

La risoluzione del Mistero dei Neutrini Mancanti

NOBEL e-MUSEUM

www.nobel.se

La risoluzione del Mistero dei Neutrini Mancanti by John Bahcall



I tre anni dal 2001 al 2003 sono stati gli anni d'oro per la ricerca sui neutrini solari. In questo periodo gli scienziati hanno risolto il mistero che li assillava da quattro decenni. La risoluzione si è rivelata molto importante sia per i fisici che per gli astronomi. In questo articolo racconterò la storia di quei tre anni favolosi.¹

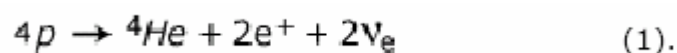
Le prime due sezioni riassumono il mistero dei neutrini solari e presentano la soluzione che fu trovata nei tre anni passati. Le due sezioni che seguono descrivono ciò che la soluzione significa per fisici e astronomi. Le successive sezioni mettono in evidenza quello che rimane da fare nella ricerca nel campo dei neutrini solari e illustrano il mio personale punto di vista sul perché ci sono voluti più di trent'anni per risolvere il mistero dei neutrini mancanti. L'ultima sezione propone un'analisi retrospettiva della soluzione.



IL MISTERO

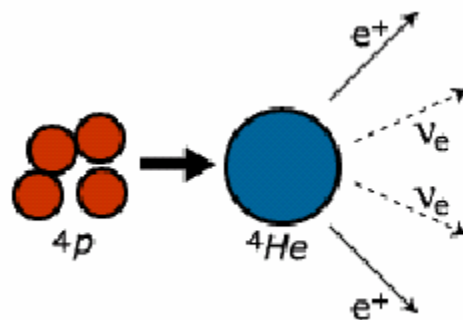
Il scena del crimine

Durante la prima metà del ventesimo secolo, gli scienziati si convinsero che il Sole brilla convertendo, nel suo interno, idrogeno in elio. Secondo questa teoria, 4 nuclei di idrogeni detti protoni (p) si trasformano, all'interno del sole, in un nucleo di elio (${}^4\text{He}$), due anti-elettroni (e^+ , elettrone con carica positiva) e due particelle elusive e misteriose chiamate neutrini (ν_e). Si pensa che questo processo di conversione nucleare o fusione nucleare sia responsabile per lo splendor del sole e di conseguenza per la vita sulla Terra. Il processo di conversione, che coinvolge molte e diverse reazioni nucleari, può essere scritto schematicamente:



Ogni volta che avviene la reazione nucleare (1) c'è la produzione di due neutrini. Dato che quattro protoni sono più pesanti di un nucleo di elio, più due elettroni positivi e due neutrini, la reazione nucleare (1) produce un sacco di energia che alla fine raggiunge la terra sotto forma di luce solare. La reazione avviene molto frequentemente. I neutrini facilmente sfuggono dal Sole e la loro energia non appare sotto forma di calore solare o luce solare. Alcune volte i neutrini sono prodotti con energie relativamente basse, e il sole assorbe molto calore. Alcune volte sono necessarie energie più elevate per produrre i neutrini e di conseguenza il Sole assorbe meno energia.

I neutrini dell'equazione (1) e l'illustrazione qui sotto sono il fulcro del mistero che si esamina in questo articolo.



I neutrini non hanno carica elettrica, interagiscono raramente con la materia, e – secondo il modello standard delle particelle elementari– non hanno massa. Circa 100 miliardi di neutrini al secondo, provenienti dal Sole, passano attraverso l'unghia del tuo pollice, ma tu non li percepisci perché essi interagiscono molto raramente e in maniera molto debole con la materia. I neutrini sono praticamente indistruttibili: quasi nulla può accadere loro. Per ogni 100 miliardi di neutrini solari al secondo che penetrano nella Terra, solo circa uno interagisce con la materia di cui è fatta la Terra. Dato che i neutrini interagiscono raramente, essi possono facilmente fuggire dalla parte interna del sole dove sono creati e portare sulla Terra informazioni dirette riguardanti le reazioni di fusione nucleare solare. Si conoscono tre tipi di neutrini. La fusione nucleare nel Sole produce solo neutrini che sono associati ad elettroni, i cosiddetti neutrini elettronici (ν_e). Gli altri due tipi di neutrini, i neutrini muonici (ν_μ) e i neutrini tau (ν_τ) sono prodotti, per esempio, in acceleratori di ricerca, o in esplosioni stellari, insieme con le versioni più pesanti dell'elettrone, le particelle muoni (μ) e tau (τ).

Mancano i Neutrini

Nel 1964, a seguito al lavoro pionieristico di Raymond Davis Jr., lui ed io proponemmo un esperimento per verificare se il processo di conversione di nuclei di idrogeno in nuclei di elio nel sole è in effetti la causa della luce solare, come indicato nell'equazione (1). Pertanto io calcolai, insieme ai miei colleghi, il numero di neutrini che il Sole produce a differenti energie, usando un modello computerizzato dettagliato del sole. Inoltre io calcolai anche il numero di atomi di argon radioattivo (^{37}Ar) che questi neutrini solari produrrebbero in un grande serbatoio contenente un fluido detergente a base di cloro (C_2Cl_4). Anche se l'idea sembrava stravagante a molti esperti, Ray era sicuro che si poteva estrarre l'esiguo numero previsto di ^{37}Ar prodotti in un mese in un serbatoio di fluido detergente delle dimensioni di una grande piscina.

