

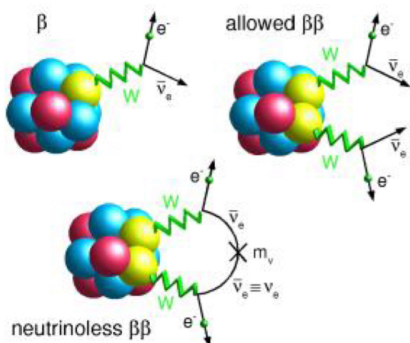
Lezione 29/05/2025

\section{29 maggio 2025}

Torniamo alla questione neutrino di Dirac e neutrino di Majorana e come possiamo distinguerli.

\subsection{esperimento concettuale e doppio decadimento $\beta\beta$ }.

Il decadimento $\beta\beta$ è un decadimento con emissione di un neutrino, i doppi decadimenti $\beta\beta$ dovrebbero emettere due neutrini si scrive come $\beta\beta_0$ perché nel complesso non viene emesso il neutrino, si ha infatti una emissione ed un riassorbimento. In realtà ancora oggi sono in corso esperimenti per verificare la reale esistenza di questo tipo di decadimenti.



$$\begin{equation} \begin{aligned} & \text{\tiny{p}}\text{\tiny{q}}\text{\tiny{t}}\text{\tiny{y}}\{A,Z\} \rightarrow \text{\tiny{p}}\text{\tiny{q}}\text{\tiny{t}}\text{\tiny{y}}\{A,Z+2\} + e^- + e^- \\ & \end{aligned} \end{equation}$$

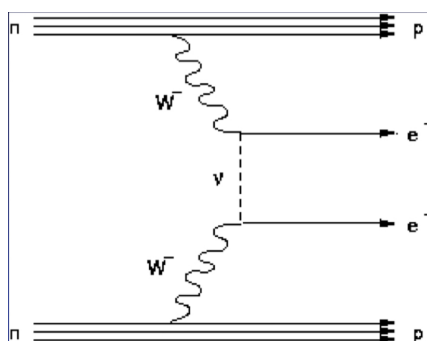
Immaginando un decadimento β si ha un'emissione di un elettrone, per la teoria delle interazioni deboli, si ha anche l'emissione simulata di un'anti-neutrino elettronico.

Un doppio decadimento $\beta\beta$ permesso dovrebbe essere un decadimento con 2 elettroni e 2 neutrini.

Ma può anche accadere che in un doppio decadimento $\beta\beta$ non venga emesso nessun neutrino, o meglio nessun neutrino viene rivelato. Questo accade poichè avviene un'annullamento dei neutrini stessi e dunque nello stato finale vengono rilevati solo due elettroni. Questo tipo di decadimento $\beta\beta_0$ si ipotizza sia possibile nel caso in cui l'anti-neutrino elettronico coincida con il neutrino stesso che deve presentare massa non nulla.

Questo processo ci permette di distinguere tra neutrini di Dirac e neutrini di Majorana. Infatti il doppio decadimento $\beta\beta_0$ è impossibile per i neutrini di Dirac, si avrebbe una violazione del numero leptonico poichè allo stato iniziale e a quello finale non si avrebbe lo stesso numero di leptoni; ma risulta permesso se i neutrini sono di Majorana in cui la particella coincide con la propria anti-particella e di massa non nulla. In ogni caso, sia con emissione sia con assenza di neutrini allo stato finale, si tratta di un processo del secondo ordine, cioè probabilisticamente sfavorito ed è possibile quando il decadimento β al primo ordine è energeticamente proibito.

Nel decadimento di una sostanza del tipo $A, Z+2$ vi è un delta di energia e allo stato finale possiamo misurare la somma delle energie degli elettroni.



