

Genesi del concetto di *Neutrino*

(come si sono formati i moderni schemi teorici)

Francesco VISSANI*

INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso

Sommario

L'idea di neutrino sta per compiere un secolo. In questa relazione, rievocheremo le sue basi che furono gettate negli anni '30, discutendo le successive modifiche ed evoluzioni che hanno dato forma al pensiero moderno, sottolineando gli aspetti teorici e filosofici. In questo viaggio nella storia, ci soffermeremo sulle seguenti tappe: 1) Inizieremo con la proposta di Pauli (1930), commentando il suo significato e sottolineando il contesto in cui è nata - quello delle prime teorie sul nucleo atomico. 2) Spiegheremo le grandi potenzialità e i limiti della teoria delle interazioni di Enrico Fermi (1933). 3) Presenteremo le idee sui fermioni di Majorana (1937) mostrando che esse sono all'origine della moderna trattazione dei fermioni e in particolare dei neutrini. 4) Offriremo un sommario dei progressi del successivo ventennio: la scoperta delle famiglie di fermioni; la struttura chirale (V-A) delle interazioni deboli; la riproposizione dell'ipotesi di Weyl (1929). 5) Ricorderemo poi il metodo di successo di Pontecorvo e Sakata, che ha consentito di misurare le masse dei neutrini. 6) Infine, parleremo degli altri modi per sondarne le masse, concludendo con alcuni scorci della futura scienza dei neutrini.

Introduzione

Questo testo è basato su una lezione dedicata agli studenti e tenuta in occasione del convegno *Neutrino 2024*. Il carattere della lezione è introduttivo, e l'enfasi è posta sui fondamenti teorici del concetto di "neutrino". La storia del neutrino e della sua massa è molto interessante, ma non è facile raccontarla con una certa completezza. Infatti, alcuni tentativi di semplificarla, magari facendola rientrare in qualche schema preordinato (ad esempio empirico, idealistico, sociologico) la impoveriscono e rendono difficile apprezzarne o anche solo comprenderne i progressi. In questo contributo cercheremo di raccontarla dandoci dei precisi limiti:

- ci concentreremo sui contributi che hanno messo a fuoco il concetto di massa del neutrino, che riguardano principalmente i decenni 1930-1970;
- daremo una certa enfasi al contributo della scuola italiana avviata da Enrico Fermi, ma cercando di evitare gravi errori di prospettiva;
- evidenzieremo il modo in cui si sono formati gli schemi concettuali oggi adottati, mostrando le loro peculiarità e certe idiosincrasie iniziali;
- arriveremo ad apprezzare quali sono i fondamenti dei moderni modelli teorici per apprezzare come si sono intrecciati con certi progressi sperimentali.

*Email: vissani@lngs.infn.it

Andando nei dettagli, esamineremo alcuni episodi cruciali, evidenziando i principali protagonisti:

1. Inizio anni trenta: evoluzione dei modelli nucleari. Il neutrino di Pauli e il suo significato (1930).
2. Fermi 1933-34: La prima teoria dei raggi β e dei neutrini. Basi concettuali e formali, implicazioni. Processo di cattura degli elettroni.
3. Majorana 1937: Comprensione moderna dei fermioni e nuovo concetto di neutrino.
4. Riassunto dei progressi degli anni 40-50 che hanno portato alla visione moderna dei neutrini e delle interazioni deboli.
5. L'approccio di successo di Pontecorvo e Sakata alla massa dei neutrini.
6. Lo stato dell'arte presentato in prospettiva, argomentando che una parte importante della storia della massa dei neutrini non è ancora stata scritta.

Prima di procedere, consideriamo una domanda molto franca: Perché parlarne? Dopo tutto, gli argomenti originali non sono sempre quelli definitivi. Tuttavia, va riconosciuto che essi hanno avuto un potere evocativo che ha orientato e permesso le discussioni successive. Quando gli argomenti originali vengono dimenticati, vengono sostituiti da miti la cui narrazione prepara i punti finali desiderati; questo crea un apparente senso di stabilità, ma la creatività viene svilita e il pensiero critico inibito. Per questo motivo ritengo che sia benefico, utile e forse persino importante cercare di capire le cose come le hanno capite i grandi scienziati del passato.

1 La strada verso la modellizzazione del nucleo e la nascita del neutrino

Una questione che tenne impegnati i fisici per diverso tempo riguardava la comprensione del nucleo dell'atomo.

1.1 Il modello elettrone-protone del nucleo e la sua crisi

L'osservazione dell'emissione di raggi¹ α e β , e la loro elevata energia, suggerirono l'idea che si trattasse di frammenti nucleari (van den Broek). Per questo, il primo modello stabile del nucleo (presentato con chiarezza da Rutherford 1920) sosteneva che esso consistesse in un conglomerato di elettroni e protoni, i due tipi di particelle di materia allora conosciuti. Anche se ciò può sorprendere un lettore moderno, il modello del nucleo 'elettrone-protone' sarebbe durato per due decenni, almeno fino alla scoperta del neutrone (1932) e anche un po' più tardi. Nel corso degli anni, questo tipo di modello sollevò diverse questioni, in particolare:

- Il modello elettrone-protone non può riprodurre lo spettro continuo dei raggi β , osservato per la prima volta da Chadwick nel 1914 e confermato definitivamente alla fine degli anni '20.

¹Si noti che i nomi α, β, γ risalgono al periodo in cui la loro natura era sconosciuta. In particolare, il termine raggi β si riferisce all'emissione degli ipotetici elettroni alloggiati nel nucleo, quelli del modello 'elettrone-protone' commentato qui di seguito.

- Nel 1928 emerge un ulteriore problema: lo spin del nucleo di azoto è intero, in contraddizione con la teoria (con il modello) che pretenderebbe sia semi-intero, essendo costituito da 14 protoni e 7 elettroni.

La via d'uscita più popolare al primo problema, autorevolmente sostenuta da Bohr, era che l'energia fosse violata nel processo di emissione dei raggi β . Si tenga presente che tutti i fisici erano stati sorpresi dagli sviluppi della teoria dell'atomo ed erano dunque pronti a sorprese, anche radicali; lo stesso Fermi abbandonò del tutto l'idea dell'emissione di elettroni nucleari solo alla fine del 1933.

1.2 Il modello di Pauli del nucleo

Nel 1930, Pauli rispose con un modello un po' diverso del nucleo, che spiegava altrettanto bene le due anomalie sperimentali appena ricordate, senza mettere a repentaglio la conservazione dell'energia. Nel suo modello, il nucleo conteneva elettroni, protoni e anche neutrini. Quest'ultima particella aveva proprio il ruolo di sottrarre energia senza essere rilevata nel processo di decadimento β .

Due anni dopo, Chadwick scoprì il neutrone. Subito dopo Iwanenko, Heisenberg e Majorana proposero un nuovo modello di nucleo (quello che usiamo oggi), questa volta composto da protoni e neutroni. Esso risolse molte questioni, in particolare quelle relative al confinamento di particelle leggere precedentemente ipotizzate, come l'elettrone o lo stesso neutrino. Nel frattempo, infatti, si erano affermate le idee della meccanica quantistica, così come la conosciamo, e i fisici capirono che esse erano applicabili anche ai nuclei.

Riassumiamo i risultati di questa prima fase di discussione in tre punti chiave.

- Negli anni '30 molti fisici si concentrarono sulla comprensione del nucleo e cominciarono a emergere i limiti del modello elettrone-protone.
- A ben vedere, il modello di Pauli degli anni '30 non è altro che una variante di questo tipo di modello: fu in questo contesto che venne proposto per la prima volta il neutrino.
- Il successivo (e attuale) modello protone-neutrone spiegava molte cose, ma riapriva la questione del decadimento β . Questo portò diverse persone a chiedersi: forse i neutrini sono comunque necessari?
- Va notato che, in tutti questi modelli, le particelle di materia (in particolare i neutrini) sono state assunte come eterne, una caratteristica tipica della meccanica quantistica non relativistica.

