

La teoria di Enrico Fermi del decadimento β

Giampaolo Co'

Dipartimento di Matematica & Fisica "Ennio De Giorgi", Università del Salento
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Lecce, Lecce, Italy

In questo articolo presento il contributo di Enrico Fermi alla comprensione del processo di decadimento β del nucleo atomico. Le novità presenti nell'approccio di Fermi, rispetto alle idee del tempo, sono spesso sottovalutate. Questa presentazione ha un taglio divulgativo, il lettore interessato può trovare una presentazione ben più accurata e dettagliata dell'argomento nel recente articolo di Francesco Vissani [1].

La descrizione dei fenomeni radioattivi attorno al 1930

La scoperta della radioattività viene fatta risalire all'anno 1896 quando Antoine Henri Becquerel scoprì che delle lastre fotografiche, conservate in un cassetto, erano rimaste impressionate anche senza essere esposte alla luce.

Questo nuovo fenomeno fu oggetto immediato di molti studi. Nella seconda metà degli anni '20 del 1900, le conoscenze riguardanti i decadimenti radioattivi avevano assodato i seguenti fatti.

- Esistono tre tipologie di decadimenti radioattivi, classificati come α , β e γ in funzione della loro capacità di penetrazione nella materia. I raggi α sono i meno penetranti e così via.
- I raggi α sono nuclei di ${}^4\text{He}$.
- I raggi β sono elettroni.

- La radiazione γ è di tipo elettromagnetico. È luce con energia milioni di volte maggiore rispetto a quella visibile. In termini quantistici, si tratta di fotoni aventi energia di qualche MeV.
- La radioattività è un fenomeno nucleare. L'idea dell'atomo nucleare era stata proposta nel 1911 da Rutherford, ed era stata ormai accettata dalla comunità scientifica.

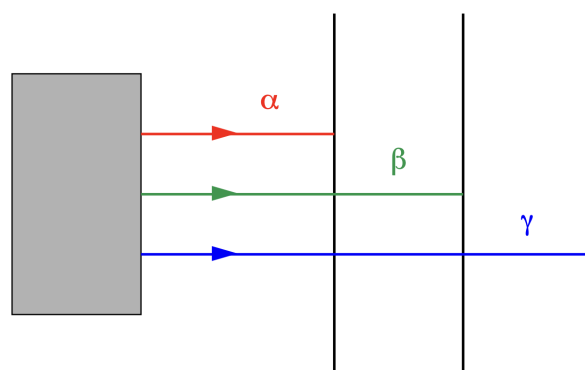


Figura 1: Classificazione dei decadimenti radioattivi in base al potere di penetrazione nella materia.

L'interpretazione dei decadimenti radioattivi consisteva, ed è ancora oggi così, nell'ipotizzare che il nucleo passi da uno stato instabile ad uno più stabile emettendo radiazione.

Problemi connessi con il decadimento β

Le quantità fisiche utili, perché misurabili, per la descrizione dei decadimenti radioattivi sono l'energia e il momento angolare, lo spin. Lo stato del nucleo genitore, il nucleo che decade, è caratterizzato da energia E_i e spin S_i . Anche lo stato del nucleo figlio possiede valori di energia E_f e spin S_f misurabili. Nel decadimento radioattivo, l'energia della radiazione è esattamente uguale alla differenza tra le energie dello stato iniziale e finale ¹

$$\omega_{if} = E_i - E_f . \quad (1)$$

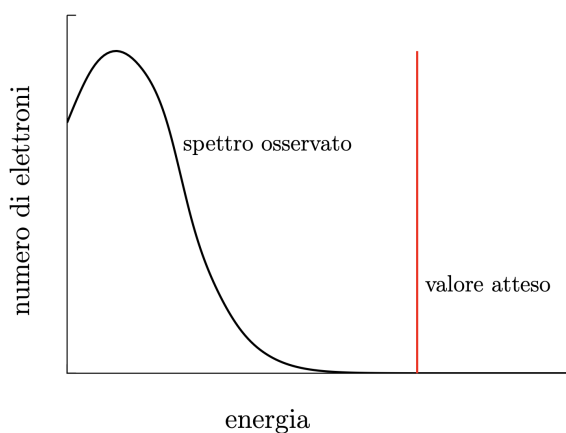


Figura 2: Spettro energetico degli elettroni emessi nel decadimento β .

