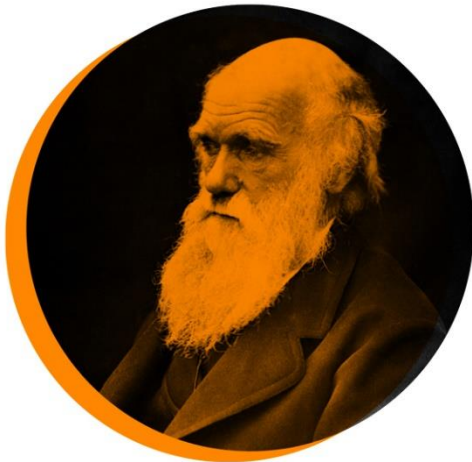


Evoluzione delle nostre idee sul Sole



percorso di [Francesco Vissani](#)

Gli uomini hanno sempre ragionato sulla natura del Sole; qui ci concentreremo sulla storia degli ultimi secoli, quando siamo riusciti a fare passi decisivi verso la sua comprensione.

L'inizio è abbastanza divertente. Infatti, dovremmo ricordare la disputa che vide lo scontro tra **Charles Darwin**, che sospettava che il Sole dovesse esistere almeno da 300 milioni di anni - per tener conto dei processi geologici e dell'evoluzione della specie - e Lord Kelvin (cioè William Thomson), che non voleva concedere un'età superiore ai 20 milioni di anni - basando la sua opinione su idee teoriche riguardanti il funzionamento del Sole.

Darwin, intimidito dall'autorità scientifica del suo avversario, decise di eliminare qualsiasi affermazione precisa dalla seconda edizione del suo "On the Origin of Species" (1859).

Tuttavia, Darwin aveva semplicemente ragione, mentre Kelvin era fuorviato dalla sua supposizione di conoscere abbastanza fisica per trarre una solida conclusione. Gli mancavano informazioni!!!

Venendo ad un momento più recente, ad un altro punto di svolta di questa storia, dobbiamo ricordare il nome di **Francis Aston**, che riuscì a pesare le singole specie atomiche fin dai primi anni del XX secolo, un risultato importante riconosciuto con il premio Nobel per la chimica nel 1922.

Alcuni scienziati compresero presto la potenziale rilevanza di queste misurazioni per comprendere il funzionamento del Sole.

Uno fu il chimico **William Harkins**: egli elaborò una teoria del nucleo dell'atomo e, su questa base, ipotizzò che la conversione dell'idrogeno in elio potesse essere una fonte di energia per il Sole e le stelle (1915). L'altro fu **Jean Perrin**: egli immaginò che quattro atomi di idrogeno potessero fondersi e trasformarsi in un unico atomo di elio nel Sole (1919). Si noti che entrambi prendevano molto sul serio la teoria atomica, che non era una posizione così ovvia in quegli anni. Il loro punto di vista era molto simile in sostanza, a parte i dettagli.

Se una tale trasformazione avviene, lo 0,7% della massa iniziale scompare, ma, allo stesso tempo, viene guadagnata energia secondo la più famosa equazione di **Einstein**: l'energia è uguale alla massa per la velocità della luce al quadrato ... o se vi piacciono le formule, $E = mc^2$, dove in questo caso m è la quantità di massa persa.



Questo significherebbe che i prodotti finali della trasformazione devono essere dotati di grandi energie (ad esempio, devono avere molta velocità/energia cinetica), che alla fine alimentano il serbatoio di calore, permettendo al Sole di continuare ad irradiare luce per molto più tempo di quanto **Kelvin** avesse pensato.