2 La prima teoria della emissione dei raggi β e dei neutrini

Come abbiamo appena visto, il neutrino di Pauli nasce nel contesto della modellizzazione del nucleo atomico. Invece, la prima teoria delle interazioni che portano alla emissione dei 'raggi β ', associata con una prima evoluzione del concetto di neutrino, nasce invece nel contesto della teoria quantistica relativistica.

Volendo essere ancora più precisi, si deve inquadrare la teoria di Fermi nel contesto matematico della teoria di Dirac dell'elettrone. Il formalismo risultante consente grandissimi progressi teorici, tuttavia *non è equivalente* al moderno schema concettuale per diverse ragioni che andiamo ad esaminare.

2.1 L'era della assimilazione di particelle ed onde ed il neutrino

L'inizio del 900, come è noto, è il periodo in cui viene fondata la meccanica quantistica. Qui ci interessa concentrarci su un parallelo filone di questa storia, che *non* è quello che di solito viene messo in evidenza, ovvero quello relativo alla teoria dell'atomo, bensì quello che si riallaccia più direttamente alla teoria di Maxwell. Vediamo bene quali sono le tappe rilevanti:

- Nel 1905, Einstein introduce l'idea del quanto di luce. Una caratteristica importante della sua teoria (accettata generalmente solo dopo le misure di Compton del 1923) è che i quanti di luce possono essere creati o distrutti - non sono eterni.
- Louis de Broglie nel 1924 propone l'idea che gli elettroni possano essere descritti come onde, proprio come i quanti di luce; come è noto, Schrödinger darà grande sviluppo a questa idea, elaborando la teoria ondulatoria degli elettroni.
- Nel 1930, Ambarzumian & Iwanenko suggeriscono di modellare l'emissione di raggi β secondo le linee concettuali di de Broglie, ovvero pensando all'emissione di onde di materia.
- Francis Perrin nel 1933 aggiunge i neutrini in un simile schema di ragionamento, che pure verrebbero creati nella trasformazione del nucleo; inoltre discute la loro massa.

Gli ultimi due contributi, che menzionano il lavoro di de Broglie, non si traducono tuttavia in uno schema di calcolo. Un tale schema viene messo a punto alla fine del 1933 per merito di Fermi. Il suo lavoro (ed i successivi del 1934, appena più elaborati) viene immediatamente riconosciuto come una svolta ed è ancora oggi molto citato; tuttavia, la sua lettura comporta degli ostacoli concettuali che conviene considerare attentamente prima di procedere oltre.

2.2 Gli antielettroni di Dirac ed i positroni di Anderson

Per andare alla radice della difficoltà, conviene capire a fondo lo schema di ragionamento proposto da Dirac per trattare l'elettrone relativistico. Come è noto nel 1928 egli trovò una nuova equazione d'onda che per la prima volta spiegava lo spin degli elettroni, prevedendo 1) la sua esistenza 2) il valore osservato dell'accoppiamento tra spin e campo magnetico (fattore di Landé).

Tuttavia, l'equazione di Dirac prevedeva anche l'esistenza di stati con energie negative; nel caso di particelle libere, questi coprivano tutti i possibili valori tranne quelli $-mc^2 < E < mc^2$. Una interpretazione troppo diretta avrebbe comportato conseguenze inaccettabili: gli elettroni atomici non avrebbero avuto alcuno stato stabile, ma come nella teoria classica dell'elettrone, sarebbero stati obbligati ad una disastrosa discesa verso energie sempre più basse.

Era chiaro che questo non succedeva. Dirac propose allora una strana via d'uscita, che si basava su un principio che si era scoperto valere per gli elettroni atomici ed era già stato applicato alla teoria dei metalli: il principio di esclusione di Pauli. Dirac postulò che *tutti* gli stati di elettrone con energia negativa fossero già occupati, risultando dunque inaccessibili ad ulteriori elettroni.

Si trattava dell'ipotesi del mare di Dirac, una entità onnipresente della quale nessuno poteva avere esperienza se non in condizioni molto particolari. Il fastidio dei fisici verso questa ipotesi ci viene ricordato p.e. da Gamow, che nel suo libro *'Trent'anni che scossero la fisica'* ritrae Dirac a faccia a faccia con una creatura del mare - ovvero, un pesce.

Manifestazioni osservabili erano possibili, se uno di questi elettroni riceveva una grande quantità di energia e si formava una lacuna del sistema di elettroni di energia negativa - un buco - che poteva venir pensata come una particella di carica opposta - un anti-elettrone, nella terminologia di Dirac.

La cosiddetta teoria dei buchi era evidentemente basata sull'ipotesi dell'esistenza del mare di Dirac. La proposta di Dirac era fondata su una sorta di riproposizione dell'idea dell' 'etere'.

Per vari anni Dirac non convinse quasi nessuno, a parte forse proprio Fermi, per il quale ogni modello (o strumento) che funzionava meritava di essere considerato ed eventualmente adoperato. Ma poi nel 1932 fu osservata una particella che sembrava una copia di un elettrone con carica opposta. Lo scopritore, Anderson, la chiamò positrone. Dirac propose che questa coincidesse con il suo costrutto teorico, l'anti-elettrone (o buco del mare di Dirac) e ci fu un rapido riallineamento generale: il disaccordo divenne disagio, il disagio si intrecciò con la curiosità, ed infine anche la curiosità venne superata dall'abitudine. La comunità scientifica aveva accettato il mare di Dirac e la sua teoria dei buchi. Fermi, che non aveva mai avuto troppe remore, si trovava in posizione vantaggiosa.

2.3 Trattamento di Fermi di elettroni e neutrini

Per ragionare del decadimento β Enrico Fermi propone un'hamiltoniana, che descrive l'emissione di elettroni e di neutrini ultra-relativistici nelle trasformazione dei nucleoni. Vediamo come funziona. Per prima cosa, Fermi adotta il formalismo non-relativistico di Heisenberg, nel quale neutrone e protone sono semplicemente due stati diversi della stessa particella; in questo modo si mette il cuore in pace per la parte che riguarda il nucleo (anche se resta il problema pratico di determinare le complesse funzioni d'onda di interesse). A questo punto, considera il formalismo di Jordan-Klein (e Wigner e Fock) introducendo un operatore 'di seconda quantizzazione' che descrive la porzione di transizione², nella quale il numero di elettroni cambia esattamente di una unità, e che scrive come segue

$$\psi(x) = \sum_s \mathbf{a}_s \psi_s(x)$$

La somma si estende su tutti gli stati, sia quelli con energia positiva che quelli con energia negativa. Le funzioni d'onda (relativistiche) $\psi_s(x)$ appaiono assieme ad un operatore, che descrive l'essenza del cambiamento del numero di elettroni, avendo come unico elemento di matrice diverso da zero il seguente

$$\langle s | \mathbf{a}_s | 0 \rangle = 1$$

Pertanto, l'operatore \mathbf{a}_s viene detto *operatore di annichilazione* (o di distruzione) dell'elettrone nello stato s . Il suo hermitiano coniugato \mathbf{a}_s^\dagger descrive invece un *operatore di creazione*. Come si evita che a causa di una transizione si acceda agli stati di energia negativa? Si assume l'esistenza del mare di Dirac, gli stati ad energia negativa sono occupati e dunque, a causa del principio di esclusione, inaccessibili. In altre parole, Fermi accetta per buona la proposta di Dirac.

Usando gli operatori di seconda quantizzazione, Fermi costruisce una hamiltoniana (una corrente) che descrive la creazione di elettroni e di neutrini nel decadimento β e che permette una valutazione quantitativa della probabilità di trasformazione. Il trucco che lui realizza, e che lascia senza parole i colleghi, è l'uso di un formalismo nel quale singole particelle sono create. Naturalmente, la carica elettrica totale non viene modificata, e possiamo offrire un sommario di queste considerazioni (oggi ovvie, all'epoca rivoluzionarie) con il formalismo usuale mutuato dalla chimica

$$n \rightarrow p + e + \nu$$

²Come vedremo fra un attimo, Fermi per la prima volta utilizza un formalismo per descrivere la creazione e distruzione di singole particelle; tuttavia, per non subire l'effetto sconcertante di questo schema di pensiero, conviene sempre tener presente la reazione complessiva che dà un senso fisico all'insieme di queste transizioni.

ovvero, un neutrone si trasforma spontaneamente in un protone, un elettrone (raggio β) ed un neutrino³. O forse meglio, come l'avrebbero detto all'epoca: un neutrone può trasformarsi in un protone, irradiando una coppia elettrone-neutrino.