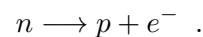
Questa relazione è verificata per i decadimenti α e γ ma per gli elettroni del decadimento β la situazione è molto diversa, come illustrato nella Figura 2. Per ogni tipo di decadimento, anziché osservare un unico valore dell'energia, come previsto dall'Eq. (1), si osserva una distribuzione continua di energie, tutte inferiori al valore atteso.

Al problema di non conservazione dell'energia se ne aggiunge un altro legato alla conservazione dello spin. Nel mondo microscopico, ogni particella possiede uno spin, quantità che non ha analogo nel mondo macroscopico. Lo spin delle particelle si comporta come un momento angolare. Nel mondo microscopico i momenti

angolari possono assumere solo valori interi o semi-interi di una quantità $\hbar = h/2\pi$, dove h è la costante di Planck.

I momenti angolari sono (pseudo)vettori e la loro composizione rispetta le regole di composizione dei vettori con, in aggiunta, il vincolo che anche i valori della composizione dei momenti angolari deve assumere valori interi o semi-interi di \hbar . Le regole di composizione dei momenti angolari in Meccanica Quantistica, sono più complicate di quelle che si usano in fisica classica. Rimane il fatto che anche i momenti angolari sono conservati. Questo significa che la composizione di un numero dispari di spin semi-interi produce un risultato che deve avere un valore semi-intero in unità \hbar , e una composizione di un numero intero di spin semi-interi produce un risultato intero, sempre in unità di \hbar . Questo risultato era contraddetto dal decadimento β .

Consideriamo, ad esempio, il decadimento β del neutrone, che nel vuoto ha una vita media di circa 15 minuti,



Il neutrone, n , il protone, p e l'elettrone, e^- , sono particelle che hanno spin $1/2$. Quindi lo spin della particella che decade è semi-intero, mentre la somma degli spin dei prodotti del decadimento, in qualsiasi modo si compongano, risulta avere valore intero.

Queste difficoltà spinsero Niels Bohr, premio Nobel in Fisica nel 1922, a mettere in discussione addirittura il principio di conservazione dell'energia che, secondo lui, nel mondo microscopico aveva un valore puramente statistico e non assoluto, cioè valido per ogni singolo evento. D'altra parte, gli esperimenti sui decadimenti α e γ indicavano chiaramente che l'energia era conservata in ogni singolo evento.

La prima testimonianza scritta di come si potesse superare il problema è una buffa lettera che, nel dicembre 1930, Wolfgang Pauli inviò ai partecipanti di un congresso a Tübingen, al quale non poteva essere presente perché invitato ad un ballo a Zurigo.²

In questa lettera, Pauli fa l'ipotesi che durante il decadimento β , insieme all'elettrone, venga

¹Nell'espressione (1) si dovrebbe anche considerare l'energia di rinculo del nucleo figlio. Quest'ultima è almeno tre ordini di grandezza inferiore a ω_{ij} e viene normalmente trascurata.

²Il testo della lettera, tradotto in italiano, può essere trovato in [2].



Figura 3: Foto di gruppo del Congresso di Fisica Nucleare di Roma 11-18 Ottobre 1931. In prima fila (da sinistra a destra): Robert Millikan, Arthur Compton, Marie Curie, Guglielmo Marconi, Niels Bohr. Dietro a Marconi, in terza fila c'è Fermi che parla con Paul Ehrenfest.

emessa anche una particella di spin $1/2$ e priva di carica, quindi invisibile ai nostri rivelatori. Questo risolverebbe entrambi i problemi della conservazione dell'energia e quello dello spin. Pauli definisce **conservazione della statistica** quest'ultimo problema.

