

Le interazioni deboli

NICOLA CABIBBO

1. – Introduzione

Cosa sono le interazioni deboli? Quale è il loro ruolo nel mondo che ci circonda? Perché parlarne in un volume dedicato alla memoria di Enrico Fermi? Cominciamo, per orizzontarci, a dare delle risposte semplici a queste domande, cominciando dalla terza, che è forse la più semplice.

Nel dicembre del 1933 apparve su “La Ricerca Scientifica”, la rivista del Consiglio Nazionale delle Ricerche, un articolo di Enrico Fermi dal titolo “Tentativo di una teoria dell’emissione dei raggi beta”. Il titolo potrebbe trarre in inganno: la teoria presentata in quell’articolo è ben più di un tentativo e con alcuni perfezionamenti di cui parleremo nel seguito essa è pienamente valida oggi a distanza di quasi settant’anni.

Malgrado la sua grande importanza, il lavoro di Enrico Fermi non ebbe inizialmente vita facile. Il lavoro fu rifiutato dalla rivista inglese “Nature”, perché “troppo astratto”, e Fermi dovette ricorrere a “La Ricerca Scientifica”. La via italiana alla pubblicazione rapida (sicuramente aiutata dalla presenza di Giustizia Amaldi nella redazione) si rivelò preziosa l’anno successivo quando i risultati sulle trasmutazioni radioattive prodotte dai neutroni furono comunicati in dieci brevi articoli pubblicati nel giro di pochi mesi.

Fermi attribuì la radioattività beta all’azione di un nuovo tipo di interazione tra le particelle elementari, quella che oggi chiamiamo “interazione debole”. Nel corso degli anni successivi, ed ancora più nella seconda metà del secolo scorso, lo studio delle particelle elementari ha messo in evidenza moltissime altre manifestazioni delle interazioni deboli, che possono essere interpretate con la teoria di Fermi del 1933. Lo studio delle interazioni deboli ha portato alla scoperta di fenomeni di grande importanza, tra cui la violazione della simmetria di parità (detta anche simmetria P , o simmetria speculare),

della simmetria per inversione temporale (simmetria T) e della simmetria tra materia ed antimateria (simmetria CP).

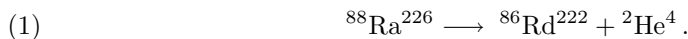
Le interazioni deboli sono estremamente interessanti perché permettono di trasmutare una particella elementare in una differente, e sono quindi in grado di mettere a nudo le connessioni più riposte tra i vari tipi di particelle.

Lo studio della teoria di Fermi e di alcuni suoi aspetti problematici portò, alla fine degli anni sessanta, alla formulazione di una teoria unificata delle interazioni fondamentali, nella quale le interazioni deboli e quelle elettromagnetiche appaiono come manifestazioni diverse di una singola forza, che oggi prende il nome di forza elettrodebole. La teoria unificata contiene, come casi particolari, sia la teoria di Maxwell delle forze elettromagnetiche che la teoria di Fermi delle interazioni deboli.

2. – Il decadimento beta e l'ipotesi del neutrino

Nei primi capitoli del suo libro “Inward Bound”, Abraham Pais racconta la storia affascinante della scoperta della radioattività, e degli studi che portarono a chiarire l'esistenza di tre tipi diversi di radioattività, distinti dalle lettere greche α , β , γ . Vogliamo qui brevemente delineare lo stato delle conoscenze alla vigilia del lavoro di Fermi, concentrandoci in particolare sui problemi posti dalla radioattività beta.

Le sostanze con radioattività alfa emettono nuclei di elio (particelle α); ad esempio, il radio (Ra), elemento scoperto da Marie Curie, decade in radon (Rd, un gas nobile) secondo lo schema:



Per ciascun nucleo abbiamo indicato a sinistra il “numero atomico”, la carica elettrica del nucleo in unità e , pari al numero di protoni, a destra il “peso atomico”, pari al numero totale di protoni e neutroni. La radioattività alfa lascia invariato il numero totale dei protoni e quello dei neutroni, e si riduce quindi ad un riarrangiamento delle componenti del nucleo iniziale. Questo fenomeno riflette una instabilità strutturale del nucleo “padre”, un fenomeno ben spiegato da George Gamow, all'inizio degli anni trenta, nel quadro della meccanica quantistica.

Nella radioattività di tipo gamma vengono emessi fotoni (quanti di luce) di altissima energia; si tratta di un fenomeno del tutto analogo alla emissione di luce da parte di un atomo, e la sua esistenza non poneva particolari problemi di principio.

