

Neutrini solari: il problema e la sua soluzione

R. Schiavilla^{a,b}

^a*Theory Center, Jefferson Lab, Newport News, VA 23606, USA*

^b*Department of Physics, Old Dominion University, Norfolk, VA 23529, USA*

(Dated: 5 marzo 2014)

Sommario

La fisica dei neutrini è attualmente uno dei più attivi campi di ricerca in astrofisica e nella fisica delle particelle elementari. In questa relazione tratterò in particolare del problema dei neutrini solari e di come la sua recente soluzione abbia portato alla spettacolare conferma di una strana proprietà dei neutrini, postulata dal fisico Pontecorvo alla fine degli anni '50: quella delle oscillazioni di “sapore”. Discuterò cosa siano i neutrini e i “sapori” che li caratterizzano, come essi interagiscano con la materia, come siano prodotti all’interno del sole, come durante il loro percorso dal centro del sole alla terra oscillino tra i diversi sapori e come la verifica sperimentale di questo fenomeno abbia imposto una revisione del “Modello Standard” delle interazioni tra particelle elementari e abbia aperto nuovi orizzonti di ricerca nella fisica delle astroparticelle.

PACS numbers:

I. LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITÀ

Nel 1896 il fisico francese Henry Becquerel scopre accidentalmente la radioattività: scopre che delle lastre fotografiche che aveva lasciato in un cassetto con dei sali di uranio per alcuni giorni hanno delle macchie come se fossero state esposte alla luce. Si rende conto che i sali emettono una qualche forma di radiazione e, grazie ad una serie di esperimenti, dimostra che si tratta di una proprietà intrinseca dell'atomo di uranio. La scoperta genera notevole interesse nella comunità scientifica del tempo. Il fisico neozelandese Ernest Rutherford studia i “raggi di uranio” in una serie di esperimenti nei quali egli avvolge l'uranio in un numero crescente di fogli di alluminio. Stabilisce così che i raggi di uranio si differenziano in due tipi di radiazione, che egli denota con α e β : il tipo α non è in grado di attraversare neanche un sottile foglio di alluminio, mentre il tipo β è capace di attraversare uno strato di fogli di alluminio cento volte più spesso. Successivamente, nel 1900, il fisico francese Paul Villard identifica un terzo tipo di radiazione—radiazione γ —mentre conduce egli pure esperimenti con sali di uranio.

Pierre e Marie Curie coniano il termine “radioattività” per descrivere il fenomeno scoperto da Becquerel e cercano altre sostanze che risultino radioattive. I loro studi rivelano che il minerale uranite contiene due elementi sconosciuti che sono anche più radioattivi dell'uranio: polonio e radio; in particolare, il radio rilascia così tanto calore da risultare tiepido al tatto. Stabiliscono così che il fenomeno della radioattività non si verifica solo nell'uranio e che alcuni elementi in natura possono rilasciare energia spontaneamente senza l'azione di stimoli esterni. Marie Curie era naturalmente ignara del pericolo di lunghe esposizioni a queste emissioni, e morì all'età di 67 anni.

Sulla base degli studi dei Curie, Rutherford, insieme con i suoi collaboratori, determina che i raggi α sono costituiti da particelle cariche positivamente e piuttosto massive. Si tratta infatti del nucleo dell'atomo di elio, il secondo elemento nella tavola periodica (dopo l'idrogeno), costituito da 2 protoni e 2 neutroni legati insieme dalla forza nucleare. Stabilisce inoltre che quando il nucleo di un elemento pesante come l'uranio emette una particella α (cioè, il nucleo dell'atomo di elio), esso si trasforma in un elemento più leggero.

In questi anni (1897–1908), altri esperimenti fatti dai Curie dimostrano che i raggi β hanno carica negativa, e successivamente Becquerel e il fisico tedesco Walter Kaufmann dimostrano che essi sono formati da elettroni. Passano ancora un certo numero di anni

prima che i raggi γ vengano identificati come una forma di radiazione elettromagnetica molto energetica (i raggi γ sono tra le più penetranti emissioni radioattive).

La radioattività fornisce uno degli esempi più emblematici della famosa equazione di Einstein $E = M c^2$, l'equivalenza tra massa M ed energia E con la velocità della luce c che regola il “tasso di cambio”. Durante un processo radioattivo, quando il nucleo dell'atomo A si trasforma in uno dell'atomo B , una parte dell'energia contenuta in A viene convertita in raggi α (o β o γ) e il resto in energia cinetica dell'atomo B . La conservazione dell'energia per il processo

$$A \longrightarrow B + \text{radiazione } \alpha/\beta/\gamma \quad (1.1)$$

implica

$$M_A c^2 = M_B c^2 + E_{\text{radiazione}} + (\text{energia cinetica di } B) . \quad (1.2)$$

Nel caso di decadimenti α o γ , i fisici dell'epoca non hanno difficoltà nel verificare che l'energia è effettivamente conservata. Nel caso della radiazione β , invece, sembra che questa legge fondamentale sia violata. Nel 1914 il fisico britannico James Chadwick scopre che l'energia dell'elettrone dei raggi β non è sempre la stessa, in particolare che l'elettrone emerge con uno spettro continuo di energie che si estende fino ad una certa energia massima. Ciò contraddice la conservazione dell'energia (1.2), dal momento che

$$\begin{aligned} E_e &= M_A c^2 - M_B c^2 - (\text{energia cinetica di } B) \\ &\simeq M_A c^2 - M_B c^2 , \end{aligned} \quad (1.3)$$

dove abbiamo trascurato l'energia cinetica dell'atomo B , che è molto pesante. Pertanto E_e assume un valore preciso che dipende da M_A e M_B .

Il problema della conservazione dell'energia nei decadimenti β preoccupa la comunità scientifica dell'epoca (fine anni '20): il fisico danese Niels Bohr, uno dei creatori della meccanica quantistica, sostiene che “non abbiamo nessun argomento nè empirico nè teorico per validare il principio della conservazione dell'energia nel caso delle disintegrazioni in raggi β ” e dichiara che “nella teoria atomica, nonostante i recenti successi conseguiti, dobbiamo essere preparati a nuove sorprese”. Propone così che tale principio non sia strettamente valido in fenomeni atomici.