2.4 Sommario: la teoria di Fermi ed il neutrino

Evidenziamo per massima chiarezza i punti qualificanti, nei quali la teoria di Fermi differisce da quella moderna:

1. il trattamento dei fermioni *non* è quello della teoria dei “campi quantizzati”;
2. il neutrino è descritto esattamente come l'elettrone (o dicendolo esplicitamente: si postula un mare di Dirac di neutrini con energie negative);
3. dunque il neutrino differisce necessariamente dall'anti-neutrino, o come si usa dire oggi, è un neutrino di Dirac⁴;
4. la teoria è costruita a somiglianza della teoria elettromagnetica, o come si dice in gergo, è ‘vettoriale’; la conseguenza è che c'è una separazione assoluta tra vettori polari (come il campo elettrico o il momento) e vettori assiali (come il campo magnetico o lo spin di una particella).

I primi tre punti sono evidentemente rilevanti per la discussione dei neutrini e come vedremo fra poco, l'ultimo è solo in apparenza un dettaglio minore: ha un ruolo importantissimo.

3 Majorana: il moderno trattamento dei fermioni ed un nuovo concetto di neutrino

3.1 Resistenza alle idee di Dirac

La teoria dell'antimateria di Dirac (sopra descritta) anticipa la scoperta del positrone di Anderson (1932). Inoltre, grazie agli sviluppi di Fermi, riesce persino a realizzare l'idea della creazione di particelle. Davanti ad un successo del genere, non stupisce che furono in pochi a provare a fare qualcosa di meglio. Anzi, a ben vedere, furono solo due i fisici che non abbandonarono le loro riserve verso la teoria di Dirac e che si impegnarono (con successo) per superarle⁵.

Il primo è Pauli, che dà i seguenti importanti contributi alla discussione critica:

1934 per prima cosa riesce a formulare assieme a Weisskopf una descrizione quantistica conclusa di una particella relativistica priva di spin. Anche se questa non si applica di certo all'elettrone, Pauli la considera e ne parla come della sua ‘teoria anti-Dirac’;

1936 poi si impegna per studiare in modo puntiglioso le matrici di Dirac, probabilmente anche nella speranza di procedere nella discussione.

³È una piccola forzatura perché all'epoca non era sicuro che il neutrone fosse più pesante del protone, e si pensava in termini di transizioni tra nuclei atomici: tuttavia non è così grave.

⁴Questa denominazione è molto comune, anche se Dirac non ha mai parlato di neutrini. L'ipotesi di una particella senza carica elettrica e tuttavia differente dalla propria anti-particella caratterizza la teoria di Fermi del 1933.

⁵La teoria di Dirac verrà utilizzata non solo da Fermi, ma da Heisenberg, Landau e numerosissimi altri.

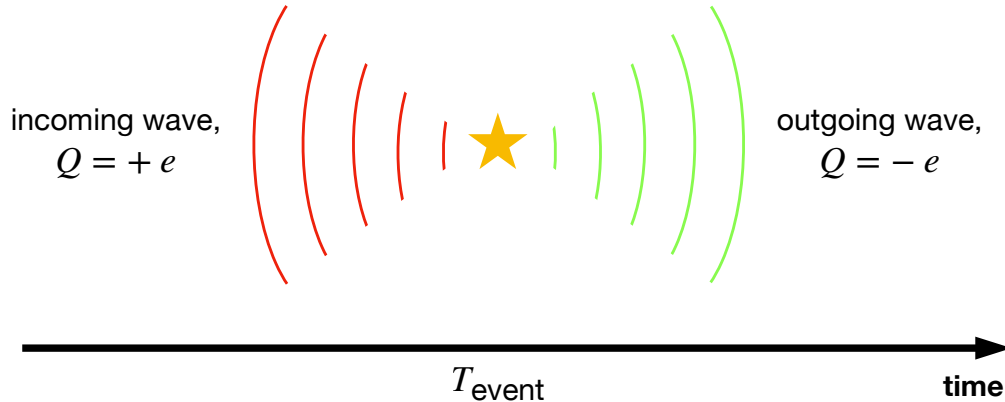


Figura 1: La possibilità che un certo sistema fisico (rappresentato dalla stellina), per esempio un nucleo atomico, possa emettere un elettrone (parte di destra della figura) è inevitabilmente accompagnata dalla possibilità che lo stesso sistema possa assorbire un positrone (parte di sinistra della figura). Pertanto, invece di pensare all'emissione di elettroni con energia negativa, nella teoria di Majorana si pensa all'assorbimento di positroni con energia positiva. In entrambi i casi il sistema fisico aumenta sia l'energia che la carica elettrica ($\Delta Q = +e$).

Tuttavia, la persona che per prima mostra che si può fare a meno di assumere l'esistenza del mare di Dirac non è lui, bensì Ettore Majorana.

Dunque sì, un grande contributo di Majorana è quello di aver svuotato il mare di Dirac. Siccome oggi non lo usiamo più, non sempre capiamo l'impresa che ha realizzato: in un certo senso, Majorana ha lavorato troppo bene.

3.2 Il formalismo di Majorana

Senza voler entrare troppo nei dettagli, ma per rimarcare la differenza col formalismo utilizzato da Fermi, l'operatore che Majorana scrive è

$$\psi(x) = \sum_{E_s > 0} [\mathbf{a}_s \psi_s(x) + \mathbf{b}_s^\dagger \psi_s^*(x)]$$

dove, come evidenziato qua sopra, si somma solo sugli stati di energia positiva. Majorana illustra chiaramente il significato di questo punto, già nel riassunto del lavoro

Si dimostra la possibilità di pervenire a una piena simmetrizzazione formale della teoria quantistica dell'elettrone e del positrone facendo uso di un nuovo processo di quantizzazione. Il significato delle equazioni di Dirac ne risulta alquanto modificato e non vi è più luogo a parlare di stati di energia negativa.

Il formalismo può essere illustrato come segue. Consideriamo un nucleo che aumenta la carica elettrica di una unità emettendo un elettrone. Cosa significa emettere un elettrone di energia negativa $-E_s$? Potremmo essere tentati di pensare ad una frequenza negativa⁶, ma poi ci dovremmo chiedere, cosa significa un'onda che oscilla 'all'indietro nel tempo'? Majorana nota molto semplicemente

⁶Come già ricordato, Einstein (1905) nota che le onde di luce hanno una frequenza associata $f = E/h$; Bohr sostiene la stessa cosa per gli elettroni dell'atomo e de Broglie la generalizza ad ogni particella.

che in questo caso il sistema che ha emesso il neutrino non solo aumenta la carica elettrica, ma anche l'energia: $-(-E_s) = +E_s$. E per questo suggerisce di rimpiazzare del tutto l'inquietante idea di un'onda con energia negativa, che dovrebbe venir emessa ad un certo istante per poi propagarsi nel futuro, con l'idea di un'onda di energia positiva e con carica opposta che è stata assorbita dal nucleo in quell'istante, dopo essere arrivata dal passato.

In conclusione, invece di pensare ad un nucleo che aumenta la sua energia emettendo elettroni con energie negative, penseremo che il nucleo lo faccia assorbendo positroni. Fermi rimase molto colpito da questo colpo di genio. (Mi sembra appena il caso di ricordare che è lo stesso formalismo che adoperiamo oggi.)

3.3 Una nuova idea di neutrino

Majorana procede e nota che per una particella di materia senza carica elettrica esiste la possibilità di una notevole semplificazione: quella di identificare la particella con la propria controparte, un po' come non abbiamo bisogno di introdurre un anti-fotone nel caso dei quanti di radiazione. In questo caso, l'unica residua differenza tra particelle di materia e di radiazione è il loro spin che è inevitabilmente collegato alle proprietà statistiche di tali particelle⁷.

