

Tratto da: Egidio Landi Degl'Innocenti, Fisica Solare

Il Sole, per via della sua relativa vicinanza, è la stella che conosciamo meglio e l'unica che può essere osservata in dettaglio.

La vicinanza del Sole rende possibile l'osservazione di numerosissimi fenomeni fisici a un livello di dettaglio e di risoluzione molto elevato. Facciamo riferimento a un'ipotetica stella uguale al Sole la quale si trovi alla distanza standard di 10 parsec.

Se si suppone di osservare i due oggetti con lo stesso strumento, il numero di fotoni raccolti nei due casi, in uno stesso intervallo spettrale e nello stesso intervallo di tempo, è legato dall'equazione:

$$N_{stella} = N_{Sole} \left(\frac{d_{Sole}}{d_{stella}} \right)^2$$

Considerando:

- il numero di secondi d'arco contenuti in un radiante $S_R = \frac{180 \cdot 60 \cdot 60}{\pi} = 206264.8$
- l'Unità Astronomica = $U.A. = d_{Sole} \approx 1.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}$
- 1 parsec = 3,26 a.l. (anni luce)
- 10 parsec = $10 \cdot S_R \cdot U.A. \approx 3.09 \cdot 10^{19} \text{ cm}$

avremo: $N_{stella} \approx 2.4 \cdot 10^{-13} N_{Sole}$

Grazie alla sua vicinanza, i parametri del Sole sono conosciuti con buona precisione:

$$M_{Sole} = (1.9891 \pm 0.0012) \cdot 10^{33} \text{ g}$$

$$R_{Sole} = (6.9626 \pm 0.0007) \cdot 10^{10} \text{ cm}$$

$$L_{Sole} = (3.845 \pm 0.006) \cdot 10^{33} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$$

Dalla L_{Sole} , ricordando la definizione di temperatura efficace e il valore della costante di Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-5} \frac{\text{erg}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{K}^4}$), otteniamo:

$$T_{efficaceSole} = \left(\frac{L_{Sole}}{4\pi\sigma R_{Sole}^2} \right)^{\frac{1}{4}} = 5776 \text{ K}$$

Questi parametri sono stati utilizzati per la calibrazione di gran parte delle misure astrofisiche.

Infine, sia evidenze geologiche che calcoli teorici, portano a determinare l'età del Sole con precisione inferiore:

$$t_{Sole} = (4.57 \pm 0.11) \cdot 10^9 \text{ anni} \approx 1.44 \cdot 10^{17} \text{ s}$$

Scoperta delle macchie solari (G. Galileo, 1610 circa): attraverso l'uso del telescopio osserva la presenza di zone scure sulla superficie del Sole, da lui chiamate macchie (*maculae*). Le macchie più grosse sono, raramente, visibili ad occhio nudo e pertanto erano già note dall'antichità. Oggi sappiamo che il fenomeno delle macchie non è circoscritto al Sole ma è presente anche su altre stelle.

Scoperta della rotazione differenziale (R.C. Carrington, 1850 circa): Utilizzando le macchie solari come traccianti, si scopre che il Sole non ruota come un corpo rigido, ma che la velocità angolare di rotazione all'equatore è maggiore (circa il 20%) della velocità angolare di rotazione ai poli. Si pensa che questo fenomeno sia dovuto all'interazione della rotazione con convezione. Infatti, in base ai modelli teorici dell'interno del Sole, oggi sappiamo che la convezione interessa una zona che si trova a una distanza dal centro compresa fra 0,72 raggi solari e la base dello strato superficiale visibile da Terra (fotosfera). Il fenomeno della rotazione differenziale è presente anche su altre stelle.

Scoperta della granulazione (W. Herschel, 1801): Osservando il Sole da un sito di buona qualità, al telescopio appare distintamente una struttura tipo "chicchi di riso" chiamata granulazione. Il fenomeno è connesso con l'esistenza di moti convettivi nell'atmosfera solare e può essere considerato l'analogo (su scala enormemente maggiore!) dei moti ascensionali e discensionali che si verificano in un liquido in ebollizione. La scoperta di questo fenomeno si rivelò fondamentale nel mettere in rilievo l'importanza dei moti convettivi nelle stelle. Oggi sappiamo che la fotosfera è stabile dal punto di vista convettivo e che la granulazione delinea in maniera attenuata la presenza di moti convettivi molto più intensi che si verificano a livelli più profondi (*overshoot* convettivo).