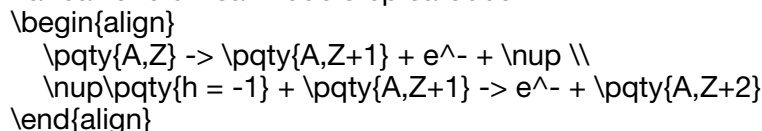
Immaginiamo neutrone e protone costituiti da particelle elementari, quark up e down. La transizione avviene e nel decadimento $\beta\beta$ un neutrone si trasforma in un protone emettendo un'elettrone tramite il propagatore w . Si ha un processo a due step con emissione e riassorbimento di un neutrino virtuale (ipotizziamo che avvenga questo tipo di processo anche se nello stato finale non troviamo neutrini)

Questo tipo di processo si potrebbe verificare solo se interpretassimo il neutrino come neutrino di Majorana. Ad oggi non sappiamo distinguere tra neutrini di Majorana e neutrini di Dirac, ma sono

in corso degli esperimenti per cercare di distinguere i due neutrini. Esiste però una teoria per quanto riguarda il neutrino di Majorana e dell'esistenza del decadimento $\beta\beta$. La teoria in questione è quella di Majorana stesso che non solo ipotizzò l'esistenza di questo neutrino ma ipotizzò anche la sua teoria, riconosciuta ancora oggi, venendo riconosciuto come uno dei più grandi giovani fisici di sempre. Nella sua interpretazione del neutrino gli si attribuisce una massa non nulla, anche Fermi in realtà aveva ipotizzato che il neutrino avesse una massa molto piccola, mentre le precedenti teorie attribuivano al neutrino massa nulla (affermazione avvalorata dal modello standard delle particelle elementari che attribuisce artificialmente massa nulla al neutrino). Inizialmente si dava maggiore credito alla teoria per cui il neutrino avesse massa nulla, ma tra il 2000-2005 fu confermato il fenomeno delle oscillazioni da diversi esperimenti (scoperto in contemporanea dalla collaborazione Super-Kamiokande, che fece esperimenti in Giappone, e dalla collaborazione MACRO italo-statunitense, che fece esperimenti sul gran sasso, ma solo la prima ebbe il riconoscimento per la scoperta poiché i secondi non pubblicarono nulla credendo si trattasse di un errore) che erano possibili sono ammettendo massa non nulla al neutrino, valorando la teoria di Majorana.

La transizione può essere rappresentata come in figura in cui si ha una prima emissione β con emissione di neutrino che però viene riassorbito (linea tratteggiata in figura), nella fase finale del decadimento troviamo dunque due elettroni. Il processo è molto raro e si ipotizzano delle condizioni discordanti rispetto alle credenze del periodo in cui fu proposta l'idea: massa del neutrino diversa da zero, violazione del numero leptonico e spin-flip del neutrino stesso.

La reazione divisa in due step sarebbe:



L'ampiezza di probabilità per produrre un neutrino nella prima transizione è proporzionale a $m_{\bar{\nu}} / E_{\bar{\nu}}$. L'ampiezza di probabilità per $\beta\beta$ è dunque proporzionale al quadrato della massa del neutrino $m_{\bar{\nu}}$. Se la massa del neutrino fosse nulla il decadimento $\beta\beta$ senza emissione di neutrini non esisterebbe.

L'Italia fu la prima ad avere effettuato degli esperimenti di questo tipo. Il fisico Ettore Fiorini & co si occupano dell'esperimento CUORE. È un enorme apparato che lavora sotto terra in presenza di silenzio cosmico (quindi bloccando tutta la radiazione cosmica), poiché si tratta di un decadimento raro le misure vanno fatte in condizioni particolari dell'ambiente circostante, devono essere super controllate poiché si tratta di decadimenti rarissimi. L'apparato è grande quanto un palazzo di quattro piani e prima è stata testata la realizzabilità dell'esperimento con un prototipo, chiamato CUORICINO, che ha dimostrato l'attendibilità del progetto. Servono fisici delle particelle e delle astroparticelle e i fenomeni vengono studiati a temperature prossime a 0 K ed utilizzando sostanze radioattive pure. Il che non è banale poiché a basse temperature accadono cose particolari (le colle, i cavi e diversi apparecchi elettronici non funzionano a temperature così basse).

Già nel 1967 Fiorini si occupò di esperimenti per dimostrare l'esistenza del neutrino di Majorana. In un primo esperimento faceva decadere germanio in selenio per verificare se lo stato finale producesse selenio e due elettroni senza la presenza di neutrini o se producesse neutrini. Il primo esperimento però non diede nessun segnale ma si ottennero dei limiti superiori alla vita media del Germanio ed alla massa del neutrino. Ad esempio anche l'esperimento MACRO, che si occupava trovare monopoli magnetici, non riuscì ma permise di dare un limite superiore a quanti se ne possono vedere (sicuramente meno di quelli che lo strumento può rivelare, anche se dovessero essere 0). In seguito Maier (1994) e Heidelberg-Mosca (1998) diedero una nuova stima migliorata. L'esperimento NEMO-3 nei laboratori sotterranei del Frejus (2003) diede risultati molto migliori ma anche in questo caso non fu confermata l'esistenza del decadimento $\beta\beta$ ma ci ha fornito degli ottimi risultati sul tempo di vita media del decadimento (10^{23} anni) e un valore medio della massa del neutrino. INSERIRE FORMULE SLIDE 28.