L'origine della radioattività beta rimase problematica sino al lavoro di Fermi. I raggi beta altro non sono che elettroni, ma da dove vengono questi elettroni? Prima della scoperta del neutrone (Chadwick, 1932) era corrente l'ipotesi che il nucleo fosse composto da protoni ed elettroni. In questo quadro un nucleo di elio sarebbe composto da 4 protoni e 2 elettroni. Questo permetteva di spiegare il suo “peso atomico” pari a 4 (la massa degli elettroni è trascurabile rispetto a quella dei protoni), e la sua carica elettrica pari a quella di due protoni (la carica di due dei quattro protoni sarebbe neutralizzata da quella opposta dei due elettroni). In questo quadro il decadimento beta risulterebbe simile al

decadimento alfa, cioè un riarrangiamento dei componenti già presenti nel nucleo iniziale, una vera e propria disintegrazione.

La scoperta del neutrone portò rapidamente ad abbandonare l'ipotesi che il nucleo contenesse degli elettroni, a favore di quella che è sostanzialmente la visione moderna della struttura del nucleo, composto da protoni e neutroni. La transizione al punto di vista moderno fu rapidissima. Alcune misure sulla spettroscopia delle molecole d'azoto, eseguite da Franco Rasetti nel 1929, avevano già messo seriamente in crisi l'ipotesi della presenza di elettroni nucleari. Questi risultati sono ad esempio citati nei lavori di Heisenberg del 1932 sulla nuova teoria della struttura nucleare. La teoria di Fermi risponde come vedremo alla domanda che sorge naturalmente non appena si accetti il fatto che il nucleo atomico non contiene elettroni: da dove vengono gli elettroni del decadimento beta?

La radioattività beta poneva un problema ancora più grave: gli elettroni non vengono emessi con una singola energia, ma con uno spettro di energie che varia con continuità. La situazione è ben diversa da quella che si riscontra nei decadimenti radioattivi di tipo alfa o gamma, in cui l'energia della particella emessa è determinata dalla differenza di energia tra il nucleo iniziale e quello finale, ed è quindi sempre la stessa per un dato tipo di decadimento. Ad esempio, nella disintegrazione del radio (eq. (1)) vengono emesse particelle alfa con una energia di 4.88 MeV. Come mai questo semplice argomento non funziona nel caso del decadimento beta? Niels Bohr era giunto a proporre che nel caso del decadimento beta l'energia non fosse esattamente conservata, e le idee di Bohr, padre della fisica atomica, godevano di un prestigio indiscusso.

La soluzione a questo secondo problema fu trovata da Wolfgang Pauli: nel decadimento beta non viene solamente emesso un elettrone, ma anche una seconda particella che sfugge ai nostri strumenti. Le due particelle emesse si suddividono l'energia a disposizione, e questo può avvenire in proporzione differente, di modo che l'energia conferita all'elettrone non è univocamente determinata. La "seconda particella" doveva essere neutra, altrimenti sarebbe facilmente rivelata tramite il suo potere ionizzante, e non poteva essere un fotone, una possibilità che i dati sperimentali sembravano escludere. Si doveva trattare di una particella interamente nuova, mai osservata sino ad allora.

L'ipotesi della "seconda particella" sembrava talmente fantasiosa che Pauli stesso, forse anche per non contrariare Niels Bohr, non si decise a pubblicarla. Ne scrisse ai colleghi più stretti, in una lettera rivolta ai "Dear radioactive ladies and gentlemen", in cui chiamava questa particella "neutrone", ne parlava nei corridoi dei congressi di fisica, ma mai in forma ufficiale. Ne parlò con Fermi durante il congresso sulla fisica nucleare tenutosi a Roma nel 1931, e fu in questa occasione che Fermi propose scherzosamente che il nome appropriato non poteva essere "neutrone" ma "neutrino", dato che la sua massa doveva essere molto piccola. Tra i due non ci dovettero essere ulteriori contatti sull'argomento: mentre Pauli adottò senza riserve il nome proposto da Fermi, lo stesso Fermi, nella sua relazione alla Conferenza Internazionale sull'Elettricità (Parigi, 1932), preferì utilizzare il nome inizialmente proposto da Pauli:

“... Si potrebbe pensare ad esempio, secondo un suggerimento di Pauli, che nel nucleo atomico si trovino dei *neutroni* che sarebbero emessi contemporaneamente alle particelle beta. ...”

A seguito della domanda di un congressista, Fermi chiarì che questi neutroni non potevano essere gli stessi neutroni recentemente scoperti da Chadwick, ma particelle molto più leggere.

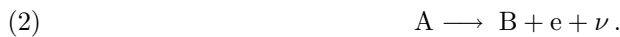
Questa breve citazione mostra come nel 1932 Fermi ancora discutesse (almeno in pubblico) della radioattività beta in termini della emissione di particelle *già presenti nel nucleo*. La soluzione introdotta nell’articolo del 1933 sarebbe stata radicalmente differente.

Nell’ottobre 1933 il punto di vista “moderno” sulla struttura del nucleo, composto da protoni e neutroni, ebbe la sua sanzione ufficiale a Bruxelles nel corso della conferenza Solvay. Nella discussione che seguì la relazione di Heisenberg sulle forze nucleari, Pauli uscì finalmente allo scoperto con alcuni commenti sulla ipotesi del neutrino.

