

Il Sole

Silvia Perri

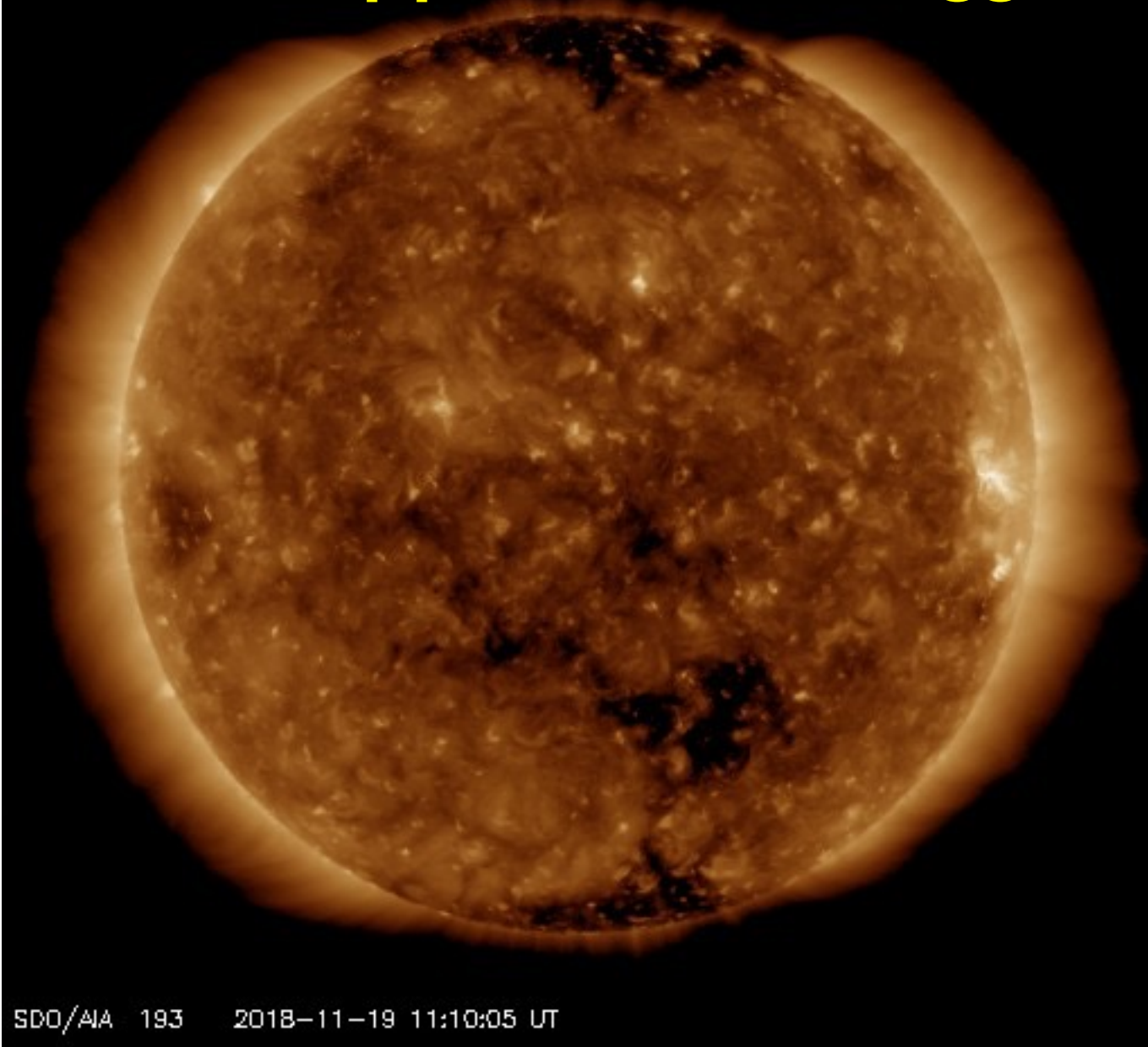
Dipartimento di Fisica, Università della Calabria

silvia.perri@fis.unical.it

Introduzione

- In Astrofisica il Sole rappresenta un vero e proprio laboratorio per l'indagine dei processi fisici nelle Stelle.
- Il Sole è una stella 'tipica' (si colloca nella Sequenza Principale del diagramma di Hertzsprung-Russel), pertanto la conoscenza dei processi fisici sul Sole è estendibile a tutte le altre stelle simili ad esso.
- Grazie alla sua vicinanza alla Terra è possibile stimare in modo accurato la sua massa, le sue dimensioni, la luminosità, etc...
- Il Sole è un corpo celeste altamente dinamico con una strutturazione molto complessa

Come appare il Sole oggi...



SDO/AIA 193 2018-11-19 11:10:05 UT

Proprietà fisiche

- Massa= 2×10^{30} Kg (99,9% della massa del sistema solare-circa 330000 volte la massa terrestre);
- Raggio= 696000 km (circa 109 volte il raggio terrestre);
- Densità media= 1.4×10^3 kg/m³ (circa ¼ della densità terrestre);
- Luminosità= 3.84×10^{26} J/s (l'energia irradiata dal Sole in 5 minuti è pari al consumo mondiale annuo di energia elettrica);
- Distanza dalla Terra= 150×10^6 km (**1 Unità Astronomica**);
- Temperatura superficiale= 5765 °K
- Temperatura al centro= 15000000 °K
- Composizione=74% H, 25% He, 1% elementi pesanti

Derivazione della massa solare

Considerando un corpo di massa m (la Terra) orbitante intorno al Sole si ha, dalla legge di Newton,

$$G \frac{mM_s}{r^2} = m\omega^2 r$$

Essendo $\omega = 2\pi/T$, dove T è il periodo di rivoluzione del corpo (ipotizzando un'orbita circolare) si ottiene

$$M_s = \frac{4\pi^2}{T^2} \frac{r^3}{G}$$

$$\rho_s = M_s/V = \frac{M_s}{\frac{4}{3}\pi R_s^3} = 1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

densità media del Sole, da confrontare con quella dell'acqua 10^3 kg/m^3 e quella della Terra che è $5.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

Il Sole non è molto denso, la materia che lo costituisce è gassosa. Date le elevate temperature gli atomi sono in buona parte ionizzati. La materia è allo stato di *plasma*

Stima della temperatura solare dal teorema del viriale

In un sistema di N particelle, l'energia cinetica totale media è data da

$$\langle E_K \rangle = -\frac{1}{2} \left\langle \sum_{i=1}^N \vec{F}_i \cdot \vec{r}_i \right\rangle = \frac{1}{2} \left\langle \sum_{i=1}^N \frac{\partial U}{\partial \vec{r}_i} \cdot \vec{r}_i \right\rangle$$

$$\vec{F}_i = -\nabla_i U = -\frac{\partial U}{\partial \vec{r}_i} \quad \text{Forza agente sulla } i\text{-esima particella}$$

$$M_s = N\mu m_p$$

$$T = \frac{1}{3K_B} \frac{GM_s \mu m_p}{R_s}$$

$$M_s \approx 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$G \approx 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg s}^2)$$

$$K_B \approx 1.4 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$$

$$\mu \approx 1$$

$$m_p \approx 1.6 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$R_s \approx 7 \times 10^8 \text{ m}$$



$$T \approx 7 \times 10^6 {}^\circ\text{K}$$

$$\langle E_K \rangle = -\frac{1}{2} \langle U \rangle \approx \frac{1}{2} \frac{GM_s^2}{R_s}$$

$$N \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle \approx \frac{1}{2} \frac{GM_s^2}{R_s}$$

$$\langle E_K \rangle = \frac{3}{2} K_B T = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$$