Da questi esperimenti di misure dirette è possibile iniziare a costruire una tabella relativa ai limiti superiori della massa del neutrino FOTO SLIDE 30 CHE DEVE RIMANDARE SISTEMATA

Possiamo classificare le sorgenti di neutrino in sorgenti naturali e sorgenti artificiali.

I neutrini prodotti da sorgenti naturali si dividono in:

-neutrini terrestri: prodotti dalla terra (per questo chiamati anche geo-neutrini). Inizialmente si ipotizzava l'esistenza di neutrini rilevabili prodotti dal nucleo della Terra ma sono stati scoperti solo recentemente. Il primo esperimento ad aver fornito la prima misura di questi neutrini è l'esperimento Borexino (2000 e le misure sono state pubblicate un paio di anni fa). L'apparato, che si trova nel Gran Sasso, è una sfera gigantesca piena di scintillatore liquido. La terra è costituita da un nucleo ferroso a temperature e pressione elevatissime che è costituito da sostanze radioattive, come uranio, plutonio e torio, che decadono con decadimenti β producendo neutrini dotati di una sezione d'urto molto bassa che quindi attraversano tutta la Terra permettendo di essere rivelati. I neutrini con sé portano moltissime informazioni anche sulla struttura della terra permettendoci anche di prevedere l'evoluzione della terra negli anni. Un altro esperimento molto importante è l'esperimento JUNO, anch'esso costituito da un'enorme sfera di scintillatore liquido tappezzata di fotomoltiplicatori posizionato all'interno di una caverna in Cina e circondato da una decina di reattori nucleari. L'obiettivo principale di JUNO è quello di misurare neutrini prodotti dai reattori circostanti ma riesce anche a misurare neutrini atmosferici, neutrini dovuti ad esplosioni di supernove e neutrini geomagnetici.

-neutrini atmosferici: sono i neutrini prodotti nelle interazioni nell'atmosfera terrestre durante lo sviluppo delle estensive air showers. Protoni e particelle cariche che giungono da sorgenti galattiche ed extra galattiche se particolarmente energetiche ($>10^{17}$ eV fino a 10^{21} eV) impattano negli strati alti dell'atmosfera (30-35 km) producendo interazioni stocastiche che spaccano le molecole di azoto ed ossigeno presenti in atmosfera producendo a valanga uno sciame di particelle secondarie, cioè si produce una grandissima quantità di neutrini muonici ed elettronici. Il fenomeno poi si arresta quando l'energia di ogni singola particella decresce al di sotto della soglia necessaria ad innescare le successive interazioni. Il numero di particelle nello sciame diminuisce senza mai azzerarsi completamente ed una componente di particelle, detta penetrante, riesce ad arrivare fino a terra o anche sotto terra. In particolare i neutrini atmosferici riescono ad attraversare la Terra ed esistono diversi esperimenti che permettono di rivelarli. Questi neutrini non ci danno informazioni sull'origine dell'universo ma ci permettono di studiare le interazioni dei neutrini stessi (sezione d'urto, lunghezza di interazione, oscillazioni).

-neutrini solari: sono i neutrini prodotti dal Sole. Il sole si mantiene in vita grazie a reazioni termonucleari globali del ciclo PP e CNO. La rivelazione di neutrini solari ha costituito il primo mezzo per studiare le caratteristiche del Sole ed in particolare le varie reazioni nucleari che avvengono al suo interno. La rivelazione dei neutrini solari ha aperto una diatriba tra fisici solari e fisici del neutrino poiché il flusso atteso dei neutrini, prodotti nelle catene PP e CNO e governato dal modello standard del Sole, era sempre maggiore del flusso rivelato dagli esperimenti a terra. Con il tempo si capì che la differenza tra il risultato atteso e quello misurato era dovuta al fatto che i neutrini elettronici prodotti nelle catene PP e CNO nell'attraversare il mezzo, estremamente denso, del Sole e traversando poi tutto il diametro della Terra si trasformano in altri tipi di neutrini per cui a terra non vediamo il flusso originario emesso. Per studiare le reazioni termonucleari globali dobbiamo considerare esperimenti che ci rivelino i neutrini stessi. L'ultimo grande esperimento è l'esperimento Borexino, che ci ha dato le misure più precise sul ciclo PP e sul ciclo CNO.

