
GLI APPUNTI
DI
SUBNUCLEARE

Indice

Indice	i
1 Storia della Fisica delle Particelle	1
1.1 Il concetto di interazione	1
1.2 Classificazione delle particelle	2
1.3 Storia delle scoperte	2
2 La Fisica del Neutrino	3
2.1 Il problema del decadimento β	3
2.2 Il neutrino	5
2.3 Storia del neutrino	7
2.4 L'interazione debole	10

Capitolo 1

Storia della Fisica delle Particelle

1.1 Il concetto di interazione

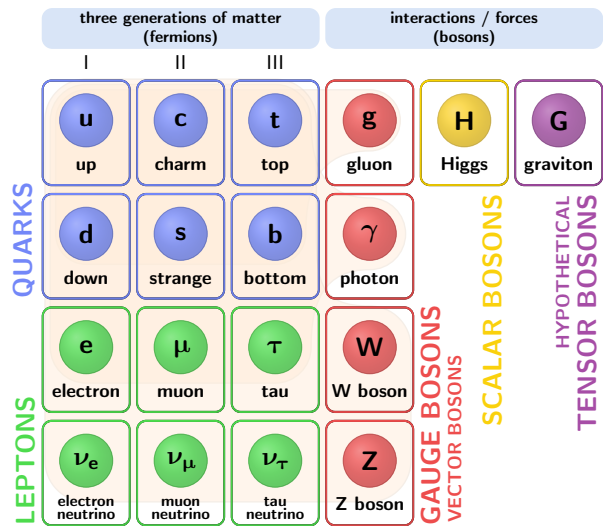
Fin dall'antichità l'uomo ha cercato di comprendere la natura e le forze che la governano. Le interazioni tra gli oggetti sono state osservate e studiate, portando alla formulazione di leggi fisiche che descrivono questi fenomeni. In un primo tempo l'interazione è stata studiata come un fenomeno macroscopico che prende il nome di *forza*, simile alla parola *sforzo*: per alterare lo stato di un sistema—come ad esempio cambiare la velocità di un oggetto o deformarlo—è necessario compiere un qualche tipo di sforzo. Quando però cerchiamo di descrivere fenomeni più complessi, come quelli che avvengono a livello atomico o subatomico, dove diventa difficile stabilire in quale momento avvenga il contatto, il concetto di forza diventa insufficiente. In questi casi, è più utile parlare di *interazione*.

In fisica delle particelle, il concetto di interazione assume un ruolo primario dal momento che gran parte del lavoro dei fisici è dedicato allo studio della natura di queste interazioni e al tentativo di unificarle tutte tra loro, ovvero trovare un'unica forza di cui tutti i fenomeni fisici siano manifestazioni. Un primo esempio di unificazione è stato quello di Sir Isaac Newton, che con la sua Teoria della Gravitazione Universale ha dimostrato che la forza di gravità che agisce tra due corpi celesti, come la Terra, la Luna e il Sole, è la stessa che fa cadere gli oggetti sulla superficie terrestre. Un altro esempio è la Teoria Elettromagnetica di James Clerk Maxwell, che ha unificato le forze elettriche e magnetiche in un'unica forza elettromagnetica. Sebbene queste due teorie siano state migliorate e generalizzate nella Relatività Generale di Albert Einstein e nell'Elettrodinamica Quantistica di Dirac, Pauli, Fermi, Feynman e molti altri, esse non sono sufficienti a spiegare tutti i fenomeni fisici conosciuti, specialmente quelli che avvengono a scale molto piccole.