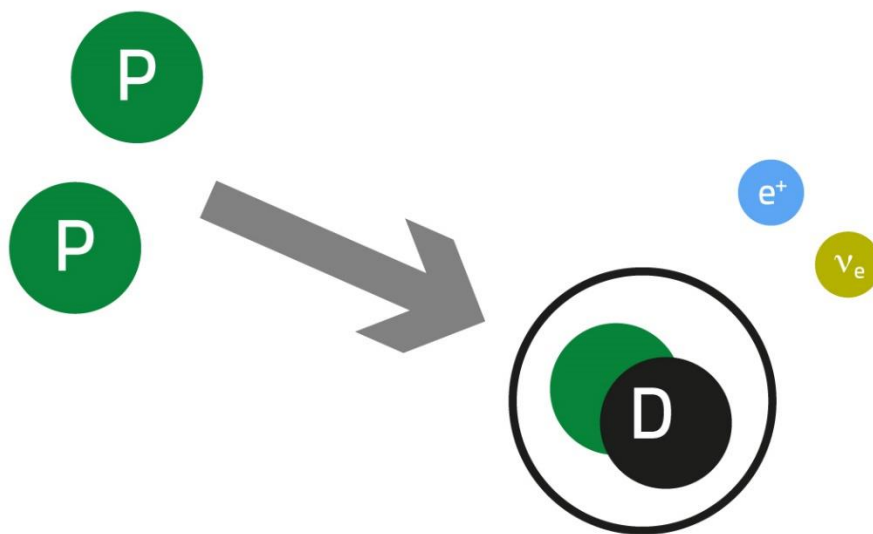
Poi, **Arthur Eddington** propose un modello teorico del Sole (1920) concludendo che il suo nucleo interno è il luogo migliore dove potrebbe avvenire l'ipotetica trasformazione e sottolineando che una conversione del 5% della massa solare è sufficiente a far risplendere 5 miliardi di anni (la stessa cifra per l'età della Terra ottenuta successivamente da Arthur Holmes, basata sullo studio delle rocce di uranio).



Molti erano però ancora scettici, poiché queste idee erano considerate troppo speculative, anche se - ora lo sappiamo - Harkins, Perrin ed Eddington erano tutti sulla strada giusta.

Una comprensione molto più completa delle trasformazioni che permettono al Sole di funzionare è dovuta a **Carl Friedrich von Weizsäcker** e **Hans Bethe**. Quest'ultimo elaborò i principali aspetti quantitativi nel 1939 e ha ricevuto il premio Nobel per la fisica 1967 proprio per questi risultati.

La reazione di base è quella in cui due nuclei di idrogeno (cioè i protoni) si fondono in un nucleo di deuterio (cioè un deuterone). Come risultato di questa e di altre trasformazioni nucleari, viene rilasciata molta energia e questo permette al Sole di brillare.



Ciò che conta per la nostra discussione è che, non solo l'energia viene rilasciata, ma anche i neutrini



sono inevitabilmente emessi. Seguono altre reazioni e, alla fine, l'elio viene sintetizzato, proprio come previsto da Harkins e Perrin.

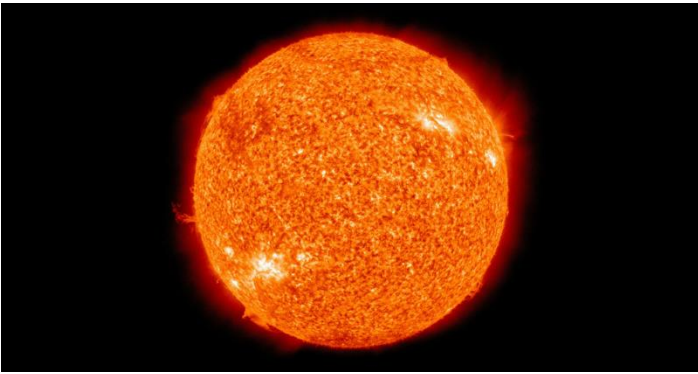
Queste idee appartenenti alla fisica nucleare - insieme a molte altre idee appartenenti all'astrofisica - sono diventate i pilastri di un ammirabile descrizione teorica, fondata su un complesso programma al computer, originariamente scritto da **John Bahcall** e finalizzato a descrivere, nel modo più

affidabile possibile, la struttura e i processi fisici che avvengono nel Sole.

Questo codice è chiamato Modello Solare Standard. La sua prima versione è apparsa a metà degli anni sessanta, più di mezzo secolo fa. Il Modello Solare Standard è stato ed è tuttora lo strumento chiave per procedere nella comprensione del Sole.

Tuttavia, il metodo galileiano richiedeva prove sperimentali di queste idee e c'era un solo modo per verificare, con certezza e direttamente, la correttezza del Modello Solare Standard, cioè della teoria: era necessario osservare i neutrini emessi quando avvengono trasformazioni nucleari. Per questo motivo pochi coraggiosi scienziati, sempre negli anni Sessanta, si unirono in un'impresa, con l'obiettivo di costruire il primo telescopio a neutrini che contribuì alla comprensione del Sole, l'esperimento Homestake (Nobel 2002).

