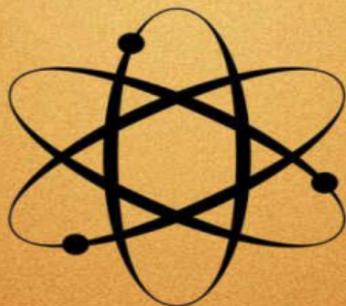


Alessio Mangoni

*I neutrini e  
il Sole*

*breve lezione di fisica*



A. MANGONI

ALESSIO MANGONI

# I neutrini e il sole, breve lezione di fisica

UUID: dc887a5e-2f62-11e8-b114-17532927e555

Questo libro è stato realizzato con StreetLib  
Write

<http://write.streetlib.com>

# Indice dei contenuti

---

# Introduzione

# I neutrini e il Sole

## Note

## INTRODUZIONE

Questa lezione è tratta dal libro "Cinque brevi lezioni di fisica", dello stesso autore. Si tratta di un breve racconto di fisica, rivolto a tutti, sulla stella del nostro sistema solare, il Sole e sui neutrini, particelle elementari elusive che interagiscono poco con la materia che incontrano. Il libro è adatto a

tutti, anche a chi non ha conoscenze di base sull'argomento, tutto viene spiegato a parole in modo dettagliato senza ricorrere a formule matematiche.

Autore: dott. Alessio Mangoni, fisico teorico.

Collana di brevi lezioni di fisica per la divulgazione scientifica:

- La teoria dei quanti, breve lezione di fisica
- La relatività del tempo, breve

lezione di fisica

- Gli atomi e la materia, breve

lezione di fisica

- Le particelle della natura, breve

lezione di fisica

- I neutrini e il sole, breve lezione di  
fisica

## I NEUTRINI E IL SOLE

Il Sole è la stella a noi più vicina e ci illumina ogni giorno grazie alla radiazione elettromagnetica che ha origine al suo interno dovuta alle reazioni nucleari. I neutrini sono particelle elementari, puntiformi, di massa quasi nulla che interagiscono molto poco con la materia che incontrano. Cosa accomuna dunque il

Sole, di massa e dimensioni enormi, con i neutrini? La risposta è semplice, nel nucleo del sole avvengono reazioni nucleari e alcune di loro producono neutrini che escono dall'interno del sole quasi indisturbati, fino alla superficie e raggiungono poi la Terra. Il sole ha una massa dell'ordine di mille miliardi di miliardi di miliardi di chilogrammi, un diametro di circa 1.4 milioni di chilometri e dista dalla Terra in media circa 150 milioni di chilometri. La sua temperatura

superficiale è di circa 5500 gradi Celsius, mentre quella interna è dell'ordine delle decine di milioni di gradi Celsius (circa 16 milioni). A queste temperature, grazie ad un meccanismo quantistico detto effetto tunnel, alcuni nuclei atomici (prima i più leggeri, come il nucleo di idrogeno, che è essenzialmente un protone) possono avvicinarsi a tal punto da far prevalere la forza nucleare forte e innescare la cosiddetta fusione nucleare. Due nuclei atomici

generici, essendo composti da neutroni (di carica elettrica nulla) e protoni (di carica elettrica positiva), hanno carica elettrica complessivamente positiva e tendono a respingersi a causa della forza elettromagnetica che per cariche elettriche dello stesso segno è repulsiva. Questa forza aumenta in modo inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra i nuclei ed è maggiore se i nuclei contengono un gran numero di protoni (è proporzionale al prodotto delle cariche

elettriche dei due nuclei). Se ipotizziamo un nucleo fermo (per semplicità, altrimenti introduciamo una velocità relativa), l'energia che un altro nucleo deve avere per potersi avvicinare ad una certa distanza da esso aumenta con il reciproco della loro distanza (a differenza della forza repulsiva che aumentava con il quadrato del reciproco della distanza). Nel sole l'energia cinetica di questi nuclei (quella dovuta al movimento che, per casi non relativistici cioè per