Questa ulteriore proposta di Majorana, nel caso del neutrino, è considerata oggi di enorme interesse. Tuttavia per apprezzarne pienamente il senso, è necessario esaminare i progressi, che riguardano lo studio delle interazioni che coinvolgono i neutrini (prossima sezione) e lo studio di un particolarissimo processo nucleare (sezione 6).

4 Il completamento della teoria delle interazioni deboli ed il suo punto debole

La comprensione delle interazioni deboli, quelle che coinvolgono i neutrini, viene completata nel quarto di secolo successivo alla proposta di Majorana. Oltre alla verifica dell'esistenza del neutrino del 1956 merito di Reines & Cowan, universalmente nota, ci sono almeno quattro importanti passi da discutere e riassumere

1. Dai muoni alle famiglie (linea teorica: Fermi→Yukawa→Sakata&Inoue, Pontecorvo, Puppi)
2. Numeri leptonici (linea teorica: Weyl, Stueckelberg, Wigner→Marx; Zel'dovich; Konopinsky&Mahmoud)
3. Natura delle interazioni deboli (linea teorica: Yang&Lee→Sudarshan&Marshak, Feynman&Gell-Mann)
4. L'ipotesi dei neutrini senza massa (linea teorica: Weyl→Salam, Landau, Lee&Yang)

Dopo di questa discussione, saremo pronti ad apprezzare il significato di un'importante classe di esperimenti, che rivelano l'unico punto debole della teoria delle interazioni deboli noto, e che possono essere considerati come l'unico punto di ingresso alla fisica oltre in modello standard che ha una base osservativa.

⁷Questo verrà chiarito da Pauli.

4.1 Dai muoni alle famiglie

Nel 1935 Yukawa, ispirato dalla teoria di Fermi, propone che esista una particella che giochi un ruolo simile a quello del fotone per le interazioni deboli.

A questo punto, bisogna rivolgersi alle acquisizioni osservative. Infatti, poco dopo la proposta di Yukawa, viene scoperto il muone, che solo in apparenza ha le caratteristiche del quanto di Yukawa; servirà il 1945 perché venga dimostrato sperimentalmente che non essendo dotato di interazioni forti, è invece del tutto diverso. La teoria ‘dei due mesoni’⁸ verrà dimostrata in via definitiva da Lattes, Powell e Occhialini nel 1947; e fino a qui abbiamo descritto una sorta di “versione ufficiale” della storia.

Tuttavia, già nel 1942 (durante la guerra mondiale) due fisici teorici del gruppo di Yukawa, Sakata ed Inoue, avevano capito che il muone viene prodotto proprio nel decadimento del quanto di Yukawa: si tratta della prima formulazione della teoria dei ‘due mesoni’. Ed è impressionante sottolineare che la proposta di Sakata ed Inoue preveda due diversi neutrini.

Qualche anno dopo (1947) fu Pontecorvo il primo a sospettare che in tutte le interazioni deboli note all’epoca, la costante di accoppiamento sia la stessa - proprietà che viene chiamata ‘universalità’ delle interazioni - un punto venne evidenziato col massimo della chiarezza da Puppi nel 1948.

Ci vorranno 20 anni prima che si riesca a dimostrare che il neutrino muonico differisce da quello elettronico, proprio come era stato ipotizzato da Sakata ed Inoue. A questo punto della discussione, è chiaro che esistono due famiglie di particelle, con masse diverse ma interazioni identiche.

4.2 Numeri leptonici

Le possibili trasformazioni nucleari avvengono senza che cambi il numero di massa (legge di Soddy & Fajans, 1913). Una volta che vengono scoperti e capiti i nucleoni, questa caratteristica viene riformulata nei termini di un numero quantico conservato, il numero di particelle pesanti (‘barioni’). Il punto viene di solito attribuito a Wigner (1949) ma era stato già anticipato da Weyl (1929) e discusso da Stueckelberg (1936).

A causa del carattere etereo dei neutrini, ci vorrà un po’ di tempo per capire che una simile legge vale anche per le particelle leggere (‘leptoni’); essa sarà formulata all’inizio degli anni 50, dopo che nel 1948 Hincks & Pontecorvo, Sard & Althaus, Piccioni, dimostrano che il muone non si trasforma in un elettrone emettendo un fotone.

4.3 Natura delle interazioni deboli

Nel 1956, la questione se la parità sia rispettata nelle interazioni deboli viene coraggiosamente posta da Lee e Yang e da lì a breve l’esperimento verifica la correttezza della loro impostazione critica. Il punto è sconvolgente per la comunità scientifica. Una buffissima annotazione del teorico JC Ward, riportata dalla sua autobiografia, ci ricorda la percezione dell’epoca:

l’esperimento della signora C.S. Wu e altri della Columbia, svolto su suggerimento di Yang e Lee, stabilì definitivamente la non conservazione della parità nelle interazioni deboli, sorprendendo tutti. Inviai una nota ad Abdus Salam per informarlo del risultato, aggiungendo che Einstein si stava certo rigirando nella tomba, in senso orario presumo

⁸Per ‘mesone’ si intende una particella di massa intermedia tra quelle dell’elettrone o dei neutrini e quelle dei nucleoni; ci torneremo nel prossimo punto.

(mia traduzione). La dimostrazione della natura vettoriale-assiale ($V - A$) e delle forze deboli ebbe un cammino un po' accidentato:

- Ruderman+Finkelstein 1949 predicono il rapporto di decadimento $R(\pi^+ \rightarrow e\nu)/R(\pi^+ \rightarrow \mu\nu)$ in varie ipotesi.
- Durbin+Loar+Steinberger 1951 determinano la parità del pione dalla fotodissociazione del deuterio.
- Lokanathan+Steinberger 1955 & Anderson+Lattes 1957 ottengono forti limiti su $R(\pi^+ \rightarrow e\nu)$, che apparentemente escludono l'ipotesi $V - A$.
- Sudarshan+Marshak 1957 seguiti da Feynman+Gell-Mann 1958 mettono al primo posto le considerazioni teoriche, concludendo che qualcuno dei precedenti risultati è inaccurato.
- Fazzini et al. nel 1958 misurano meglio $R(\pi^+ \rightarrow e\nu)/R(\pi^+ \rightarrow \mu\nu)$ e confermano la struttura $V - A$.

4.4 L'idea dei neutrini senza massa

Molti fisici, tra il 1956 ed il 1957, capiscono che la struttura $V - A$ delle interazioni deboli si lega in modo naturale con l'idea che il neutrino abbia massa nulla. Il punto viene proposto (con molta, troppa enfasi) da Salam, Landau, Lee & Yang e poi ancora da Mc Lennan, Pursey, Enz, Pubby. Ma sono Pauli da una parte e Radicati & Touschek dall'altra coloro che fanno piena chiarezza; non si tratta di una implicazione, ma di una semplice possibilità teorica minimale. Tuttavia, sarà la verifica di Goldhaber, Grodzins & Sunyar quella che apparentemente concluderà la discussione, mostrando che (nei limiti delle verifiche sperimentali) lo spin del neutrino è opposto al suo momento, mentre per l'antineutrino vale il contrario.

È estremamente interessante che si era già ragionato di fermioni relativistici a massa nulla molto tempo prima. Hermann Weyl aveva esaminato attentamente l'equazione di Dirac nel 1929, e anziché considerare la massa dell'elettrone come una caratteristica che le osservazioni ci obbligano a descrivere, ne proclamò per primo la natura di problema concettuale. Convinto che la spiegazione dell'origine della massa andasse rimandata ad una piena comprensione delle interazioni gravitazionali, non si fece problemi a impostare una nuova discussione a partire dal caso in cui la massa fosse nulla. Egli aveva notato che, in questo caso, l'equazione di Dirac si separa in due equazioni d'onda che, quando si cambia sistema di riferimento, si comportano in modo indipendente; dunque, postulando che la massa non ci sia affatto, l'equazione dell'elettrone diventa assai più semplice⁹.