3. – La teoria di Fermi

L’ingresso del neutrone di Chadwick nella struttura del nucleo ne scacciava l’elettrone, e lasciava ben poco posto per la presenza di un neutrino di Pauli. Occorreva una idea nuova, e questa fu fornita dal lavoro di Fermi, apparso su “La Ricerca Scientifica” nel numero di dicembre dello stesso anno.

Esaminiamo brevemente il lavoro di Fermi, considerando il decadimento radioattivo beta di un nucleo A in un nucleo B con l’emissione di un elettrone e un neutrino,



Se elettrone e neutrino non sono presenti in A, essi devono essere creati nell’atto della transizione. Questa conclusione era dura da accettare, dato che si era abituati a pensare l’elettrone come una particella materiale, dotata di una sua solidità e persistenza.

La possibilità di creare (e distruggere) particelle aveva un precedente ben noto nel caso dei fotoni. La luce è composta da particelle, i fotoni, che vengono creati quando la luce viene emessa, e distrutti quando essa viene assorbita. Un atomo può emettere un fotone passando da un livello di energia superiore a uno di energia inferiore. Nel processo inverso un atomo può assorbire un fotone portandosi da un livello di energia inferiore ad uno superiore.

I processi di creazione e distruzione dei fotoni vengono descritti dalla teoria quantistica del campo elettromagnetico, sviluppata da Dirac immediatamente dopo la nascita della nuova meccanica quantistica di Heisenberg. Nel 1927 Jordan e Klein mostrarono che la teoria dei campi quantistici può essere applicata a qualsiasi particella. In altre parole, gli elettroni possono essere visti come particelle —il punto di vista classico— ma anche come fenomeno ondulatorio. Questa situazione è ben descritta dai versi in cui Enrico Persico descrive il suo lavoro missionario all’Università di Torino:

“...Credon poi con fe’ profonda
 Cui s’inchina la ragion
 Che la luce è corpo ed onda
 Corpo ed onda è l’elettron
 Sono questi i dogmi santi
 Ch’egli insegna agli infedel
 Con esempi edificanti
 Appoggiandosi al Vangel”⁽¹⁾

Le prime tracce della dualità campo-particella si trovano nel lavoro del 1905 sull’effetto fotoelettrico in cui Einstein introdusse il concetto di fotone. Una importante conseguenza della corrispondenza tra campi e particelle è il concetto di identità delle particelle che corrispondono ad un dato campo. Due fotoni sono tra loro “identici” in un senso molto più forte di quello in cui questo termine si usa nel linguaggio comune. La madre di due gemelle “identiche”, diciamo Ida e Ada, è quasi sempre in grado di distinguerle. La situazione in cui Ida è alla sinistra di Ada è differente da quella in cui Ida è alla destra. Scambiare tra loro due fotoni invece non cambia in nessun modo la situazione —come si dice in termini tecnici, non cambia lo stato del sistema.

Nella fisica quantica il concetto di particella e quello di campo sono totalmente intercambiabili. Ad ogni campo corrisponde un tipo di particelle tra loro identiche, ma vale anche il contrario: ad ogni tipo di particelle tra loro identiche corrisponde un campo. Possiamo considerare il lavoro di Jordan e Klein come un dizionario che permette di tradurre dal linguaggio dei campi a quello delle particelle e viceversa.

Il linguaggio dei campi permetteva di descrivere fenomeni in cui delle particelle sono create o distrutte ma il lavoro di Fermi sulla radioattività beta è il primo in cui questa possibilità sia stata usata al di fuori della teoria dei fotoni.

Alla base della teoria di Fermi è l’ipotesi che il decadimento beta di un nucleo (eq. (2)) sia dovuto ad un nuovo tipo di interazione tra particelle che causa la trasmutazione di un neutrone in un protone con la simultanea creazione di un elettrone ed un neutrino,

$$(3) \quad N \longrightarrow P + e + \nu.$$

Dato che protone ed elettrone hanno carica elettrica rispettivamente pari a $+e$, $-e$, mentre neutrone e neutrino sono elettricamente neutri, in questo processo è conservato il valore della carica elettrica totale. Fermi costruì la sua teoria partendo dall’ipotesi che esistesse una analogia —per quanto possibile stretta— tra questo processo e quello alla base della emissione di raggi gamma,

$$(4) \quad P \longrightarrow P + \gamma,$$

⁽¹⁾ Il Vangelo sono le dispense di Enrico Persico, uno dei primi testi di meccanica quantistica apparsi in Italia, ancora in uso a Roma negli anni cinquanta.

nel quale uno dei protoni nel nucleo passa da uno stato energetico superiore ad uno inferiore, emettendo un fotone. Può essere istruttivo paragonare il processo (4) all'emissione di radiazione elettromagnetica da parte di un'antenna: sorgente di questa radiazione è la corrente elettrica oscillante nell'antenna. Nel processo (4) il fotone (che è la manifestazione quantistica della radiazione elettromagnetica) è prodotto dalla corrente elettrica che si manifesta all'atto della transizione del protone da uno stato energetico all'altro.