Le interazioni che sono state teorizzate per descrivere la fisica dei nuclei atomici—come il decadimento β e l'interazione del neutrino—sono l'interazione nucleare debole, che è stata successivamente unificata con l'interazione

Interazione	Portata	Intensità relativa	Portatore
Gravitazionale	∞	1	Gravitone*
Elettromagnetica	∞	10^{36}	Fotone
Nucleare debole	10^{-18} m	10^{33}	Bosoni W^{\pm}, Z^0
Nucleare forte	10^{-15} m	10^{38}	Gluone

Tabella 1.1: Le quattro interazioni fondamentali della natura. *Il gravitone è una particella ipotetica, non ancora osservata, che dovrebbe mediare l’interazione gravitazionale.



elettromagnetica nella Teoria Elettrodebole, e l’interazione nucleare forte, che attraverso la Cromodinamica Quantistica spiega le interazioni tra *quark* e *gluoni*. Queste due interazioni sono raccolte in modo sistematico nella Teoria del Modello Standard delle Particelle Elementari ma non sono tuttavia unificate tra loro, né con la gravità. Sono inoltre presenti delle inconsistenze legate all’attribuzione artificiosa di massa nulla al neutrino, che invece mostra dei comportamenti spiegabili solo da una massa non nulla.

Le principali interazioni descritte fin’ora prendono il nome di *interazioni fondamentali* e sono riportate in tabella 1.1.

1.2 Classificazione delle particelle

1.3 Storia delle scoperte

Capitolo 2

La Fisica del Neutrino

2.1 Il problema del decadimento β

Il decadimento β è un fenomeno nucleare che avviene quando un nucleo instabile si trasforma in uno più stabile trasformando un protone in neutrone o viceversa; questa trasformazione viene tipicamente osservata attraverso l'emissione di una particella β^\pm , ovvero un elettrone (β^-) o un positrone (β^+).

Il problema così impostato tuttavia dovrebbe portare all'osservazione di particelle β monoenergetiche, in particolare con un'energia cinetica pari al difetto di massa del nucleo. Nel caso del decadimento β^- il comportamento previsto applicando il modello a due corpi è

$$(A, Z) \longrightarrow (A, Z + 1) + e^- ,$$

dove A è il numero di massa e Z il numero atomico del nucleo. Il difetto di massa è dato dalla differenza tra la massa del nucleo iniziale e quella del nucleo finale più quella dell'elettrone:

$$Q_\beta = m(A, Z) - m(A, Z + 1) - m(e^-) ,$$

essendo Q_β è il Q -valore del decadimento.

Il problema è che lo spettro energetico dei β —osservato in un importante esperimento da Ellis e Wooster—risulta continuo, con un massimo pari al Q -valore del decadimento, e non piccato come previsto da un decadimento monoenergetico. Per spiegare questa discrepanza, W. Pauli nel 1903 propose con una lettera l'introduzione di una nuova particella da chiamare *neutrone*¹ con massa e proprietà simili all'elettrone ma di carica neutra, che venisse emesso insieme all'elettrone per bilanciare il decadimento e preservare le leggi di conservazione.

Dopo la scoperta del neutrone in quanto nucleone, molto più massiccio di un elettrone e che non veniva osservato come emissione nei decadimenti β , E. Fermi propose nel 1932–1933 di cambiare il nome della particella ipotetica in *neutrino*, essendo questo molto più piccolo e sfuggente di un neutrone.

¹Il neutrone vero e proprio sarebbe stato scoperto due anni dopo.

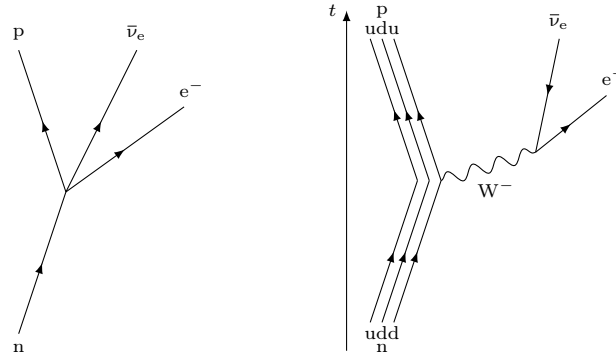


Figura 2.1: A sinistra la rappresentazione del decadimento β secondo il modello a contatto di Fermi, a destra la rappresentazione di Feynman.