I primi risultati dell'esperimento di Ray furono annunciati nel 1968. Lui rivelò solo circa un terzo degli atomi radioattivi di argon previsti. Questa discrepanza tra il numero di neutrini previsti e il numero misurato da Ray subito divenne noto come "Il Problema del Neutrino Solare" oppure in contesti più popolari il "Il Mistero dei Neutrini Mancanti".



Reymond David Jr. (sinistra) e John Bacall in abbigliamento da minatori e casco protettivo. Foto scattata nel 1967 in una miniera nel South Dekota, USA. Davis mostra a Bachall il suo nuovo serbatoio in acciaio (6 metri di diametro, 15 metri di lunghezza) contenente 40.000 litri di fluido detergente usato per catturare i neutrini del sole.

Possibili Spiegazioni

Furono suggeriti tre tipi di spiegazioni per risolvere il mistero. La prima spiegazione fu che forse il calcolo teorico era errato. Ciò poteva accadere in due modi: o il numero di neutrini previsti dal conto teorico non era corretto, o la quantità di atomi di argon calcolata non era corretta. La seconda spiegazione offerta fu che forse l'esperimento di Ray era sbagliato. La terza spiegazione, la più audace e la meno discussa, fu forse i fisici non avevano capito il comportamento dei neutrini quando percorrono distanze astronomiche.

I calcoli teorici furono rifatti e verificati molte volte nei venti anni seguenti, sia da me che da molti altri ricercatori. I dati usati per i calcoli furono migliorati e le previsioni diventarono più precise. Non furono trovati errori significativi sia nel modello computerizzato del Sole che nei miei calcoli sulla probabilità di cattura dei neutrini da parte del serbatoio di Ray. Nel frattempo, Ray migliorava la sensibilità del suo esperimento. Egli condusse anche un certo numero di verifiche sulla sua tecnologia per cautelarsi che nessun neutrino fosse trascurato. Non furono trovati errori significativi nelle misure. Persisteva la discrepanza tra teoria e dati sperimentali.

Consideriamo ora la terza spiegazione, la possibilità di una nuova teoria fisica. Già nel 1969 Bruno Pontecorvo e Vladimir Gribov dell'ex Unione Sovietica proposero la terza soluzione che abbiamo suggerito prima, esattamente che i neutrini si comportano in modo diverso da

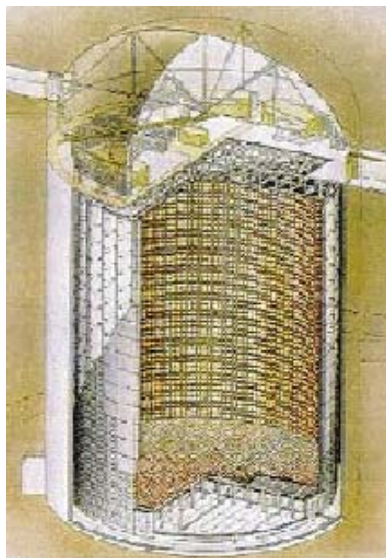
quello ipotizzato dai fisici. All'epoca pochi fisici presero questa idea in seria considerazione ma l'evidenza sperimentale per questa ipotesi aumentò col passare del tempo.

L'evidenza favorisce una nuova teoria fisica

Nel 1989, ventun'anni dopo la pubblicazione dei primi risultati sperimentali, furono pubblicati nuovi risultati di una ricerca sperimentale di collaborazione giapponese–americana il cui scopo era quello di “risolvere” il problema dei neutrini solari. Il nuovo gruppo sperimentale, chiamato Kamiokande (diretto da Masatoshi Koshiba e Yoichi Totsuka), usò un grande rivelatore di acqua pura per misurare la percentuale di eventi di scattering tra gli elettroni nell'acqua e i neutrini ad alta energia emessi dal Sole. Il rivelatore ad acqua era molto sensibile, ma solo ai neutrini ad alta energia prodotti da una reazione nucleare piuttosto rara (il decadimento del nucleo di ${}^8\text{B}$) nel ciclo di produzione energetico solare. L'esperimento originale di Davis con il cloro era principalmente, ma non esclusivamente, sensibile agli stessi neutrini ad alta energia.

L'esperimento Kamiokande confermò che il numero di neutrini osservati era inferiore a quello previsto dal modello teorico del Sole e dalla teoria dei neutrini. Ma la discrepanza nel rivelatore ad acqua era meno marcata di quella osservata dal rivelatore a base di cloro.

