

Sommario



● **Introduzione**

● **Parametri fisici**

- **La costante solare**

● **L'interno del Sole**

- **La fusione nucleare**

● **La Fotosfera**

- **Le macchie solari**
- **Il ciclo solare**

Iperastro- Il Sole-Parte I



Il Sole

Tra la moltitudine delle stelle che popolano l'Universo, ce n'è una che ha per noi un significato tutto particolare: il Sole. Il Sole è una stella di tipo medio come tante altre, né troppo piccola né troppo grande, che non rappresenta nulla nell'Universo anche se per noi è tanto importante. Da questa stella, infatti, dipende la nostra

esistenza. La sua distanza è di 150.000.000 km. Questa distanza si chiama Unità Astronomica. Intorno a esso si muovono la Terra, i pianeti e una moltitudine di altri corpi, dagli asteroidi ai meteoriti, dalle comete ai grani di polvere cosmica.

All'osservazione visuale il Sole si presenta come un disco brillante, dal bordo molto netto. Ciò che noi vediamo è soltanto lo strato superficiale, fotosfera, che separa le regioni interne dall'atmosfera solare.

I principali parametri fisici del Sole sono riassunti nella tabella. La loro importanza sta anche nel fatto che essi vengono assunti come unità di misura per i corrispondenti parametri delle stelle.

I parametri fisici del Sole	
Massa (kg)	$2 \cdot 10^{30}$
Raggio (km)	700.000
Densità media (kg/m^3)	1400
Luminosità (J/s)	$3,86 \cdot 10^{26}$
Temperatura superficiale ($^{\circ}\text{K}$)	5780
Composizione chimica: (% della massa)	
Idrogeno	73
Elio	25
Metalli	2

Iperastro- Il Sole-Parte I

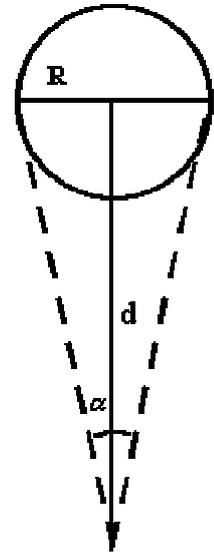
I parametri fisici del Sole

•Il raggio del Sole

La misura del raggio del Sole, così come quella di un pianeta, può essere ricavata a partire dalla conoscenza della distanza d e del diametro angolare. Dalla figura si ha che

$$R = d/2 \alpha$$

con l'angolo α misurato in radianti. Il Sole ha un diametro angolare di circa 0,0093 radianti (pari a 32') ed ha quindi un raggio di circa 700.000 km, 109 volte maggiore di quello equatoriale terrestre (6.378 km). Il suo volume supera quello terrestre di circa un milione e trecentomila volte.



•La massa del Sole

Il valore della massa del Sole può essere ricavata dalla terza legge di Keplero generalizzata da Newton:

$$P^2 (M_S + m_T) = 4\pi^2 a^3/G.$$

Risulta per la massa del Sole un valore di circa $2 \cdot 10^{30}$ kg, non facilmente rappresentabile in termini concreti. Per poterne avere un'immagine basta pensare che, in cifra tonda, la massa del Sole è 330.000 volte quella della Terra e 1000 volte superiore a quella di Giove, il pianeta più grande del Sistema solare. Nota la massa ed il volume del Sole, si ottiene facilmente la sua densità media, data dal rapporto tra massa e volume, che risulta essere pari a 1.410 kg/m^3 , superiore dunque alla densità dell'acqua, pari ad 1 kg/m^3 .

•La luminosità del Sole

Con questo termine si intende *l'energia irradiata dal Sole in tutte le direzioni nell'unità di tempo*. Il suo valore può essere determinato a partire dalla costante solare. Risulta che la luminosità del Sole vale

$$L_S = 3,86 \cdot 10^{26} \text{ J/s}$$

(pari a 386.000 miliardi di miliardi di kW !). Di questa potenza la Terra ne riceve appena un milionesimo o poco più. Quanto basta per mantenere la vita; il resto, salvo qualche altra minima frazione intercettata dai vari pianeti, va perduto nello spazio.