La coppia elettrone-neutrino emessa dal processo (3) è, nella teoria di Fermi, l'analogo del fotone emesso nel processo (4), e il meccanismo di emissione è strettamente analogo. Fermi propose l'esistenza di un nuovo tipo di corrente, oggi detta corrente debole, che si manifesta all'atto della trasformazione di un neutrone in protone provocando la creazione della coppia $e-\nu$.

Nel suo lavoro del 1933 Fermi presentò la struttura matematica della nuova teoria, e la sua applicazione allo studio dei decadimenti radioattivi beta. Questi si possono dividere in due classi: i decadimenti *permessi* che, secondo la teoria, potrebbero avvenire anche se i nucleoni (protoni e neutroni) fossero fermi all'interno del nucleo, e quelli *proibiti* che sono solamente resi possibili dal fatto che i nucleoni si muovono. I decadimenti proibiti procedono più lentamente, e la loro vita media risulta circa cento volte più lunga di quella dei decadimenti permessi. Si sapeva già che alcuni decadimenti beta procedono molto più rapidamente di altri, ma fu solamente con il lavoro di Fermi che questo fenomeno trovò una spiegazione quantitativa.

Un secondo risultato importante del lavoro di Fermi è nella determinazione della distribuzione energetica degli elettroni emessi. Fermi mostrò che questa distribuzione permette di determinare la massa del neutrino, e che i dati esistenti sembravano favorire una massa molto piccola, se non addirittura nulla.

La teoria di Fermi contiene un solo parametro incognito, che può essere determinato misurando la vita media di un decadimento beta "permesso". Questo parametro, G , oggi detto "costante di Fermi", determina la intensità delle nuove interazioni. Il valore di G , molto piccolo, ha meritato alle nuove interazioni il nome di "interazioni deboli". Quanto deboli sono le interazioni deboli? Se la loro intensità fosse paragonabile a quella delle forze che legano i nucleoni nel nucleo, le disintegrazioni beta sarebbero dieci miliardi di volte più rapide, le vite medie dei materiali radioattivi beta sarebbero dieci miliardi di volte più corte di quanto si osserva.

Prima di chiudere questa sezione, diamo qualche ulteriore dettaglio sulla struttura della teoria di Fermi. Nel far questo useremo per convenienza una terminologia entrata in uso in tempi successivi al lavoro di Fermi, usando il termine "nucleone" per indicare indifferentemente il protone o il neutrone, ed il termine "leptone" per indicare elettroni e neutrini. Il termine "leptone" ha in effetti un significato più vasto, perché viene usato anche per due particelle che sono essenzialmente degli "elettroni pesanti", il muone, con massa pari a circa duecento volte quella dell'elettrone, ed il tau, con massa pari a circa tremilacinquecento volte quella dell'elettrone. Sappiamo oggi che esistono tre tipi di neutrini associati ai tre tipi di leptoni dotati di carica elettrica.

Abbiamo detto che la transizione tra neutrone e protone nel processo (3) genera una corrente debole che conduce alla creazione della coppia elettrone-neutrino. Il meccanismo

di questo fenomeno è analogo al fenomeno della induzione magnetica in cui una corrente variabile in un circuito elettrico genera un campo magnetico che a sua volta può generare una corrente in un circuito fisicamente separato. È così, ad esempio, che funzionano i trasformatori. Nella teoria di Fermi si ha una specie di cortocircuito tra la corrente debole dei nucleoni, attivata dalla transizione da neutrone a protone, ed una corrispondente corrente dei leptoni (elettrone e neutrino) la cui attivazione porta alla creazione della coppia elettrone-neutrino. L'interazione debole è quindi, secondo Fermi, una interazione diretta tra correnti deboli, senza l'azione di un campo intermedio, come avviene nel caso della induzione magnetica.

Alla fine degli anni sessanta è stato sviluppato un nuovo schema teorico, in cui le interazioni deboli sono molto più simili alle interazioni elettromagnetiche di quanto Fermi sospettasse. Nella teoria moderna, infatti, la interazione tra correnti deboli è, come avviene nella induzione magnetica, mediata da un campo intermedio, i cui quanti, i bosoni W, sono stati effettivamente identificati all'inizio degli anni ottanta. La teoria di Fermi rimane tuttavia una eccellente approssimazione per descrivere processi in cui l'energia a disposizione è molto minore dell'energia di massa (Mc^2) dei W, una condizione ben soddisfatta dalla radioattività beta, ma anche in tutti i decadimenti delle particelle elementari⁽²⁾.