Nei dieci anni successivi, tre nuovi esperimenti su neutrini solari resero più profondo il mistero dei neutrini mancanti. In esperimenti in Italia e Russia furono usati enormi rivelatori contenenti gallio per dimostrare che anche i neutrini ad energia più basse erano mancanti. Questi esperimenti furono chiamati GALLEX (condotto da Till Kirsten di Heidelberg in Germania) e SAGE (condotto da Vladimir Gavrin di Mosca in Russia). Il fatto che GALLEX e SAGE erano sensibili a neutrini a più bassa energia era molto importante, perché io ero convinto che potevo calcolare più accuratamente il numero di neutrini a bassa energia che il numero di neutrini ad energia più alta. Inoltre, con una versione più grande del rivelatore ad acqua Giapponese, chiamata Super–Kamiokande (in un esperimento diretto da Totsuka e Yoichi Suzuki), furono eseguite misure più accurate dei neutrini a energie più alte e fu confermato l'originale deficit di neutrini ad alta energia trovati dagli esperimenti con il cloro e nell'esperimento di Kamiokande. Quindi mancavano sia neutrini ad alta energia che a bassa energia anche se non nella stessa proporzione.



Il rivelatore Super – Kamiokande dell' Università di Tokio. Il rivelatore consiste di due settori, uno interno ed uno esterno, rispettivamente di 32,000 e 18,000 tonnellate di acqua pura . Quello esterno protegge quello interno dove viene studiata l'interazione dei neutrini. Il volume interno è circondato da 11,000 tubi fotomoltiplicatori che rivelano la luce blue pallida di Cherenkov emessa quando i neutrini colpiscono gli elettroni.

Disegno: Cortesia dell'osservatorio Kamioka, ICCR, Università di Tokyo.

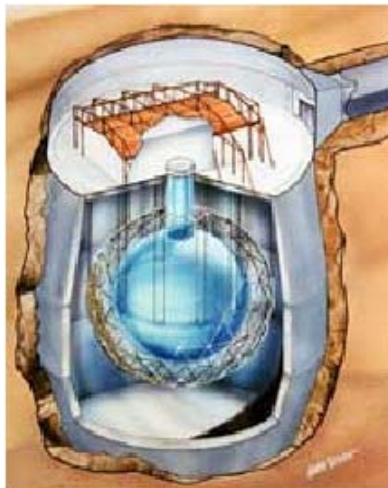
L'evidenza sperimentale raccolta durante questo decennio indicò che qualcosa doveva succedere ai neutrini durante il loro percorso dall'interno del Sole fino ai rivelatori sulla Terra. Nel 1990, Hans Bethe e io proponemmo una nuova teoria per la fisica dei neutrini, che andava al di là della teoria contenuta nei testi di fisica delle particelle, ed era in grado di conciliare i risultati degli esperimenti con il cloro di Davis e gli esperimenti giapponesi-americani con l'acqua. La nostra conclusione si basava sull'analisi della sensibilità diversa che gli esperimenti con il cloro e con l'acqua avevano sul numero dei neutrini e sull'energia dei neutrini. I successivi esperimenti in Italia e in Russia contribuirono solo ad aumentare la difficoltà per spiegare i dati sui neutrini, se non si voleva invocare una nuova teoria fisica.

Nel frattempo, nuova evidenza sperimentale dimostrò che le previsioni sul modello solare erano attendibili. Nel 1997 furono fatte misure precise della velocità del suono all'interno del sole usando le fluttuazioni periodiche osservate nella luce emessa dalla superficie del Sole. Le velocità del suono così misurate erano in accordo, entro una approssimazione del 0,1%, con le velocità del suono calcolate con il nostro modello teorico del Sole. Queste misure suggerirono agli astronomi che il modello teorico del Sole era così accurato che esso poteva anche predire correttamente il numero di neutrini solari.

L'ultimo decennio del ventesimo secolo mise fortemente in evidenza che era necessaria una teoria migliore della fisica fondamentale per risolvere il mistero dei neutrini mancanti. Ma era ancora necessario trovare un segnale conclusivo.

La soluzione

Alle 12:15 del 18 giugno del 2001, una collaborazione di scienziati canadesi, americani e britannici emise un comunicato drammatico: loro avevano risolto il mistero dei neutrini mancanti. Il gruppo internazionale (diretto da Arthur McDonald dell'Ontario, in Canada) comunicò i primi risultati sui neutrini solari ottenuti con un rivelatore con 1000 tonnellate di acqua pesante² (D₂O). Il nuovo rivelatore, localizzato in una miniera di nickel in Sudbury, in Ontario (Canada), era in grado di studiare in modo diverso gli stessi neutrini ad alta energia precedentemente esaminati in Giappone con i rivelatori Kamiokande e Super-Kamiokande ad acqua naturale. Il rivelatore canadese è chiamato SNO, acronimo di Solar Neutrino Observatory (Osservatorio di neutrini solari).



Disegno della sezione del Sudbury Solar Neutrino Observatory nel suo alloggiamento all'interno della miniera. Il rivelatore interno contiene 1000 tonnellate di acqua pesante ed è circondato da una struttura in acciaio inossidabile contenente circa 10000 foto-moltiplicatori. La cavità esterna, a forma di barile (un diametro di 22 metri e una altezza di 34 metri) è riempita con acqua naturale purificata.

L'Esperimento definitivo

Per le prime misure il gruppo SNO usò un rivelatore con acqua pesante in una modalità di funzionamento tale che era sensibile solo ai neutrini elettronici. Gli scienziati di SNO osservarono all'incirca un terzo dei neutrini elettronici rispetto alla quantità creata all'interno del Sole secondo le previsioni del modello standard computerizzato del Sole. Il rivelatore Super-Kamiokande, principalmente sensibile ai neutrini elettronici, ma anche sensibile ad altri tipi di neutrini, aveva osservato circa la metà degli eventi di quelli previsti.