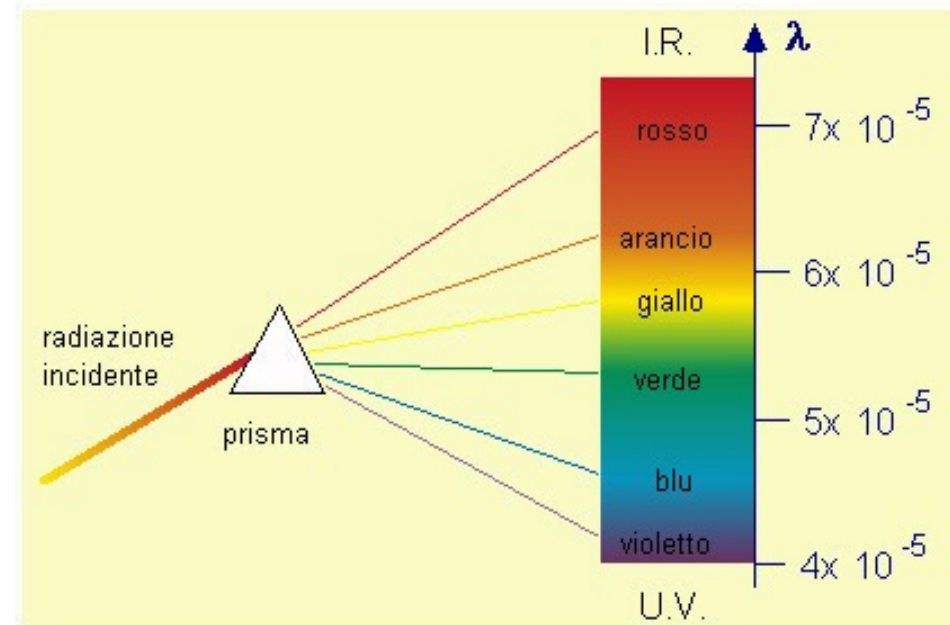
$$3NK_B T = G \frac{M_s^2}{R_s}$$

Ipotizzando una temperatura uniforme sul Sole

Sorgenti di luce e spettri continui

Molte sorgenti di luce emettono in un certo intervallo di lunghezze d'onda (ad eccezione dei laser) che viene definito ***spettro***.

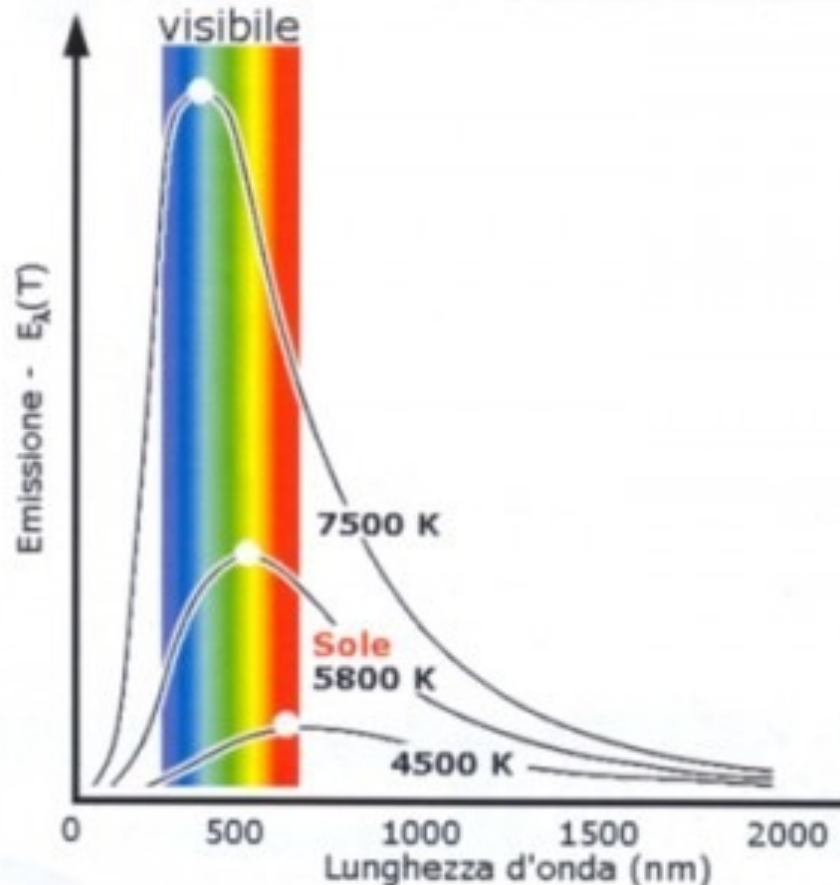
Se la sorgente di luce produce uno spettro continuo sarà possibile osservare tutte le lunghezze d'onda del visibile. Il risultato è simile all'arcobaleno!



Un ulteriore esempio di spettro continuo è quello prodotto dalla radiazione di ***corpo nero***

Radiazione di corpo nero

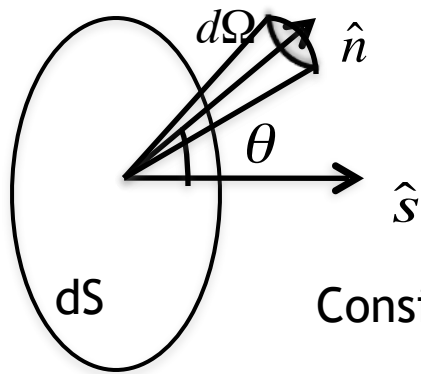
Il corpo nero è un oggetto (ideale) all'equilibrio termico in cui tutta la radiazione assorbita viene re-irradiata (perfetta assenza di riflessione della radiazione). Lo spettro della radiazione emessa (densità di energia irradiata) è “tipico” e dipende unicamente dalla temperatura del corpo.



Legge della radiazione di Planck

$$E(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{K_B T}\right) - 1}$$

$E(\nu)$ quantità di energia emessa per unità di tempo, per unità di superficie, per unità di angolo solido



Consideriamo un fascio luminoso che si propaga nella direzione \hat{n}

$$dE = I_\nu(\hat{n}, t) \cos \theta dS d\nu d\Omega dt$$

Considerando l'energia che attraversa tutta la superficie abbiamo

$$dE = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_\nu(\hat{n}, t) \cos \theta \sin \theta d\varphi d\theta d\nu dS dt$$

$$dE = I_\nu 2\pi \left[\frac{\sin^2 \theta}{2} \right]_0^{\pi/2} d\nu dS dt = \pi I_\nu d\nu dS dt$$

definendo

$F_\nu = \pi I_\nu$ → Flusso d'energia in tutte le direzioni ad una data frequenza

$$dE = \int_0^\infty F_\nu d\nu dS dt = F dS dt$$

$$F = \int_0^\infty F_\nu d\nu = \int_0^\infty \pi I_\nu d\nu = \int_0^\infty \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{K_B T}\right) - 1} d\nu$$
 → Flusso d'energia

definendo

$$x = \frac{h\nu}{K_B T}$$

otteniamo

$$F = \frac{2\pi (K_B T)^4}{h^3 c^2} \int_0^\infty \frac{x}{\exp(x) - 1} dx = \sigma T^4$$