velocità in gioco molto minori di quella della luce, è data dalla metà del prodotto della massa per la velocità al quadrato) è di natura termica, tanto maggiore è la temperatura tanto più sarà la loro energia cinetica (questa energia termica è dell'ordine della costante di Boltzmann moltiplicata per la temperatura). Facendo un calcolo si osserva che l'energia cinetica media dei nuclei all'interno del Sole (dove la temperatura è dell'ordine delle decine di milioni di gradi Celsius) non

sarebbe sufficiente, da sola, a far avvicinare i nuclei di idrogeno (e dunque tantomeno quelli più pesanti di elio o carbonio o altri elementi) fino a distanze dell'ordine del fermi (1 fermi equivale a un milionesimo di miliardesimo di metro), è questa infatti la distanza alla quale agisce la forza nucleare forte attrattiva tra nucleoni (con nucleoni si intendono protoni e neutroni, cioè i costituenti del nucleo atomico). Riassumendo: due nuclei (avendo carica elettrica positiva)

tendono a respingersi a causa della forza elettromagnetica a meno che non riescano ad avvicinarsi a distanze dell'ordine del fermi dove agisce la forza nucleare forte che è attrattiva e può innescare la fusione nucleare. Come accennato le alte temperature all'interno del Sole non sarebbero sufficienti, da sole, ad innescare la fusione nucleare. Il motivo per cui essa accade risiede nell'effetto quantistico detto effetto tunnel, infatti i nuclei sono particelle molto piccole per cui gli

effetti della meccanica quantistica sono non trascurabili, in particolare questo effetto prevede una probabilità non nulla per una particella di superare una barriera di energia potenziale (questa barriera, in questo caso, è dovuta alla repulsione elettromagnetica citata prima) maggiore dell'energia che possiede (questa probabilità dipende dalla larghezza spaziale della barriera e da quanto è maggiore rispetto all'energia della particella). Grazie a questo effetto combinato con le elevate

temperature del Sole fanno sì che la probabilità che avvenga la fusione nucleare sia non trascurabile. All'interno del sole quindi, dove sono presenti moltissimi nuclei di idrogeno, avviene la fusione nucleare dell'idrogeno in deuterio. Durante questa fusione uno dei due protoni (infatti un nucleo di idrogeno è proprio un protone) si trasforma in un neutrone grazie all'interazione nucleare debole (una delle quattro forze fondamentali della natura insieme all'interazione

nucleare forte, a quell'elettromagnetica e a quella gravitazionale). Questa trasformazione prende il nome di decadimento beta<sup>+</sup>. Il decadimento beta<sup>+</sup> prevede che un protone all'interno di un nucleo si trasformi in tre particelle: un neutrone che rimane nel nucleo, un positrone (anti-particella dell'elettrone) che in genere esce e dopo un po' interagisce con un elettrone che incontra e un neutrino elettronico che esce indisturbato (interagisce molto raramente). Esiste

anche il decadimento beta- in cui un neutrone si trasforma in un protone, un elettrone e un anti-neutrino elettronico. Dato che la massa del neutrone è leggermente maggiore di quella del protone il decadimento beta- avviene anche per neutroni liberi (cioè non legati in un nucleo), infatti il neutrone libero ha una vita media di poco più di quindici minuti dopodiché decade. Dunque nel Sole, dove avvengono questi decadimenti beta, si producono neutrini (o anti-neutrini) e una parte di

essi raggiunge la Terra. In una stella generica, a seconda della temperatura interna centrale, possono avvenire reazioni di fusioni anche tra nuclei più pesanti come ad esempio l'elio, il carbonio e l'ossigeno. Per quanto riguarda la fusione di idrogeno le reazioni più importanti sono la catena pp, già citata e il cosiddetto ciclo CNO (che coinvolge carbonio, azoto e ossigeno e decadimenti beta oltre a catture di protoni da parte di questi nuclei) e tra questi due prevale il

secondo a temperature maggiori. Nel Sole, data la sua temperatura, prevale la catena pp sul ciclo CNO. Nelle stelle, man mano che la temperatura aumenta, avvengono altre reazioni, come ad esempio, a temperature dell'ordine delle centinaia di milioni di gradi Celsius, avviene la cosiddetta reazione 3-alfa in cui, al netto di due reazioni, tre particelle alfa (una particella alfa è un nucleo di elio-4) si fondono formando carbonio-12 e emettendo un fotone (il fotone è la