2.1.1 La proposta di Fermi per il decadimento β

Una delle grandi intuizioni di Fermi fu quella di trattare il decadimento del protone o del neutrone in modo del tutto simile alla fisica atomica. Così come un atomo può passare da uno stato quantico a un altro emettendo o assorbendo un fotone

$$A^* \longrightarrow A + \gamma,$$

il protone e il neutrone sono trattati stati quantici distinti della stessa particella e l'uno può trasformarsi nell'altro attraverso l'emissione di un β e di un neutrino. Si parla quindi di un'interazione puntiforme tra quattro fermioni regolata dalla costante di Fermi $G_F = 1.166 \text{ GeV}(\text{hc})^3$

$$\begin{aligned} n &\longrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \\ p &\longrightarrow n + e^+ + \nu_e. \end{aligned}$$

Il modello di Fermi dà anche una stima più corretta del tasso di decadimento e dello spettro di energia trasportata dagli eiettili.

Il modello di Fermi è stato successivamente aggiustato in seguito agli esperimenti svolti da C. Rubbia, scopritore dei bosoni mediatori: il protone e il neutrone non decadono direttamente emettendo la particella β e il neutrino, ma piuttosto uno dei quark che li costituisce decade emettendo una particella intermedia—un bosone mediatore dell'interazione debole, W^\pm o Z^0 a seconda che l'interazione sia a corrente carica o neutra—che a sua volta decade nella coppia β - ν . Questo nuovo modello porta a una ridefinizione della costante di accoppiamento, che è quindi data da

$$G_F = \sqrt{2} \frac{g^2}{8M_W^2},$$

essendo g la nuova *costante di accoppiamento debole* ed M_W la massa del bosone W .

2.2 Il neutrino

Il neutrino è una particella elusiva con una sezione d'urto estremamente bassa, ha caratteristiche completamente diverse da quelle delle altre particelle rivelate attraverso la fisica dei raggi cosmici. Ad oggi è una delle particelle più ricercate, anche nel suo fenomeno di oscillazione di quello che viene chiamato *flavor*, o sapore.

Il neutrino sembra trasformarsi dal punto di partenza al punto di arrivo, anche in base alla lunghezza del tragitto (1–100 metri = short baseline, 100–1000 metri = long baseline). Viene studiato sia in ambito particellare attraverso la fisica delle astroparticelle che attraverso lo studio dei decadimenti nucleare. Si fanno molto esperimenti anche di grandi dimensioni a cui prendono parte migliaia di scienziati.

Rispetto al 1900 sappiamo molto di più quindi sappiamo in che direzione andare con la ricerca, ad esempio nei termini(?) di mescolamento. Ci interessano molto i neutrini di origini cosmiche che hanno energia molto elevata e possono essere rivelati solo con grandi apparati sotterranei, sotto ghiaccio o sott'acqua come il km³net che ha rivelato di recente il neutrino astroparticellare più energetico mai osservato con energie del PeV. Adesso studiamo anche i neutrini che vengono dai reattori nucleari.

Gli sperimentali, i nucleari e altri fisici studiano queste cose e fanno i conti alla magistrale e al dottorato (deduco che noi non li facciamo). Ci sono scuole di alta formazione che hanno come unico obiettivo quello di approfondire la fisica del neutrino.

2.2.1 Il neutrino e i fisici

All'epoca di Fermi il neutrino non veniva studiato a “compartimenti stagni”. I fisici dell'epoca erano a tutto tondo, sviluppavano la teoria e immaginavano, costruivano ed eseguivano esperimenti. Ad esempio Fermi con i raggi cosmici ad alta energia, che immaginò potessero esse generati da esplosioni di supernove.

Dal 2010 invece lo studio della fisica del neutrino ha iniziato a differenziarsi, le sottoaree sono state assorbite dai gruppi di scienziati dell'ambito in cui viene osservato: a Catania sono divisi in nucleari, astroparticelle e acceleratori.

Fermi immaginò che l'interazione del neutrino fosse un'interazione a 4 fermioni. Introdusse quella che oggi chiameremmo una costante di accoppiamento G_F . Naturalmente si tratta di una possibile interpretazione che seppur non sia del tutto corretta comunque ha costituito un primo modello. Non potevano fare simulazioni e non avevano strumenti per conservare i dati come oggi.