II. LA RADIAZIONE β

L'eminente fisico austriaco Wolfgang Pauli è profondamente scettico sulla proposta di Bohr di abbandonare il principio di conservazione dell'energia. Nel 1930 ipotizza che ci sia una particella “fantasma” x che viene emessa insieme con l'elettrone nel decadimento β

$$A \longrightarrow B + e^- + x , \quad (2.1)$$

e che quindi

$$E_{e^-} + E_x = M_A c^2 - M_B c^2 - (\text{energia cinetica di } B) . \quad (2.2)$$

Perché la (2.2) e il principio di conservazione della carica siano entrambi verificati, Pauli conclude che la fantomatica particella x debba essere neutra e più leggera dell'elettrone. Egli è consapevole di quanto drastica ed *ad hoc* sia la sua proposta. Confessa all'amico e collega Walter Baade, astronomo tedesco: “Ho fatto una cosa terribile. Ho ipotizzato una particella la cui esistenza non può essere rivelata. Ciò è qualcosa che nessun fisico teorico dovrebbe mai fare”.

Nel 1932 Chadwick scopre nel nucleo atomico una nuova particella neutra con approssimativamente la stessa massa del protone, troppo massiva quindi per essere la x . Chiama la nuova particella “neutrone”, lo stesso termine usato da Pauli per descrivere la x . Enrico Fermi, che nel frattempo aveva iniziato ad interessarsi della fisica del decadimento β , conia il termine di “neutrino” per la particella x .

È proprio Fermi che nel 1933 formula una descrizione matematica del processo di decadimento β nucleare nel contesto della meccanica quantistica—il suo articolo apparso in stampa nel 1934 rimane un classico della fisica teorica. Nella sua teoria, un neutrone si trasforma in protone, emettendo un elettrone ed un neutrino. Il neutrino non risiede nel nucleo ma viene creato al suo interno durante il decadimento β del neutrone. Dal confronto tra i risultati della sua teoria e i dati sperimentali disponibili all'epoca, Fermi conclude che il neutrino o è senza massa (come il fotone) o ha una massa molto più piccola di quella dell'elettrone.

Qual è la causa della trasformazione del neutrone in protone? Una nuova forma di interazione, l'interazione debole, che opera a livello subatomico. Due delle forze note in natura, la gravità e l'elettromagnetismo, agiscono su grandi distanze, e ci risultano pertanto familiari dalla nostra esperienza quotidiana. Le altre due forze, l'interazione “forte” e quella “debole”, agiscono su distanze dell'ordine di 10^{-13} cm (le dimensioni nucleari, si noti che le

dimensioni atomiche sono dell'ordine di 10^{-8} cm). L'interazione forte tiene insieme protoni e neutroni nel nucleo atomico, mentre quella debole è responsabile della radioattività β .

Alla fine degli anni '30, i fisici teorici Hans Bethe e Rudolf Peierls, tedesco-americano il primo e tedesco-britannico il secondo, considerano la possibilità di osservare il processo inverso (previsto dalla teoria di Fermi)

$$A + \nu_e \longrightarrow B + e^- , \quad (2.3)$$

simile all'assorbimento (o all'emissione) di fotoni da parte dell'atomo. Trovano che la probabilità che la reazione nucleare (2.3) si verifichi, cioè la sua sezione d'urto, è piccolissima e ciò li porta a concludere che “non c'è nessun modo pratico di osservare i neutrini”. I neutrini non sono rivelabili tramite forze elettromagnetiche, poiché sono elettricamente neutri, e non sono soggetti alla forza forte. Inoltre la probabilità che un neutrino interagisca con il nucleo atomico per via della forza debole è estremamente piccola. Conseguentemente, in quegli anni c'è diffuso scetticismo circa la loro esistenza da parte di fisici della statura di Paul Dirac, Arthur Eddington, e Wolfgang Pauli stesso.

III. L' ESISTENZA DEL NEUTRINO

Il fisico italiano Bruno Pontecorvo ritiene che debba essere possibile rivelare i neutrini con un apparato sperimentale adatto allo scopo. Sebbene la probabilità che un singolo neutrino interagisca con il rivelatore sia estremamente piccola, Pontecorvo pensa che, se a raggiungere tale rivelatore fossero molte migliaia di miliardi di neutrini al secondo (10^{12} s^{-1}) , allora dovrebbe essere possibile catturarne alcuni. Il primo passo è quindi quello di identificare una sorgente copiosa di neutrini: un reattore nucleare.

La teoria di Fermi prevede il seguente processo

$${}^AZ + \nu_e \longrightarrow {}^A(Z+1) + e^- , \quad (3.1)$$

dove Z è il numero di protoni ed A il numero di protoni e neutroni nel nucleo. Se il nucleo ${}^A(Z+1)$ è radioattivo esso decade emettendo radiazione β o γ , e la sua presenza può essere rivelata misurando tale radiazione. Nel 1946 Pontecorvo propone di costruire una grande vasca contenente liquido per il lavaggio a secco (tetracloruro di carbonio) e di considerare il processo

$${}^{37}\text{Cl} + \nu_e \longrightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^- . \quad (3.2)$$

L'argon è un elemento radioattivo ma chimicamente inerte. Il decadimento dell'argon segnalerebbe che un neutrino ha interagito con il cloro.

Pontecorvo non ha l'opportunità di mettere in pratica la sua proposta. Dopo alcuni anni trascorsi prima in Canada a Chalk River e poi in Inghilterra a Harwell vicino Oxford, “scompare” durante una vacanza in Italia con la famiglia per riemergere nell'Unione Sovietica alla metà degli anni '50.

Intanto negli Stati Uniti i fisici americani Fred Reines e Clyde Cowan propongono di considerare il processo

$${}^AZ + \bar{\nu}_e \longrightarrow {}^A(Z-1) + e^+ \quad (3.3)$$

anch'esso previsto dalla teoria di Fermi, e di rivelare il positrone (il positrone è l'antiparticella dell'elettrone, ha la sua stessa massa ma carica elettrica opposta). Fortunatamente per loro sono stati da poco scoperti dei liquidi organici che hanno la proprietà di scintillare, cioè di emettere piccoli impulsi di luce, quando sono attraversati da particelle cariche. Propongono quindi di costruire, in prossimità di un reattore nucleare (che produce tipicamente dell'ordine di 10^{13} neutrini per centimetro quadrato e per secondo), una grande vasca contenente liquido scintillatore e di montare tanti fotomoltiplicatori sulla parte interna della vasca (il fotomoltiplicatore è un rivelatore estremamente sensibile di luce con frequenze nell'ultravioletto, nel visibile e nel vicino infrarosso, così sensibile da poter rivelare un singolo fotone).