particella mediatrice della forza elettromagnetica, la luce che vediamo è formata da fotoni, come anche, ad esempio, i raggi X, le onde radio, le microonde, e così via). Una volta che si è formato abbastanza carbonio-12 da queste reazioni esso può reagire con un nucleo di elio-4 formando ossigeno-16 e un fotone. L'ossigeno-16, a sua volta, può interagire con un nucleo di elio-4 e dare origine a neon-20 e un fotone. A temperature più elevate due nuclei di carbonio-12 possono fondersi in

sodio-23 emettendo un protone oppure fondersi in neon-20 e emettere una particella alfa. Anche due nuclei di ossigeno-16 possono fondersi in fosforo-31 rilasciando un protone, oppure fondersi in silicio-28 emettendo una particella alfa. Per fare queste ultime reazioni la temperatura dovrà essere dell'ordine dei miliardi di gradi Celsius e non è il caso del Sole. Parliamo ora dei neutrini, come già accennato sono particelle elementari puntiformi di massa molto

piccola, quasi nulla (all'inizio si pensava avessero massa nulla) e fanno parte dei cosiddetti leptoni, una delle famiglie in cui sono divise le particelle. Esistono tre tipi di neutrini: il neutrino elettronico, il neutrino muonico e il neutrino tauonico. Ognuno ha la sua corrispondente anti-particella (cioè esistono anche l'anti-neutrino elettronico, l'anti-neutrino muonico e l'anti-neutrino tauonico). In genere il neutrino e l'anti-neutrino elettronico vengono prodotti insieme al leptone

corrispondente cioè l'elettrone o la sua anti-particella il positrone.

Analogamente i neutrini muonici sono legate al leptone corrispondente, il muone, così come quelli tauonici al tauone. La conservazione del numero leptonico implica che in ogni reazione il numero leptonico si conserva, in particolare si assegna all'elettrone e al neutrino elettronico numero leptonico elettronico pari a +1 e alle loro anti-particelle -1, al muone e al neutrino muonico si assegna numero leptonico muonico +1 e alle anti-particelle -1 e analogamente al tauone e al suo neutrino. Dunque, ad esempio, nel decadimento beta- si ha come stato

iniziale un neutrone che ha numero leptonico (di tutti e tre i tipi) pari a 0 (non essendo un leptone), mentre nello stato finale si hanno un protone (numeri leptonici 0), un elettrone (numero leptonico elettronico +1) e un anti-neutrino elettronico (numero leptonico elettronico -1) e la somma dei numeri leptonici nello stato finale fa 0 come in quello iniziale. Analogamente in altre reazioni, ecco perché se c'è un muone che compare e all'inizio non c'era deve esserci un neutrino muonico che compensa il numero leptonico muonico in modo che si conservi. Nel Sole, la reazione nucleare di fusione di due nuclei di idrogeno formando un nucleo di deuterio fa parte di una catena di

reazioni detta catena pp (protone-protone). Il risultato più importante di questa catena prevede, come effetto netto di più reazioni, che quattro nuclei di idrogeno (quattro protoni) si trasformino in un nucleo di elio (isotopo-4), due positroni, due neutrini elettronici e si liberi un'energia di 26 MeV (il MeV è un'unità di misura dell'energia, la M sta per mega che significa "un milione", e l'eV è "l'elettronvolt" pari a circa 1.6 volte un decimo di miliardesimo di miliardesimo di Joule, simbolo J). Sapendo la luminosità del Sole (che è una potenza, cioè energia emessa per unità di tempo) che è circa 3.8



piano quando qualcosa viene emesso in tutte le direzioni possibili da una sorgente puntiforme si dice che questo qualcosa viene emesso verso tutti i 360 gradi (che è l'angolo totale su un piano). Per sapere quanto di questo qualcosa sarà emesso entro un certo angolo di  $x$  gradi basterà fare  $x$  diviso 360 e questa è la frazione del totale che cadrà entro l'angolo di  $x$  gradi. Nello spazio tridimensionale il ragionamento è identico, solo che l'angolo totale in 3D è detto angolo solido e si misura in steradiani. L'angolo solido totale misura 4 volte pi greco steradiani e si tratta di sapere quant'è l'angolo solido sotto cui è