Se il modello standard di fisica delle particelle era corretto, le frazioni misurate da SNO e da Super-Kamiokande dovrebbero essere identiche. Tutti i neutrini dovrebbero essere neutrini elettronici. Invece, le frazioni erano diverse. Il modello teorico standard della fisica delle particelle era errato.

Combinando le misure SNO e Super-Kamiokande, il gruppo SNO determinò il numero totale di neutrini solari di tutti i tipi (elettronici, muonici e tau) e il numero giusto di neutrini elettronici. Il numero totale di neutrini dei tre tipi è in accordo con il numero previsto dal modello computerizzato del Sole. I neutrini elettronici costituiscono circa un terzo del numero totale di neutrini.

Il segnale conclusivo era quindi emerso. L'evidenza finale era la differenza tra il numero totale di neutrini e il numero di neutrini elettronici. I neutrini mancanti erano effettivamente presenti, ma in una forma difficilmente rivelabile, sotto forma di neutrini muonici e di tipo tau.

Gli storici risultati annunciati nel giugno 2001 furono confermati da esperimenti successivi. La collaborazione SNO introdusse nuove tecniche di rivelazione dove il numero totale di neutrini ad alta energia di tutti i tipi furono osservati con rivelatori ad acqua pesante. I risultati delle misure della collaborazione SNO dimostrarono che la maggior parte dei neutrini prodotti all'interno del Sole, che sono tutti neutrini elettronici quando sono prodotti, si trasformano in neutrini muonici e di tipo tau durante il tragitto verso la Terra.

L'abilità da parte del rivelatore SNO di rivelare i neutrini di tutti i tipi svelò il mistero.

Questi risultati rivoluzionari furono verificati indipendentemente tramite un tour de force sperimentale da un nuovo esperimento di collaborazione giapponese-americano, il Kamland, che studiò, invece dei neutrini solari, anti-neutrini emessi da reattori nucleari in Giappone e in nazioni vicine. La collaborazione (con a capo Suzuki del Sendai in Giappone) osservò un deficit nel numero di anti-neutrini rivelati dai reattori nucleari. Il deficit osservato dall'esperimento Kamland era stato predetto da calcoli basati sul modello solare, sulle misure sperimentali del numero dei neutrini solari, e su un nuovo modello teorico della fisica dei neutrini capace di spiegare perché i calcoli precedenti sembrarono essere in disaccordo con gli esperimenti. L'esperimento Kamland migliorò sensibilmente la conoscenza dei parametri caratteristici della fisica dei neutrini.

Dove sono andati i neutrini mancanti ?

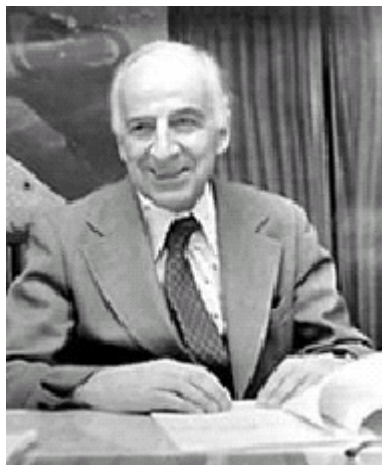
La soluzione del mistero dei neutrini solari mancanti è che i neutrini non sono affatto mancanti. I neutrini che precedentemente non erano stati contati sono trasformati da neutrini elettronici in neutrini muonici e di tipo tau che sono più difficilmente rivelabili. I neutrini muonici e di tipo tau non furono rivelati dall'esperimento di Davis con il cloro; non furono rivelati dagli esperimenti col gallio in Russia e in Italia; e non furono rivelati dai primi esperimenti SNO. La mancanza di sensitività ai neutrini muonici e di tipo tau è la ragione per cui questi esperimenti sembravano suggerire che la maggior parte dei neutrini solari erano mancanti. Invece gli esperimenti ad acqua giapponesi (Kamiokande e Super-Kamiokande) e quelli con acqua pesante SNO avevano una certa sensibilità ai neutrini muonici e di tipo tau, oltre alla sensibilità primaria per i neutrini elettronici. Questi esperimenti con l'acqua pertanto rivelarono frazioni più alte dei neutrini solari previsti.

Cosa significa tutto ciò per la Fisica?

Che cosa c'è di sbagliato con i neutrini?

I neutrini solari hanno un disordine di personalità multipla. Essi sono creati come neutrini elettronici all'interno del Sole, ma lungo il tragitto per la Terra cambiano la tipologia: per i neutrini, l'origine del disordine di personalità è un processo di meccanica quantistica chiamato "oscillazioni del neutrino".

Pontecorvo e Gribov ebbero nel 1969 una intuizione corretta. Neutrini con bassa energia si trasformano da neutrini elettronici in neutrini di altri tipi durante il loro tragitto nel vuoto tra il Sole e la Terra. Il processo può andare avanti e indietro tra tipi diversi. Il numero di cambiamenti di personalità, o oscillazioni, dipende dall'energia del neutrino. Per neutrini ad energia più alta, il processo di oscillazione è aumentato dall'interazione con gli elettroni all'interno del Sole e della Terra. Stas Mikheyev, Alerei Smirnov e Lincoln Wolfenstein proposero per primi l'ipotesi che l'interazione con gli elettroni nel Sole potesse aumentare il disordine di personalità di neutrini, cioè che la presenza di materia potesse causare in modo più vigoroso le oscillazioni dei neutrini da un tipo all'altro.