•La temperatura superficiale del Sole

Il dato della luminosità permette di determinare la temperatura della fotosfera solare, detta *temperatura superficiale*, utilizzando la Legge di Stefan del corpo nero

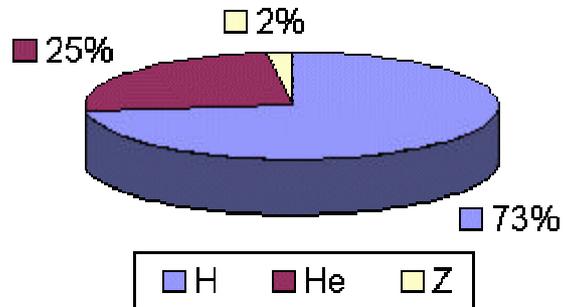
$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

Iperastro- Il Sole-Parte I

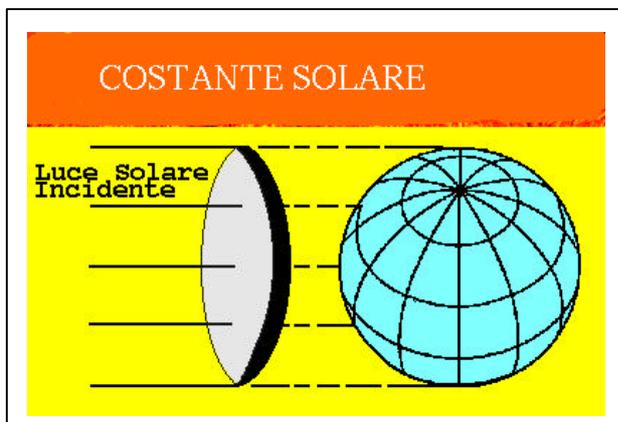
Risulta un valore di 5780 °K. A questa temperatura il massimo dell'emissione di corpo nero cade, per la legge di Wien, nella regione del giallo-verde e tale fatto determina il colore caratteristico del Sole.

•La composizione chimica del Sole

Per quanto riguarda, infine, la composizione chimica del Sole, la spettroscopia consente un'analisi qualitativa e quantitativa accurata dei gas solari. L'analisi quantitativa mostra che l'elemento di gran lunga più abbondante è l'idrogeno (H), pari al 73% della massa solare, seguito dall'elio (He) con il 25%. Tutti gli altri elementi, raggruppati nel termine generico di *metalli* (Z), sono distribuiti nel residuo 2% in proporzioni diverse. I più abbondanti sono nell'ordine: l'ossigeno (O), il carbonio (C), il ferro (Fe), il neon (Ne), l'azoto (N), il silicio (Si), il magnesio (Mg), lo zolfo (S), l'argon (Ar), il nichel (Ni) ed il calcio (Ca). A proposito dell'elio va detto che tale elemento deve il suo nome (che deriva dal greco *Elios* = Sole) proprio al fatto di essere stato scoperto per la prima volta nello spettro solare.



Composizione chimica del Sole



La costante solare

La costante solare, C , è definita come

l'energia che incide nell'unità di tempo su un metro quadrato di superficie esposto perpendicolarmente alla linea di vista, fuori dell'atmosfera terrestre, posto alla distanza media della Terra dal Sole.