-neutrini da esplosione di supernova: dal punto di vista particellare le supernove sono sorgenti che accelerano raggi cosmici (protoni e nuclei fino al ferro ad energie molto elevate) e producono dei neutrini con determinate caratteristiche. Misurare i neutrini provenienti da supernove ci consente una misura diretta della massa del neutrino, di capire alcuni meccanismi particolari dell'esplosione della stella stessa e ci consentono di avere una sorgente di neutrini naturali nota. Il più grande esperimento di riferimento è l'esperimento Large Volume Detector, nei laboratori del Gran Sasso che ha operato per circa vent'anni.

-neutrini cosmogenici: sono i neutrini originati dall'interazione tra raggi cosmici e altra materia intergalattica (non l'interazione con l'atmosfera) e si tratta dei neutrini a più elevate energie conosciute. È possibile che provengano dai nuclei galattici attivi (AGN). Sono stati rivelati da Ice Cube e km³net.

-neutrini primordiali dal BIG Bang: si ipotizza l'esistenza di un fondo di neutrini primordiali dal Big Bang, sarebbero come il fondo cosmico a microonde, che dovrebbero permeare l'universo. Li cerchiamo ma non abbiamo conferma poiché per rivelarli servono tecniche molto raffinate ed esperimenti molto diversi da quelli fatti finora.

I neutrini prodotti da sorgenti artificiali sono invece prodotti da laboratori terrestri e sono:

- neutrini da reattore nucleare: si conosce lo spettro di reazione dei neutrini del reattore. Gli esperimenti consistono in un rivelatore principale posto ad una certa distanza dal reattore nucleare (<1km) e un rivelatore secondario posto a pochi metri dal reattore stesso in modo da monitorare il flusso dei neutrini prodotto.
- neutrini da acceleratore: analogo a quelli prima.

I neutrini terrestri

Il pianeta Terra ha un nucleo ferroso interno caldo. Tutta la terra è rimasta calda per 5 miliardi di anni poiché al suo interno avvengono continue reazioni di decadimento radioattivo di vari nuclei (uranio e torio che sono sorgenti β). Ogni decadimento radioattivo produce un po' di energia che si dissipa in calore; si accumula all'interno e si sposta verso l'esterno solo attraverso un lento processo della conduzione del calore per cui il centro della terra è estremamente caldo.

I neutrini riescono ad attraversare il mezzo estremamente denso, nonostante la bassa sezione d'urto, e attraversano i vari strati della Terra. Due rivelatori, uno in Giappone e uno in Italia (Borexino), sono in grado di misurare questo flusso di neutrini e confermare o smentire il modello geofisico. Le notizie più recenti sono del rivelatore Borexino che pochi anni ci ha permesso di avere importanti informazioni sui geo-neutrini.

Neutrini Atmosferici

Sappiamo che la Terra è costantemente bombardata da raggi cosmici: nuclei di H, He o più pesanti che colpiscono l'atmosfera causando una pioggia di particelle secondarie. Nell'interazione di questi raggi con l'atmosfera vengono prodotti neutrini muonici e neutrini elettronici che, in base al loro livello di energia, attraversano i rivelatori o l'intero globo terrestre.

Neutrini solari

Bethe nel 1938 propose uno schema di reazioni nucleari per il sole, non era infatti ancora chiaro che l'energia del sole derivasse da decadimenti radioattivi. Bethe propose come ciclo fondamentale il ciclo PP, che sintetizza la fusione di due protoni (interazioni deboli), e il ciclo CNO che però è meno efficiente del ciclo PP. Durante il ciclo PP, quattro protoni si trasformano in 4He con una catena di trasformazioni mediate dalla forza debole e che quindi comportano l'emissione di neutrini: ogni ciclo produce energia pari alla differenza fra la massa di un nucleo di 4He e quei quattro protoni FORMULA GIALLA SLIDE 37

FOTO SLIDE 38

Compagno elementi come Elio, Berillio, Boro che sono molto importanti da un punto di vista chimico ma anche dal punto di vista dell'astrofisica-nucleare.