La differenza tra le energie iniziale e finale dell'equazione (1) sarebbe data dalla somma dell'energia dell'elettrone E_e e quella di questa particella elettromagneticamente neutra E_ν

$$\omega_{if} = E_e + E_\nu .$$

Rivelando solo E_e , è evidente che si osservi uno spettro continuo di valori il cui massimo è proprio ω_{if} , il valore atteso.

Anche il problema della statistica degli spin sarebbe risolto perché nello stato finale abbiamo due particelle a spin $1/2$ la cui combinazione degli spin è intera, conservando la statistica. Nell'esempio del decadimento del neutrone lo stato finale è composto da tre particelle a spin

semi-intero che si compongono in uno spin totale semi-intero come quello del neutrone.

Per discutere di queste questioni, legate alla struttura del nucleo atomico, Fermi organizzò un Congresso internazionale di Fisica Nucleare che si tenne a Roma dall'11 al 17 Ottobre del 1931. Il congresso fu gestito dall'Accademia d'Italia e finanziato dalla Fondazione Alessandro Volta, una istituzione fondata dalla società Edison di elettricità. L'occasione fu sfruttata dal fascismo per un'operazione propagandistica sull'apertura culturale del regime: lo stesso Mussolini intervenne alla seduta inaugurale del congresso e ricevette i congressisti a palazzo Venezia.

Pauli era molto cauto rispetto alla sua proposta, e racconta la situazione in una lettera inviata, anni dopo, a Franco Rasetti [3].

“Ho parlato per la prima volta di una particella neutra, per salvare il principio di conservazione dell'energia nel decadimento β , al convegno di fisica

di Pasadena nella primavera del 1931. Niente tuttavia venne pubblicato nel *Bullettin of the National Academy of Science* per mia precauzione [...] Poi ne parlai a Roma al congresso di Fisica Nucleare, dove c'erano praticamente tutti i fisici più famosi (*Horribile dictu*: Là ho dovuto anche stringere la mano a Mussolini. Perdonami di ciò.) [...] In contrasto con Bohr, Fermi era molto a favore della mia nuova idea e fu lui che inventò il nome neutrino³ in questo congresso, ovviamente per distinguerlo dal neutrone pesante. [...] In una discussione durante il congresso Fermi mi chiese di parlare della mia nuova idea, ma io ero ancora molto cauto e al congresso di Roma non ne parlai in pubblico, ma solo privatamente. "

In un congresso a Parigi nel Luglio 1932 Fermi, invitato a presentare un intervento sullo "Stato attuale della Fisica Nucleare", accennò all'ipotesi del neutrino proposta da Pauli al congresso di Roma dell'anno precedente.

Nel 1932 l'identificazione del neutrone da parte di James Chadwick convinse Ettore Majorana a sviluppare una teoria del nucleo composto da protoni e neutroni legati tra loro da una interazione nuova rispetto a quella elettromagnetica e gravitazionale: l'interazione nucleare forte [6].

Fermi partecipò alla 7^a Conferenza Solvay nell'Ottobre del 1933 e in quella occasione Pauli presentò la sua idea sull'esistenza del neutrino con maggiore convinzione che nel congresso di Roma, perché, come ricorda in una lettera a Rasetti [3]

"... dopo la scoperta del neutrone mi era diventato chiaro che non solo la conservazione dell'energia ma anche la conservazione dello spin (e della statistica) rendevano necessaria, nel decadimento β , l'esistenza di una nuova particella di spin semi-intero [il neutrino]. Capii quindi che le mie precauzioni non erano più giustificate. Ne parlai

³Una storia dettagliata di come sia nato il nome neutrino può essere trovata in [4].

di nuovo al congresso Solvay a Bruxelles (con Fermi e Bohr di nuovo presenti) e questa volta il mio intervento fu pubblicato."