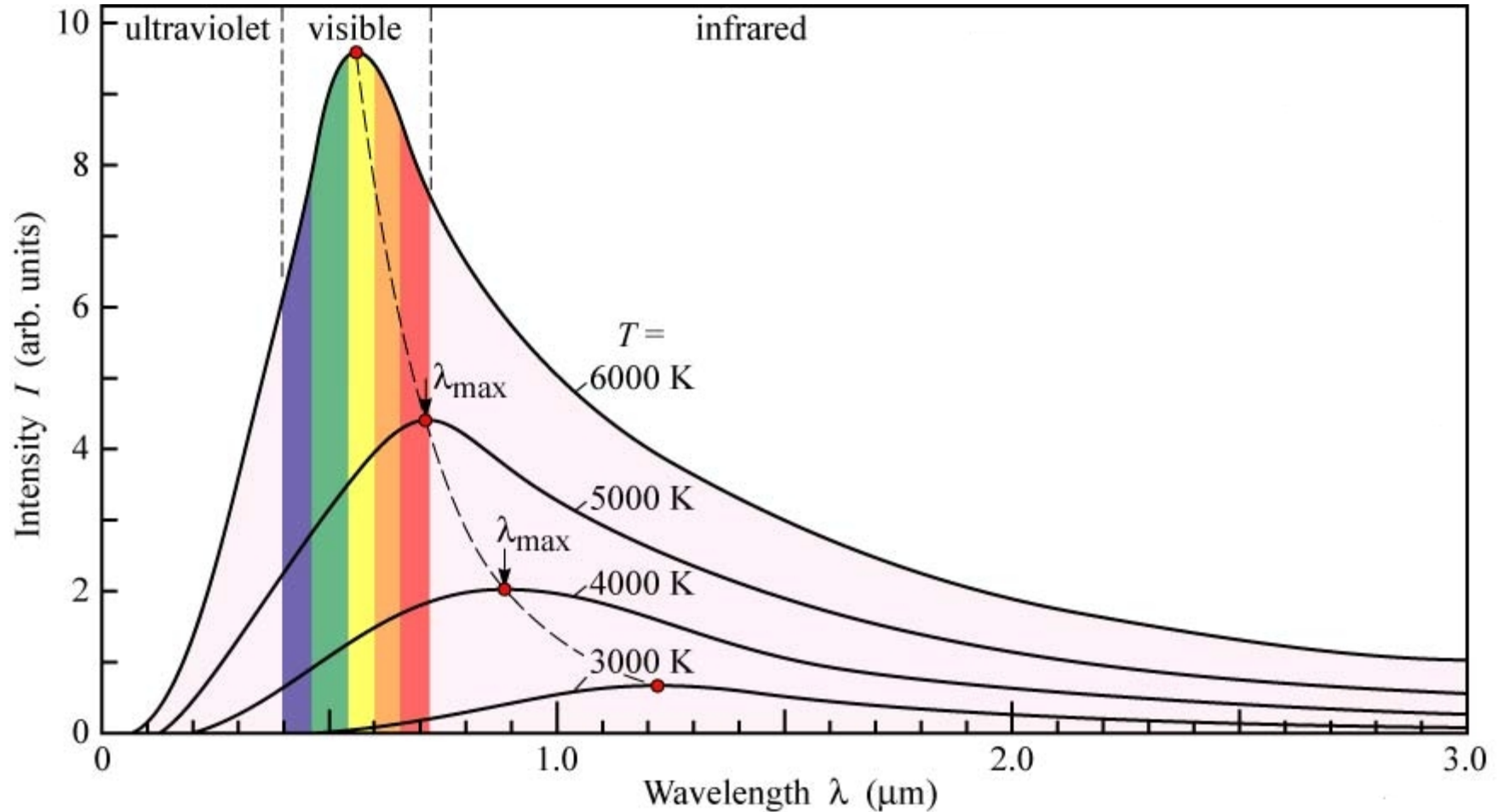
Legge di Stefan-Boltzmann

$$L = \frac{dE}{dt} = \int F dS = 4\pi r^2 \sigma T^4$$

Luminosità (potenza emessa dalla stella)

$$\sigma \approx 5.7 \times 10^{-8} \text{ W } / (\text{m}^2 \text{ } ^\circ \text{K}^4)$$

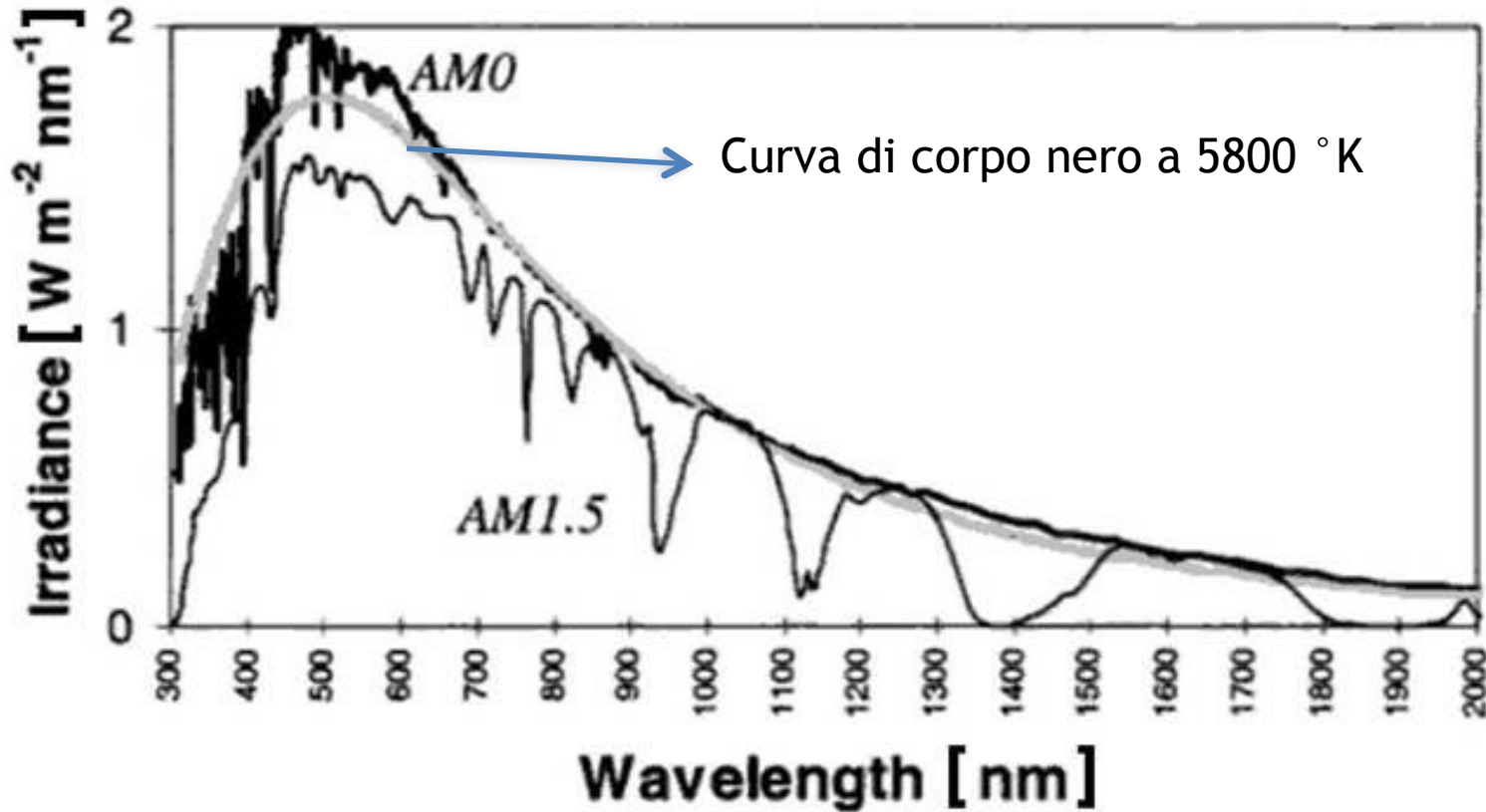
Legge dello spostamento di Wien: legge sperimentale che permette di stabilire la lunghezza d'onda λ_{\max} alla quale si ha la massima emissione radiativa di un corpo nero ad una data temperatura T .



$$\lambda_{\max} T = \text{const} = 2.9 \times 10^{-3} \text{ m}^\circ\text{K}$$

Si può determinare la temperatura di un oggetto nell'ipotesi che esso si comporti come un corpo nero

Il Sole e le altre stelle possono essere considerati degli emettitori perfetti e lo spettro della radiazione emessa è ben descritto dallo spettro di corpo nero, ciò implica che le loro temperature superficiali possono essere stimate mediante tale tecnica