4. – Le interazioni deboli nell'economia dell'universo

Nella materia ordinaria, quella che forma i nostri corpi e gli oggetti che ci circondano, le interazioni deboli non sembrano avere un ruolo significativo. La radioattività beta —tutta la radioattività— è giustamente considerata come un fenomeno dannoso da cui guardarsi e di cui si farebbe volentieri a meno. Fortunatamente, i materiali radioattivi sono in natura piuttosto rari, e quelli artificiali, prodotti, ad esempio, nei reattori nucleari, vengono accuratamente segregati in depositi sicuri. Esistono però anche molte applicazioni utili della radioattività beta, ad esempio nella diagnostica medica, o per la datazione di reperti archeologici.

Trascurando per un momento queste sia pure interessanti applicazioni pratiche, ci si potrebbe domandare se le interazioni deboli non siano una mera curiosità nel mondo delle particelle elementari, messe lì solamente per la gioia di alcuni fisici, ma la realtà è ben diversa: queste interazioni hanno un ruolo fondamentale nell'economia dell'universo. Le interazioni deboli sono alla base dell'energia solare, e agiscono come spazzino cosmico, provocando il decadimento di molte particelle prodotte nel corso del "Big Bang" o nella radiazione cosmica: la nostra vita dipende in maniera essenziale dall'esistenza delle interazioni deboli.

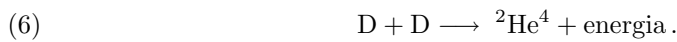
4.1. L'energia solare. – La reazione nucleare alla base della produzione di energia da parte del sole consiste nella trasformazione di idrogeno in elio. Il nucleo dell'idrogeno è

⁽²⁾ Unica eccezione sono i decadimenti di particelle estremamente pesanti, come quelle contenenti un quark di tipo t, la cui energia di massa è il doppio di quella del W.

composto da un singolo protone (P), mentre quello di elio contiene due protoni e due neutroni. Nel corso della reazione alcuni protoni devono essere trasformati in neutroni, e questo richiede l'azione di una interazione debole. La reazione avviene in una serie di passi di cui il primo è una interazione debole,



Questa reazione trasforma due protoni in un deutone (D), il nucleo dell'isotopo pesante dell'idrogeno, che contiene un protone ed un neutrone. Il secondo passo potrebbe ad esempio essere



Nella realtà si realizza una catena piuttosto complessa di reazioni nel corso della quale si costruiscono anche nuclei relativamente più pesanti dell'elio, ad esempio litio e berillio. Per la nostra discussione può bastare la catena semplificata che abbiamo mostrato. Il grosso dell'energia si produce nella seconda reazione che non coinvolge interazioni deboli: una volta formati, i deutoni vengono rapidamente bruciati. La prima reazione produce relativamente poca energia, ma il suo ruolo è fondamentale, perché è in essa che si formano i neutroni necessari alla seconda reazione. In termini molto semplici, senza interazioni deboli il sole non potrebbe produrre la sua energia.

La prima reazione è anche essenziale come regolatore della attività solare: il fatto che essa avvenga tramite una interazione debole garantisce che l'idrogeno venga "bruciato" lentamente di modo che la vita del sole si estenda su miliardi di anni. La reazione richiede temperature e pressioni elevatissime, ed avviene nella parte centrale del sole.

Il sole, oltre che una sorgente di luce e di calore, è anche una potentissima sorgente di neutrini. Negli ultimi decenni molti esperimenti condotti in laboratori sotterranei hanno permesso di rivelare i neutrini emessi dalle parti centrali del sole, che giungono a noi dopo avere attraversato l'intera massa del sole praticamente indisturbati. I neutrini prodotti dalla reazione PP (eq. (5)) sono quelli di energia più bassa, e sono stati osservati per la prima volta nel 1991 dall'esperimento "Gallex" che opera nel laboratorio del Gran Sasso. Il risultato di questo e di altri esperimenti ha presentato un puzzle non interamente risolto: i neutrini vengono osservati con una frequenza inferiore a quella attesa. Si pensa oggi che la soluzione del puzzle vada ricercata nel fenomeno di oscillazione dei neutrini proposto negli anni sessanta da Bruno Pontecorvo e di cui parleremo nel seguito.

4.2. Lo spazzino cosmico. – Gli anni successivi al lavoro di Fermi hanno visto la scoperta di nuovi tipi di particelle; le prime sono state rivelate sin dagli anni trenta studiando la radiazione cosmica, ma il ritmo delle scoperte si è grandemente accelerato con l'avvento, nella seconda metà del secolo scorso, dei grandi acceleratori.

Le nuove particelle sono caratterizzate da una vita effimera; una volta prodotte, ad esempio nella radiazione cosmica, esse scompaiono in un tempo più o meno breve trasmutandosi in particelle stabili: protoni, elettroni, fotoni, neutrini.

In assenza di interazioni deboli, alcune di queste particelle sarebbero stabili. Sarebbero ad esempio stabili gli iperoni, composti da tre quark come i nucleoni, ma in cui uno o più dei quark di tipo u , d è sostituito con un quark di tipo s . Esisterebbero di conseguenza nuovi tipi di nuclei stabili. Ancora più preoccupante sarebbe la stabilità dei muoni, particelle che si possono sostituire agli elettroni e formare nuove specie atomiche con proprietà chimiche ben diverse da quelle usuali.