L'interpretazione moderna di questa interazione d'iconatto dei 4 fermioni è un po' meglio.

Il neutrino è presente laddove c'è interazione debole, attraverso interazioni di corrente carica e corrente neutra. Il neutrino interagisce solo attraverso interazione debole. Vedremo l'interazione debole a parte. Es-

sendo neutro il neutrino non può interagire col campo elettromagnetico, Pauli prevede massa nulla ma Fermi—che aveva ragione—pensava avesse una massa molto piccola, neutro come un neutrone, per questo essendo un piccolo neutrone decide di battezzarlo neutrino.

Gli esperimenti di Carlo Rubbia (Nobel) al CERN confermò l'esistenza dei propagatori dell'interazione debole: W^+ , W^- e Z^0 .

Albergo cita sempre questi esperimenti e li chiede agli esami quindi li chiede anche lei per continuità!

2.2.2 Il neutrino nel modello standard

Il neutrino, come già detto, è parte delle particelle elementari che non sono da confondere con le particelle subatomiche. Le particelle elementari sono i quark e i leptoni e per quanto ne sappiamo oggi son indivisibili. I protoni sono particelle subatomiche ma non sono elementari, essendo costituite da agglomerati di tre quark.

Le interazioni vengono rappresentate attraverso altre particelle mediatrici come i fotoni per l'interazione elettromagnetica, i bosoni W^\pm , Z^0 per l'interazione debole, i gluoni per l'interazione forte e il bosone di Higgs che giustifica l'esistenza della massa.

Ai neutrini viene attribuita massa nulla in maniera artificiosa, per far “tornare i conti” del modello standard, ma attraverso il metodo scientifico l'ipotesi è stata smentita attraverso la scoperta e lo studio delle oscillazioni. Lo studio delle oscillazioni è qualcosa che non viene previsto dal modello standard quindi è *beyond the standard model*. Matematicamente parlando, le oscillazioni sono interpretate come sovrapposizioni di autostati di massa distinti, e l'esistenza di massa prevede che il neutrino abbia massa, in contraddizione col modello standard. Al momento non abbiamo un numero per la massa ma solo dei limiti superiori, sappiamo che la massa del neutrino è non nulla e minore di una certa quantità. La massa del neutrino cambia come quella dei quark e degli altri leptoni cambiando famiglia, in ordine elettronico < muonico < tauonico.

La sua sezione d'urto è di $10 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$ e di conseguenza servono target estremamente massivi per poter avere un'interazione. Al gran sasso si usano rivelatori grandi come palazzi per poter osservare l'oscillazione del neutrino. km3net usa masse d'acqua enormi. L'esperimento Auger, di cui la prof Caruso fa parte, usa rivelatori vicino alle Ande e fa rivelazioni di fotoni e neutrini astroparticellari. Non essendoci grandi masse da sfruttare hanno rivelatori che tappezzano il terreno. In realtà misurano i neutrini che vengono dal lato opposto della terra che trapassano tutto il pianeta e interagiscono col terreno. Quindi anche se ancora non capiamo il neutrino, sappiamo che ci sono molti modi di rivellarli grazie agli avanzamenti della fisica delle particelle.

2.2.3 Decadimento beta

Nei fenomeni nucleari, il decadimento beta produce neutrini:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Il neutrone è formato da tre quark u d d che si trasformano in un u u d attraverso l'emissione di un bosone W⁻. Il bosone, appena lasciato il nucleone, decade in un elettrone e in un antineutrino. Avendo generato un elettrone, l'antineutrino deve essere di tipo elettronico. Se venisse emesso un muone allora il neutrino si presenterebbe anch'esso di tipo muonico.

2.3 Storia del neutrino

Carrellata di storia:

1956: Reines & Cowan rivelazione della prima interazione diretta di (anti)-neutrino elettronico;

1962: Danby et al prima rivelazione del neutrino muonico;

1975: Perl scopre il leptone τ ;

2000: La collaborazione DONUT del Fermilab registra il primo segnale proveniente da un neutrino tauonico.