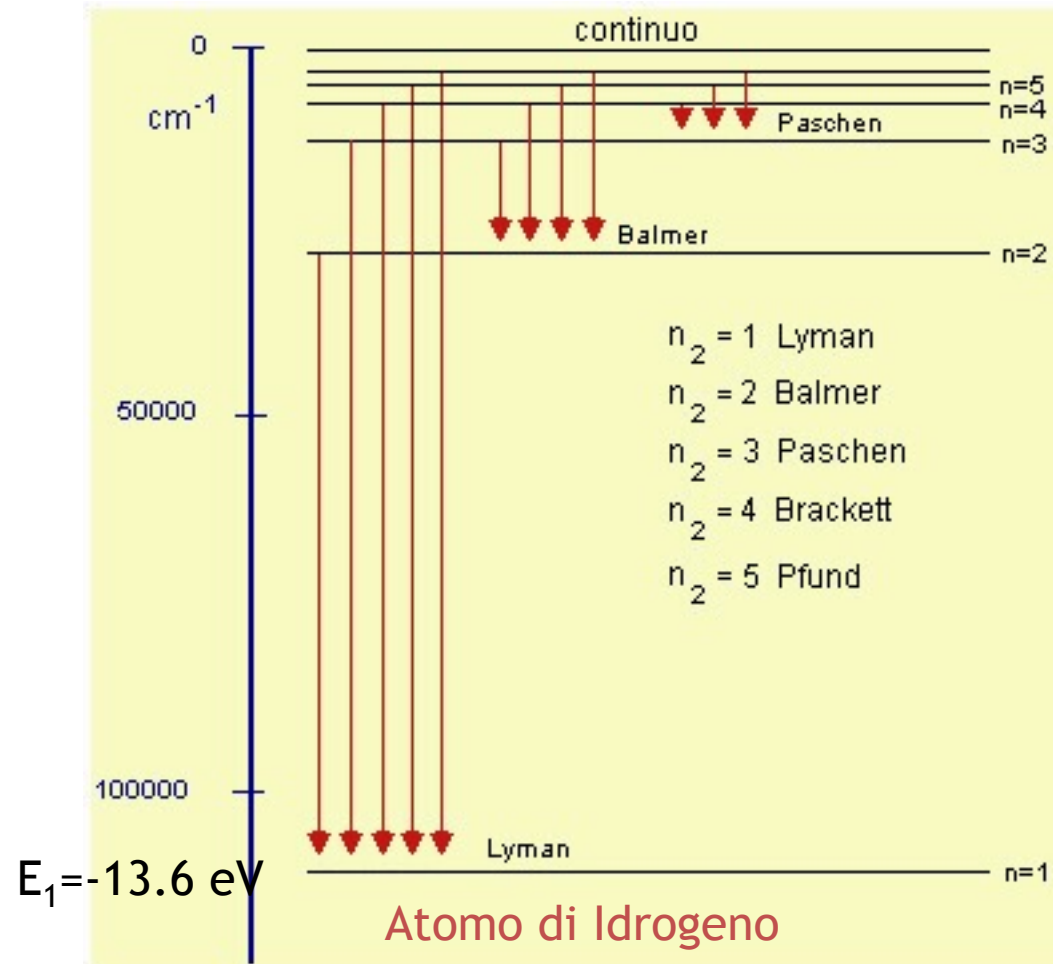
Lo spettro della radiazione solare è caratterizzato da numerose linee dette **linee di assorbimento**

Linee di emissione e linee di assorbimento

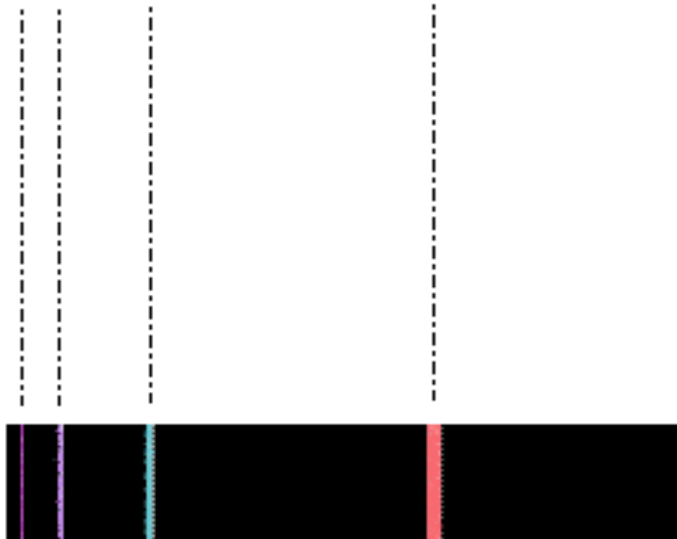
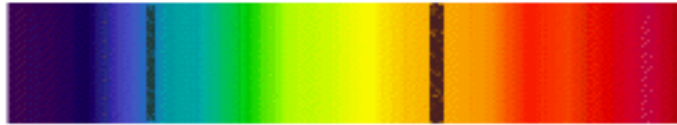
Quando la radiazione emessa da un corpo nero attraversa un gas, lo spettro che si osserva presenta un certo numero di linee scure (**linee di assorbimento**). Alcuni atomi assorbono infatti la radiazione della sorgente:

$$f_{fi} = \frac{1}{h} (E_f - E_i)$$

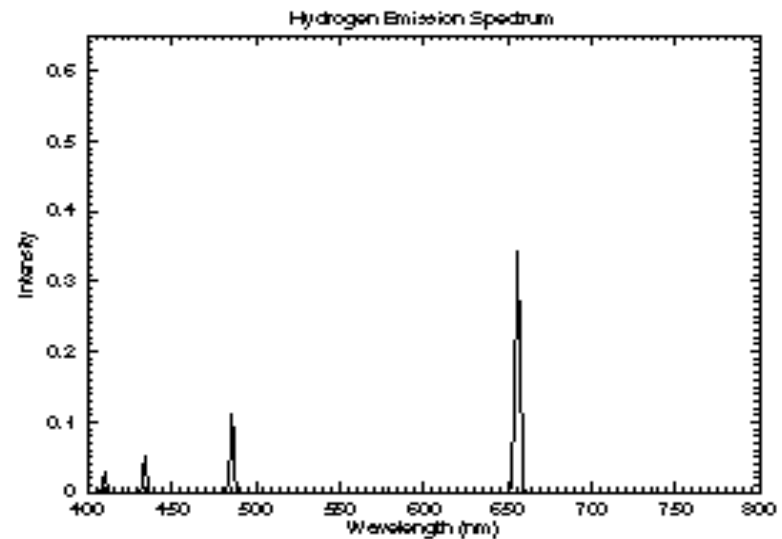
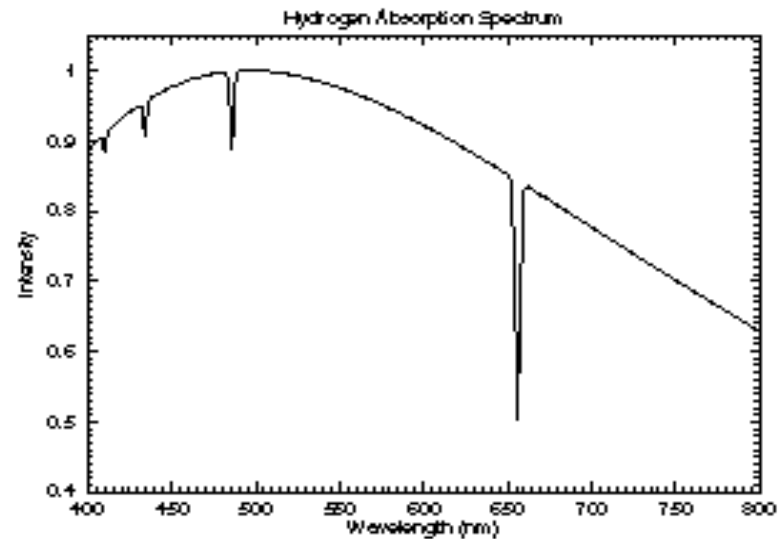
Se viene assorbito un fotone di energia $E_f - E_i$ l'elettrone passa dallo stato fondamentale ad uno stato eccitato. L'energia assorbita viene riemessa dal momento che gli elettroni tendono a ritornare allo stato iniziale (l'atomo viene diseccitato). Lo spettro di tale radiazione riemessa presenterà righe di emissione alla stessa lunghezza d'onda delle linee di assorbimento.