Stimolato dalle discussioni avvenute al congresso di Bruxelles, Fermi completò il lavoro sul decadimento β . Rasetti ricorda [3]

"Nell'autunno del 1933 Fermi ci mostrò un articolo che aveva meditato e scritto nelle prime ore del mattino da parecchi giorni, già in forma completa di tutti gli sviluppi matematici, su una teoria dell'emissione dei raggi β fondata sull'ipotesi di Pauli del neutrino, dalla quale si deducevano risultati precisi sulle caratteristiche quantitative del fenomeno. Poche teorie della fisica moderna sono state così originali, così feconde di risultati [...] come la teoria di Fermi dei raggi β , che ancora oggi domina non soltanto l'ordinario processo β (che rappresenta la trasformazione di un neutrone in un protone con la creazione di un elettrone e un neutrino) ma anche numerose trasformazioni di particelle instabili."

Segrè ricorda quanto Fermi andasse fiero di questo lavoro [3]

"Fermi espose la sua teoria ad alcuni di noi durante una vacanza nell'inverno del 1933, in Val Gardena, dopo una giornata di sci. [...] Era pienamente consapevole dell'importanza del suo lavoro e disse che quello sarebbe stato il suo capolavoro, ricordato dalla posterità, certo il meglio di quanto aveva fatto fino ad allora."

Fermi inviò la prima versione dell'articolo sul decadimento β alla rivista *Nature*, di carattere generalista, che tuttora si contende con *Science* il titolo della più accreditata vetrina della ricerca scientifica d'avanguardia. *Nature* rifiutò di pubblicare l'articolo perché [5]

"contenente speculazioni troppo remote dalla realtà per poter interessare i lettori."



Figura 4: Foto di gruppo della 7^a Conferenza Solvay Bruxelles, 22-29 Ottobre 1933. Seduti da sinistra a destra: Erwin Schrödinger, Irène Joliot-Curie, Niels Bohr, Abram Ioffe, Marie Curie, Paul Langevin, Owen Willans Richardson, Lord Ernest Rutherford, Théophile de Donder, Maurice de Broglie, Louis de Broglie, Lise Meitner, James Chadwick. In piedi, da sinistra a destra: Émile Henriot, Francis Perrin, Frédéric Joliot-Curie, Werner Heisenberg, Hendrik Anthony Kramers, Ernst Stahel (de), Enrico Fermi, Ernest Walton, Paul Dirac, Peter Debye, Nevill Francis Mott, Blas Cabrera y Felipe, George Gamow, Walther Bothe, Patrick Blackett, M.S. Rosenblum, Jacques Errera, Edmond Bauer, Wolfgang Pauli, Jules-Émile Verschaffelt, Max Cosyns, Édouard Herzen, John Douglas Cockcroft, Charles Drummond Ellis, Rudolf Peierls, Auguste Piccard, Ernest Lawrence, Léon Rosenfeld.

Il rifiuto di pubblicare il lavoro di Fermi del 1934 è considerato uno dei maggiori infortuni editoriali della lunga esistenza della rivista.

Fermi fu piuttosto infastidito da questo rifiuto ed inviò una versione preliminare del lavoro alla rivista *Ricerca Scientifica* [7] e poi una versione più completa al *Nuovo Cimento* [8] e una traduzione parola per parola a *Zeitschrift für Physik* [9].⁴

La teoria di Fermi fu immediatamente accettata dalla comunità scientifica, e utilizzata per lo studio dei decadimenti beta del nucleo e anche per descrivere fenomeni subnucleonici legati all'interazione nucleare debole.

Il neutrino fu identificato nel 1956, due anni dopo la morte di Fermi, da Clyde Cowan e Fred Reines in un esperimento eseguito presso il reattore a fissione di Savannah River [10].

L'articolo di Fermi

Il titolo dell'articolo è molto modesto indicando come "tentativo" la teoria presentata. Nel primo paragrafo, Fermi presenta i problemi osservativi legati al decadimento β e chiarisce che lavora all'interno della proposta di Pauli in cui nel decadimento vengono emessi elettrone e neu-

trino⁵. Fermi accenna al fatto che sulla base del principio di indeterminazione di Heisenberg elettroni e neutrini non possono essere confinati nel nucleo. E quindi, sempre citando Heisenberg, considera l'ipotesi che il nucleo sia composto da protoni e neutroni. Quindi ipotizza che elettrone e neutrino vengano creati durante il processo di decadimento in analogia a ciò che accade con i fotoni nel decadimento γ .