Come funziona il Sole, introduzione



Il Sole è la nostra stella, ma quanto ne sappiamo del suo funzionamento? Questo percorso ci darà qualche informazione in più e ci spiegherà chi e come lo sta studiando. Scopriremo così che Borexino, un esperimento presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso, è alla frontiera di tale ricerca.

percorso di [Francesco Vissani](#)

La gente crede che gli scienziati abbiano un'idea precisa di come funziona il Sole, e questa è una opinione ben fondata. La cosa sorprendente, però, è che la convalida definitiva è piuttosto recente: infatti, è stata solo l'osservazione di alcune speciali particelle a convincere la maggior parte degli scienziati che le nostre aspettative sul Sole sono - in buona misura - corrette.

Certo, l'umanità vede il Sole da sempre, ma la luce ci permette di osservare solo la sua superficie e non le sue regioni interne, quelle in cui viene liberata l'energia che permette al Sole di splendere (e a noi di vivere).

Tuttavia, ragionando sugli strumenti offerti dalla scienza, ci siamo resi conto che era possibile osservare l'interno del Sole per mezzo di una particella elusiva chiamata neutrino. Il compito che queste particelle svolgono per noi è simile a quello svolto dai raggi X, che vengono utilizzati dai medici per osservare le parti interne del nostro corpo. La differenza è soprattutto quantitativa: i neutrini ci permettono di vedere molto molto più in profondità.



L'illustrazione trasmette questa idea in modo divertente, anche se è lontana dalla realtà. Procediamo allora ad elaborare il punto: come funziona la "vista neutrinica"?

I neutrini possono essere considerati come particelle molto piccole: il rapporto tra le dimensioni degli atomi e quelle dei neutrini solari è lo stesso che tra le dimensioni della Terra e quelle dei virus! Il neutrino passa quindi attraverso la materia solare e ci raggiungono indenni, essendo così incredibilmente piccoli. Questa è in sostanza la ragione per cui queste particelle sono state sfruttate dai fisici per vedere l'interno del Sole.

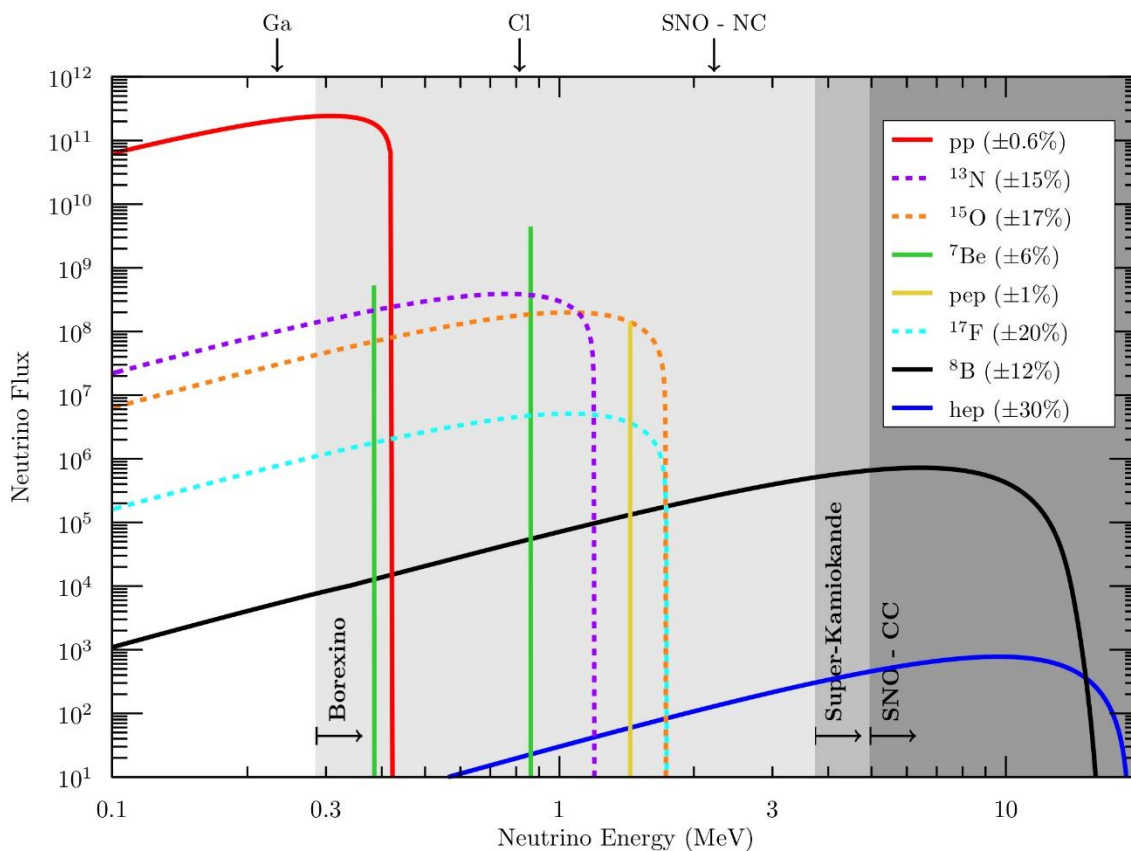
Aspettative teoriche e telescopi di neutrini