absorption line spectrum

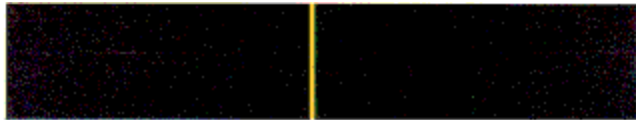
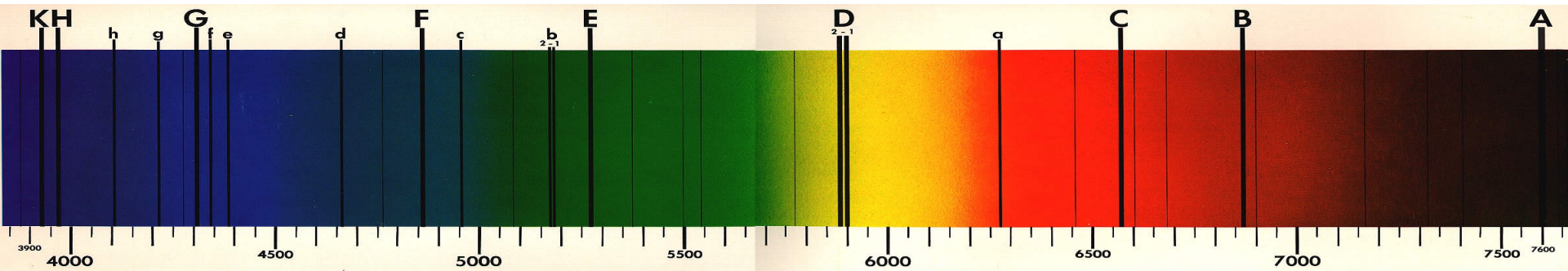


emission line spectrum

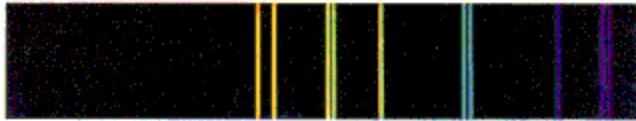


Due modi di mostrare lo stesso spettro

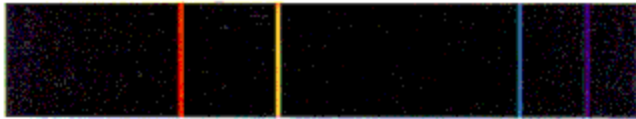
Spettri solari



SODIUM



MERCURY



LITHIUM



HYDROGEN

←
Wavelength

Riga	Sorgente	λ (nm)
A (banda)	O_2	759 - 762
B (banda)	O_2	687 - 688
C	HI	656.3
a (banda)	O_2	627 - 629
D1 - D2	NaI	589.6 - 589
E	FeI	527
b1 - b2	MgI	518.4 - 517.3
c	FeI	495.8
F	H	486.1

Dagli spettri si deduce la composizione chimica del gas!

Qual é la riserva primaria di energia del Sole?

Analisi geologiche basate sull'osservazione di decadimenti radiattivi hanno portato a stimare un'età della Terra

$$\tau_{TERRA} \approx 3 \times 10^9 \text{ anni}$$

Quindi si può dedurre che

$$\tau_S \gg \tau_{TERRA}$$

Essendo la luminosità del Sole

$$L_S \approx 3.84 \times 10^{33} \text{ erg/s}$$

$$E_S = L_S \tau_S \approx 5 \times 10^{50} \text{ erg}$$

Se prendiamo in considerazione la sola energia gravitazionale

$$E_{grav} = -\frac{GM^2}{R} \approx 3.8 \times 10^{48} \text{ erg}$$

$$\tau_S = \frac{E_{grav}}{L_S} \approx 3 \times 10^7 \text{ anni}$$

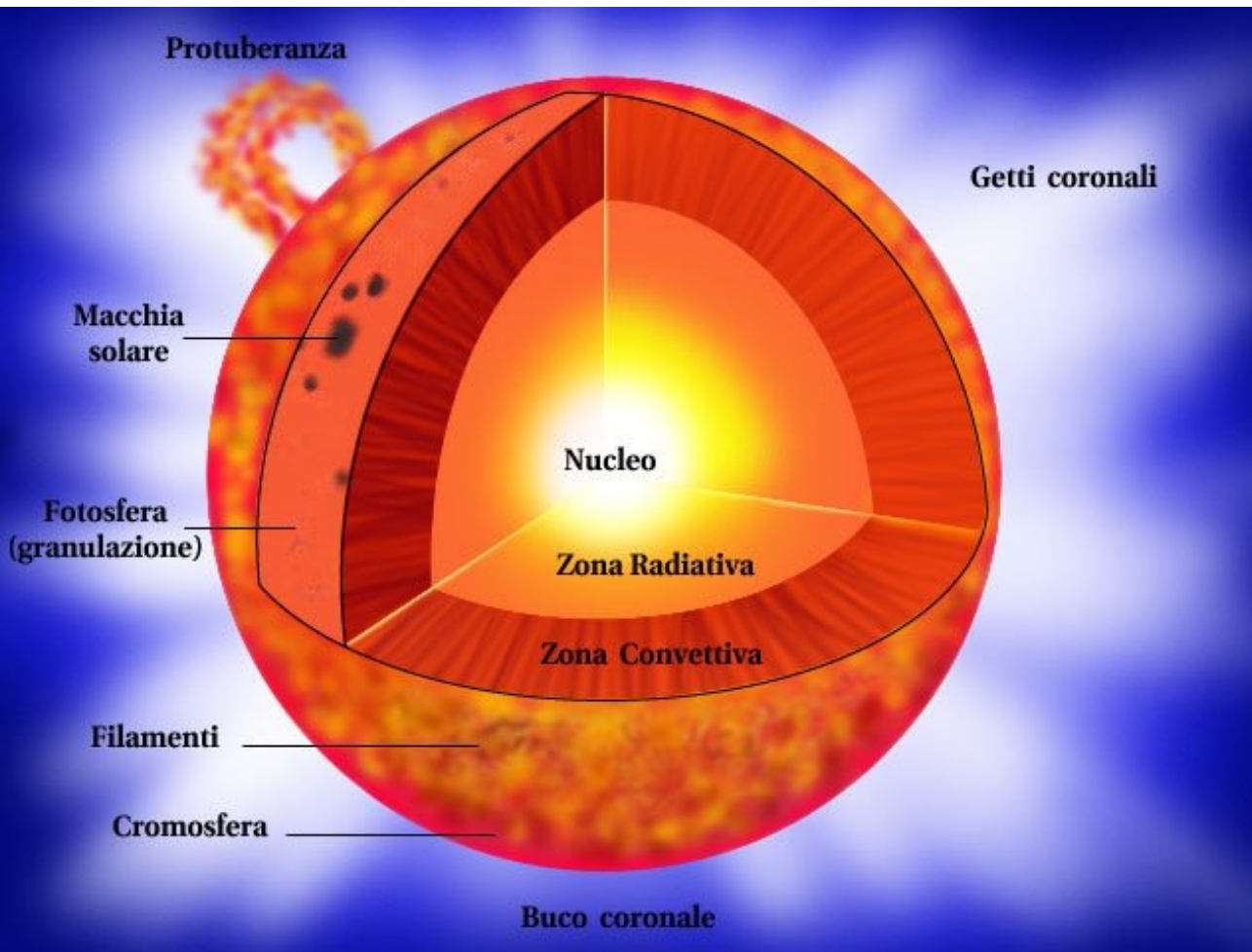
Energia gravitazionale di una sfera di raggio R
con una distribuzione di massa uniforme M

Non va bene!

Nel 1920 Eddington identificò nelle reazioni nucleari la sorgente di energia delle stelle.