Sorge però il problema di come distinguere gli impulsi di luce dovuti ai neutrini da quelli dovuti ad altre cause, in particolare ai raggi cosmici. Reines e Cowan si rendono conto di poter rivelare, oltre al positrone, anche il neutrone che viene prodotto dall'interazione del $\bar{\nu}_e$ con la materia. Il positrone si annichila con uno degli elettroni nel liquido scintillatore producendo i fotoni rivelati dai fotomoltiplicatori. Il neutrone invece procede a zigzag tra le molecole del fluido, perdendo energia nelle varie collisioni con i nuclei degli atomi di queste molecole, fino a quando non viene assorbito da un nucleo con la conseguente emissione di radiazione γ . Reines e Cowan sono a conoscenza del fatto che c'è un tempo (5×10^{-6} s) che caratterizza il cammino casuale (“random walk”) del neutrone prima della sua cattura da parte di un nucleo. Ciò vuol dire che c'è un ritardo preciso tra le due emissioni di luce, la prima dovuta all'annichilazione del positrone e la seconda alla cattura cosiddetta radiativa del neutrone. La registrazione di due emissioni di luce separate da 5×10^{-6} s costituirebbe la prova che un neutrino ha interagito con la materia come indicato nella (3.3)

e permetterebbe di escludere emissioni dovute ad altre particelle, che avverrebbero invece ad intervalli di tempo casuali.

In realtà le cose non sono così semplici, perché i raggi cosmici producono emissioni doppie di luce che simulano quelle dovute ai neutrini. Tuttavia, gli esperimenti di Reines e Cowan alla metà degli anni '50, il primo presso il reattore nucleare di Hanford nello stato di Washington e il secondo presso quello molto più potente a Savannah River nella Carolina del Sud, forniscono prova irrefutabile dell'esistenza dei neutrini.

IV. NEUTRINI SOLARI

Il chimico-fisico americano Ray Davis decide di mettere in pratica la proposta di Pontecorvo di rivelare neutrini tramite il processo (3.2). Costruisce una vasca contenente 3800 litri di tetracloruro di carbonio presso un reattore nucleare nel laboratorio nazionale di Brookhaven. L'esperimento non dà esito positivo. Anche un secondo tentativo (contemporaneo all'esperimento di Reines e Cowan) con una versione maggiorata dell'apparato sperimentale presso il reattore di Savannah River fallisce, a causa del fatto che tale reattore (come pure quello di Brookhaven) produce principalmente antineutrini elettronici che non possono interagire con il ^{37}Cl , sebbene ciò non fosse noto all'epoca dell'esperimento di Davis.

Davis non si perde d'animo e decide anzi di usare lo stesso metodo sperimentale per rivelare i neutrini generati dal sole. L'astrofisico britannico Arthur Eddington già nel 1920 aveva ipotizzato che reazioni nucleari fossero responsabili per la produzione di energia solare. Un suo collega aveva scoperto che l'atomo di elio è leggermente meno massivo di 4 atomi di idrogeno. Eddington propone che nella regione centrale del sole 4 protoni (cioè 4 nuclei di altrettanti atomi di idrogeno) vengano fusi in un nucleo di elio (costituito da due protoni e due neutroni) e che la (piccola) differenza di massa ΔM sia convertita in energia, $E = \Delta M c^2$.

Nel 1938 Hans Bethe e Charles Critchfield (uno studente di dottorato presso la George Washington University in Washington D.C.) calcolano la probabilità che due protoni, vincendo la loro reciproca repulsione coulombiana, formino il deutone—il nucleo più leggero costituito da un protone ed un neutrone “legati insieme” dalla forza nucleare (cioè l'interazione forte)—tramite il processo (dovuto all'interazione debole)

$$p + p \longrightarrow d + e^+ + \nu_e , \quad (4.1)$$

in cui uno dei protoni si trasforma in neutrone emettendo un positrone ed un neutrino (per questo motivo il processo (4.1) si dice di cattura debole). Postulano inoltre che il deutone “catturi” velocemente un altro protone formando il nucleo di ^3He (due protoni ed un neutrone) e che successivamente due nuclei di ^3He formino il nucleo di ^4He (due protoni e due neutroni) liberando due protoni. La sequenza di processi è la seguente:

$$p + p \longrightarrow d + e^+ + \nu_e \quad p + d \longrightarrow {}^3\text{He} + \gamma \quad {}^3\text{He} + {}^3\text{He} \longrightarrow {}^4\text{He} + p + p, \quad (4.2)$$

ed è il più importante dei rami del ciclo di reazioni nucleari detto ciclo pp . I positroni creati da processi deboli e gli elettroni già presenti all'interno del sole si annichilano in fotoni e questi fotoni insieme con quelli generati da processi elettromagnetici, come per esempio nella seconda reazione della (4.2), emergono lentamente (in un tempo stimato dell'ordine di 100000 anni) dalla regione centrale del sole, attraversando strati via via meno densi, perdendo energia in collisioni multiple con la materia, e raggiungendo la superficie solare come luce (con frequenze anche nel visibile). I neutrini, invece, a causa della loro propensione a non interagire con la materia, emergono indisturbati dalla regione centrale, viaggiando a velocità prossima a quella della luce e raggiungendo la terra in poco più di 8 minuti.

È interessante fare una stima del flusso di neutrini che raggiungono la terra. I processi nella (4.2) convertono 4 protoni e 2 elettroni (si noti che il positrone creato dalla reazione (4.1) si annichila con un elettrone tramite il processo $e^+ + e^- \longrightarrow 2\gamma$) in un nucleo ^4He , 2 neutrini ed energia elettromagnetica (a questa si deve la luminosità del sole):

$$\begin{aligned} E_\gamma &= 4 M({}^1\text{H}) c^2 + 2 M_e c^2 - M({}^4\text{He}) c^2 - 2 \langle E_{\nu_e} \rangle \\ &\simeq 26.7 \text{ MeV o } 4.27 \times 10^{-12} \text{ J} \end{aligned} \quad (4.3)$$

dove $M({}^1\text{H})$ e $M({}^4\text{He})$ sono le masse dei nuclei degli atomi di idrogeno ed elio, M_e la massa dell'elettrone, ed $\langle E_{\nu_e} \rangle$ è l'energia media (calcolabile) del neutrino creato dalla (4.1). Dalla nota luminosità solare $L = 3.83 \times 10^{26} \text{ J s}^{-1}$ si può stimare il numero di neutrini generati per secondo: $N_{\nu_e} \simeq 2 \times (L/4.27) \times 10^{12} \simeq 1.8 \times 10^{38}$ neutrini/s, un numero enorme! Di questi, quelli che raggiungono la terra sono all'incirca $N_{\nu_e} \times \pi R^2 / (4\pi D^2) \simeq 8.1 \times 10^{28}$ neutrini/s, dove R è il raggio della terra, $R = 6.37 \times 10^3 \text{ km}$, e D la distanza sole-terra, $D = 1.50 \times 10^8 \text{ km}$. Ciò corrisponde ad un flusso di neutrini (numero di neutrini per unità di superficie e per secondo) dovuti alla cattura debole pp

$$\phi(pp) \simeq 8.1 \times 10^{28} / (\pi R^2) \simeq 6.4 \times 10^{10} \text{ neutrini}/(\text{cm}^2 \text{ s}). \quad (4.4)$$

Un calcolo più accurato che tiene conto di altri contributi alla luminosità solare dà il risultato $\phi(pp) \simeq 6.0 \times 10^{10}$ neutrini/(cm² s), quindi 60 miliardi di neutrini al secondo attraversano ogni centimetro quadrato del nostro corpo!