A questo punto, formula le tre ipotesi su cui si fonda il suo lavoro. L'ipotesi *a*) è quella di non considerare fisso il numero di elettroni e neutrini, ma di ritenere che questi vengano creati durante il processo di decadimento. Afferma che

"Questa possibilità non ha per altro alcuna analogia con la possibilità della creazione o della distruzione di una coppia elettrone-positrone . . ."

Discute di quest'ultimo caso in termini di mare di Dirac in cui il positrone risulta essere una lacuna e quindi il numero totale "(infinitamente grande)" di elettroni si conserva.

L'ipotesi *b*) considera protoni e neutroni come fossero una sola particella distinta da nume-

⁴È interessante notare che oggi queste due riviste si sono fuse in una rivista: *European Physics Journal*.

⁵F. Vissani [1] fa notare che, almeno nella sua visione iniziale, W. Pauli riteneva che neutrino ed elettrone fossero presenti nel nucleo. Infatti nella famosa lettera del 1930 dice esplicitamente "... possibilità che nei nuclei possano esistere particelle neutre."

ri quantici differenti utilizzando il formalismo dell'isospin formulato da W. Heisenberg [11].

L'ipotesi c) indica la necessità di descrivere in maniera unificata sia le particelle che chiama pesanti (protone e neutrone) sia quelle leggere (elettrone e neutrino) e afferma che

“... ogni transizione da neutrone e protone deve essere accompagnata dalla creazione di un elettrone e neutrino; e che il processo opposto, trasformazione di un protone in neutrone, sia accompagnato dalla sparizione di un elettrone e di un neutrino.”

Nel secondo paragrafo dell'articolo Fermi presenta gli operatori di creazione e distruzione introdotti da Jordan e Klein [12] per fornire una formalizzazione elegante della teoria della radiazione di Dirac [13]. La rappresentazione che Fermi ne dà è quella oggi adottata dalla maggior parte dei testi di Teoria dei Campi. Quello di Fermi è il primo lavoro in cui questo formalismo è usato per descrivere la creazione di particelle massive e a spin semi-intero [1].

Usando questi operatori, Fermi descrive il sistema delle particelle pesanti, il nucleo, in termini non relativistici. Siccome le energie cinetiche delle particelle leggere, elettrone e neutrino, sono confrontabili con le loro masse a riposo, Fermi descrive il loro sistema utilizzando il formalismo relativistico di Dirac che implica l'uso di quadrivettori.

Dopo aver descritto separatamente i sistemi delle particelle pesanti e di quelle leggere introduce l'interazione tra questi due sistemi. Questo termine di interazione è scritto nella forma più semplice possibile in termini di operatori di creazione e distruzione in modo che l'espressione soddisfi le regole delle simmetrie spazio-temporali e garantisca la conservazione della quantità di moto.

Per calcolare la probabilità di transizione, Fermi stima che all'interno del nucleo le densità di probabilità di trovare elettrone e neutrino sono essenzialmente costanti. Inoltre, considera che il neutrone si trasformi in protone senza che questo modifichi la sua posizione nel nucleo. Chiama “permesse” queste transizioni anche se afferma chiaramente che questo nome non implica che non ce ne siano di altro tipo. Questa terminologia

L'esperimento KATRIN

L'esperimento KATRIN (Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment) è progettato per misurare la massa del neutrino elettronico osservando con grande accuratezza la distribuzione energetica degli elettroni emessi nel decadimento β del nucleo di trizio ^3H nella regione di massima energia: esattamente il procedimento indicato da Fermi. Il contenitore dello spettrometro è stato costruito a Deggendorf in Baviera e doveva essere trasportato a Karlsruhe che dista 350 km. Purtroppo le sue dimensioni erano tali che il trasporto per le autostrade non era possibile, e anche i canali navigabili che collegano il Danubio al Reno erano troppo stretti. Per questa ragione, il rivelatore è stato trasportato per via d'acqua scendendo il corso del Danubio fino al Mar Nero, quindi percorrendo il Mediterraneo, l'oceano Atlantico, fino a Rotterdam, quindi ha disceso il fiume Reno fino a Karlsruhe, e ha percorso via terra solo gli ultimi 7 km di un viaggio lungo 8600 km.