E' stato formulato il **Modello Solare Standard (SSM)**. Esso ha consentito di costruire un modello evolutivo del Sole, partendo da una data composizione chimica iniziale e basandosi sui processi di fusione nucleare. Tali processi rilasciano una grande quantità di energia che bilancia l'energia gravitazionale.

L'interno del Sole



Grazie alle tecniche spettroscopiche è possibile studiare solo gli strati più esterni del Sole (atmosfera solare).

L'interno del Sole non è accessibile all'osservazione diretta e la sua strutturazione deriva da modelli che tengono conto dei processi fisici che avvengono all'interno.

Si considera che l'energia irradiata venga tutta prodotta all'interno

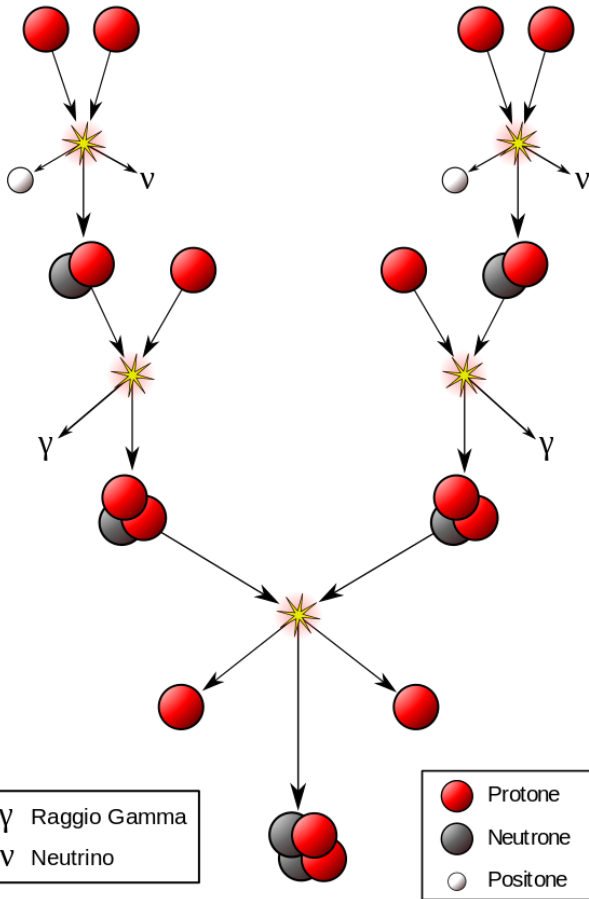
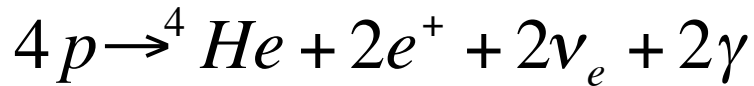
Nucleo

Il nucleo: regione in cui viene prodotta l'energia (modello standard)

$$R \cong 0.2-0.25 R_s$$

$$M \cong 0.5 M_s$$

$$T \cong 1-1.5 \cdot 10^7 \text{ K}$$



All'inizio per i due protoni è necessario superare la barriera di repulsione elettrostatica (ciò avviene grazie ad un effetto quantistico - **effetto tunnel** e ad un effetto statistico)

Tutte le reazioni nucleari avvengono rispettando delle **leggi di conservazione**:

Conservazione della carica

Conservazione nel numero di neutroni e protoni

Conservazione dell'energia

I raggi γ forniscono gran parte della radiazione emessa dal Sole

Stima vita media del Sole

Assumendo che i protoni rappresentano circa il 70% della massa totale del Sole, otteniamo un numero totale di nuclei di H disponibili pari a

$$N = 0.7 \frac{M_s}{m_p} \approx 8 \times 10^{56}$$

Poichè dalla reazione di fusione si ottiene $m = 3.97m_p$

0.03 m_p va in energia, per cui per ogni quattro nuclei di idrogeno fusi si ha

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.03m_p c^2$$

$$E_{TOT} = \frac{N}{4} \Delta E \approx 9 \times 10^{51} \text{ erg}$$

$$L_s \approx 3.9 \times 10^{33} \text{ erg/s}$$

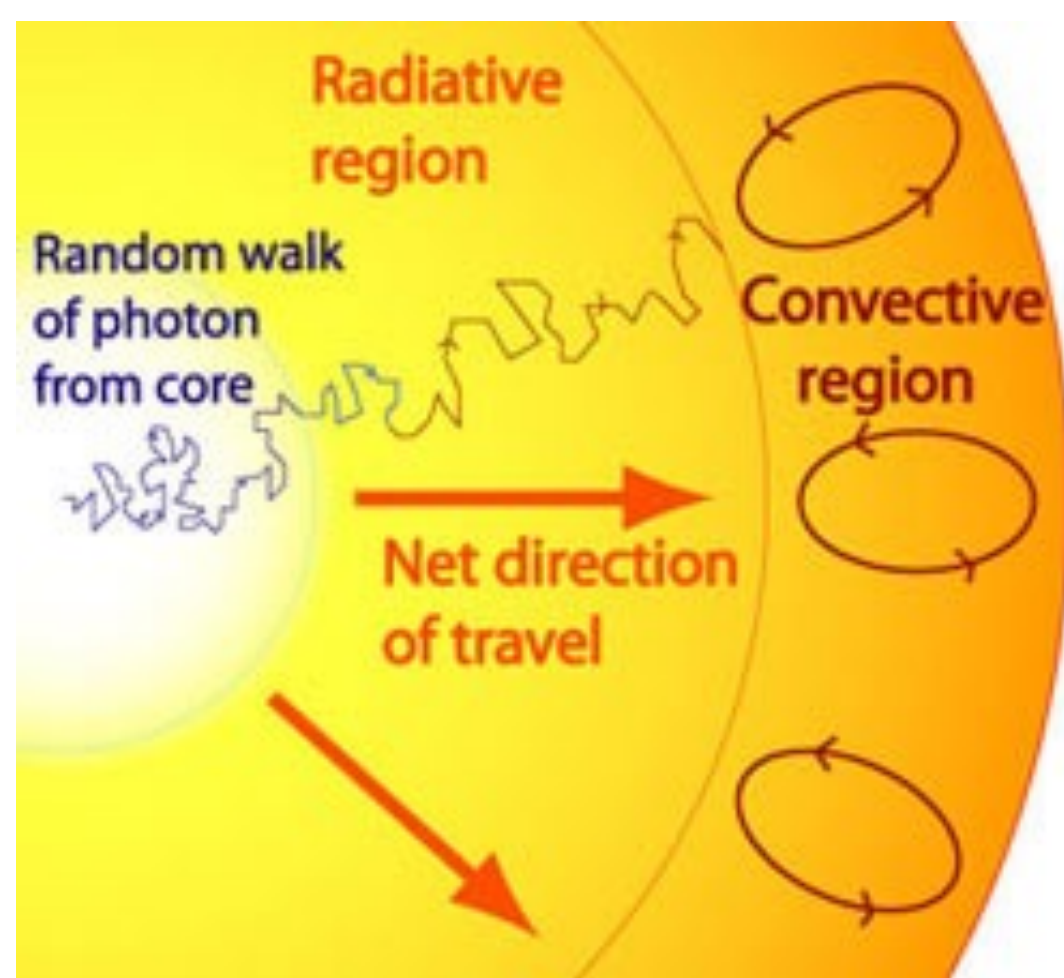
$$\tau_s = E_{TOT} / L_s \approx 7 \times 10^{10} \text{ anni}$$

Assumendo che le reazioni di fusione avvengono solo nel nucleo dove c'è circa il 13% di H disponibile, possiamo tirare fuori una stima più accurata

$$\tau_s = 13\% E_{TOT} / L_s \approx 9 \times 10^9 \text{ anni}$$

Il Sole vivrà' per altri 4-5 miliardi di anni

Come viene trasportata l'energia dal nucleo alla superficie solare?