Il tasso di produzione di energia dipende dalla temperatura nella regione centrale della stella. Tale temperatura è dell'ordine di 1.5×10^7 K nel sole, che è una stella piccola e non molto massiva. In stelle più grandi e massive un altro ciclo di reazioni nucleari, noto come ciclo CNO, porta alla produzione di energia (e neutrini). Esso ha inizio con un nucleo di carbonio che si trasforma, tramite una serie di processi di cattura di protoni e di decadimenti deboli e radiativi, in isotopi dell'azoto prima e dell'ossigeno poi. L'ossigeno è convertito nuovamente in carbonio con l'emissione di un nucleo di atomo di elio. Essenzialmente il ciclo CNO trasforma 4 protoni in un nucleo ⁴He usando il carbonio come catalizzatore, richiede però una temperatura superiore a 2.0×10^7 K perché si attivi. Quindi nel sole il ciclo *pp* è il meccanismo principale di produzione di energia e neutrini.

V. IL PROBLEMA DEI NEUTRINI SOLARI

Il problema più serio di fronte a Davis è dovuto al fatto che l'energia dei neutrini creati dalla fusione debole di due protoni è troppo bassa perché tali neutrini interagiscano con il cloro e producano l'argon:

$$E_{\nu_e} + T_e = 2 M(^1\text{H}) c^2 - M(^2\text{H}) c^2 - M_e c^2 \simeq 0.42 \text{ MeV} , \quad (5.1)$$

dove $M(^2\text{H})$ è la massa del deutone, E_{ν_e} è l'energia del neutrino, e T_e è l'energia cinetica dell'elettrone. La relazione (5.1) implica che E_{ν_e} varia nell'intervallo di energie $0 < E_{\nu_e} \lesssim 0.42 \text{ MeV}$. C'è però un altro ramo del ciclo *pp* nel quale, invece di due ³He che si convertono in un ⁴He (e due protoni), un ³He si combina con un ⁴He formando ⁷Be. Il ⁷Be cattura un protone trasformandosi in ⁸B che è instabile e decade debolmente via

$$^8\text{B} \longrightarrow ^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e . \quad (5.2)$$

Questi neutrini hanno energie che variano tra 0 e circa 14 MeV e sono quindi sufficientemente energetici da reagire con il cloro nell'esperimento di Davis.

Sorge a questo punto la necessità di fare predizioni accurate per i flussi di neutrini dovuti alle varie reazioni del ciclo *pp*, un problema complicato perché tali flussi dipendono

dalla temperatura interna del sole, come quello dei neutrini creati dal decadimento β del ^8B nella (5.2). Diventa quindi necessario determinare le caratteristiche interne del sole—temperatura, densità, pressione, e composizione chimica—con molta accuratezza. All’inizio degli anni ’60 il fisico americano John Bahcall elabora un modello della struttura interna del sole, che raffinerà nel corso di più di trent’anni e che diventerà noto come il “Modello Solare Standard” (“Standard Solar Model” o SSM). Si basa su un certo numero di ipotesi: (i) il sole è un plasma in equilibrio idrostatico dove la pressione verso l’esterno dovuta alla radiazione elettromagnetica e, in minor misura, all’energia cinetica delle particelle bilancia l’attrazione gravitazionale; (ii) il trasporto di energia avviene principalmente per via radiativa ma anche per moti convettivi; (iii) la produzione di energia è dovuta a reazioni nucleari ed effetti gravitazionali sono piccoli; (iv) le abbondanze chimiche relative cambiano solo a causa delle reazioni nucleari. Risulta dallo SSM che il sole ha una temperatura centrale di $\sim 1.5 \times 10^7$ K, una densità centrale di ~ 150 g/cm³, ed un’età di $\sim 4.9 \times 10^9$ anni.

Davis assembla una vasca di 380000 litri di tetracloruro di carbonio nella miniera d’oro di Homestake nel Dakota del Sud a circa 1.5 km di profondità. L’esperimento comincia nel 1966. Bahcall ha intanto raffinato la sua stima del numero di atomi di argon radioattivo che Davis dovrebbe rivelare: mediamente meno di uno al giorno! Sebbene l’estrazione dell’argon radioattivo sia un processo complicato—Bahcall commenta che “è molto più facile cercare un’ago nel pagliaio”—tuttavia Davis annuncia nel 1968 i primi risultati: il numero di neutrini rivelato è $\sim 1/3$ di quello previsto dallo SSM, il primo indizio di quello che diventerà noto come “il problema dei neutrini solari”.

Sorgono dubbi circa la validità dello SSM di Bahcall e la capacità di Davis di “contare” i pochi atomi di ^{37}Ar creati dai neutrini. Questi dubbi sono però dissipati negli anni successivi da una serie di verifiche e controlli. In una di queste verifiche, Davis, dopo aver disperso 500 atomi di ^{37}Ar nella vasca, li estrae tutti, senza perderne neanche uno. Dall’inizio degli anni ’70 è ormai chiaro che il deficit di neutrini solari non è dovuto a problemi sperimentali o teorici. Sono ventilate varie ipotesi e possibili soluzioni. Si pensa di apportare modifiche allo SSM, in particolare alle abbondanze relative dei vari elementi. Si ipotizza che il sole abbia già “bruciato” gran parte dell’idrogeno e che nella regione centrale consista prevalentemente di elio. Poiché è necessario qualche centinaio di migliaia di anni perché i fotoni dalla regione centrale raggiungano la superficie, è possibile che non ci si sia ancora accorti che il sole è “spento”. Si ventila anche l’ipotesi, che risulterà poi essere quella valida, che il problema dei

neutrini solari abbia a che fare con una qualche proprietà sconosciuta di queste particelle.

Negli anni '80 e '90 il problema dei neutrini solari è sulle pagine di giornali come il New York Times che lo descrive come “uno dei più imbarazzanti per la fisica del ventesimo secolo”. Intanto alla fine degli anni '90 misure eliosismologiche di propagazione di onde di pressione, cioè di onde sonore, e di velocità del suono all'interno del sole sono in accordo eccellente con le predizioni dello SSM, confermandone la validità.