Bruno Pontecorvo nel suo studio all'Istituto per la Fisica Nucleare in Dubna in Russia nel 1983: Pontecorvo stava discutendo di Fisica con il suo collaboratore Samoil Bilenky. Più tardi quel pomeriggio Pontecorvo festeggiò il suo settantesimo compleanno

Anche prima delle misure SNO del 2001 l'analisi fenomenologica dei dati sperimentali collettivi di tutti gli esperimenti sui neutrini solari suggerì, con un alto livello di certezza, che era necessario introdurre un qualche tipo di nuova teoria fisica. I parametri dei neutrini preferiti da queste analisi prima degli esperimenti SNO erano in accordo con quelli selezionati più tardi sulla base dei risultati SNO e Super-Kamiokande. Ma mancava la prova convincente finale.

La combinazione dei risultati SNO e Super-Kamiokande produsse la prova finale perché questi esperimenti rivelavano gli stessi neutrini solari ad alta energia e perché usarono tecniche universalmente accettate dai fisici. Inoltre entrambi questi esperimenti contenevano molte verifiche sui loro metodi di misura e raccolta dei dati.

Cosa c'è di sbagliato nel modello Standard di Fisica delle Particelle?

Il modello standard di fisica delle particelle prevede che i neutrini non abbiano massa. D'altra parte, per avere l'oscillazione dei neutrini è indispensabile che i neutrini abbiano massa. Quindi il modello standard di fisica delle particelle deve essere corretto.

Il modello più semplice che calza tutti i dati sui neutrini implica che la massa del neutrino elettronico debba essere diversa da zero, e circa 100 milioni di volte più piccola della massa dell'elettrone. Al momento però i dati disponibili non sono ancora sufficientemente precisi da indicare in maniera unica qual'è la teoria corretta. Quando avremo finalmente una soluzione unica, i valori delle masse dei diversi tipi di neutrini potrebbero essere l'indicazione che ci permetterà di capire la fisica delle particelle. al di là del modello standard attualmente accettato.

Ci sono due descrizioni equivalenti dei neutrini, una espressa in termini della massa dei neutrini e l'altra espressa in termini delle particelle con le quali i neutrini sono associati (neutrini elettronici con gli elettroni, neutrini muonici con i muoni e neutrini di tipo tau con le particelle tau). La relazione tra la descrizione in funzione della massa e quella in funzione della particella associata coinvolge alcune costanti, chiamate "angoli di mescolamento", i cui valori sono delle indicazioni possibilmente molto importanti per capire come migliorare la teoria della fisica delle particelle elementari.

La ricerca sui neutrini solari mette in evidenza che i neutrini possono cambiare la loro personalità o tipologia. La descrizione matematica di questo fenomeno richiede la conoscenza di valori sperimentali che speriamo siano utili nella scoperta di una teoria più generale delle particelle fondamentali.

Cosa significa tutto ciò in Astronomia?

Il numero totale di neutrini osservati negli esperimenti SNO e Super-Kamiokande coincide con il numero calcolato con il modello standard computerizzato del Sole. Ciò dimostra che noi conosciamo perché il Sole splende, la domanda iniziale che portò alla ricerca sui neutrini

solari. La risoluzione del mistero dei neutrini mancanti è stato un trionfo importante per l'Astronomia. La previsione del modello standard del sole e' stata verificata; il modello standard della fisica delle particelle deve essere modificato. Quattro decenni fa, quando furono proposti i primi esperimenti sui neutrini solari, nessuno avrebbe potuto immaginare questa conclusione.

Per predire il numero esatto di neutrini prodotti nelle reazioni nucleari nel Sole, bisogna capire in dettaglio molti fenomeni complessi. Per esempio si deve capire una moltitudine di reazioni nucleari in regioni energetiche dove è difficile fare misure. Bisogna capire come avviene il trasporto di energia a temperature e densità molto alte. Bisogna capire lo stato della materia solare in condizioni che non si possono riprodurre sulla terra. La temperatura al centro del Sole è circa 50.000 volte la temperatura della Terra in un giorno assolato e la densità al centro del Sole è circa cento volte la densità dell'acqua. Bisogna essere capaci di misurare l'abbondanza di elementi pesanti sulla superficie del Sole e poi capire come queste abbondanze cambiano quando uno va verso il centro del Sole. Tutti questi dettagli e molti altri devono essere capiti e calcolati in modo accurato.