visto un metro quadro sulla Terra dal Sole. Questo si calcola facendo 1 diviso la distanza Terra-Sole, in metri, al quadrato. Infine per il flusso di neutrini si prende il numero di neutrini prodotti nel Sole al secondo e si divide per questo valore tra parentesi: (4 volte pi greco per il quadrato della distanza Terra-Sole, in metri). Il calcolo viene circa 6.35 centinaia di migliaia di miliardi di neutrini al secondo al metro quadro. Questo è il flusso di neutrini dal Sole sulla Terra prodotti dalla reazione detta sopra. Ci sono anche altre reazioni che danno origine a neutrini e per ciascuna si può calcolare il flusso atteso, alcuni esempi sono la cattura di un elettrone

da parte del berillio-7 formando litio-7 e un neutrino, oppure il decadimento del boro-8 in berillio-8, un positrone e un neutrino. Il numero che segue il nome del nucleo atomico ne stabilisce l'isotopo corrispondente. Infatti un nucleo di un atomo è formato da protoni e neutroni (detti nucleoni) e atomi con lo stesso numero di protoni, ma diverso numero di neutroni hanno lo stesso nome ma sono detti isotopi. Il numero indica quanti protoni e neutroni ci sono (la loro somma, detto anche numero di massa). Sulla Terra sono stati fatti alcuni esperimenti (il primo iniziato verso la fine degli anni sessanta del novecento) in cui si è

cercato di misurare il flusso di neutrini elettronici provenienti dal Sole e tutti i dati raccolti (anche in trent'anni di misure) erano in contrasto con il calcolo teorico del flusso atteso. I neutrini elettronici che arrivavano erano di meno di quelli previsti, tra un terzo a due terzi di quelli attesi. Questa discrepanza diede origine al cosiddetto “problema dei neutrini solari” perché non si riusciva a trovare una spiegazione plausibile per questo fenomeno. Nel frattempo la stima teorica del flusso di neutrini fu confermata da altre osservazioni indipendenti effettuate sul Sole, tuttavia anche gli esperimenti sulla Terra venivano confermati. Si ipotizzò

allora che i neutrini potessero cambiare tipologia durante il tragitto Terra-Sole, cioè i neutrini elettronici prodotti potevano oscillare tra i tre tipi di neutrini (elettronici, muonici e tauonici) e dunque parte dei neutrini elettronici una volta arrivati sulla Terra sarebbero stati di tipo, ad esempio, muonico e non rivelati dagli esperimenti che erano sensibili solo (o molto di più) a quelli elettronici. Questa ipotesi prende il nome di “oscillazione dei neutrini” e può essere spiegata dalla fisica, matematicamente, grazie alla teoria quantistica solo nel caso in cui la massa dei neutrini sia non nulla. In

realtà si è sempre ipotizzato che la massa dei neutrini fosse proprio zero, ma se “oscillano” tra i vari stati questo non può essere vero. Si allestì un nuovo tipo di esperimento sensibile a tutti e tre i tipi di neutrino e finalmente, verso i primi anni del duemila si scoprì che sommando i neutrini di tutti i tipi provenienti dal Sole si otteneva proprio il numero atteso teoricamente. Le oscillazioni di neutrini sono state dimostrate e hanno fruttato il premio Nobel assegnato nel 2015. Inoltre la teoria delle oscillazioni, scritta in chiave matematica, mostra che la probabilità di trovare neutrini di un certo tipo dopo un certo tragitto dipende dalla distanza, dalla loro

energia e dalla loro differenza di massa al quadrato, inoltre il comportamento è diverso a seconda che viaggino nel vuoto o attraverso un mezzo denso.

## NOTE

I neutrini e il Sole, breve lezione di fisica, I edizione

Autore: Dott. Alessio Mangoni, fisico teorico

[www.alessiomangoni.it](http://www.alessiomangoni.it)

collana di brevi lezioni di fisica per

la divulgazione scientifica:

- La teoria dei quanti, breve lezione di fisica
- La relatività del tempo, breve lezione di fisica
- Gli atomi e la materia, breve lezione di fisica
- Le particelle della natura, breve lezione di fisica
- I neutrini e il sole, breve lezione di fisica

©2016 Alessio Mangoni. Tutti i diritti riservati.