L'esplorazione delle ipotetiche conseguenze della assenza delle interazioni deboli potrebbe apparire una curiosità oziosa che non perseguiremo oltre. È però chiaro che le interazioni deboli hanno, anche con la loro opera di "operatore ecologico", un ruolo importante sulla struttura del nostro mondo.

5. – Le interazioni deboli dopo Fermi

La storia delle interazioni deboli può essere rozzamente suddivisa in due periodi. Il primo periodo parte dal lavoro di Fermi del 1933 e si conchiude con la scoperta della violazione della simmetria di parità (T. D. Lee e C. N. Yang, 1956) e la prima sintesi rappresentata dalla "teoria $V - A$ " del 1958 (Feynman e Gell-Mann, Marshak e Sudarshan). Il secondo periodo si estende sino ai nostri giorni, ed ha visto l'emergere di una teoria unificata delle interazioni deboli ed elettromagnetiche che ha pienamente confermato l'ipotesi di Fermi dell'esistenza di una forte analogia tra due tipi di interazione in apparenza così differenti.

Una caratteristica comune a tutto il lavoro scientifico di Enrico Fermi è la ricerca della soluzione più semplice ed efficace, ottenuta con il suo leggendario "senso fisico", piuttosto che quella più generale. Il suo "Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta" illustra pienamente questa sua capacità: Fermi non tentò di determinare la legge più generale per le interazioni deboli, ma si concentrò su quella più promettente partendo dall'ipotesi di una stretta analogia tra interazioni deboli ed elettromagnetiche. Se si abbandona questa ipotesi si ottiene una teoria più generale caratterizzata da cinque parametri arbitrari, contro il singolo parametro G della teoria di Fermi.

L'esistenza di una teoria più generale di quella di Fermi stimolò lo sviluppo di esperimenti che permettessero di selezionare la teoria corretta. Questa ricerca fu conclusa solamente tra il 1956 e il 1958 dopo la scoperta della violazione della simmetria di parità, e condusse alla cosiddetta teoria $A - V$ che, a parte la violazione della parità, è sostanzialmente identica a quella inizialmente proposta da Fermi.

Questo primo periodo ha visto alcune importanti scoperte sperimentali, prima tra tutte quella dei muoni (Anderson, 1936), particelle cariche con una massa pari a circa duecento volte la massa dell'elettrone. Inizialmente, questi furono identificati con i mesoni di Yukawa, ma gli esperimenti condotti da Conversi, Pancini e Piccioni (1946) mostrarono che si trattava di una particella priva di interazioni forti, le interazioni che legano i nucleoni all'interno del nucleo atomico. Il muone è sostanzialmente un "elettrone pesante".

L'anno successivo vide la scoperta (Lattes, Occhialini, Powell, 1947) del mesone π , una particella dotata di interazioni forti che poteva essere identificata con il mesone di

Yukawa, l'ipotetico quanto delle forze nucleari. Sempre nel 1947 furono scoperti nella radiazione cosmica i primi esempi di particelle "strane", quelle che oggi chiamiamo mesoni K ed iperoni (Λ , Σ , Ξ). La stranezza di queste particelle consiste nel fatto che esse sono capaci di interazioni forti, ma la intensità dei loro decadimenti, ad esempio

$$(7) \quad K^+ \longrightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-,$$

è quella caratteristica delle interazioni deboli. Questo decadimento è il primo esempio di un nuovo tipo di interazione debole che non coinvolge l'emissione di elettroni. Lo studio dei mesoni K portò negli anni cinquanta ai primi indizi della rottura della simmetria speculare da parte delle interazioni deboli.

Nel 1956 Cowan e Reines riuscirono a rivelare direttamente i neutrini prodotti dalla intensa concentrazione di materiali radioattivi presente in un reattore nucleare. Per un quarto di secolo il neutrino era rimasto una ipotesi, certo convincente, anche alla luce del successo della teoria di Fermi, ma pur sempre una ipotesi. La scoperta sperimentale del neutrino di Pauli, quella della violazione della simmetria di parità e la affermazione della teoria $A - V$, così simile alla originale teoria di Fermi, chiudono questo primo periodo della storia delle interazioni deboli.

5.1. *Il mescolamento dei quark.* – Fermi aveva costruito la sua teoria del decadimento beta partendo da una analogia tra questo fenomeno e le interazioni elettromagnetiche, ma si trattava di una analogia veramente stretta? L'intensità delle interazioni elettromagnetiche tra le particelle elementari è determinata dalla loro carica elettrica, che è sempre un multiplo della carica dell'elettrone⁽³⁾, e . La carica dell'elettrone rappresenta quindi una unità di misura universale per la intensità delle interazioni elettromagnetiche. La domanda emerse con la scoperta di nuovi tipi di particelle e nuovi tipi di interazione debole, e fu per la prima volta posta chiaramente da G. Puppi, che considerò tre processi di interazione debole: la radioattività beta del neutrone,

$$(3) \quad N \longrightarrow P + e + \nu;$$

il decadimento del muone in un elettrone e due neutrini,

$$(8) \quad \mu^- \longrightarrow e^- + 2\nu;$$

e la sua cattura da parte di un nucleo con l'emissione di un neutrino,

$$(9) \quad \mu^- + P \longrightarrow N + \nu,$$

un processo identificato per la prima volta nel celebre esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni.