Le misure danno per la costante solare un valore pari a

$$C = 1360 \text{ (J/s) } \cdot \text{m}^2.$$

Iperastro- Il Sole-Parte I



Dal valore della costante solare si ricava quello della luminosità. Questa è semplicemente data dalla costante solare moltiplicata per la superficie di una sfera di raggio d , uguale all'Unità Astronomica:

$$L = C \cdot 4\pi d^2$$

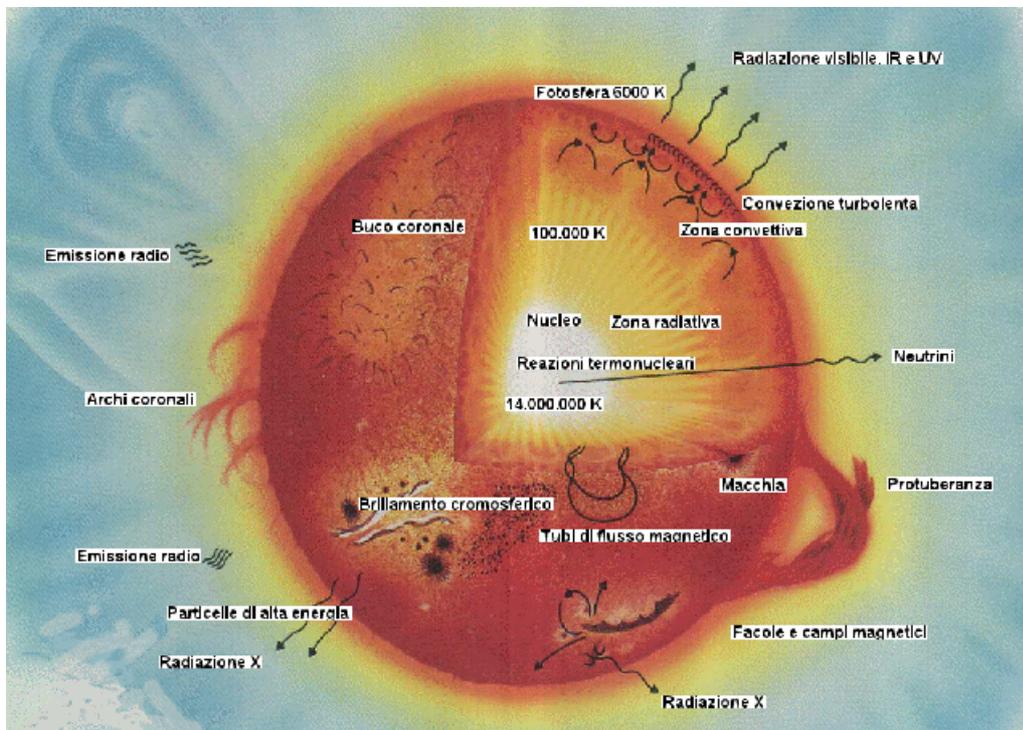
L'interno del Sole

Le regioni interne del Sole sono costituite da un gas che può considerarsi perfetto, in quanto costituito da protoni ed elettroni liberi (plasma). Per quanto riguarda la struttura interna del Sole si distinguono:

- un nucleo centrale a temperatura di circa 10.000.000 °K
- un involucro, che si estende dal nucleo fino alla fotosfera, con temperature decrescenti con la distanza dal centro fino a raggiungere il valore di quella superficiale.

Nel nucleo avviene la produzione dell'energia solare, attraverso processi di fusione nucleare.

L'energia prodotta nel nucleo viene trasportata verso l'esterno attraverso i meccanismi dell'irraggiamento (l'energia passa di strato in strato senza che vi sia trasporto di materia) fino a regioni poco al di sotto della fotosfera. Da qui il meccanismo di trasporto è per convezione (l'energia è trasportata verso l'esterno da colonne ascensionali di materiale, che portano verso l'alto bolle più calde).



Iperastro- Il Sole-Parte I

La fusione nucleare

La fusione nucleare è il processo attraverso il quale si producono nuclei di elementi più pesanti a partire dalla fusione di nuclei di elementi più leggeri.