Ora torniamo indietro.

2.3.1 Il pomo della discordia

Pauli suppone che il neutrino abbia massa nulla, Fermi suppone che abbia una massa dell'ordine di grandezza del centesimo della massa dell'elettrone. Il modello standard attribuisce massa nulla. Dagli anni '40 agli anni '80 sono stati cercati diversi metodi per misurare la massa, che nel complesso si possono dividere in due grandi classi: le misure *dirette* e le misure *indirette*. A loro volta le misure dirette si dividono in filoni: studi cinematici in laboratorio—decadimenti, pochi ricercatori, faccio decadere cose e uso la meccanica classica e relativistica per studiare il moto del neutrino—, studio del doppio decadimento beta—senza neutrini, indicato dalla sigla $\beta\beta_0$ —e infine neutrini da esplosione da supernovae.

Le misure indirette invece si basano prevalentemente sullo studio delle oscillazioni del neutrino nella materia e sono metodologie più moderne. Quello che si va a misurare però non è la massa, ma piuttosto la differenza al quadrato Δm^2 degli autostati di massa dell'Hamiltoniana del neutrino secondo la teoria delle oscillazioni.

2.3.2 Misure dirette

1. Fermi–Kurie plot: Fermi ipotizza che l'attribuzione di massa al neutrino influenzerebbe la parte finale—*end-point*—dei grafici del decadimento beta. In questi grafici è rappresentato lo spettro di emissione in funzione dell'energia e con esperimenti molto precisi si osserva una curvatura nell'estremo destro dello spettro. Vai a vedere i grafici! Il succo è che l'andamento della curva sarebbe molto diverso se il neutrino non avesse massa, e basta una massa molto piccola a cambiare la forma dell'*end-point*. Un problema consistente è che nell'*end-point* del grafico cadono circa 10×10^{-10} decadimenti del totale, che sono veramente pochi. Il limite superiore della massa ottenuto da questa misura è di 10 eV.

Si usano decadimenti con un Q -valore piccolo per evitare che il neutrino, che ha massa molto bassa, venga nascosto da un'energia di decadimento molto alta. Più è piccolo il Q -valore meglio viene la misura. Serve inoltre un tempo di dimezzamento breve per avere molti decadimenti e poter fare più misure. Può infine essere utile avere una struttura nucleare semplice, dal momento che il decadimento è influenzato dall'interazione coulombiana e avere un nucleo piccolo e semplice introduce meno errori. Un ottimo nucleo che si presta a questo tipo di esperimento è il trizio che decade in elio 3 + elettrone + antineutrino [mettere nella formula chimica]. Il trizio ha un tempo di dimezzamento di 12.3 anni.

2. Esperimenti da decadimenti deboli: si sfruttano i decadimenti del pione in muone + neutrino muonico, oppure dal decadimento del tauone in tre pioni e un neutrino tauonico. Si sparano fasci di protoni su un target spaccando i nuclei del materiale e formando uno sciame di adroni e altre particelle secondarie, in modo simile agli sciami originati da raggi cosmici. Di conseguenza non li chiamo *extensive air shower* ma solo *shower*. La valanga di particelle infine attraversa dei rivelatori che sono in grado di risalire alla traiettoria del proiettile—rivelatori *tracker*—e all'energia delle particelle—calorimetri formati da un mezzo denso e un mezzo scintillante, circondati da fotomoltiplicatori che convertono l'energia immessa nello scintillatore in segnale elettrico.

Affinché questi esperimenti siano utili è necessario riconoscere tutte le interazioni che possono avvenire a valle. Comunque nello sciame secondario possono esserci pioni neutri o pioni carichi, quelli neutri decadono in due gamma mentre quelli carichi decadono in coppie di muoni e neutrini. Quello che si fa è quindi generare sciami che contengano pioni e osservare i neutrini emessi dal suo decadimento, da qui massa del neutrino munoico minore di 120 keV

3. Lo stesso può essere fatto osservando il decadimento dei τ che emettono tre pioni e un neutrino tauonico. [Vedi slide per dettagli sugli sperimentatori e l'anno]. I tauoni vengono generati nei collider pres-

so il DORIS (1988) e il CERN (1995) trovando una massa minore di 24 MeV

Scala di massa? I limiti superiori ci fanno capire che le masse dei diversi sapori di neutrino sono di ordini di grandezza diversi.