I fotoni prodotti dalle reazioni nucleari nel nucleo solare viaggiano all'interno di un plasma denso e interagiscono molto con la materia circostante prima di raggiungere la superficie solare

Si distinguono principalmente due zone:
Zona radiativa
Zona convettiva

Zona radiativa

Si estende da circa il 30% al 70% del raggio solare, per circa 350.000 km.

L'energia viene trasportata per irraggiamento.

I fotoni vengono continuamente scatterati, assorbiti e riemessi dalle particelle del plasma ed hanno una eguale probabilità di viaggiare dopo ciascuna interazione in ogni direzione (**cammino random**).

A causa della grande interazione tra radiazione e materia solare si verifica un equilibrio termico locale (**termalizzazione**) e lo spettro della radiazione diventa vicino a quello di corpo nero.

Secondo il SSM la temperatura nell'interno del Sole decresce man mano che ci si allontana dal nucleo, gli elettroni si ricombinano con altre particelle per costituire nuovi ioni o atomi neutri; i fotoni vengono assorbiti più facilmente e la materia diventa molto opaca.

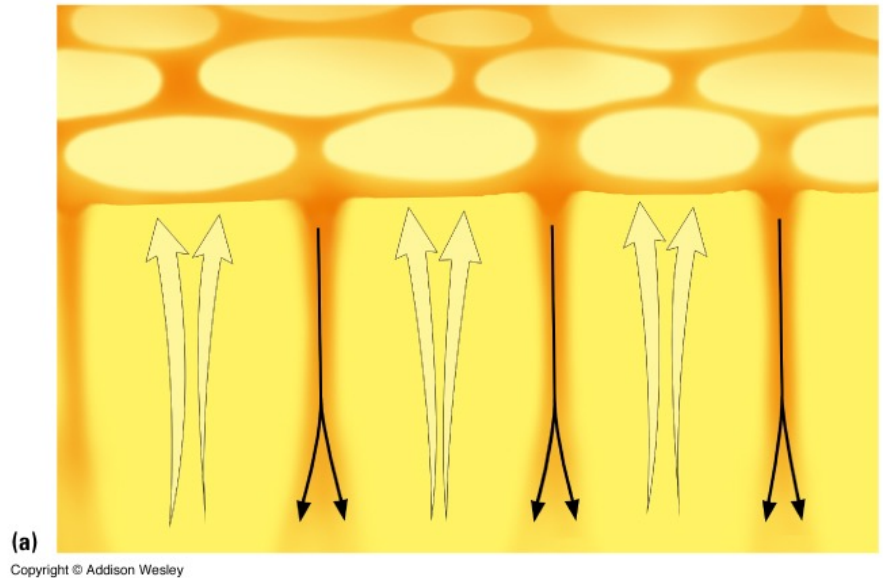
Al limite più esterno della zona radiativa la temperatura è di circa 500.000° K.

Durante il loro cammino e le numerose interazioni con le particelle del plasma solare i fotoni perdono parte della loro energia (aumenta la lunghezza d'onda della radiazione associata).

Zona convettiva

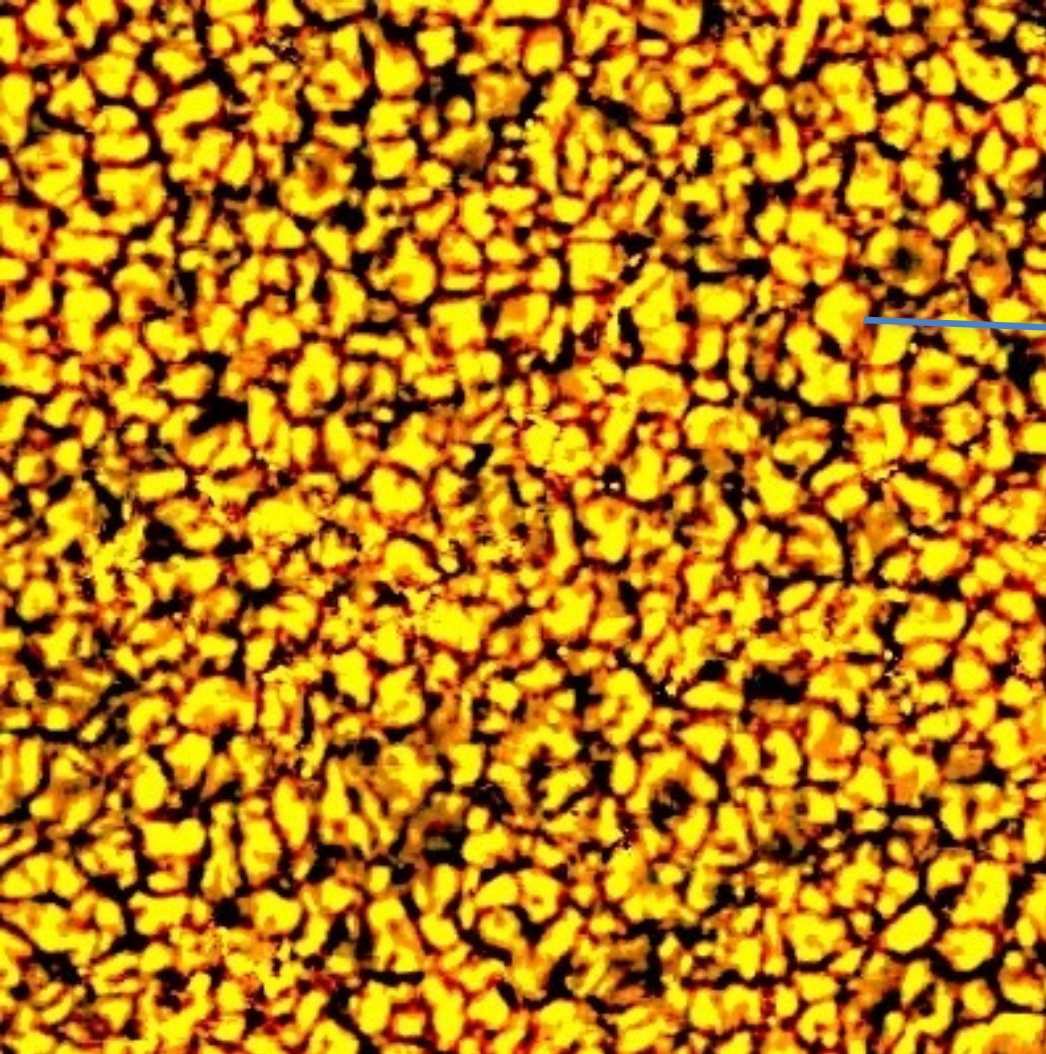
Si estende per circa il 30% del raggio solare (è la parte più esterna)
L'energia viene trasportata per convezione, come in una pentola d'acqua che bolle (grazie al gradiente di temperatura)

Trasporto *meccanico* del calore attraverso movimenti di materia



Al limite della zona radiativa il gas è molto opaco, ciò funge da 'schermo' per la radiazione per gli strati di materia sovrastanti creando una grande differenza di temperatura che rende il gas instabile. Si crea una circolazione (**convezione**) di colonne di plasma caldo che tendono a risalire verso le zone superficiali più fredde. Qui cedono calore e precipitano nuovamente verso gli strati inferiori.