⁽³⁾ Nel caso dei quark la carica risulta un multiplo di $e/3$. Potremmo più esattamente dire che tutte le particelle hanno carica multipla di $e/3$.

I tre processi studiati da Puppi possono essere descritti da una teoria alla Fermi, e con i dati disponibili negli anni cinquanta sembravano caratterizzati dalla stessa intensità; veniva così acquisito un primo indizio favorevole alla ipotesi che le interazioni deboli hanno, come quelle elettromagnetiche, un carattere di universalità.

All'inizio degli anni sessanta la situazione si è complicata quando furono disponibili i primi dati sui decadimenti di particelle strane con l'emissione di una coppia elettrone-neutrino, ad esempio il decadimento dell'iperone Λ ,

$$(10) \quad \Lambda \longrightarrow P + e^- + \nu.$$

Questo è un processo molto simile al decadimento del neutrone, eq. (3), ma in esso le interazioni deboli agiscono con una intensità nettamente minore (circa un quinto) che nella radioattività beta. Dati più precisi e una più accurata analisi teorica mostrarono che nella radioattività beta e nel decadimento del muone le interazioni deboli manifestano una intensità differente, sia pure di qualche percento.

La soluzione di questi problemi fu trovata da chi scrive nel 1963. Cercherò di spiegarla in termini semplici, anche se è inevitabile l'uso di qualche nozione elementare di meccanica quantistica. Il lettore che trovasse difficoltà nel comprendere le frasi che seguono potrebbe senz'altro saltare qualche capoverso.

I decadimenti del neutrone e del Λ (eq. (3), (10)) portano allo stesso stato finale e possono quindi interferire tra loro (il fotone è corpo ed onda...). Quindi esisterà una certa combinazione di N e Λ in cui l'interferenza è distruttiva, e risulta quindi stabile, ed un'altra in cui l'interferenza è massimamente costruttiva, e su cui quindi l'interazione debole agisce con la massima intensità. Quindi non ha senso paragonare la intensità del decadimento del muone (eq. (8)) separatamente con quelle delle reazioni (3) e (10), ma occorre piuttosto paragonarla con il decadimento di quella particolare combinazione di N e Λ in cui si realizza la massima interferenza costruttiva. Questa combinazione, N_θ , è determinata da un "angolo di mescolamento" tra N e Λ ,

$$(11) \quad N_\theta = N \cos(\theta) + \Lambda \sin(\theta).$$

I dati sperimentali permettono di ricostruire quale sarebbe l'intensità delle interazioni deboli nell'immaginario processo

$$(12) \quad N_\theta \longrightarrow P + e + \nu.$$

La intensità di questo processo coincide con quella che si manifesta nel decadimento del muone; le interazioni deboli sono quindi, come quelle elettromagnetiche, caratterizzate da una intensità universale. Questa conclusione ha aperto la strada alle moderne teorie unificate.

L'angolo θ che appare nella eq. (11) riflette una nuova proprietà delle interazioni deboli: esse non agiscono direttamente sulle particelle elementari usuali, ad esempio N e Λ , ma su certe loro miscele. Per una discussione più corretta di quella qui presentata

dovremmo tenere conto che N e Λ sono particelle composte da quark, e che il fenomeno di mescolamento di cui abbiamo discusso avviene in realtà a livello dei quark d e s.

La scoperta di nuovi tipi di quark (charm, beauty, top) ha di molto arricchito il quadro degli effetti indotti dal mescolamento tra quark. I primi effetti del mescolamento riguardavano i rapporti tra i decadimenti di particelle “strane” ed “ordinarie”, ma oggi possiamo esaminare questi effetti anche nei decadimenti delle particelle provviste di “beauty” (quark b) o charm (quark c). Una descrizione completa del mescolamento richiede oggi quattro parametri, uno dei quali coincide con l’originale angolo θ . Il mescolamento tra quark è molto probabilmente alla base, come proposto da Kobayashi e Maskawa, della violazione della simmetria tra materia ed antimateria, osservata nei decadimenti dei mesoni K^0 . Questo punto dovrebbe essere in breve tempo chiarificato dagli esperimenti in corso sui decadimenti di mesoni B, caratterizzati dalla presenza di un quark con “beauty”, attualmente in corso a Stanford, al Fermilab di Chicago, a Tsukuba in Giappone e al laboratorio Desy di Amburgo.