Si può dimostrare, con un calcolo di meccanica quantistica, che il numero dei neutrini solari ad alta energia dipende sensibilmente sulla temperatura al centro del Sole. Un errore dell' 1% sulla temperatura corrisponde ad un errore di circa il 20% sulla previsione del numero di neutrini; un errore del 3% sulla temperatura comporta un fattore due nel numero di neutrini. La ragione fisica di questa grande sensibilità è che l'energia delle particelle cariche la cui collisione produce neutrini ad alta energia è bassa rispetto alla energia di repulsione elettrica. Solo una piccola frazione delle collisioni nucleari nel Sole riesce a vincere questa repulsione e dar luogo alla fusione; la frazione è molto sensibile alla temperatura. Nonostante questa grande sensibilità alla temperatura, il modello teorico del Sole è sufficientemente accurato per predire in modo corretto il numero dei neutrini.

E' stato necessario il contributo di migliaia di ricercatori in istituzioni distribuite in tutto il mondo per arrivare alla precisione sperimentale necessaria. Un risultato di questo sforzo comunitario durante gli ultimi quattro decenni è che adesso abbiamo fiducia nella nostra comprensione di come splendono le stelle. Possiamo usare queste conoscenze per interpretare osservazioni di galassie lontane, dato che esse pure contengono stelle. Possiamo usare la teoria di come le stelle splendono e si evolvono per capire meglio l'evoluzione dell'universo.

Cosa rimane da fare?

I rivelatori con cloro e con gallio non misurano l'energia dei neutrini. Solo i rivelatori ad acqua (Kamiokande, Super-Kamiokande e SNO) danno informazioni specifiche sulle energie dei neutrini solari che sono osservati. Però i rivelatori ad acqua sono sensibili solo a neutrini ad alta energia (con energie > 5 milioni di elettronvolt).

Il modello standard computerizzato del Sole prevede che la maggior parte dei neutrini hanno energie al di sotto della soglia di rivelazione dei rivelatori ad acqua. Se il modello standard del Sole è esatto, i sensori ad acqua sono sensibili solo a circa il 0,01% dei neutrini emessi dal

Sole, i rimanenti 99,99% devono essere osservati, nel futuro, con nuovi rivelatori sensibili a neutrini con energie relativamente basse.

Il Sole è la sola stella abbastanza vicina alla Terra per osservare i neutrini prodotti da reazioni di fusione nucleare. E' importante osservare un numero abbondante di neutrini a bassa energia in modo da verificare meglio la teoria dell'evoluzione stellare. Pensiamo di poter calcolare il numero di neutrini a bassa energia che ci aspettiamo in modo più esatto rispetto al calcolo dei neutrini ad energia più alta. Quindi una misura accurata dei neutrini a bassa energia sarà una verifica critica del livello di esattezza della nostra teoria solare. Sono sicuro che ci saranno altre sorprese.

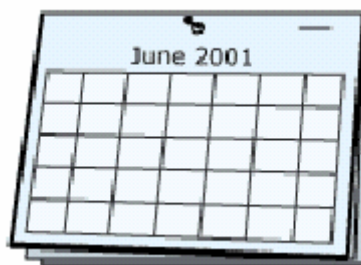
Noi pensiamo che a basse energie (< 2 milioni di elettronvolt) la teoria di Pontecorvo e Gribov descrive bene la conversione di neutrini elettronici in neutrini di altro tipo. Pensiamo inoltre che, a energie più alte, come suggerito da Mikheyev, Smirnov e Wolfenstein, le interazioni con elettroni con la materia sono necessarie per capire il processo di conversione di neutrini elettronici in altri tipi di neutrini. Abbiamo bisogno di nuovi esperimenti a basse energie per verificare e capire quantitativamente il cambiamento nei meccanismi di conversione dal processo che avviene con alte energie e il processo, molto importante, a basse energie.

Esperimenti per neutrini solari a basse energie possono anche dar luogo a nuove misure dei parametri che descrivono le oscillazioni dei neutrini.

Possiamo usare i neutrini per misurare la luminosità totale irradiata dal Sole. Attualmente, per stimare la luminosità totale si usano solo particelle di luce chiamate fotoni. Se la sola sorgente di energia emessa da Sole è la fusione nucleare come descritto dall'equazione (1) all'inizio dell'articolo, allora le due misure (quella dei fotoni e quella dei neutrini) devono concordare. Ci aspettiamo un accordo basato sulla nostra conoscenza attuale di come splende il Sole. Ma se c'è un'altra sorgente di energia – qualche processo che non conosciamo ancora – allora le misure con neutrini e fotoni possono essere significativamente diverse. Ciò potrebbero essere una scoperta rivoluzionaria.

Perché ci è voluto tanto tempo?

Il mistero dei neutrini mancanti fu enunciato nel 1968. Il numero di eventi dovuti a neutrini osservati da Ray Davis nel suo rivelatore risultò al di sotto dei valori previsti. Ma fu solo nel 2001 che la maggior parte dei fisici si convinsero che l'origine del mistero dei neutrini mancanti era nel fatto che il modello standard della fisica delle particelle non era adeguato, e non dipendeva invece da un errore nel modello teorico standard di come splende il Sole.



Perché ci volle tanto tempo per la maggior parte dei fisici per convincersi che la teoria delle particelle era sbagliata e non l'astrofisica?

Incominciamo con quello che dissero alcuni dei fisici più illustri sulla mancanza di neutrini. Nel 1967, due anni prima che fosse pubblicato l'articolo storico sull'oscillazione dei neutrini da parte di Gribov, Bruno Pontecorvo scriveva:

“Sfortunatamente, le varie reazioni termonucleari nel sole e la temperatura interna del sole non sono conosciute con precisione sufficiente a permettere un paragone utile tra i neutrini solari previsti e quelli misurati...”