4.5 C'è qualcosa di marcio nel modello standard

Bene, prima di trarre le conclusioni, facciamo un piccolo sommario. Siamo partiti dalla teoria di Fermi e siamo arrivati alle fondamenta del cosiddetto modello standard (modello elettrodebole di Glashow, Weinberg, Salam). Due proprietà importantissime sono emerse

⁹Mi riferisco al fatto matematico che viene espresso in gergo dicendo che l'equazione di Dirac di una particella a spin 1/2 ma con massa nulla può essere separata in quella dei due stati di chiralità; questo implica che con una scelta opportuna delle matrici di Dirac, l'equazione ha solamente 2 componenti anziché 4. Come è ben noto, oggi riteniamo che l'origine della massa dei fermioni sia legata all'esistenza del cosiddetto bosone di Higgs e non alle interazioni gravitazionali come credeva Weyl; tuttavia il suo punto di vista resta estremamente stimolante.

- Esistono dei numeri leptonici conservati.
- La natura $V - A$ delle interazioni assieme all'ipotesi che i neutrini non abbiano massa conduce alla conclusione che la distinzione tra neutrini ed antineutrini sia attribuibile alla proiezione del loro spin lungo il momento (elicità)

Entrambi questi fatti diventano dei teoremi all'interno del cosiddetto modello standard. Tuttavia, le osservazioni di 'apparizione di neutrino' in esperimenti quali OPERA, T2K e $\text{NO}\nu\text{A}$ mostrano al di là di ogni dubbio che i numeri leptonici sono violati. Questo fatto in logica formale viene detto 'contraddizione'. Se si preferisce dirlo in italiano, esistono esperimenti che non sono descritti dal modello standard, dunque, quest'ultima teoria non è completa.

Riconosco che ci sono molte interessanti ragioni per considerare delle modifiche di quella teoria di enorme successo detta 'modello standard'; tuttavia, se ci si limita a parlare di quelle ragioni che hanno basi osservative, la lista si accorcia moltissimo. Anzi, al meglio di quanto ne posso capire, mi pare che il punto debole del modello standard messo in luce dagli esperimenti di fisica dei neutrini sia, al momento almeno, unico. (Noto che fino a qui non ci siamo ancora addentrati nella discussione delle masse dei neutrini; lo faremo nelle prossime due sezioni.)

5 Il metodo per misurare le masse dei neutrini che ha funzionato

A questo punto, è utile descrivere una linea di sviluppo della fisica delle particelle che procede in direzione ortogonale a quella del modello standard. Ci riferiamo all'insieme di idee ed esperimenti che hanno portato alla convinzione quasi universale che, in contrasto con l'aspettativa del modello standard, i neutrini siano dotati di massa. In considerazione del carattere eminentemente teorico di queste note, e siccome si tratta di fatti generalmente ben noti, ci limiteremo ad alcuni cenni essenziali.

5.1 Il metodo che ha funzionato - preistoria

Tutto comincia con lo studio e la comprensione delle transizioni tra mesoni K neutri, merito di Gell-Mann, Pais e Piccioni (1955). Sulla base dell'analogia, Pontecorvo propone che qualcosa di simile possa succedere in altri sistemi, come tra neutrone e antineutrone, tra atomo ed anti-atomi dello stesso tipo, ecc; ed anche tra neutrini ed antineutrini. Seppure non sarà in questa forma che l'idea si consoliderà, è proprio così che la discussione inizia.

Nel 1962, due gruppi giapponesi, uno a Tokyo ed uno a Kyoto, anche essi ispirati dai risultati sui mesoni K neutri, propongono che i neutrini associati all'elettrone ed al muone siano 'sovrapposizioni quantistiche' di certe particelle neutre, dette anche esse 'neutrini' (ipotesi del mescolamento leptonico). Il secondo gruppo di lavoro, guidato da Sakata, conetterà nel 1963 le masse dei neutrini con l'ipotesi del mescolamento, menzionando la parola trasmutazione, pur senza elaborare il punto.

5.2 Il metodo che ha funzionato - storia

Nel corso dei successivi 10 anni Pontecorvo svilupperà il moderno formalismo delle trasformazioni che riguardano i neutrini, oggi detto un po' impropriamente 'oscillazioni'. In questo modo sarà

chiarito che l'ipotesi che i neutrini siano dotati di massa conduce all'aspettativa che quelli associati all'elettrone e al muone non sono auto-stati della propagazione e si trasformano nel tempo.

Le prime evidenze emergeranno immediatamente dopo grazie agli studi dei *neutrini solari* di Ray Davis Jr. e collaboratori, preparati grazie al prezioso aiuto e guida teorica di John Bahcall, l'autore del 'modello solare standard'. I successivi risultati di Kamiokande (1989) e Sage e Gallex (anni 90) rinforzeranno il punto di Homestake senza tuttavia arrivare ad una conclusione accettata dall'intera comunità scientifica.

Per procedere sarà molto importante l'accettazione di un altro caso di oscillazioni, quello dovuto ai neutrini atmosferici. Grazie a Kamiokande (1988), e poi a Super-Kamiokande, Macro e Soudan (1998), la maggior parte degli scienziati si convinceranno del fatto che le 'oscillazioni' sono reali e che i neutrini hanno massa diversa da zero.

5.3 Il metodo che ha funzionato - il presente

C'è poi una ulteriore evoluzione teorica. Il fisico sperimentale Emilio Zavattini si chiede se per caso esista per i neutrini qualcosa simile alla rigenerazione dei mesoni K neutri, e questa sua domanda in strada Wolfenstein verso la comprensione teorica del cosiddetto effetto di materia (1978). Le conseguenze vengono elaborate da Mikheyev & Smirnov nel 1985, che chiariscono oltre ogni dubbio che ci si debba aspettare un nuovo effetto, oggi noto come effetto MSW, importante per l'interpretazione dei neutrini solari e utile per progettare nuovi esperimenti sul nostro pianeta.

Nel 1994 compaiono le prime analisi globali di tutti i dati disponibili, da parte del gruppo di Bari composto da Fogli, Lisi, Montanino¹⁰. Esse consolidano le interpretazioni dei dati di neutrino solare e di neutrino atmosferico nel contesto dei tre neutrini del modello standard, una volta accettata la cruciale modifica che essi siano dotati di massa. In seguito anche i gruppi di Valencia e Barcelona contribuiranno con analisi di simile qualità alla discussione critica dei dati, consolidando pian piano i risultati ottenuti.

Come è noto, verranno poi intrapresi esperimenti con fasci controllati che confermeranno i risultati. Essi verranno proseguiti ed approfonditi grazie a esperimenti come JUNO (antineutrini da reattore) DUNE e Hyper-Kamiokande (neutrini ed antineutrini da acceleratori).

Commenti

- Va sottolineato che nell'approccio di Sakata viene messa in evidenza l'analogia tra leptoni ed adroni, che aveva cominciato ad emergere con la teoria di Yukawa; a dimostrazione che un certo tipo di visione (o meglio, di approccio filosofico) consente di proseguire nella discussione pur senza disporre di tutti i fatti sperimentali - anzi, anticipandoli.
- È molto interessante notare che i risultati dell'esperimento Homestake non verranno accettati ma sottoposti a lunghe ed estenuanti discussioni critiche; in particolare la comunità dei fisici teorici delle particelle opporrà una grande resistenza alla conclusione che i neutrini abbiano massa diversa da zero¹¹.
- È buffissimo ma non inutile notare che si cominceranno ad accettare i risultati di Homestake solo dopo aver capito che l'effetto MSW può funzionare con angoli di mescolamento piccoli;

¹⁰Siamo dunque al trentennale! Approfitto per far loro gli auguri e per ringraziarli.

¹¹In parte fu un portato di una discussione che come abbiamo ricordato, si bloccò nella metà degli anni 50.

in altre parole, solo dopo che si intravede una corrispondenza con i pregiudizi dell'epoca (che verranno contraddetti da fatti successivi).