1. Il doppio decadimento $\beta\beta_0$ può essere diverso in base al tipo di neutrino che può essere distinto in neutrino di Dirac o di Majorana. Goldhaber, Grozins e Sunyar osservano una reazione strana [vedi slide] dove il neutrino ha la stessa elicità di qualcosa boh?? di che sta parlando.? Ci sono neutrini destrorsi e sinistrorsi se immaginiamo l'elicità come una rotazione intorno alla direzione di propagazione. Ricordi l'esperimento di madame Wo dove c'era l'elicità dell'elettrone? Ecco, una cosa del genere.

Pauli introduce uno spin di 1/2 per bilanciare il momento angolare nel decadimento β . Possiamo dare l'elicità del neutrino come:

$$\eta = \frac{\mathbf{S} \cdot \mathbf{p}}{\|\mathbf{S}\| \|\mathbf{p}\|}$$

Se per un attimo immaginiamo lo spin come una rotazione della particella su sé stessa. Dall'esperimento si osserva che l'elicità del neutrino è sempre -1 , quindi viene detto particella *sinistrorsa* o *left-handed*. Se applichiamo il teorema di conservazione di carica, parità e tempo allora prevediamo che l'antineutrino possa essere *destrorso* o *right-handed*.

Qualcosa sulla conservazione della coniugazione di carica? [rec a 38 minuti]

bbbb Distinguiamo il neutrino di Dirac da quello di Majorana in base alle idee proposte. Dirac propone che il neutrino e l'antineutrino sono distinti, il neutrino è sempre *sinistrorso* e l'antineutrino è sempre *destrorso*: non possono esistere le configurazioni invertite, che vengono dette *sterili*. Dirac afferma inoltre che si deve conservare il numero leptonico, quindi:

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu\end{aligned}$$

e inoltre

$$\begin{aligned}\nu_\mu + N &\rightarrow \mu^- + \text{had.} \\ \bar{\nu}_\mu + N &\rightarrow \mu^+ + \text{had.}\end{aligned}$$

[sentire rec] Il neutrino di Majorana invece è molto diverso dalla teoria di Dirac. Per lui il neutrino e l'antineutrino sono la stessa particella—segue banalmente che sono possibile sia neutrini sinistrorsi che destrorsi—e

sostiene che il numero leptonico non debba conservarsi:

$$\begin{aligned}\pi^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu^- \\ \pi^- &\rightarrow \mu^- + \nu_\mu^+\end{aligned}$$

essendo ν_μ^+ il destrorso e il ν_μ^- il sinistrorso.

Con i nostri esperimenti cerchiamo di capire se i neutrini sono come previsto da Dirac o come da Majorana. I fattori necessari per poter distinguere i due tipi di neutrini sono:

1. Una sorgente di neutrini come quelli che abbiamo visto fin'ora, insieme a rivelatori come calorimetri e rivelatori Cherenkov.
2. La possibilità di invertire artificialmente l'elicità del neutrino nel corso dell'esperimento
3. Studiare l'interazione del neutrino con elicità invertita: se il neutrino invertito non interagisce vuol dire che non esiste o è sterile come previsto da Dirac e viceversa se riesco ad osservarlo, secondo Majorana dovrebbe avvenire la

$$\nu_\mu^+ + N \rightarrow \mu^+ + \text{had.} \quad (2.1)$$

Il limite di questo programma è che fin'ora si è dimostrato impossibile invertire l'elicità del neutrino, per questo si ricercano i neutrini sterili nell'ambito della fisica astroparticellare o nei doppi decadimenti $\beta\beta_0$.

2.4 L'interazione debole