La convezione è responsabile della granulazione superficiale



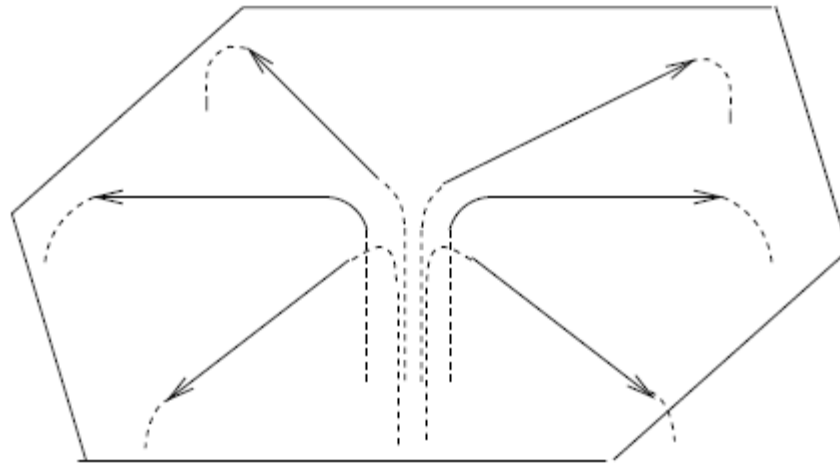
Dimensioni tipiche
dei granuli $\sim 10^3$ km

La loro 'vita' media è
di circa 8-20 minuti

Rappresentano la
'testa' delle celle
convettive

Sono state scoperte anche celle convettive su scale più grandi
(supergranulazione) con dimensioni tipiche di 10.000km e
durata di 24 ore

I moti supergranulari, studiati attraverso i Dopplergrammi, sono prevalentemente orizzontali con velocità dirette dal centro del supergranulo verso la sua periferia. Inoltre, si hanno delle piccole componenti verticali di velocità, in senso uscente nella zona centrale del supergranulo e in senso entrante ai confini delle celle.

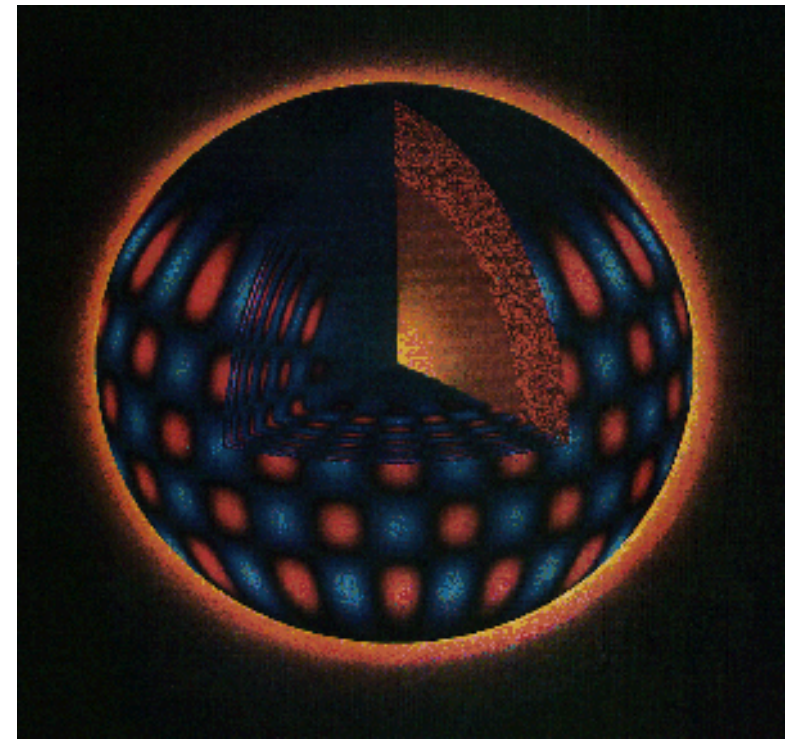
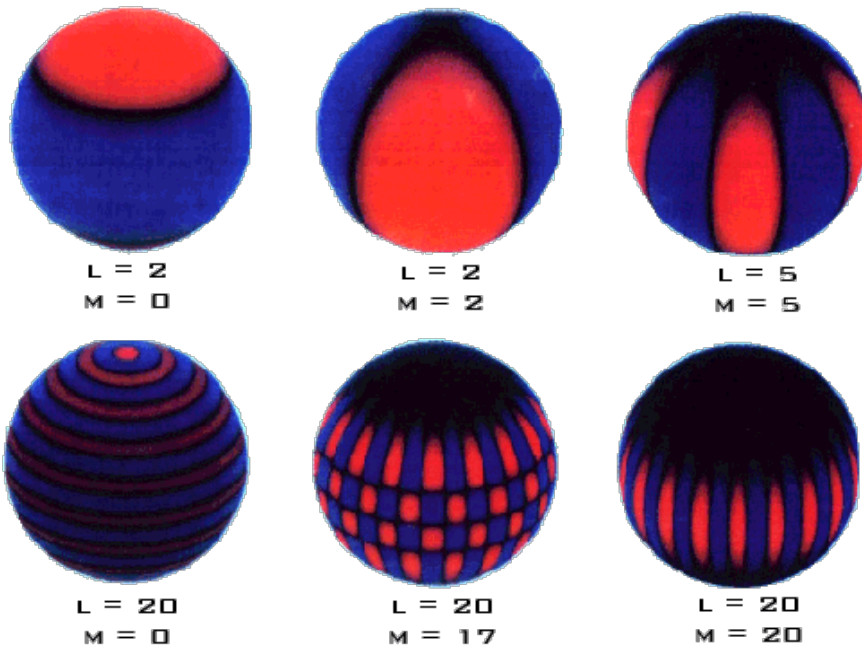


Le velocità orizzontali sono dell'ordine di 500 m/s mentre quelle verticali sono dell'ordine di 50 m/s (moti ascendenti) e di 100 m/s (moti discendenti).

Test osservativi per i modelli solari

Fin dagli anni 60 si è osservato che la superficie del Sole risulta soggetta a moti oscillatori. A prima vista tali oscillazioni sembrano disordinate ma negli anni 70 si è capito che tali movimenti sono il risultato di un elevato numero di oscillazioni globali (per lo più onde acustiche) ciascuna avente un certo periodo caratteristico (tipicamente circa 5 minuti)

Alcune oscillazioni raggiungono anche gli strati più interni del Sole e ciò ha permesso di testare i modelli solari. Essendo tale metodologia simile alla sismologia, che cerca di studiare l'interno della Terra dai terremoti, questa recente branca di ricerca è stata denominata '**eliosismologia**'



Campo che richiede misure di estrema delicatezza: si consideri che l'ampiezza tipica delle oscillazioni è dell'ordine di solo 0.1 m/sec e la rivelazione di tali velocità tramite l'effetto Doppler sulle righe di assorbimento della radiazione solare richiede di riuscire a valutare spostamenti Doppler dell'ordine di un milionesimo della larghezza intrinseca delle righe stesse!

Nei primi anni '90 è diventato operativo il programma GONG (Global Oscillation Network Group) che, grazie a sei stazioni di osservazione distribuite regolarmente in longitudine e a diverse latitudini, permette uno studio continuo del Sole da Terra. Inoltre il satellite SOHO (SOlar and Heliospheric Observatory) è dedicato all'osservazione continua del Sole dallo spazio.

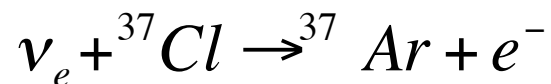
I risultati dell'eliosismologia sono in buon accordo con le predizioni del modello solare standard.

Solar neutrino problem

I neutrini prodotti nelle reazioni nucleari non interagiscono con il Sole ed arrivano sulla Terra “indisturbati”

Flusso teorico = $6.51 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Primi esperimenti negli anni '70 fatti nella miniera di Homestake nel South Dakota si basavano sulla reazione



Risultato: il flusso misurato dei neutrini era 1/3 di quello predetto dalla teoria

Risultati simili anche in altri esperimenti (Gallex/GNO in Italia, SAGE in Russia, Kamiokande in Giappone)

Ma le misure di eliosismologia confermarono negli stessi anni con una buona approssimazione i modelli esistenti

Sudbury Neutrino Experiment (Ontario, Canada)

E' stata posto un contenitore a circa 2 km di profondità riempito con 'acqua pesante' ovvero molecole di acqua in cui l'idrogeno è sostituito dal deuterio

Attorno al recipiente ci sono 9500 celle fotovoltaiche che registrano i flash di luce provenienti dalle varie interazioni dei neutrini con il liquido. Tutti i tipi di neutrino partecipano a tali reazioni. L'esperimento ha mostrato che in realtà il neutrino può cambiare tipo e il flusso totale di neutrini (considerando tutti i 'sapori') è in accordo con la previsione teorica