- Il premio Nobel in fisica del 2015 è stato meritatamente assegnato per i risultati di Super-Kamiokande e di SNO che hanno concluso la scoperta delle oscillazioni; ma nessuno dei principali contributi teorici sopra ricordati - p.e., Pontecorvo, Sakata o Bahcall - ha ricevuto tale premio.
- Le analisi globali vengono a volte considerate come 'semplici' analisi dei dati, ma a mio avviso vanno trattate con maggiore considerazione, e devono essere pensate come un raffinato lavoro di tipo valutativo. Detto più schiettamente, mi sembra che invece di affidarsi ad una visione come dire, profetica, della fisica teorica, sarebbe più conveniente imparare ad apprezzare i progressi lenti ma sistematici, tanto più che in alcune fasi della storia sono gli unici possibili.

6 Il capitolo della fisica dei neutrini ancora da scrivere

Mentre il metodo descritto nella sezione precedente ha permesso di accertare che i tre neutrini noti hanno masse tra di loro diverse, non ci permette di misurare il valore della massa più leggera e neppure di sapere se essa è diversa da zero - una caratteristica delle 'oscillazioni' messa in luce già da Pontecorvo. Inoltre, come chiarito da due continuatori della sua opera, Bilenky e Petcov, le oscillazioni di neutrini relativistici non consentono di sondare il tipo di massa; una massa di Majorana o una 'di Dirac' producono lo stesso effetto. Riprendiamo il filo della storia per capire quali margini di progresso abbiamo.

6.1 Misure cinematiche

Nella celeberrima lettera del 1930 che inizia con l'intestazione '*Cari Radioattivi Signori e Signore*', Pauli sostiene che

i neutrini differiscono dai quanti di luce in quanto non viaggiano alla velocità della luce

(mia traduzione). Non ci possono essere dubbi sul significato delle sue parole: Pauli sa che una massa del neutrino, per quanto piccola, produrrà un ritardo nel tempo di arrivo¹². Il metodo verrà rilanciato nel 1968 da Zatsepin, che proporrà di usare i neutrini abbondantemente prodotti da una supernova a collasso gravitazionale. Esso verrà applicato ai dati dalla SN1987A da Loredò e Lamb nel 2002 e da un gruppo di fisici del Laboratorio del Gran Sasso qualche anno dopo, derivando il limite

$$m_\nu(\text{kin}) < 5.8 \text{ eV}/c^2 \text{ al } 95\%$$

6.2 Misure dallo spettro β

Nel 1933, Fermi mostra che lo spettro β dipende dal valore della massa dei neutrini, e sottolinea che la regione nella quale gli elettroni assumono i valori massimi dell'energia (e pertanto i neutrini assumono quelle minime) sono i più utili per evidenziarne gli effetti. Il metodo di indagine viene portato avanti da molti esperimenti; l'impressionante limite superiore posto dall'esperimento

¹²Quando, durante la lezione, ho detto per scherzo che la frase di Pauli alludeva ai neutrini super-luminali, ho provocato un boato di 'nooo!' cosa che mi ha molto consolato: essere testimone dei fatti del 2011 fu cosa tristissima.

KATRIN a *Neutrino 2024* è inferiore alla soglia di $500 \text{ meV}/c^2$. Come argomentato da McKellar (1980) i risultati possono essere presentati in termine di un parametro efficace $m_\nu^2(\text{beta}) = |U_{ei}^2| m_i^2$, dove m_i sono le masse e U_{ei} i coefficienti di mescolamento dei neutrini elettronici ν_e . Purtroppo le ‘oscillazioni’ permettono di quantificare solo una piccola parte di questo parametro, ovvero $\delta m_\nu^2(\text{beta}) = |U_{ei}^2| (m_i^2 - m_{\min}^2)$, come ho sottolineato nel 2000, che vale

$$\delta m_\nu^2(\text{beta}) = \begin{cases} 8.8 \text{ eV}/c^2 \text{ meV} & \pm 1.3\% \text{ (spettro normale)} \\ 48.8 \text{ eV}/c^2 \text{ meV} & \pm 0.6\% \text{ (spettro inverso)} \end{cases}$$

Ci sono infatti due spettri di massa compatibili con i dati, e oltretutto quello che sembra favorito¹³ conduce ad un valore inferiore. Non è del tutto chiaro come arrivare a sondare tali valori; si noti che la massa del neutrino più leggero m_{\min}^2 , oggi incognita, si somma in quadratura con il valore di $\delta m_\nu^2(\text{beta})$, fissato dai dati di oscillazione.

6.3 Misure dalla cosmologia

Ci sono state molte discussioni della possibilità che le masse dei neutrini, prodotti copiosamente nel big-bang, possano giocare un ruolo significativo in cosmologia. Chi come me ha i capelli bianchi si ricorda per esempio dei modelli del ‘neutrino di Mosca’, dove l’assunzione che essi avessero una massa intorno ai $30 \text{ eV}/c^2$ faceva sì che fossero il candidato ideale per un modello di ‘materia oscura calda’. Nel tempo questa ipotesi divenne gradualmente meno credibile, ma trenta anni fa (1994) venne riproposta in modo meno radicale ma autorevole, suggerendo che il ruolo delle masse dei neutrini fosse solo quello di correggere i difetti del modello di ‘materia oscura fredda’ (mi riferisco al modello freddo+caldo di Primack e collaboratori). Questo convinse i fisici ad intraprendere delle ricerche di masse di neutrino al CERN, che non diedero l’esito desiderato.

È curioso che sin dal 1996 Seljak sostenne che il limite sulla massa dei neutrini fosse molto più stringente di quello di Primack, ma venne fortemente criticato. Tuttavia, dal 2015 in poi, con l’inizio della cosmologia di precisione, limiti altrettanto o ancora più stringenti sono stati derivati da numerosi gruppi di indagine. La versione più recente del satellite Planck, che combina le loro misure su grande scala con quelle ottenute in altri modi su scale più piccole, danno infatti

$$\sum_{i=1}^3 m_{\nu_i}(\text{cosm}) < 110 \text{ meV}/c^2 \text{ al } 95\%$$

Come possiamo vedere, questo limite è il più forte tra quelli al momento disponibili. Va inoltre notato che due misure del numero di neutrini dalla cosmologia, del tutto diverse tra di loro, sono in perfetto accordo con l’ipotesi minimale che esistano solo tre tipi di neutrini leggeri; e questa inferenza prescinde dalla loro massa.

Tuttavia, il fatto che non si conosca ancora la natura della materia oscura (fredda), l’esistenza di misure della costante di Hubble H_0 tra loro in contrasto, e ancora più la semplice prudenza suggeriscono di prendere con cautela tali inferenze.

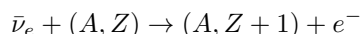
¹³Le ragioni non sono solo empiriche ma prima di tutto teoriche. Inoltre, sperando mi sia concesso uno scherzo, mi rifiuto per principio di menzionarlo con l’acronimo oggi invalso, ovvero NO (normal ordering); nel caso lo chiamo YES (yearningly expected spectrum).

6.4 Natura della massa del neutrino e una possibilità alternativa di sondarne la massa

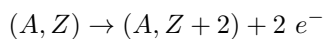
Infine torniamo ad esaminare l'ipotesi di Majorana sui neutrini, che qualche volta viene un po' (troppo) frettolosamente riassunta scrivendo

$$\nu = \bar{\nu}$$

ovvero identificando neutrini con antineutrini. Pochi mesi dopo venne proposta, il suo collega Giulio Racah raccolse una serie di osservazioni di natura critica¹⁴. In particolare rimarcò che poteva accadere qualcosa di questo tipo: se un reattore produce antineutrini elettronici $\bar{\nu}_e$, ma essi coincidono con i neutrini, ci aspetteremmo che accadano reazioni del tipo



Poi, negli anni 1938 e nel 1939, Furry propose di cercare il decadimento spontaneo



Entrambe le reazioni violano il numero leptonic. Il primo tipo di reazione¹⁵ fu cercato da Davis nel 1955, usando un bersaglio di cloro 37, che si sarebbe dovuto convertire in argon 37; ma Davis mostrò che questo non accadeva. Bisognava dunque concludere che l'ipotesi di Majorana non era valida?