Figura 5: Passaggio del *tank* dello spettrometro di KATRIN nella cittadina tedesca di Eggenstein-Leopoldshafen durante il trasporto avvenuto nel 2006.

è usata ancora oggi. Fermi non considera il fatto che durante la transizione lo spin del neutrone che decade possa cambiare direzione. Queste transizioni “permesse” senza cambio di spin sono chiamate ancora oggi “transizioni di Fermi”. Le transizioni “permesse” in cui lo spin del neutrone cambia direzione sono dette “transizioni di Gamow-Teller”.

È interessante notare che nel considerare la

transizione tra neutrone e protone con l'ipotesi sopra indicata Fermi si preoccupa del principio di esclusione di Pauli:

“Nel nucleo si deve dunque avere uno stato neutronico occupato abbastanza elevato al di sopra di uno stato protonico libero perché l'emissione sia possibile.”

Nel paragrafo 7 dell'articolo, Fermi si occupa degli effetti della massa del neutrino, indicando un metodo per una sua eventuale misura che consiste nell'osservare l'andamento dello spettro elettronico vicino al valore massimo dell'energia. Questa metodologia è quella utilizzata oggi per le misure più accurate del valore della massa del neutrino, che attualmente la collaborazione KATRIN (vedi il riquadro) indica con un limite superiore di 0.8 eV [14].⁶

A questo punto, Fermi corregge la descrizione del moto dell'elettrone, che prima ha considerato come particella libera, inserendo l'interazione elettromagnetica con il nucleo. Definisce una funzione che corregge il moto della particella libera, funzione che ancora oggi, nei manuali di Fisica Nucleare, è chiamata funzione di Fermi.

Prima di confrontare la sua teoria con i dati sperimentali, Fermi stima l'intensità di quelle transizioni da lui definite “non permesse”, trovando che “sono circa 100 volte meno intense di quelle normali”.

L'ultimo paragrafo dell'articolo è dedicato al confronto con i dati sperimentali disponibili all'epoca [16]. Fermi scrive:

“Nel complesso si può concludere da questo confronto tra teoria ed esperienza che la concordanza è certo altrettanto buona quanto si sarebbe potuto attendersi.”

Attribuisce le discrepanze sia all'imprecisione nelle misure, ma anche ai dettagli numerici dei calcoli. Ad ogni modo, questi calcoli gli permettono di stimare l'ordine di grandezza dell'intensità dell'interazione tra particelle pesanti e leggere.

⁶Anche l'esperimento HOLMES, situato presso i laboratori di criogenia dell'Università Milano Bicocca, è pensato per effettuare una misura della massa del neutrino osservando lo spettro di emissione del nucleo ¹⁶³Ho con tecniche criogeniche. L'obiettivo dell'esperimento è quello di raggiungere una sensibilità di 0.1 eV. [15].

“Riassumendo sembra giustificato affermare che la teoria, nella forma in cui la abbiamo qui esposta, si trova in accordo con i dati sperimentali, i quali per altro non sono sempre molto precisi. Se anche del resto, in un ulteriore confronto della teoria con l'esperienza, si dovesse arrivare a delle contraddizioni, sarebbe sempre possibile modificare la teoria senza alterarne essenzialmente i fondamenti concettuali. [...] Solo un ulteriore sviluppo della teoria, come anche un aumento nella precisione dei dati sperimentali, potranno indicare se una tale modificazione si renderà necessaria.”