Alla fine degli anni '80, intanto, un nuovo esperimento per la rivelazione di neutrini solari diventa operativo, quello di Kamiokande in Giappone, sebbene inizialmente esso fosse dedicato a rivelare il decadimento del protone previsto dalla grande teoria unificata (“grand unified theory” o GUT). L'apparato consiste di ~ 3000 tonnellate di acqua purificata e di 1000 fotomoltiplicatori montati all'interno del contenitore. Un neutrino solare entra in collisione con uno degli elettroni nella molecola di acqua ionizzandola. L'elettrone viene emesso ad alta velocità e crea un cono di luce lungo il suo percorso (effetto Cherenkov), luce che è rivelata dai fotomoltiplicatori. L'esperimento di Kamiokande ha dei vantaggi rispetto a quello di Homestake: dalla direzione e dall'intensità del cono di luce è possibile dedurre rispettivamente la direzione e l'energia del neutrino iniziale. Ha però anche degli svantaggi. Uno di questi è che l'apparato di Kamiokande (come del resto quello di Homestake) è sensibile principalmente ai neutrini di energia più elevata. Un'altro svantaggio è che è soggetto a “contaminazioni” dovute ai raggi cosmici, sebbene la difficoltà di distinguere segnali dovuti ai neutrini dal background causato dai raggi cosmici sia mitigata notevolmente quando si consideri il percorso della luce.

I primi risultati di Kamiokande, annunciati nel 1989, dimostrano che i neutrini provengono dal sole, fatto non ovvio nell'esperimento di Davis, e ne confermano il deficit. Tuttavia la loro distribuzione in energia è in accordo con quella prevista dallo SSM.

VI. I “SAPORI” DEI NEUTRINI

Pontecorvo propone già alla fine degli anni '50 che esiste più di una varietà di neutrini. Egli arriva a questa conclusione esaminando il decadimento di una particella instabile chiamata muone (μ), che appartiene alla famiglia dei “leptoni” insieme con l'elettrone ed il neutrino. I leptoni non sono soggetti all'interazione forte e sono particelle fondamentali (senza struttura interna) della materia. Il muone ha carica negativa come l'elettrone ma massa

circa 200 volte più grande. A differenza dell'elettrone, esso è instabile con una vita media $\tau_\mu \simeq 2.2 \times 10^{-6}$ s e decade primariamente tramite il processo debole $\mu^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$.

I neutrini muonici ν_μ (distinti da quelli elettronici ν_e) vengono identificati sperimentalmente nel 1962 dai fisici americani Lederman, Schwartz e Steinberger. Successivamente nel 1975 il fisico americano Perl e collaboratori individuano un terzo membro della famiglia dei leptoni, chiamato tau (τ), anch'esso instabile e circa 3500 volte più massivo dell'elettrone. Nel 2000 viene osservato presso il laboratorio Fermilab vicino Chicago il neutrino tau (ν_τ). I tre tipi di neutrini (ν_e , ν_μ e ν_τ) vengono indicati come i “sapori” dei neutrini.

La seconda grande intuizione di Pontecorvo è che i neutrini oscillino tra i diversi sapori, essenzialmente che un ν_e si trasforma in un ν_μ o in un ν_τ e così via. Le oscillazioni di sapore sono un effetto di natura esclusivamente quantistica e, affinché esse si verifichino, è necessario che i neutrini abbiano massa, non importa quanto piccola, purché sia strettamente diversa da zero. Pontecorvo è a conoscenza del fatto che i neutrini prodotti dalle reazioni nucleari all'interno del sole sono quelli di sapore elettronico e che essi sono gli unici che l'apparato sperimentale di Davis è in grado di rivelare. Nel 1969, dopo la pubblicazione dei primi risultati dell'esperimento di Davis, Pontecorvo e il fisico sovietico Gribov propongono che alle oscillazioni di sapore sia dovuto l'ammancio di neutrini: una parte dei ν_e si trasformano in neutrini di altri sapori durante il loro percorso dalla regione centrale del sole fino alla terra e quindi sfuggono al rivelatore di Davis.

In meccanica quantistica una particella può anche essere descritta come un'onda (dualità particella-onda), la cui lunghezza d'onda λ dipende dalla massa e dalla velocità della particella, cioè dalla sua quantità di moto (a volte chiamato impropriamente impulso) p , come in $\lambda = h/p$ con h la costante di Planck. C'è una “funzione d'onda” che descrive ciascun tipo di neutrino e neutrini con masse diverse hanno quindi lunghezze d'onda diverse associate alle rispettive funzioni d'onda. Si può pensare al neutrino come un ibrido costituito dai tre sapori. Quindi, mentre esso si propaga nello spazio, le onde associate con i tre sapori avanzano in modo diverso, sovrapponendosi lungo il suo percorso. A punti diversi lungo tale percorso si ottengono diverse “miscele” di sapori. La meccanica quantistica permette di calcolare la probabilità che un neutrino di un dato sapore si trasformi in uno di sapore differente dopo un percorso di lunghezza x . Per esempio, nel caso più semplice di due soli

sapori, ν_e e ν_μ , la meccanica quantistica prevede che

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(x) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad L = \frac{2\hbar}{c^3} \frac{E}{m_2^2 - m_1^2} , \quad (6.1)$$

dove il parametro L con le dimensioni di lunghezza dipende dall'energia del neutrino E e dalla differenza di massa $m_2^2 - m_1^2$ e l'angolo θ caratterizza il grado di miscelamento tra i due sapori. Ovviamente la probabilità che un ν_e rimanga tale è

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(x) = 1 - P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(x) . \quad (6.2)$$

Al momento le masse individuali m_1 e m_2 non sono note, sono invece stati determinati limiti sui possibili valori sia della differenza di masse che dell'angolo θ .

La proposta di Pontecorvo e Gribov è in contrasto con il modello teorico che descrive le interazioni tra le particelle elementari (il Modello Standard o “Standard Model”), formulato negli anni '70, e la cui validità era stata confermata da moltissimi esperimenti. Nella formulazione originale del Modello Standard i neutrini non hanno massa. Per questa ragione l'ipotesi di Pontecorvo e Gribov viene inizialmente accolta con scetticismo da gran parte della comunità scientifica, scetticismo che però svanisce quando il fisico americano Lincoln Wolfenstein e i fisici sovietici Stanislav Mikheyev e Alexei Smirnov realizzano che la presenza di materia, in particolare di elettroni, modifica l'espressione (6.1) (effetto MSW), in particolare la dipendenza dall'angolo di miscelamento che ora diventa una funzione della densità elettronica (che è assai elevata nella regione centrale del sole, ma decresce via via che il neutrino viaggia verso la sua superficie). Di conseguenza, anche se i neutrini dovessero avere una debole predisposizione ad oscillare in assenza di materia (a causa di un piccolo angolo θ), essi sarebbero comunque finiti per diventare “schizofrenici” nel loro percorso dalla regione centrale alla superficie del sole. L'effetto MSW risulta così convincente che Bahcall dichiara che “sarebbe un errore di portata cosmica se la natura non dovesse farne uso”.