La risposta è chiara ed è un semplice **NO**, ma le ragioni sono sottili e sono state capite solo *dopo* l'esperimento di Davis. In effetti, la considerazione cruciale che c'è dietro riguarda proprio la struttura delle interazioni deboli $V - A$ sopra rammentata. Essa fa sì che le masse dei neutrini, che come abbiamo visto sono molto piccole, diventino addirittura irrilevanti nel caso in cui essi si muovono di moto ultra-relativistico - ovvero, quando l'energia E_ν dei neutrini è molto maggiore di quella a riposo $m_\nu c^2$. Per questa ragione, non è matematicamente impossibile che un antineutrino induca la trasformazione del cloro 37, ma di regola l'ampiezza è soppressa da un fattore $m_\nu c^2 / E_\nu$. Nei casi concreti di transizioni nucleari, le energie tipiche E_ν hanno valori intorno al MeV; dunque il fattore di soppressione nella sezione d'urto, che dipende dall'ampiezza al quadrato, è enorme¹⁶.

In altre parole, gli effetti della massa del neutrino vengono 'schermati' dalla struttura $V - A$ delle interazioni. Lo stesso accade nella transizione di Furry, che viene chiamata in gergo 'decadimento doppio beta senza emissione di neutrini' ma può essere correttamente descritta come 'creazione di una coppia di elettroni'. Un punto interessante rimarcato da Greuling e Whitten nel 1960 è che, con le interazioni del tipo $V - A$, l'ampiezza di questa reazione dipende da una combinazione delle masse dei neutrini, assunte essere del tipo di Majorana. Tale combinazione è vincolata dalle evidenze di oscillazioni di neutrino (Vissani 1999): dunque, una sua futura osservazione consentirebbe sia la verifica dell'ipotesi di Majorana che un nuovo tipo di misura delle masse dei neutrini. Sottolineo che questa transizione viola la conservazione del numero di leptoni; pertanto, per la discussione

¹⁴Curiosamente non riconobbe l'importanza del passo fatto da Majorana, relativo alla nuova procedura di quantizzazione.

¹⁵Viene detto catena di Racah, in quanto si tratta della seconda reazione di una sequenza.

¹⁶Notiamo (nella speranza di aiutare a far chiarezza) che se la teoria delle interazioni deboli fosse stata esattamente vettoriale, come era stato originariamente proposto, questo fattore di soppressione non si sarebbe applicato.

delle estensioni del modello standard, ha una importanza comparabile se non superiore a quella della ricerca del decadimento del protone¹⁷.

7 Sommario

Come argomentato sopra, il concetto di neutrino ha preso forma gradualmente e con l'apporto di molti diversi pensatori. A scopo di riassunto, richiamiamo qui quegli aspetti che si sono consolidati nell'idea moderna:

- la proposta di una particella quasi invisibile - il neutrino - emessa negli speciali decadimenti nei quali i nuclei cambiano la carica elettrica (Pauli 1930);
- l'idea che tale particella venga creata in coppia con elettroni, brillantemente formalizzata da Fermi 1933 in un modo che suggerisce numerosi sviluppi e punti di vista: p.e., il cambiamento dei nucleoni è parallelo a quello delle particelle leggere (Fermi, Yukawa 1934);
- un'intero mondo di processi legati ai decadimenti, prima predetti teoricamente e sistematicamente osservati (Wick; Bethe & Peierls 1934);
- l'idea moderna di fermioni (elettroni, neutrini, ecc) che nasce grazie a Ettore Majorana nel 1937, che può essere finalmente formulata senza ricorrere all'artificiale ipotesi del mare di Dirac;
- la teoria delle interazioni deboli si completa negli anni '50; essa dà origine ad un inaspettato *revival* del formalismo proposto da Weyl nel 1929 per la descrizione dei fermioni senza massa;
- pian piano queste idee prenderanno forma in un modello completo delle interazioni - il cosiddetto modello standard - che tuttavia proprio per mezzo di esperimenti di neutrino viene mostrato essere incompleto;
- nel tempo si formula con chiarezza l'idea che esistano vari tipi di neutrini, che si trasformano tra di loro a causa della massa, proprio come è stato osservato; inoltre, queste idee si armonizzano perfettamente con quelle di Majorana;
- esistono ancora ampi margini di miglioramento per lo studio delle masse di neutrino.

Con riferimento all'ultimo punto, è molto curioso che il costrutto teorico di neutrino, basato sulle idee di Majorana, sia ancora in attesa di una conferma sperimentale. Allo stesso tempo esso costituisce uno dei più stimolanti punti di accesso alla fisica oltre il modello standard, pur essendo stata concepito ben prima di esso.

¹⁷La ragione è che questa transizione viola necessariamente la differenza del numero barionico e quello leptonico $B - L$, che, nel contesto del modello standard, è l'unica simmetria globale esatta non ancora sondata; questa non è una caratteristica generale dei canali di decadimento del nucleone; appartiene solo ad alcuni particolari modi come $n \rightarrow K^+ + e^-$. I modi più studiati come $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ oppure $p \rightarrow K^+ + \bar{\nu}$ non sondano $B - L$.

Ringraziamenti: Ringrazio Chiara Brofferio, Irene Nutini e Gioacchino Ranucci per l'invito al convegno *Neutrino 2024* ed i numerosi colleghi che hanno partecipato al seminario e alla discussione. Il lavoro ha visto la luce anche grazie al supporto dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN, dell'Osservatorio di Brera dell'INAF, della borsa di ricerca 2022E2J4RK “*PANTHEON: Perspectives in Astroparticle and Neutrino THEory with Old and New messengers*” nel contesto del programma PRIN 2022 finanziato dal Ministero Italiano dell'Università e della Ricerca (MUR) & del progetto dell'Unione Europea – Next Generation EU.

APPENDICI

A Quale teorico è stato la “prima donna”?

La risposta onesta è che, anche in una versione minimale della storia, non ce ne è una: ce ne sono parecchie. La lista che mostriamo a titolo di sommario, pur piuttosto incompleta, lo dimostra piuttosto chiaramente.

- **[Dirac 1928]** — antimateria (ma naturalmente nulla sui neutrini)
- **[Weyl 1929]** — una giusta osservazione matematica al momento sbagliato
- **Pauli 1930** — la nuova particella, pur in un contesto del tutto superato
- **Fermi 1933** — teoria quantitativa costruita sulle discutibili idee di Dirac
- **Majorana 1937** — teoria dei campi fermionici & nuova idea del neutrino
- **Lee & Yang, anni 40-50** — parità, $V - A$, numero leptonico, ecc
- **Pontecorvo, Sakata, ... anni 60-70** — teoria delle oscillazioni

B Predizione della cattura elettronica

Uno dei processi cruciali per la verifica dell'affidabilità della teoria di Fermi è quello di cattura elettronica, discusso da Wick nel 1934. Il suo argomento viene sviluppato nel contesto della teoria di Fermi e viene riassunto come segue. Consideriamo il processo di decadimento del neutrone $n \rightarrow p + e + \nu$ ed il suo inverso

$$p + e + \nu \rightarrow n$$

Supponiamo che quest'ultimo avvenga in presenza del mare di Dirac dei neutrini e immaginiamo che esista un buco, che indichiamo con la posizione del corrispondente neutrino con energia negativa

$$p + e + \nu + \nu_- \rightarrow n + \nu_-$$

Immaginiamo ora che il neutrino ν occupi il buco, e dunque omettiamo i due ultimi termini nel membro di sinistra e troviamo

$$p + e \rightarrow n + \nu_-$$

In altre parole, se un protone assorbe un elettrone, può, tramite l'hamiltoniana di Fermi, produrre un buco nel mare dei neutrini - ovvero secondo l'interpretazione di Dirac può tramutarsi in un neutrone ed un anti-neutrino. Ricordiamo che questa reazione verrà osservata da vari scienziati, in particolare James S. Allen intitolerà il suo lavoro del 1942 *Experimental evidence for the existence of a neutrino*.