Esperimenti come Borexino ci forniscono misure molto precise della reazione PP e per la prima volta ha permesso di pubblicare risultati molto importanti anche riguardo i decadimenti nel berillio, boro e del litio.

Noi dunque che per ogni ciclo PP si ha l'emissione di due neutrini elettronici

IMMAGINE VERDE SLIDE 38 (flusso di neutrini in funzione dell'energia)

Quando parliamo della rivelazione dei neutrini solari dobbiamo però considerare il problema del deficit dei neutrini. Il Sole emette un'enorme quantità di neutrini, circa 6×10^{10} neutrini/s per cm^2 , il cui flusso è stato misurato con precisione a diverse energie da vari esperimenti. Il primo esperimento che ha cercato di rivelare neutrini solari avvenne alla fine degli anni cinquanta, l'esperimento Homestake (dal nome della miniera abbandonata utilizzata come sito in cui è stato posizionato il rivelatore), ma in realtà l'esperimento a cui si fa riferimento è Gallex. Ma ogni esperimento misurava un flusso di neutrini che era pari a circa la metà del flusso atteso dal metodo di Bahcall, nacque così il problema del deficit dei neutrini solari. Oggi sappiamo che questa discrepanza non è legata alla fisica del Sole, ed è dunque confermato il modello solare di Bahcall, ma è dovuta alla metamorfosi che i neutrini subiscono attraversando i densi strati del Sole e sia attraversando lo spazio e la distanza tra il Sole e la Terra.

Neutrini da esplosione di supernove

Una supernova è un fenomeno esplosivo con cui stelle pesanti concludono la loro vita. Nel 1987 una supernova esplose nella piccola nube di Magellano, una piccola galassia satellite della nostra distante circa 10.000 a.l. ($9,46 \times 10^{17}$ km). In quello stesso momento tre rivelatori neutrini solari stavano prendendo dati: due di essi, IMB e Kamiokande, distanti tra loro più di 10.000 km, rivelarono delle anomalie nello stesso lasso temporale. Si cominciò dunque a pensare che la sorgente di quei neutrini non fosse il sole ma qualcos'altro. La comunità astronomica aveva rivelato l'esplosione della supernova e dunque si capì che i due rivelatori avevano infatti rivelato i

neutrini dovuti all'esplosione della supernova, circa 11 neutrini in 10 secondi. Fu dunque un successo clamoroso: il modello teorico delle supernove, elaborato solo sulla base di considerazioni teoriche e sulle conoscenze di fisica nucleare sviluppati dai laboratori terrestri, fu pienamente confermato.

SLIDE 41

Neutrini cosmologici

Con neutrini cosmologici si fa riferimento a quelli che si pensa siano i neutrini prodotti nella prima fase del Big Bang. Secondo il modello cosmologico del Big Bang i neutrini sarebbero stati prodotti nella prima fase calda di nascita dell'Universo (circa 0.7s) e analogamente al Cosmic Microwave Background è prevista l'esistenza di un fondo di neutrini e anti neutrini o radiazione fossile di neutrini. Se riuscissimo a rivelare effettivamente questi neutrini potremmo conoscere l'origine dell'universo. Si ipotizza che i neutrini sopravvissuti fino ad oggi abbiano perso parte della loro energia (energia bassissima che rende il processo di rivelazione molto complesso e sofisticato) nel tempo, si propagano in tutte le direzioni con una densità stimata di circa 300 neutrini per cm^3 . Ad oggi è impossibile rivelare questi neutrini anche se esistono degli esperimenti che cercano di rivelarli.

Neutrini cosmici

Sono i neutrini ultra high energy prodotti per interazione dei raggi cosmici primari nel loro percorso nell'universo da sorgenti astrofisiche (particolari poiché si ipotizza che al loro interno si trovino dei buchi neri). L'esperimento Auger ha confermato nel 2007 l'esistenza di questi protoni con energie dell'ordine di 10^{20} eV provenienti da nuclei galattici attivi. MANCA LA SLIDE

Neutrini da reattori nucleari

Un reattore nucleare si autoalimenta grazie ad un materiale radioattivo pesante, generalmente uranio.