L'eredità di Fermi

Nel lavoro pubblicato sul Nuovo Cimento Fermi non parla esplicitamente di una nuova interazione fondamentale, quella che oggi chiamiamo interazione nucleare debole. D'altra parte fornisce una stima quantitativa dell'intensità dell'interazione tra le particelle leggere e pesanti. Di fatto, questo è il primo lavoro in cui si mette in evidenza l'esistenza dell'interazione debole.

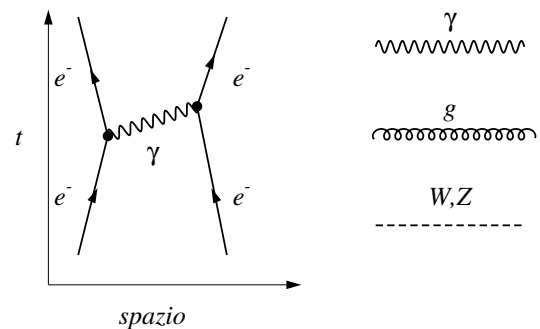


Figura 6: A sinistra: diagramma in cui due elettroni interagiscono elettromagneticamente scambiandosi un solo fotone. A destra: simboli comunemente usati nei diagrammi per identificare i fotoni γ , i gluoni g , mediatori dell'interazione forte, e W^\pm e Z^0 , mediatori dell'interazione debole.

Oggi, il modo di descrivere la fenomenologia delle interazioni fondamentali è molto differente rispetto all'approccio usato da Fermi. L'idea è che le interazioni fondamentali siano media-

te dallo scambio di particelle a spin intero. Ad esempio, due elettroni che interagiscono elettromagneticamente si scambiano fotoni. La Figura 6 presenta un diagramma in cui i due elettroni si scambiano un solo fotone. I mediatori dell'interazione forte sono i gluoni e quelli dell'interazione debole i bosoni W^\pm e Z^0 . Mentre fotoni e gluoni hanno massa nulla, W^\pm e Z^0 sono molto massivi, il W^\pm circa 80 volte più massivo del protone e lo Z^0 circa 90.

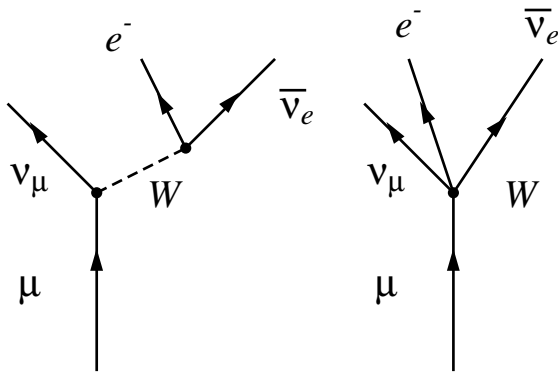


Figura 7: Diagrammi che descrivono il decadimento debole del muone. A sinistra il diagramma nella teoria fondamentale, a destra la sua semplificazione nella teoria di Fermi.

Il fenomeno più semplice per lo studio dell'interazione debole è il decadimento del muone. Il muone, μ , è una particella fondamentale, cioè priva di struttura interna, sensibile solo alle interazioni debole ed elettromagnetica. Ha una massa circa 200 volte maggiore di quella dell'elettrone. Si tratta essenzialmente di un elettrone molto più massivo che, per il tramite dell'interazione debole, decade secondo lo schema indicato nella Figura 7.

Il diagramma a sinistra descrive il decadimento del muone secondo la moderna trattazione. Il muone, una volta creato, viaggia libero e in un certo istante, mediamente dopo circa 2.2×10^{-6} secondi, emette un W^- e si trasforma in elettrone. Il W^- a sua volta viaggia e, dopo un tempo molto più breve, decade creando una coppia elettrone e (anti)neutrino elettronico. In questo processo sono coinvolte solo particelle prive di struttura interna e non ci sono complicazioni legate all'interazione forte come nel caso del decadimento del neutrone.