VII. LA SOLUZIONE DEL PROBLEMA DEI NEUTRINI SOLARI

Negli anni '90 nuovi esperimenti forniscono ulteriori risultati a sostegno dell'ipotesi di oscillazioni di sapore. L'apparato sperimentale di Kamiokande viene ingrandito, diventando Super-Kamiokande (Super-K). Super-K può rivelare non solo i neutrini solari ma anche quelli creati da raggi cosmici nell'atmosfera e dovuti al decadimento debole dei muoni (neutrini

ν_μ). I neutrini atmosferici sono da 100 a 1000 volte più energetici di quelli solari e sono più facili da rivelare. Si stima inoltre che il rapporto di $\nu_\mu:\nu_e$ sia di 2:1 nei “detriti” di raggi cosmici. Super-K è in grado di distinguere un ν_e da un ν_μ : un ν_e che entra in collisione con un elettrone nella molecola di acqua produce un anello di luce sfocato, mentre un ν_μ ne produce uno netto. Dopo due anni di misure, Super-K annuncia che il rapporto $\nu_\mu/\nu_e \simeq 1$ (invece di 2). Per spiegare questo dato, si ipotizza che una metà dei ν_μ si trasformi in ν_τ che però Super-K non è in grado di rivelare.

I raggi cosmici colpiscono la terra da tutte le direzioni mediamente con la stessa intensità, e quindi il numero di ν_μ dovrebbe essere approssimativamente lo stesso da qualunque direzione essi provengano. Super-K trova invece che il numero di ν_μ che arrivano dall’alto sono il doppio di quelli che, provenienti dal basso, hanno attraversato la terra. Quindi una metà dei ν_μ “scompaiono” durante il loro viaggio attraverso la terra (in questo caso, l’effetto MSW non è molto importante, poiché la densità elettronica all’interno della terra non assume valori così elevati come nel sole).

Rimane tuttavia il problema di stabilire in cosa si trasformino i neutrini solari e di saldare così il deficit riscontrato dagli esperimenti di Homestake e Kamiokande, cioè di determinare se il numero totale di ν_e , ν_μ e ν_τ rivelati sulla terra sia uguale al numero di ν_e prodotti dal “reattore solare” a fusione nucleare. Per questo scopo negli anni ’90 viene progettata la costruzione di un nuovo laboratorio, il Sudbury Neutrino Observatory (SNO), a 2 km di profondità in una miniera di nichel nello stato dell’Ontario in Canada. Il rivelatore di SNO consiste di una sfera gigantesca fatta di materiale acrilico, riempita con 1000 tonnellate di acqua pesante, purificata da contaminazioni dovute a gas radioattivi. Gli atomi di idrogeno nella molecola di acqua “normale” H_2O sono sostituiti da quelli di deuterio nella molecola di acqua pesante D_2O —il nucleo dell’atomo di idrogeno contiene solo un protone, mentre quello dell’atomo di deuterio consiste di un protone ed un neutrone (il nucleo deutone). Una sfera geodesica con 9600 fotomoltiplicatori montati sulla sua superficie interna circonda il contenitore di materiale acrilico. L’intero apparato è all’interno di una cavità dalle dimensioni di una cattedrale, riempita di acqua (H_2O) purificata, nella parte più profonda della miniera. Alla fine, saranno necessari 9 anni per la sua costruzione ad un costo di 270 milioni di dollari canadesi, 200 dei quali per le 1000 tonnellate di acqua pesante.

L'apparato di SNO può rivelare i neutrini tramite i seguenti processi

$$d + \nu_e \longrightarrow p + p + e^- \quad d + \nu_x \longrightarrow p + n + \nu_x . \quad (7.1)$$

Nella prima reazione un ν_e è assorbito dal neutrone nel deutone. Il neutrone si trasforma in protone emettendo un elettrone. L'elettrone produce radiazione Cherenkov che viene rivelata dai fotomoltiplicatori. La seconda interazione, a differenza della prima, può essere avviata da un neutrino non necessariamente di sapore elettronico, cioè $\nu_x = \nu_e$ o ν_μ o ν_τ , e consiste nella disintegrazione del deutone nelle particelle che lo compongono, protone e neutrone. Il neutrone si combina successivamente con un deutone (d) formando il nucleo ^3H ed emettendo un fotone, oppure con un nucleo ^{35}Cl , precedentemente introdotto nel rivelatore, formando il nucleo ^{36}Cl , che è soggetto a decadimento γ . Il fotone emesso nella cattura radiativa $n-d$ o nel decadimento γ del ^{36}Cl ionizza una molecola di D_2O e l'elettrone rimosso nel processo di ionizzazione emette radiazione Cherenkov.

Il fisico canadese Arthur McDonald (uno dei leaders della collaborazione SNO) annuncia nel 2001 i primi risultati, che confermano il deficit di ν_e . Successivamente nel 2003 l'analisi dei dati sperimentali corrispondenti al processo $d + \nu_x \longrightarrow p + n + \nu_x$ stabiliscono che il numero totale di neutrini provenienti dal sole rivelati da SNO ($1/3 \nu_e$ e i rimanenti $2/3 \nu_\mu$ e ν_τ) è in accordo con le previsioni del modello solare standard di Bahcall, confermando non solo la validità di tale modello e quindi dei processi che determinano l'evoluzione stellare ma anche la validità delle ipotesi di Pontecorvo che i neutrini hanno massa e che sono soggetti ad oscillazioni di sapore. Queste scoperte impongono la necessità di apportare modifiche al Modello Standard delle interazioni tra particelle, nella cui formulazione originale i neutrini non avevano massa.

Una parte consistente della intensa attività di ricerca nella fisica dei neutrini attualmente in corso o in fase di pianificazione è volta alla determinazione degli angoli di "mixing" θ nella (6.1) tra i vari sapori e del valore assoluto delle masse (al momento sono stati individuati solo dei limiti di variabilità circa i valori degli angoli di mixing e delle differenze di massa tra i vari tipi di neutrini).

VIII. NEUTRINI E SUPERNOVAE

Nel 1987 Kamiokande rivela circa due dozzine di neutrini provenienti dalla supernova 1987A nel gruppo di galassie noto come “Nubi di Magellano” (“Magellanic Clouds”), galassie satelliti della Via Lattea distanti dalla terra 160000 anni luce. Sono i primi neutrini ad essere mai rivelati provenienti da una sorgente al di fuori del sistema solare e sono il prodotto finale nell’evoluzione della stella Sanduleak $-69^\circ 202$, di massa assai più grande del sole—tale fase finale, nota come supernova, si conclude con l’esplosione della stella.