In altre parole, le incertezze nel modello del sole sono così grandi che impediscono una interpretazione valida delle misure sui neutrini solari. Il punto di vista di Bruno Pontecorvo riemerse più di venti anni dopo quando nel 1990 Howard Georgi e Michael Luke usarono la seguente frase all'inizio di una pubblicazione sui possibili effetti della fisica delle particelle sugli esperimenti sui neutrini solari:

“Con molta probabilità il problema dei neutrini solari non ha niente a che fare con la fisica delle particelle. E' già un grande trionfo se gli astrofisici sono in grado di predire il numero di neutrini ^8B entro un fattore 2 o 3 ...”

C.N. Yang, il giorno 11 Ottobre del 2002, pochi giorni dopo che Ray Davis e Masatoshi Koshiba ricevettero il Premio Nobel per la Fisica per il primo rivelamento cosmico di neutrini, affermò:

“Io non ho creduto nell'oscillazioni dei neutrini anche dopo le dettagliate misure sperimentali di Davis e l'attenta analisi teorica di Bahcall. Io ero convinto che non c'era nessun bisogno di invocare la teoria delle oscillazioni del neutrino...”

Sidney Drell scrisse, in una lettera personale di spiegazioni che mi scrisse nel gennaio 2003 che “il successo del Modello Standard della fisica delle particelle elementari ci stava troppo a cuore per rinunciarci...”

Il modello standard della fisica delle particelle è una bellissima teoria che è stata verificata e che è in grado di fare previsioni corrette per migliaia di esperimenti di laboratorio. Il modello standard del Sole, d'altro canto, copre una fisica complessa in condizioni non familiari e non è stata precedentemente verificata con alta precisione. Per di più, le previsioni del modello solare standard dipendono sensibilmente dai dettagli del modello, e dalla temperatura centrale. Non ci si può meravigliare che c'è voluto molto tempo agli scienziati per attribuire il problema al modello standard della fisica delle particelle e non al modello standard del sole.

Un Traguardo Comunitario Entusiasmante

Sono esterrefatto quando guardo indietro e penso ai successi ottenuti nel campo della ricerca sui neutrini solari negli ultimi quaranta anni. Una comunità internazionale di migliaia di

fisici, chimici, astronomi e ingegneri lavorando insieme hanno dimostrato che il conteggio di atomi radioattivi in una piscina piena di fluido detergente in una caverna nella Terra ci può insegnare cose importanti su quel che succede al centro del Sole e sulle proprietà di esotiche particelle fondamentali chiamate neutrini. Se non avessi vissuto la saga dei neutrini solari in persona, non avrei creduto che ciò fosse possibile.

Bibliografia

J. N. Abdurashitov et al., "Measurement of the solar neutrino capture rate by the Russian-American gallium solar neutrino experiment during one half of the 22-year cycle of solar activity," *J. Exp. Theor. Phys.* **95**, 181-193 (2002); W. Hampel et al. "GALLEX solar neutrino observations: results for GALLEX IV," *Phys. Lett. B* **44**, 127-133 (1999). These two papers present the crucial observations obtained with gallium solar neutrino experiments.

Q. R. Ahmad, et al., "Measurement of the rate of $\bar{\nu}_e + d \rightarrow p + p + e^-$ interactions produced by ^8B solar neutrinos at the Sudbury Neutrino Observatory," *Phys. Rev. Lett.* **87**, 071301 (2001). For most physicists, this paper changed the way they think about solar neutrinos.

J. N. Bahcall, "Solar Neutrinos I. Theoretical," *Phys. Rev. Lett.* **12**, 300-302 (1964). This paper presented the theoretical aspects of the proposal to study solar neutrinos with a chlorine detector.

J. N. Bahcall and H. A. Bethe, "A solution of the solar neutrino problem," *Phys. Rev. Lett.* **65**, 2233-2235 (1990). We showed in this article that new particle physics was required if the chlorine and Kamiokande solar neutrino experiments were both correct. The argument was strengthened by the subsequent results of the gallium and Super-Kamiokande experiments.

J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault, S. Basu, and J. Christensen-Dalsgaard, "Are standard solar models reliable?," *Phys. Rev. Lett.* **78**, 171-174 (1997). The abstract of this paper concludes that: "standard solar models predict the properties of the sun more accurately than are required for applications involving solar neutrinos." This conclusion was based upon the agreement to better than 0.1% of the measured sound speeds of the Sun with the values predicted by the standard solar model. This inference that new physics was required was based upon astronomical evidence and was verified four and half years later by the beautiful SNO solar neutrino measurements.

J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault, and S. Basu, "Solar models: current epoch and time dependences, neutrinos, and helioseismological properties," *Astrophysical J.* **555**, 990-1012 (2001). The agreement between the neutrino predictions in this paper and the subsequent measurements by the SNO and Super-Kamiokande experiments is good, well within the quoted theoretical and experimental uncertainties. This paper is part of a series, begun in 1962, to calculate increasingly more accurate models of the interior of the Sun and to refine the neutrino predictions of the solar model.