Nei processi di fusione nucleare (o anche, reazioni termonucleari) la massa del nuovo nucleo formato non è pari alla somma di quella dei nuclei atomici che hanno partecipato alla fusione, ma leggermente inferiore. E' per tale difetto di massa che, in base alla legge di Einstein

$$E = m c^2$$

si sviluppa energia a processo avvenuto. Nella formula m è il difetto di massa e c è la velocità della luce nel vuoto (300.000 km/s).

● Nell'interno del Sole avviene la fusione di quattro nuclei di Idrogeno (protoni) in un nucleo di Elio, secondo lo schema di figura (reazione protone-protone).

● Il nucleo di Elio ha un difetto di massa di 0,007 rispetto alla somma delle masse dei quattro nuclei di Idrogeno. Su questa base è facile calcolare, dalla legge di Einstein, che, se solo un decimo della massa di Idrogeno contenuta nel Sole partecipa alle reazioni termonucleari per formare Elio, si sviluppa un'energia di $9.2 \cdot 10^{43}$ joule, la quale, consumata al tasso di $3.86 \cdot 10^{26}$ J/s (che rappresenta la luminosità solare), risulta sufficiente per circa 7,5 miliardi di anni, ben oltre l'età della Terra.

Iperastro- Il Sole-Parte I

		Le reazioni del ciclo protone-protone	
<div style="border: 2px solid cyan; padding: 10px; background-color: #f0f0f0;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">Il ciclo protone-protone nell'interno solare</p> <p>1 - $p + p = \overset{p \ n}{D} + e^+$</p> <p>2 - $D + p = {}^3\text{He}$</p> <p>2 bis - $D + p = {}^3\text{He}$</p> <p>3 - ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} = {}^4\text{He} + p + p$</p> <p style="font-size: small; margin-top: 5px;">● protone ● neutrone</p> </div>	1-	Nella prima reazione due protoni si uniscono per creare un nucleo di deuterio (D) ed un positrone (e^+)	
	2-	Nella seconda reazione un nucleo di deuterio ed un protone si uniscono per creare un nucleo dell'isotopo 3 dell'elio (${}^3\text{He}$)	
	2 bis -	La reazione (2) deve avvenire due volte perché possa aver luogo la reazione (3)	
	3 -	Nella terza reazione due nuclei di ${}^3\text{He}$ danno luogo ad un nucleo dell'isotopo 4 dell'elio (${}^4\text{He}$) più due protoni, che sono disponibili di nuovo per la reazione (1), donde il nome di ciclo al complesso delle reazioni p-p	



Affinché le reazioni termonucleari possano avvenire, è necessario che venga vinta la forza di repulsione elettrostatica tra cariche dello stesso segno, quali sono i protoni del nucleo atomico, e che, avvicinandosi i protoni a sufficienza, operi la cosiddetta interazione forte, che li porterà, con una certa probabilità, ad unirsi per formare, secondo la successione delle reazioni mostrate in figura, il prodotto finale. Alla temperatura di oltre 10.000.000 di gradi, la temperatura centrale del Sole, tutto questo può accadere per quanto riguarda la fusione dell'Idrogeno, l'elemento più abbondante e più leggero.

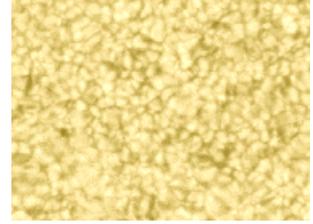
La Fotosfera

Quando si osserva direttamente il Sole ad occhio nudo, la fotosfera ci appare liscia ed uniforme. Ma basta un piccolo telescopio, anche amatoriale (**Attenzione ad oscurare l'oculare utilizzando un filtro solare! Si rischiano gravi danni alla vista!**), o meglio la proiezione dell'immagine ingrandita su uno schermo, per accorgersi che la fotosfera possiede una struttura fine. Essa appare formata da una moltitudine di granuli brillanti, separati da spazi più scuri; a

Iperastro- Il Sole-Parte I

questa struttura si dà il nome di **granulazione**.