Il percorso del W^- è essenzialmente descritto

dall'espressione

$$g \frac{1}{Q^2 - M_W^2} g \quad (2)$$

dove M_W è la massa del W^- e Q^2 è essenzialmente il quadrato dell'energia a cui avviene il processo. Con g si indica la costante che accoppia W^- con muone ed elettrone, vertice di sinistra, e poi W^- con elettrone ed anti-neutrino, vertice di destra. Un gran numero di esperimenti ha mostrato che il valore della costante g è lo stesso per i due casi in esame.

Nel caso $Q^2 \ll M_W^2$ abbiamo che

$$\left| g \frac{1}{Q^2 - M_W^2} g \right| \xrightarrow{Q \ll M_W} \frac{g^2}{M_W^2} \equiv \frac{\sqrt{2}}{\pi} \frac{1}{(\hbar c)^2} G_F$$

dove la costante G_F è detta costante di Fermi. In questo caso, il diagramma di sinistra della Figura 7 si trasforma in quello di destra, che descrive in termini moderni l'approccio di Fermi.

I decadimenti β avvengono ad energie di pochi MeV, mentre la massa del W^\pm è di circa 80 GeV, quindi per questi decadimenti la condizione $Q^2 \ll M_W^2$ è ben verificata. A tutt'oggi il confronto tra teoria ed esperimento per i decadimenti β è fatto usando la teoria di Fermi, e non il più complicato approccio delle Teoria dei Campi.

È un piacere ringraziare Paolo Ciafaloni, Vincenzo Flaminio e Francesco Vissani per i loro commenti che mi hanno aiutato a migliorare, e a correggere, l'articolo.



- [1] F. Vissani: *First steps towards understanding neutrinos A tribute to Enrico Fermi on the 90th anniversary of the β decay model*, Quaderni di Storia della Fisica, 31 (2024) 109.
- [2] G. Co': *Neutrini ed interazione debole*, Ithaca, VI (2015) 7.
- [3] M. De Maria: *Fermi: un fisico da via Panisperna all'America*, Supplemento n. 8 a Le Scienze, 368 (aprile 1999) 1.
- [4] H. Kragh: *A terminological history of early elementary particle physics* Archive for History of Exact Sciences, Pubblicato on-line (2022).
<https://doi.org/10.1007/s00407-022-00299-2>
- [5] L. Belloni, S. Olivares: *Fermi e l'energia atomica*, RCS Mediagroup, Milano (2016).

- [6] Ettore Majorana: *Über die Kerntheorie*, Zeitschrift für Physik, 82 (1933).137
- [7] E. Fermi: *Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta*, Ric. Sci., 4 (1933) 491.
- [8] E. Fermi: *Tentativo di una teoria dei raggi β* , Nuovo Cimento, 11 (1934) 1.
- [9] E. Fermi: *Versuch einer Theorie der β -Strahlen*, Zeitschrift für Physik, 88 (1934) 161.
- [10] L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, A. D. McGuire: *Detection of the Free Neutrino: a Confirmation*, Science, 124 (1956) 103.
- [11] Werner Heisenberg: *Über den Bau der Atomkerne*, Zeitschrift für Physik, 77 (1932) 1.
- [12] P. Jordan, O. Klein: *Zum Mehrkörperproblem der Quantentheorie*, Zeitschrift für Physik, 45 (1927) 751.
- [13] P. A. M. Dirac: *The Quantum Theory of the Emission and Absorption of Radiation*, Proc. Roy. Phys. Soc. London, 114 (1927) 243.
- [14] KATRIN Collaboration: *Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity*, Nat. Phys., 18 (2022) 160.
- [15] M. Borghesi et al.: *An updated overview of the HOLMES status*, Nucl. Inst. Met. A, 1 (0) 5.1 2023 168205
- [16] B. W. Sargent: *The maximum energy of the β -Rays from uranium X and other bodies*, Proc. Roy. Soc., 139 (1933) 659.



Giampaolo Co': è Professore Associato di Fisica Nucleare presso l'Università del Salento. Si occupa di sistemi quantistici a molti corpi e della redazione di *Ithaca*.