H. A. Bethe, "Energy production in stars," *Phys. Rev.* **55**, 434-456 (1939). If you are a physicist and only have time to read one paper in the subject, this is the paper to read.

B. T. Cleveland et al., "Measurement of the solar electron neutrino flux with the Homestake chlorine detector," *Astrophys. J.* **496**, 505-526 (1998). This monumental paper summarizes the measurements of the solar neutrino flux with the Davis et al. chlorine detector.

R. Davis Jr., "Solar Neutrinos. II. Experimental," Phys. Rev. Lett. **12**, 303-305 (1964). This paper presented the experimental aspects of the proposal to measure solar neutrinos with a chlorine detector.

S. Drell, personal letter to John Bahcall, January 29, 2003. In this letter, Drell explained his reasons, and those of many theoretical physicists, for not accepting solar neutrino oscillations until the first results of the SNO experiment were published. He said that the standard model of physics was too beautiful and too successful to abandon.

K. Eguchi et al., "First results from Kamland: evidence for reactor anti-neutrino disappearance," *Phys. Rev. Lett.* **90**, 021802 (2003). You have to read this paper to believe it can be done. The paper presents the definitive confirmation via a terrestrial experiment that solar neutrinos change their type.

Y. Fukuda et al., "Solar neutrino data covering solar cycle 22," *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1683-1686 (1996); S. Fukuda et al., "Solar ^8B and hep neutrino measurements from 1258 days of Super-Kamiokande data," *Phys. Rev. Lett.* **86**, 5651 (2001). These articles summarize the solar neutrino results of the extraordinary Japanese-American water experiments.

H. Georgi and M. Luke, "Neutrino moments, masses, and custodial SU(2) symmetry," *Nucl. Phys.* **B 347**, 1-11 (1990). These authors expressed the prevailing view among physicists at the time they wrote their paper, namely, that the solar neutrino mystery was not due to new particle physics.

V. N. Gribov and B. M. Pontecorvo, "Neutrino astronomy and lepton charge," *Phys. Lett.* **B 28**, 493-496 (1969). Just one year after the problem was recognized, this visionary paper proposed the basic idea underlying the correct solution of the solar neutrino problem. More than three decades were needed in order to prove that indeed new particle physics was required to explain what happened to the uncounted neutrinos.

S. P. Mikheyev and A. Y. Smirnov, "Resonance enhancement of oscillations in matter and solar neutrino spectroscopy," *Soviet Journal Nuclear Physics* **42**, 913-917 (1985). Mikheyev and Smirnov showed that the ideas of Wolfenstein (1978) and Gribov and Pontecorvo (1969) on neutrino oscillations provided a natural and beautiful explanation of the missing solar neutrinos. Their paper supplied the final particle physics element required to solve the solar neutrino problem. Moreover, the ideas of Mikheyev, Smirnov, and Wolfenstein on the influence of matter on neutrino oscillations are important in arenas much removed from solar physics, including the early universe, the explosion of stars, and laboratory experiments on Earth.

B. M. Pontecorvo, "Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge," *Zh. Exp. Teor. Fiz.* **53**, 1717-1725 (1967). This is the prophetic paper in which Pontecorvo first discussed the possibility of solar neutrino oscillations. He also dismissed the possibility of using solar neutrinos to test for neutrino oscillations, because—he believed—that the theoretical expectations were not reliable to the required accuracy.

A. Y. Smirnov, "The MSW effect and solar neutrinos," *Proceedings of the X International Workshop on Neutrino Telescopes, Venice, March 11-14, 2003*, edited by Milla Baldo Ceolin, pp. 23-43. This paper is a clear and beautiful summary of the history and basic physics of matter effects in solar neutrino phenomena.

L. Wolfenstein, *Phys. Rev.* **D 17**, 2369-2374 (1978). This extraordinary paper spawned an academic industry and underlies much of the subsequent theoretical work on neutrino oscillations. Wolfenstein presented an elegant and physical derivation of the mechanism by which matter (electrons) could modify the vacuum neutrino oscillations proposed by Gribov and Pontecorvo.

C. N. Yang, "Necessary subtlety and unnecessary subtlety," in 'Neutrinos and Implications for Physics Beyond the Standard Model,' edited by R. Shrock, World Scientific (2003) p. 5. Yang makes an illuminating distinction between necessary and unnecessary subtleties. He explains that he did not believe in neutrino oscillations until the experimental evidence became overwhelming. He regarded oscillations as an intellectual luxury that was not required by what was previously known of particle physics.

¹Questo articolo è fine a se stesso e può essere letto in modo indipendente, ma segue all'articolo "How the Sun Shines" di J Bahcall che fu presentato nel sito web del Nobel e-Museum nel Giugno 2000. Nei tre anni a seguire dalla pubblicazione dell'articolo originale sono stati ottenuti una serie di dati sperimentali . Questi nuovi dati hanno richiesto un aggiornamento che è il presente articolo.

²L'Acqua pesante è chimicamente simile all'acqua normale. In ogni caso l'idrogeno, nell'acqua pesante, ha un nucleo che contiene un protone e un neutrone ed è chiamato deuterio. Per l'acqua normale, l'idrogeno ha un nucleo che contiene solo un protone (senza neutrone).