Le dimensioni dei granuli sono dell'ordine di 700 km. Nei granuli la materia risale e nelle zone circostanti discende. La velocità di questi moti varia da 1 a 2 km/sec. Per questo motivo si pensa che la granulazione sia la manifestazione superficiale della zona convettiva sotto la fotosfera solare. Ciascun granulo *esiste* in media per un tempo che va da 5 a 10 minuti, dopo il quale esso si decompone per cedere il posto ad un altro granulo. La fotosfera, sotto questo aspetto, sembra una caldaia di riso in ebollizione; da qui il nome di *grani di riso* dato anche ai granuli.

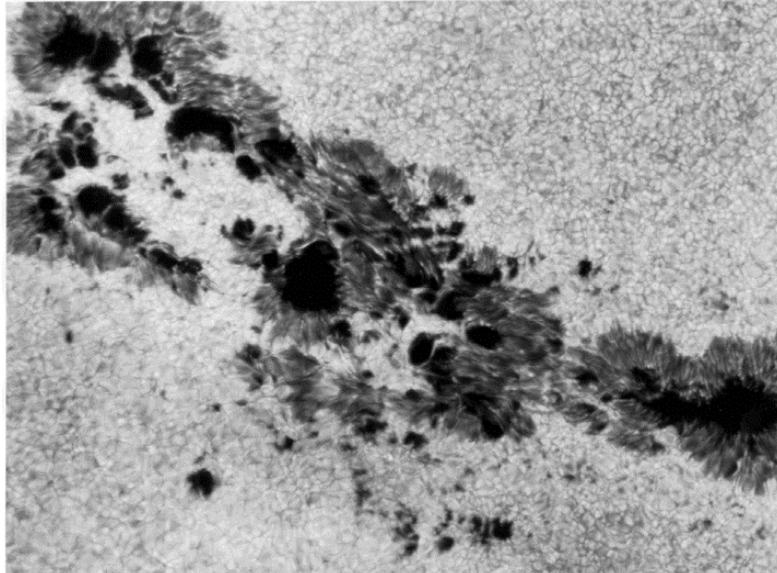


Il fenomeno certamente più appariscente che avviene sulla fotosfera è quello costituito dalle macchie solari.

Le Macchie Solari

Le macchie solari furono scoperte da **Galileo Galilei** nel 1610. Una macchia compare inizialmente sul disco solare sotto forma di un minuscolo poro, appena percettibile. Nello spazio di pochi giorni i pori si sviluppano, proliferano, si allargano, si fondono insieme, dando luogo a gruppi di macchie, i quali in un periodo di circa un mese si dissolvono per far posto ad altri gruppi. Il fenomeno della comparsa di macchie sulla fotosfera solare ha carattere di periodicità e prende il nome di ciclo delle macchie.

Le macchie solari rappresentano dettagli ben identificabili sulla fotosfera, seguendo i quali nel tempo si ha l'evidenza della rotazione del Sole intorno ad un asse polare. Il sole non ruota come un corpo solido, ma il periodo di rotazione aumenta andando verso i poli (*rotazione differenziale*). Esso è di circa 32 giorni in vicinanza dei poli e di circa 27 giorni in vicinanza

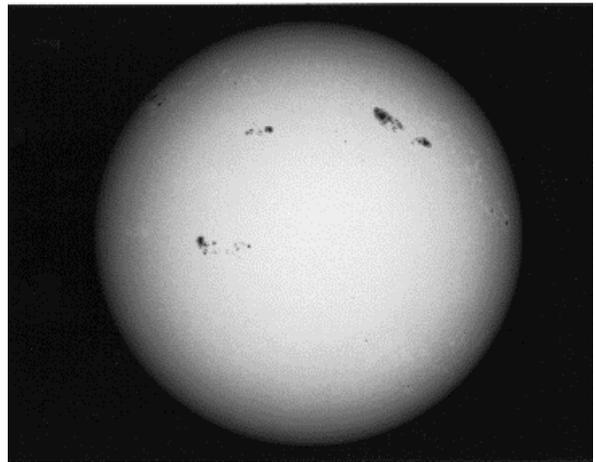


dell'equatore solare.