5.2. I neutrini e le loro oscillazioni. – Gli effetti di interferenza tra diversi decadimenti, con cui abbiamo illustrato il fenomeno del mescolamento, non possono essere osservati direttamente ma solamente ricostruiti con una analisi teorica. La ragione di questa impossibilità è molto semplice: per poter interferire due onde devono poter mantenere la fase relativa, quindi avere la stessa frequenza. Dato che la frequenza dell’onda associata ad una particella è proporzionale alla sua energia (secondo Planck si ha $E = h\nu$), una interferenza è possibile solo per particelle della stessa energia, quindi della stessa massa. Se le energie (quindi le frequenze) di due particelle sono molto vicine, si potrebbero osservare dei battimenti, ma per energie molto differenti, come quelle di un neutrone e di un iperone Λ , gli effetti di interferenza si cancellano.

La situazione è ben diversa nel caso dei neutrini: sin dai tempi del lavoro di Fermi si sapeva che i neutrini hanno masse estremamente piccole, e si è a lungo pensato che la loro massa potesse essere esattamente nulla. Si deve a Bruno Pontecorvo, uno dei collaboratori di Enrico Fermi ai tempi di via Panisperna, l’idea che, se i neutrini hanno masse differenti tra loro, anche se estremamente piccole, un fenomeno di mescolamento, analogo a quello da me proposto, può condurre a fenomeni di battimento osservabili che prendono il nome di “oscillazione di neutrini”. Dopo anni di ricerche con risultati incerti o negativi, un risultato positivo è giunto due anni fa da ricercatori del laboratorio giapponese “Kamioka”, che studiavano i neutrini prodotti dalla radiazione cosmica nell’atmosfera. Questi risultati sembrano confermati da quelli ottenuti con l’esperimento “Macro” nei laboratori del Gran Sasso. Per una conferma definitiva dovremo attendere i risultati di un nuovo esperimento, attualmente in preparazione, che utilizza neutrini scagliati dai laboratori del CERN di Ginevra verso i laboratori sotterranei del Gran Sasso.

Un indizio indiretto della esistenza di oscillazioni di neutrini è quello fornito dalle discrepanze tra le misure dei neutrini solari e la previsione teorica. Dato che il mescolamento dei neutrini, come quello dei quark, può essere descritto da quattro parametri, uno dei quali associato ad una possibile violazione della simmetria tra materia ed antimateria, una completa chiarificazione della situazione impegnerà i fisici per alcuni decenni.

6. – Conclusioni

Con la sua teoria Fermi ha mostrato la sua capacità di dare una soluzione semplice ed efficace ad un problema fisico, ma allo stesso tempo la sua capacità di riconoscere in un fenomeno fisico l'impronta di una idea matematica che sino allora poteva apparire una costruzione puramente astratta.

Due dati ci permettono di valutare l'importanza del campo di ricerca aperto da Enrico Fermi con il suo lavoro. Il primo riguarda i premi Nobel, una misura rozza ma efficace dell'importanza di un determinato settore delle ricerche scientifiche e dei progressi in esso conseguiti: più di dieci Nobel per la fisica sono stati attribuiti a scoperte relative alle interazioni deboli. Se Fermi non avesse ottenuto il Nobel per le sue ricerche sui neutroni ne avrebbe ben meritato uno per la scoperta delle interazioni deboli.

Una seconda valutazione dell'importanza della scoperta di Enrico Fermi si può dedurre dal fatto che oltre la metà degli esperimenti attualmente in corso o in preparazione con acceleratori di particelle —al CERN di Ginevra, al Fermilab di Chicago, a Stanford come a Frascati come a Tsukuba in Giappone o a Novosibirsk in Russia— sono dedicati a studiare vari aspetti delle interazioni deboli. La stessa prevalenza degli studi sulle interazioni deboli si riscontra nei programmi sperimentali dei grandi laboratori sotterranei, come quello italiano del Gran Sasso, quello giapponese di Kamioka, ed altri ancora in Canada e negli Stati Uniti.

La teoria di Fermi delle interazioni deboli è ormai confluita nella più generale teoria delle particelle elementari che va sotto il nome di “Modello Standard”. Questi sviluppi sono descritti nel contributo di M. Jacob e L. Maiani in questo volume. È però importante ricordare che la teoria di Fermi mantiene ancora oggi il suo valore, sia per la validità delle soluzioni proposte sia come stimolo per una serie di ricerche che hanno impegnato i fisici per quasi settant'anni, e che ancora li impegneranno nei decenni a venire. In questa teoria si riflette la grandezza di Fermi, la firma di una grande maestro.

Nicola Cabibbo insegna Fisica delle Particelle elementari all'Università di Roma “La Sapienza”. Presiede la Pontificia Accademia delle Scienze. È stato Presidente dell'INFN e dell'ENEA. Ha scoperto il “mescolamento dei quark” e si è occupato di vari problemi, dalle interazioni radiazione-cristalli al magnetismo nei superconduttori. Ha diretto la realizzazione dei supercalcolatori paralleli APE.