Il ciclo di vita di una stella massiva come la Sanduleak $-69^\circ 202$ è assai interessante. Per i primi 10^7 anni essa genera energia convertendo idrogeno in elio (come il sole). Questa energia impedisce che la stella imploda sotto l’azione del suo stesso peso. Quando l’idrogeno è stato quasi interamente convertito in elio nella regione centrale della stella, la produzione di energia viene sospesa e la regione centrale, non essendo più in grado di controbilanciare l’azione della gravità, si contrae surriscaldandosi. L’idrogeno continua a “bruciare” negli strati esterni della stella, che quindi si espandono. Quando la temperatura e la densità raggiungono valori sufficientemente elevati nella regione centrale, la produzione di energia riprende con la fusione di elio in carbonio ed ossigeno. A questo punto Sanduleak $-69^\circ 202$, che inizialmente si stima avesse una massa 20 volte più grande del sole, è diventata una stella “supergigante rossa”, di dimensioni 500 volte più grandi di quelle solari. La stella continua a bruciare elio per circa 10^6 anni, fino a quando pure l’elio non si esaurisce e si avvia una nuova fase di contrazione gravitazionale. Da quanto risulta da modelli di evoluzione stellare, la regione centrale continua a contrarsi fino a quando i valori di temperatura e densità sono così elevati da permettere la fusione di $C \rightarrow Ne \rightarrow Na \rightarrow Mg$. Durante questa fase, la stella espelle gli strati esterni, mentre la regione centrale cambia colore (da rosso in blu a causa della temperatura assai più elevata). Queste ultime fasi evolutive si avvicinano rapidamente: quella di fusione del carbonio dura 12000 anni, mentre quelle di fusione del neon ed ossigeno durano pochi anni. Da ultimo la stella converte silicio (Si) e zolfo (S) in ferro (Fe) in appena una settimana. A quel punto essa assomiglia ad una cipolla gigantesca, con strati costituiti da elementi diversi avvolti intorno alla regione centrale consistente di ferro. Non è possibile convertire il ferro in elementi più pesanti senza fornire energia dall’esterno. Pertanto la stella non è più in grado di resistere alla pressione gravitazionale. La “fine” arriva velocemente e in modo spettacolare, con un’esplosione (supernova) visibile ad occhio

nudo a 160000 anni luce di distanza.

Si congettura che i neutrini accelerino il processo di “morte” del progenitore della supernova. La radiazione elettromagnetica emessa durante la fase di combustione del carbonio, quando la temperatura nella regione centrale è dell'ordine di 5×10^8 K, è sufficientemente energetica da creare coppie elettrone/positrone (e^-/e^+). Queste coppie si annichilano la maggior parte delle volte in due fotoni (2γ), ma qualche volta (sia pure raramente) in una coppia di neutrino/antineutrino elettronici ($\nu_e/\bar{\nu}_e$). Dal momento che i neutrini interagiscono poco con la materia, essi abbandonano la stella sottraendole energia, che potrebbe altrimenti essere utilizzata per resistere alla pressione verso l'interno esercitata dalla gravità.

Quando la regione centrale (consistente di ferro) raggiunge la massa critica di 1.4 volte la massa solare, essa collassa, in una frazione di secondo, in una sfera dal diametro di 50 km. Le temperature estremamente elevate fanno sì che un grande numero di coppie $\nu_e/\bar{\nu}_e$ venga creato. Queste coppie impiegano diversi secondi per arrivare in superficie a causa della densità elevatissima, sottraendo alla stella una quantità enorme di energia. Nel frattempo neutroni liberi che sono molto abbondanti in questa fase si combinano con i nuclei di ferro per formare nuclei di elementi più pesanti (tramite una serie di processi di cattura). Il processo di implosione gravitazionale si arresta quando la densità raggiunge il valore tipico all'interno del nucleo atomico, cioè quando la forza forte (la forza nucleare) tra neutroni e protoni, che è fortemente repulsiva a piccole distanze, impedisce che essi siano “stipati” in un volume ancora più ridotto. In realtà, la regione centrale, invece di arrestarsi, “rimbalza”, entrando in collisione con gli strati esterni che continuano la loro “caduta” verso il centro e generando così un'onda d'urto. Si congettura che una piccola frazione dei neutrini che emergono dal centro della stella depositino la loro energia nella materia ed “alimentino” così l'onda d'urto, che altrimenti si esaurirebbe. Sembrerebbe quindi che i neutrini giochino un ruolo importante nell'esplosione della stella, sebbene al momento simulazioni basate su modelli di evoluzione stellare non abbiano ancora confermato la validità di questo scenario.

Durante l'esplosione, elementi dall'elio al ferro formati durante il ciclo di vita della stella ed elementi più pesanti formati durante l'evento di supernova sono espulsi nello spazio. Una parte di questa materia viene incorporata in nuove generazioni di stelle, nei loro sistemi planetari, e infine nei nostri corpi. Il calcio nelle ossa, il ferro nel sangue, e l'ossigeno che respiriamo sono tutti stati sintetizzati da antiche supernovae.

Si stima che il numero di neutrini creati durante un evento di supernova sia dell'ordine di

10^{58} (un numero gigantesco!) e che l'energia emessa da essi in pochi secondi sia equivalente a 100 volte l'energia emessa dal sole nella forma di radiazione elettromagnetica nel corso di 10^{10} anni. Si stima inoltre che il 99% dell'energia gravitazionale della stella che precede la supernova sia convertita in neutrini di tutti e tre i sapori, e che solo 0.5% di essa sia trasformata in radiazione elettromagnetica con frequenze nel visibile.

I pochi neutrini della supernova 1987A insieme con osservazioni astronomiche hanno fornito importanti conferme per lo scenario, sviluppato dai fisici teorici con l'aiuto di simulazioni complesse su supercomputers, di come una stella massiva si “autodistrugge” con la sua regione centrale che si contrae fino a diventare una sfera compatta di neutroni (una “stella di neutroni”) o un buco nero, e con i suoi strati esterni che, dopo essere stati espulsi, formano nuvole luminose di detriti stellari. Il numero e la distribuzione in energia dei neutrini provenienti dalla supernova 1987A sono in accordo con le predizioni teoriche. Tuttavia c'è un tassello mancante: gli astronomi non sono ancora stati in grado di individuare la stella di neutroni, cioè il “residuo” della supernova 1987A.

Lo studio dei neutrini che provengono non dal sole ma dal resto del cosmo, i cosiddetti neutrini galattici, è attualmente un campo di intensa attività di ricerca (per esempio, presso il laboratorio IceCube completato nel 2010 e situato al Polo Sud).