Nei gruppi di macchie si distinguono una macchia di testa e una macchia di coda, nel senso della rotazione solare. Una tipica macchia solare è costituita da un'area grossolanamente circolare oscura, detta ombra, circondata da una zona grigiastra, detta penombra, con una caratteristica struttura radiale.

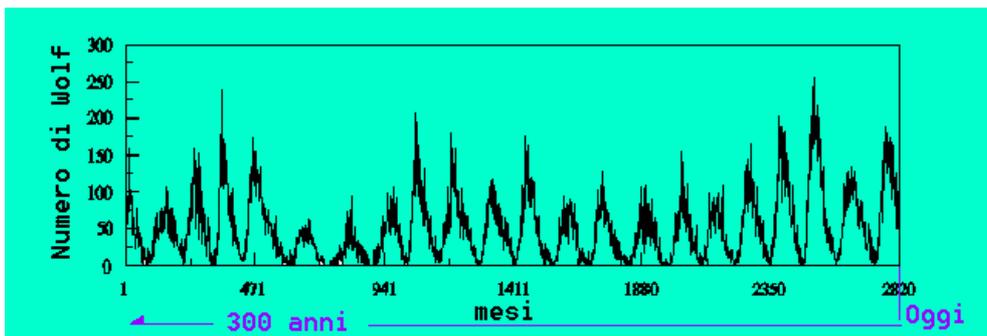
Iperastro- Il Sole-Parte I

Le macchie più grandi possono avere un diametro di alcune decine di migliaia di chilometri. Una grande macchia solare può quindi contenere comodamente al suo interno la Terra. Le osservazioni consentono di affermare che le macchie sono sedi di vere e proprie aree cicloniche, simili (ma su scala infinitamente più grande) a trombe d'aria, che succhiano il materiale dagli strati immediatamente inferiori della fotosfera e lo proiettano in alto con moto vorticoso, raffreddandolo. Un dato importante che riguarda le macchie è quello del forte campo magnetico associato ad esse, fino a qualche migliaio di gauss. I campi magnetici delle macchie di testa e delle macchie di coda hanno sempre polarità magnetica opposta.



Il ciclo delle macchie solari (ciclo di Wolf)

L'esistenza di un ciclo periodico nella comparsa delle macchie solari fu scoperta nel 1844 da H. SCHWABE, un farmacista appassionato di osservazioni solari. Per mettere in evidenza tale periodicità occorre costruire un indice di attività che descriva in ogni momento lo stato della fotosfera solare sotto il profilo della presenza di macchie. Solitamente si fa riferimento al cosiddetto numero di Wolf, legato al numero delle macchie e dei gruppi di macchie presenti in un dato momento sul Sole. Facendo una media annuale dei numeri di Wolf determinati giornalmente e riportando questi dati in un grafico in funzione del tempo, si visualizza il ciclo delle macchie solari. La periodicità è evidentissima. Il ciclo passa da minimi (quasi totale assenza di macchie) a massimi con periodicità di circa 11,2 anni in media.



Il grafico riporta i Numeri di Wolf mensili nel corso degli ultimi 300 anni. I Numeri di Wolf sono proporzionali al numero dei gruppi di macchie e delle macchie singole: essi sono quindi una misura empirica dell'attività magnetica del Sole. La registrazione quotidiana dei numeri di Wolf viene effettuata presso vari osservatori solari. Importante è risultato il contributo degli astronomi non professionisti alla raccolta di questa grande quantità di dati nel corso di ben tre secoli di osservazioni.