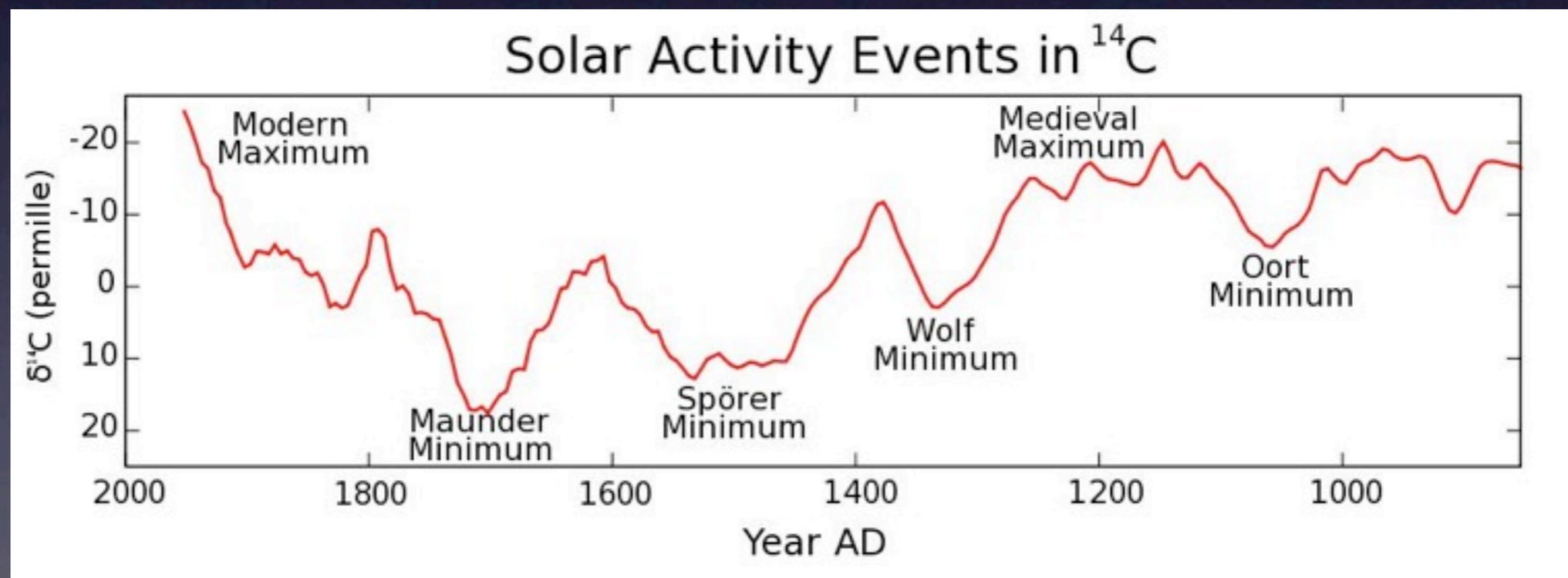
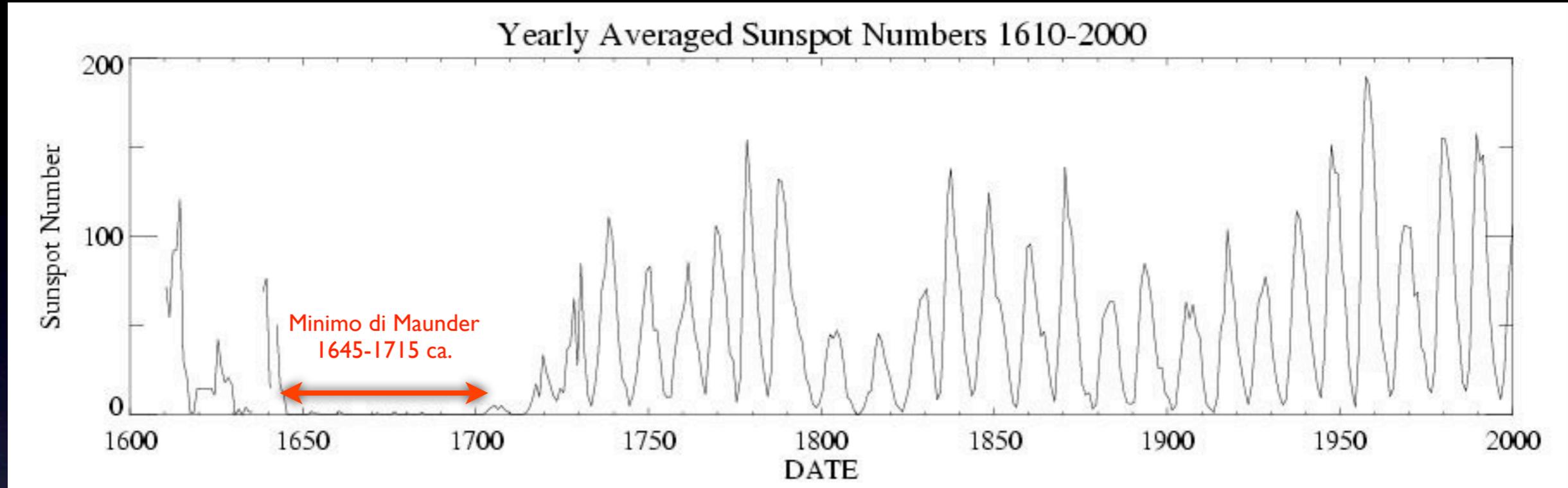
L'attività solare nel passato



L'attività solare nel passato



L'attività solare nel passato



H. Avercamp, 1608

La “Piccola Era Glaciale”



L'attività solare influenza il clima?

- Raccolta di dati climatici per secoli o millenni nel passato
- Ricostruzione dell'attività solare nello stesso periodo
- Possibili correlazioni (es. modulazioni di 11/22 anni dei dati climatici)
- Comprensione dei processi fisici in gioco

Possibili meccanismi

Causa	Effetto
Irraggiamento solare totale	Temperatura superficiale dei mari, ciclo idrologico
Irraggiamento UV	Riscaldamento dell'alta e media atmosfera
Particelle solari energetiche	Ionizzazione dell'alta atmosfera
Raggi cosmici	Ionizzazione della bassa atmosfera, nuclei di condensazione delle nubi

Cave canem...

- Le eventuali correlazioni sono difficili da indagare
- I meccanismi sono ancora poco capiti
- Ricerca non neutrale: gli interessi economici in gioco sono enormi!!
- Anche se il Sole ci sembra noto fino alla noia, in realtà ci riserva ancora molte, molte sorprese

Per saperne di più

- <http://www.nasa.gov/missions/current/index.html> : tutte le missioni spaziali attive, con descrizioni e links alle loro pagine web: per il Sole vedi Hinode, Rhesi, Soho, Stereo, Trace, SDO
- <http://spaceweather.com/> Informazioni in tempo reale sull'attività solare
- D. Whitehouse; Il Sole: una biografia; Mondadori (2007)
- U. Villante; Al di là delle nuvole, Bollati Boringhieri (2001)
- P. V. Foukal; Solar Astrophysics; Wiley (*)



Il Sole adesso

Distanza Sole-Terra