IX. L'ASIMMETRIA MATERIA-ANTIMATERIA

I costituenti degli atomi appartengono a due grandi famiglie di particelle: la famiglia dei barioni e quella dei leptoni. I barioni, come il protone ed il neutrone all'interno del nucleo atomico, sono costituiti a loro volta da particelle elementari note con il nome di “quarks”. Ci sono sei tipi (sapori) diversi di quark: “up”, “down”, “charm”, “strange”, “top” e “bottom”. Ciascuno di essi è contraddistinto da una carica elettrica, un “numero barionico” e una “carica di colore”. I leptoni invece non hanno costituenti più elementari—sono essi stessi particelle elementari—e possono avere carica elettrica (come per esempio l'elettrone) o essere neutri (come il neutrino). Ciascuno di essi è inoltre caratterizzato da un “numero leptonico”. Nel Modello Standard, ciascuna particella fondamentale ha una antiparticella gemella della stessa massa ma di carica elettrica opposta (per esempio, la coppia elettrone-positrone o up-antiup). I quarks e gli antiquarks si combinano per formare, rispettivamente, i barioni e gli antibarioni. Quando la materia e l'antimateria vengono in

contatto, esse si annichilano reciprocamente in fotoni, ovvero in radiazione elettromagnetica (si pensi al processo $e^- + e^+ \longrightarrow 2\gamma$).

Le leggi del Modello Standard stabiliscono che sia il numero leptonico che quello barionico siano conservati in tutti i processi: il numero barionico totale delle particelle sulla “sinistra” è uguale a quello delle particelle sulla “destra”, e così pure per il numero leptonico totale. Si pone però il problema che, se queste leggi fossero esattamente valide, esse porterebbero all’assenza di materia nell’universo (non saremmo qui!). La ragione è la seguente. Nel “big bang” che crea l’universo ci sono densità di energia e temperatura elevatissime. Tale energia permette la creazione di coppie particella-antiparticella, le quali però a causa dell’alta densità vengono in contatto rapidamente e sono quindi riconvertite in energia. Tale scenario implicherebbe la presenza di energia solo in forma di radiazione elettromagnetica e la quasi totale assenza di materia (o quanto meno la presenza di materia ed antimateria in parti uguali). Ciò naturalmente non si osserva. Si è portati a concludere che dopo il big bang ci deve essere stata una leggera preponderanza di materia su antimateria. Si stima che un’asimmetria dell’ordine di una parte su 10^9 , cioè su un miliardo di antiparticelle ci sia un miliardo e una particella, sia sufficiente a creare la materia presente nell’universo (e a cui dobbiamo la nostra stessa esistenza). Sebbene positroni, antiprotoni, antineutroni, ... siano stati rivelati in raggi cosmici o creati in acceleratori di particelle, in generale l’antimateria è rara in natura ed è difficile da creare in laboratorio: l’universo è costituito quasi interamente di materia.

La simmetria tra materia ed antimateria è associata con la conservazione della coniugazione di carica (C) e della parità (P), cioè la conservazione di CP . L’operazione di coniugazione di carica trasforma la particella in antiparticella, mentre quella di parità inverte le coordinate spaziali, cioè $(x, y, z) \longrightarrow (-x, -y, -z)$. C ’è una relazione profonda tra simmetrie e leggi di conservazione: l’esistenza di una simmetria in natura implica una legge di conservazione e viceversa. Per esempio, il fatto che le leggi della fisica rimangano le stesse nel tempo implica la conservazione dell’energia; viceversa, se l’energia è conservata, il sistema è invariante per traslazioni temporali.

La violazione di CP viene osservata per la prima volta nel 1964 dai fisici americani James Cronin e Val Fitch nei decadimenti dei “kaoni”. Il mesone neutro K_0 e la sua antiparticella $\bar{K}_0$ si trasformano l’uno nell’altro, ma ciò non avviene con la stessa probabilità nelle due direzioni, cioè $K_0 \longrightarrow \bar{K}_0$ e $\bar{K}_0 \longrightarrow K_0$. Se la conservazione di CP fosse valida, le proba-

bilità che i due processi si verificano dovrebbero essere uguali. C'è però un problema: la violazione di simmetria derivata da questo tipo di decadimenti non è sufficiente a spiegare la preponderanza di materia su antimateria nell'universo. Sembra invece che la violazione di CP abbia qualcosa a che fare con i neutrini, in particolare con una proprietà che essi potrebbero avere, cioè che il neutrino e l'antineutrino siano in realtà la stessa particella. Se il neutrino e l'antineutrino fossero “intercambiabili”, allora la prevalenza di materia su antimateria nella fase primordiale dell'universo potrebbe essere spiegata.

Che il neutrino e l'antineutrino possano essere la stessa particella è suggerito per la prima volta negli anni '30 dal fisico italiano Ettore Majorana, scomparso qualche tempo dopo in circostanze misteriose. Al momento diversi esperimenti mirati a verificare tale congettura sono in corso o in fase di pianificazione (CUORE, EXO200, ...). Essi cercano di misurare il cosiddetto decadimento doppio β di certi nuclei con l'emissione di due elettroni ma nessun neutrino (“neutrinoless double β decay”). Se tale decadimento dovesse essere osservato, ciò implicherebbe che $\nu_e = \bar{\nu}_e$ (e comporterebbe la violazione della conservazione del numero leptonico totale). Al momento non ci sono esperimenti che abbiano osservato processi di questo tipo, ad eccezione dell'esperimento guidato dal fisico tedesco Hans Klapdor-Kleingrothaus, circa il quale però sono stati sollevati dubbi sulla validità dell'analisi dei dati sperimentali (anche da membri interni alla collaborazione).

Ringrazio i colleghi Luca Girlanda (Università del Salento), Laura Elisa Marcucci (Università di Pisa), Robert McKeown (Jefferson Lab) e Michele Viviani (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pisa) per commenti e per una lettura critica del manoscritto, e lo *U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Physics*, per il supporto finanziario con contratto DE-AC05-06OR23177.

Bibliografia

1. *Solving the Solar Neutrino Problem*, Arthur B. McDonald, Joshua R. Klein, e David L. Wark, *Scientific American* (04/2003), p. 40.
2. *Solar Neutrinos*, John N. Bahcall, *Encyclopedia of Physics* (Wiley-VCH, Weinheim 2005), Vol. 2, p. 2242.

3. *Neutrino Hunters: The Thrilling Chase for a Ghostly Particle to Unlock the Secrets of the Universe*, Ray Jayawardhana (Scientific American/Farrar, Strauss and Giroux, New York 2013).