percorso di [Francesco Vissani](#)

La teoria dice che i neutrini sono prodotti nella regione centrale del Sole, il luogo dove si libera l'energia, il suo motore. Questa regione è chiamata il nucleo solare o in breve, il nucleo. Questa è la parte più calda del Sole. Lì la materia vive in condizioni molto diverse da quelle ordinarie e non può essere osservata direttamente perché è circondata dal resto della struttura della stella.

Poiché i neutrini solari sono molto numerosi, è possibile - anche se non è facile - rivelare la loro presenza per mezzo di dispositivi molto grandi, che sono costruiti per questo scopo. Questi apparecchi sono chiamati, con poca fantasia, telescopi a neutrini.

Ci sono diversi telescopi a neutrini che hanno visto neutrini solari e, tra questi, i più famosi sono Super-Kamiokande (Giappone) e SNO (Canada), i cui risultati sono stati riconosciuti dal premio Nobel per la Fisica 2015.



Tuttavia, i neutrini che sono stati osservati da questi esperimenti non sono quelli più importanti, siccome corrispondono solo allo 0,02% dell'energia emessa dal nostro Sole. Si veda il diagramma allegato che mostra sia le distribuzioni dei vari tipi di neutrini al cambiare dell'energia (le curve e le

linee verticali), sia le regioni di energia che riusciamo a sondare (le tre bande grigie): stiamo parlando dei neutrini che cadono sotto le due bande più a destra.

Lo stesso diagramma vi mostra che, al mondo, c'è solo un solo telescopio a neutrini, ad oggi, che ha la possibilità di osservare tutti i tipi di neutrini, compresi quelli più abbondanti. Questo è il telescopio Borexino, che si trova nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Italia). Ne mostriamo una buffa immagine che lo ritrae "incappottato". Ma prima di raccontarne il motivo, e prima di parlare delle ultime novità e dei risultati, è utile ricordare un po' di storia.



Fig.2: Foto dell'esperimento Borexino visto dall'esterno.

1. Darwin pensava che il Sole esistesse da quanti anni?
2. Su quali basi scientifiche?
3. Lord Kelvin da quanti anni pensava esistesse il Sole?
4. Su quali basi scientifiche?
5. Quali ipotesi e quale metodo ti sembra avvicinarsi di più al metodo scientifico?
6. Per quali scoperta vinse il premio Nobel Francis Aston?
7. In cosa viene trasformata la massa durante la trasformazione dell' idrogeno in elio?

8. Quanta percentuale della massa del Sole è sufficiente per farlo risplendere per 5 miliardi di anni?
9. Sapendo che la massa del Sole è circa $2 \cdot 10^{30}$ kg, calcola quanta massa è sufficiente per farlo risplendere per 5 milioni di anni.
10. Quando avvengono trasformazioni nucleari, quali particelle vengono emesse?
11. Cos'è il "Modello Solare Standard?"
12. Perché è stato costruito il telescopio a neutrini?