Scoperta delle righe di assorbimento nello spettro solare (J. Fraunhofer, 1817): Le righe spettrali sono state scoperte per la prima volta sul Sole. Solo successivamente lo stesso fenomeno è stato osservato in lampade di laboratorio e, ovviamente, in altri oggetti astronomici. La loro scoperta e interpretazione hanno portato all'evoluzione dell'astronomia tradizionale nell'astrofisica moderna.

Scoperta della presenza del ciclo di attività (H. Schwabe, 1830 circa): Le macchie solari non si presentano sempre con la stessa frequenza sulla superficie del Sole. Studiando la variazione del loro numero al passare del tempo, è stato trovato che esse presentano un ciclo il cui periodo è dell'ordine di 11 anni (*ciclo di attività solare*) e coinvolge non soltanto le macchie solari ma numerosi altri fenomeni. Cicli di attività simili sono presenti su numerose stelle.

Interpretazione del fenomeno dell'oscuramento al bordo per mezzo della teoria del trasporto radiativo (E.A. Milne, A. Eddington, 1920 circa): Osservando il Sole in maniera quantitativa, risulta apparente il fenomeno dell'oscuramento al bordo per il quale l'intensità della radiazione solare diminuisce in maniera notevole man mano che ci si sposta dal centro verso il lembo. In luce bianca (luce integrata) l'intensità del bordo solare è circa 2/5 di quella del centro. Questo fenomeno, ovviamente osservato solo sul Sole, è stato il primo ad essere interpretato attraverso la teoria del trasporto radiativo e oggi è alla base dell'interpretazione degli spettri astronomici.

Scoperta della presenza di campi magnetici (G.E. Hale, 1908): Registrando lo spettro della radiazione proveniente da una macchia solare in due opposte direzioni di polarizzazione circolare (destra e sinistra) si osserva che le righe spettrali risultano leggermente spostate in lunghezza d'onda nei due spettri. Questo fenomeno, *effetto Zeeman*, permette di accertare la presenza nelle macchie di intensi campi magnetici (mille volte più intensi del campo magnetico terrestre). Tale scoperta da un lato fornisce l'evidenza dell'esistenza di campi magnetici in oggetti astronomici, dall'altra apre la strada a una nuova tecnica osservativa chiamata spettropolarimetria. Il ruolo fondamentale svolto dai campi magnetici in tutta l'astrofisica può difficilmente essere sottovalutato.

Scoperta dell'esistenza di cromosfera e corona: Osservando il Sole in eclisse totale risulta evidente che l'atmosfera solare si estende ben oltre il bordo netto che appare all'osservazione visuale. A questo tenue involucro gassoso, con una temperatura di $T \approx 10^6$ K e che si estende fino alla Terra, si dà il nome di "corona solare". Sempre durante le eclissi totali, ma solo in corrispondenza dell'immersione e dell'emersione del Sole dietro la Luna, si osserva, all'estremo bordo del Sole, un'intensa radiazione di colore rossastro. Tale radiazione è dovuta a numerose righe di emissione, la più importante delle quali è la riga H α dell'Idrogeno neutro a 6563 Å, ovvero nella regione rossa dello spettro visibile. Essa è emessa da parte di una sottile zona superficiale del Sole chiamata "cromosfera". Oggi sappiamo che la presenza della cromosfera è comune a tutte le stelle di tipo spettrale più avanzato di F.

Induzione della presenza di reazioni termonucleari nell'interno del Sole (H. Bethe, 1930 circa): Assumendo che per tutto il tempo corrispondente all'età stimata del Sole, $t_{Sole} \approx 4.6 \cdot 10^9$ anni, la sua luminosità sia rimasta praticamente costante, se ne deduce che il Sole deve aver irradiato nel corso della sua vita un'energia pari a:

$$E_{totale} = t_{Sole} \cdot L_{Sole} \approx 5.5 \cdot 10^{50} \text{ erg}.$$

Questa energia è molto maggiore sia dell'energia gravitazionale, che dell'energia termica, che di un qualsiasi tipo di energia chimica che il Sole possa possedere (in base al teorema del viriale, $E_{grav} \approx E_{term} \approx \frac{1}{2} \frac{GM_{Sole}^2}{R_{Sole}} \approx 1.9 \cdot 10^{48} \text{ erg}$, mentre $E_{chim} \approx 6.8 \cdot 10^{44} \text{ erg}$). In base a

queste considerazioni cominciò ad essere chiaro ai fisici, a partire dagli anni 1930, che l'energia responsabile della luminosità del Sole e delle stelle andasse identificata nell'energia nucleare. Per l'energia nucleare a disposizione del Sole si ha infatti:
 $E_{nucl} = \gamma M_{Sole}$, dove γ rappresenta la frazione di massa solare che può essere convertita in energia raggiante. Assumendo che il Sole fosse costituito inizialmente di solo Idrogeno e osservando che la conversione di 4 nuclei di Idrogeno in un nucleo di Elio implica un valore $\gamma \approx 0.007$, si ottiene potenzialmente per il Sole $E_{nucl} \approx 1.3 \cdot 10^{52} \text{ erg}$.