C La connessione tra elicità e chiralità

C.1 Struttura $V - A$ ed elicità degli stati

Riportiamo una dimostrazione formale della connessione tra chiralità ed elicità. Consideriamo l'hamiltoniana di Dirac

$$H = c\vec{p}\vec{\alpha} + mc^2\vec{\beta}$$

e nel limite ultra-relativistico trascuriamo il secondo termine. Consideriamo poi le matrici di spin e la chiralità $\gamma_5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$ e notiamo che

$$\gamma_5\vec{\alpha} = \vec{\Sigma}$$

Ne segue che

$$H \approx cp\gamma_5\mathcal{H}$$

dove

$$\mathcal{H} = \frac{\vec{\Sigma}\vec{p}}{p}$$

è l'operatore di elicità. Il proiettore di chiralità

$$P_L = \frac{1 - \gamma_5}{2}$$

presente nelle interazioni deboli cariche, e che dunque moltiplica ogni funzione d'onda ψ fa sì che un'autofunzione dell'energia con valore $E \approx cp$ che scriveremo come $\psi_L = P_L\psi$ soddisfi $H\psi_L \approx cp\psi_L = -cp\mathcal{H}\psi_L$. In conclusione

$$\mathcal{H}\psi_L = -\psi_L$$

che implica che tale stato abbia elicità negativa.

C.2 Ancora sull'elicità dei neutrini

Per chiarire il punto quanto più possibile riportiamo una seconda considerazione, utilizzando stavolta una specifica scelta delle matrici di Dirac, quella originaria di Dirac (o rappresentazione non-relativistica). Dato uno stato di fermione libero con data energia normalizzato *a la* Born sul volume (formale) di tutto lo spazio V , fermione descritto da una auto-funzione

$$\psi_\lambda(\vec{x}) = \frac{e^{i\vec{p}\vec{x}/\hbar}}{\sqrt{V}} u_\lambda$$

il cui 4-spinore è dato da

$$u_\lambda = \begin{pmatrix} \sqrt{1 + \varepsilon\varphi_\lambda} \\ \lambda\sqrt{1 - \varepsilon\varphi_\lambda} \end{pmatrix}, \quad \lambda = \pm 1, \quad \varepsilon = \frac{mc^2}{E}$$

Ricordando che le interazioni deboli cariche comportano la presenza di un proiettore di chiralità, valutiamo quale porzione dello stato con elicità "sbagliata" sopravvive. Dobbiamo insomma calcolare $P_L\psi_\lambda$ ponendo $\lambda = +1$. Siccome abbiamo che

$$P_L = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} +1 & -1 \\ -1 & +1 \end{pmatrix}$$

effettuando la moltiplicazione, concludiamo che

$$P_L u_+ = \frac{\varepsilon}{\sqrt{1+\varepsilon} + \sqrt{1-\varepsilon}} \begin{pmatrix} +1 \\ -1 \end{pmatrix} \varphi_+$$

che nel limite ultra-relativistico $p \gg mc$ è soppresso, come si vede dal fattore ε a numeratore.

D Masse dei neutrini nel linguaggio moderno

Vediamo alcuni termini importanti della densità di lagrangiana dei neutrini. Il primo è il termine cinetico e conserva il numero leptonico

$$\mathcal{L} \ni i \bar{\nu}_L \partial_a \gamma^a \nu_L$$

È possibile formare un termine di massa compatibile con i principi della relatività e che tuttavia porta ad una violazione del numero leptonico

$$\mathcal{L} \ni -(m_{LL} \bar{\nu}_L C \bar{\nu}_L^t + \text{h.c.})$$

dove C è la matrice di coniugazione di carica introdotta da Kramers. Questo porta ad usare come linguaggio naturale per descrivere gli autostati di massa quello dei campi di Majorana, che nel caso di un solo neutrino si legge come segue

$$\chi = \nu_L + C \bar{\nu}_L^t$$

Se poi aggiungiamo dei neutrini “destri” alla teoria avremo analoghi termini di propagazione e di massa, ed anche il termine misto

$$\mathcal{L} \ni -(m_{RL} \bar{\nu}_R \nu_L + \text{h.c.})$$

che corrisponde alla cosiddetta massa di Dirac, che non viola il numero leptonico.

E Sulla possibilità di verificare l'ipotesi di Majorana

Il processo cruciale per la verifica della teoria di Majorana, quello evidenziato da Furry, viene spesso chiamato “decadimento doppio beta senza emissione di neutrini”. Questa terminologia, molto diffusa tra gli esperti, non aiuta tuttavia ad apprezzare l'importanza del punto: in effetti, caratterizzare un processo in termini di qualcosa che non c'è (l'emissione di neutrini) è sconcertante per chi ne sente parlare la prima volta, e non si vede il bisogno di usare una terminologia, quella dei raggi β , risalente ad un periodo in cui si pensava che si trattasse di elettroni alloggiati nel nucleo dell'atomo. Sembra molto più efficace riferirsi ad essa parlando di creazione di elettroni in una trasformazione nucleare.

Vediamo adesso come si argomentò l'esistenza di tale transizione, con lievissimi aggiornamenti del formalismo. Consideriamo due decadimenti di neutroni, che descriviamo seguendo Fermi con

$$2n \rightarrow 2p + 2e + 2\nu$$

Se tuttavia, come sostiene Majorana, il neutrino coincide con la propria anti-particella, potremo anche scrivere l'ultimo termine in modo diverso

$$2n \rightarrow 2p + 2e + \nu + \bar{\nu}$$

e considerare anche il caso in cui le ultime due particelle si annichilano tra di loro

$$2n \rightarrow 2p + 2e$$

che in essenza è il processo che ci interessa. Si noti che

- il numero di elettroni è mutato, e dunque il 'numero leptonic' è stato violato (circostanza che attribuiamo alla presenza di neutrini di Majorana)
- con questa descrizione, non sembrerebbe essere necessaria la massa dei neutrini, ma solo la loro natura di Majorana

In effetti, questa descrizione non è completa e corrisponde all'interpretazione precedente agli anni '50-'60. Quando poi si considerano anche gli aspetti descritti nell'appendice C, si capisce che è lecito rimpiazzare un neutrino con un antineutrino, ma siccome le interazioni sono del tipo $V - A$ nella teoria di riferimento, questo comporta una soppressione del tipo energia a riposo/energia cinetica, e dunque l'ampiezza della transizione è proporzionale alla massa di Majorana dei neutrini.

Tutti i lavori che ho menzionato sono famosi e di regola facili da reperire. Riporto solo alcune referenze che ho trovato particolarmente utili per avere una visione di insieme, includendo alcuni miei lavori di rassegna, storia e/o di didattica; le presenti note e la lezione sono soprattutto basate sugli ultimi.

Riferimenti bibliografici

- [1] *Pages in the development of neutrino physics*, Bruno Pontecorvo, 1983
- [2] *Inward bound: of matter and forces in the physical world*, Abraham Pais, 1986
- [3] *Neutrino. the mutant particle*, Giampaolo Cò et al, 2016 - La versione italiana è pubblica <http://siba-ese.unisalento.it/index.php/ithaca/issue/view/1330>
- [4] *The formalism of neutrino oscillations: an introduction*, Guido Fantini, Andrea Gallo-Rosso, Vanessa Zema, FV, arXiv:1802.05781, 2018
- [5] *History of the neutrinos*, <https://neutrino-history.in2p3.fr/books/>
- [6] *Neutrino unbound*, Carlo Giunti et al, website <https://www.nu.to.infn.it/>
- [7] *What is matter according to particle physics, and why try to observe its creation in a lab?*, FV, arXiv:2103.02642 (Universe) 2021
- [8] *Toward the discovery of matter creation with neutrino-less double beta decay*, FV et al, arXiv:2202.01787 (RMP) 2022
- [9] *A discussion of the cross section $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$* , FV et al, arXiv:2311.16730 (Majorana conference proceedings) 2023
- [10] *Majorana and the bridge between matter and anti-matter*, FV, (Majorana conference proceedings) 2023
- [11] *First steps towards understanding neutrinos*, FV, arXiv:2310.07834 (Quaderni di storia della fisica) n.31, 109, 2024