Si ritiene oggi che una stella come il Sole possa convertire in Elio solo circa un decimo della sua massa iniziale di Idrogeno, e se ne deduce quindi che il Sole è arrivato alla mezza età!

Il contributo di Bethe fu quello di riuscire a immaginare una serie di reazioni nucleari che potessero funzionare nell'interno del Sole e che riuscissero a convertire 4 nuclei di Idrogeno in 1 nucleo di Elio (*ciclo protone protone*). Oggi sappiamo che il ciclo protone-protone è alla base delle reazioni nucleari che si svolgono in tutte le stelle di massa confrontabile alla massa solare. Nelle stelle più massicce il ciclo di reazioni fondamentali è invece il CNO.

Scoperta dell'esistenza del vento solare (E.Parker, 1950 circa): le prime indicazioni dell'esistenza del vento solare sono emerse dallo studio delle code delle comete (*la coda di ioni*), quando si avvicinano al Sole. La coda di polvere segue un'orbita perfettamente Kepleriana, mentre quella di ioni segue un'orbita leggermente diversa, il che porta alla deduzione che sulle particelle che la compongono agiscono forze di natura non gravitazionale. Tali forze sono dovute in parte alla pressione di radiazione, ma questo contributo non è sufficiente a spiegare l'anomalia delle orbite. E' quindi necessario ipotizzare che esista un flusso di materia radiale proveniente dal Sole. L'esistenza del vento solare è stata confermata dai satelliti artificiali e dalle sonde spaziali. Alla distanza di 1 U.A. dal Sole, ovvero in corrispondenza dell'orbita della Terra, il vento solare ha una densità tipica di circa 10 protoni per cm^3 e una velocità tipica di circa 500 km/s. Questo porta ad una perdita di massa da parte del Sole di circa $2 \cdot 10^{12} \text{ g/s}$, ovvero $4 \cdot 10^{14}$ masse

solari per anno. Il fenomeno della perdita di massa da parte delle stelle è molto comune nell'Universo.

Scoperta di emissione X strutturata da parte della corona (1970 circa): Le prime osservazioni X del Sole sono avvenute con lo Skylab, evidenziando che la corona solare emette raggi X, e che tale emissione è notevolmente strutturata e variabile con il ciclo di attività. Le strutture tipiche della corona X sono gli archi coronali (*loops*) che delineano le linee di forza del campo magnetico e i buchi coronali (*coronal holes*).

Scoperta delle oscillazioni solari (1960 circa): Questa importantissima scoperta ha aperto un nuovo filone di ricerca, l'eliosismologia, che ha poi a sua volta dato il via a un analogo filone rivolto all'osservazione degli stessi fenomeni in ambito stellare. Inizialmente furono osservate soltanto le oscillazioni più intense, con un periodo dell'ordine di 300 s. Poi, con l'aumentare della sensibilità dei metodi di osservazione, è emersa chiaramente l'esistenza di uno spettro molto strutturato di oscillazioni con periodi tipici che vanno dalle ore fino a poche decine di secondi. La contemporanea misura del periodo T e della lunghezza d'onda λ delle oscillazioni fornisce una relazione di dispersione del tipo $\lambda = f(T)$ che permette di risalire con buona precisione all'andamento dei parametri fisici (sostanzialmente la velocità del suono) nell'interno del Sole.

Origine dell'astrofisica dei neutrini (R. Davis, 1960 circa): L'astrofisica dei neutrini nasce in una miniera del South Dakota dove R. Davis realizza e mette a punto uno strumento per la rivelazione del flusso di neutrini provenienti dal Sole. Si tratta di rilevare, entro un serbatoio contenente circa 10^{31} atomi di Cloro, una decina di atomi di Argon radioattivo che vengono prodotti settimanalmente dai neutrini solari nella loro interazione con il Cloro del serbatoio. L'esperimento riesce e mostra che il flusso dei neutrini solari è inferiore di circa un fattore 3 di quanto ci si attendeva in base ai modelli teorici dell'interno del Sole. Oggi si ritiene che tale discrepanza non sia dovuta a una descrizione teorica incompleta dell'interno del Sole ma provenga dal fatto che il neutrino non è una particella stabile e che decade durante il suo tempo di volo dal Sole alla Terra.