

LA FISICA DEL NEUTRINO: UN' APPASSIONANTE AVVENTURA DELLA RICERCA SCIENTIFICA

ANNA MARIA ROTUNNO

Introduzione

Definire la Fisica come la scienza della natura che si occupa della comprensione razionale del mondo materiale è suggestivo ma al tempo stesso un po' vago. Più precisamente si potrebbe dire che la Fisica studia gli aspetti osservabili e misurabili della natura e si avvale del linguaggio matematico per fornire una descrizione quantitativa in termini di leggi e teorie predittive. A tutt'oggi dispone di svariati campi di applicazione, a livello sia teorico che applicativo, affermandosi quale disciplina autonoma ed al contempo flessibile, tale da completare e completarsi con altre discipline di tipo tecnico-scientifico (ingegneria, medicina, chimica, biologia).

L'indagine fisica viene condotta seguendo il cosiddetto "metodo scientifico", o anche "metodo sperimentale", adottato in tutte le scienze naturali, poichè garantisce l'oggettività dei risultati ottenuti. Elementi essenziali sono i concetti di esperimento ed osservazione e riproducibilità dei fenomeni, da cui scaturiscono le cosiddette leggi empiriche. Le teorie e le leggi della fisica sono espresse come relazioni matematiche fra grandezze fisiche.

La scienza non è semplicemente un'arida raccolta di numeri e dati su eventi osservabili della natura, ma è un'attività creativa della mente umana che si riflette nella ricerca scientifica. La **ricerca scientifica** è l'unica sorgente della conoscenza per la scienza, e può essere di base ed applicata.

La *ricerca di base*, chiamata anche ricerca pura o fondamentale, si propone, come obiettivo primario, l'avanzamento della conoscenza e la comprensione teorica delle relazioni tra le diverse variabili in gioco in un determinato fenomeno, fornendo le fondamenta per ulteriori studi. Non già fine a se stessa, è alimentata e fortemente sostenuta dall'amore per il sapere in quanto tale. Ed è questo ciò che la rende strumento potente per la scienza.

La *ricerca applicata*, invece, ha come scopo primario non già l'avanzamento della conoscenza, bensì lo sfruttamento della conoscenza esistente, retaggio di precedenti ricerche di base, al fine di individuare soluzioni pratiche e specifiche. Spesso viene eseguita in ambito industriale oppure universitario con finanziamenti provenienti da soggetti interessati.

Ogni forma di ricerca si contraddistingue per il suo carattere esplorativo e

speculativo, ed è spesso guidata dalla curiosità, dall'interesse e dall'intuito del ricercatore. Mentre nel passato la figura del ricercatore in fisica aveva un carattere di universalità [1], ai giorni nostri si registra una forte specializzazione e separazione in diversi campi di ricerca: fisica atomica, molecolare, ottica, dello stato solido e della materia condensata, dei materiali, nucleare, subnucleare e delle particelle, cosmologia, astrofisica, fisica statistica e dei sistemi complessi, fisica nonlineare, biofisica, geofisica, ed infine fisica medica.

All'interno, poi, dei singoli campi di ricerca, è possibile identificare un'ulteriore forte specializzazione in: fisica sperimentale e teorica. Domandarsi quale sia più importante delle due equivale a chiedersi cosa sia nato per primo: se l'uovo o la gallina. L'aspetto teorico stimola, infatti, la messa a punto di nuovi esperimenti, allo scopo di confermare o confutare la teoria che lo sottende. D'altra parte, molte leggi note hanno natura empirica, ossia derivano dalla osservazione sperimentale di molti fenomeni, il cui studio viene, poi, formalizzato in modo più rigoroso in ambito teorico ed in termini di modellizzazione matematica.

Si vuole, qui di seguito, fornire un breve e semplice esempio di ricerca scientifica e contestualmente del progresso scientifico compiuto in anni relativamente recenti, tramite uno "temi caldi" della fisica contemporanea: la fisica dei neutrini. Essa rappresenta un settore della fisica delle particelle elementari davvero affascinante, ma al tempo stesso sfuggente. Gli studi effettuati ed i successi fino ad ora conseguiti sono appannaggio della ricerca di base, nella quale sia l'aspetto teorico che sperimentale hanno svolto, e continuano tuttora a svolgere, un ruolo determinante.

Motivazioni scientifiche

Ma cosa sono i neutrini? E perché è importante chiarirne la natura ed il comportamento? Prima di parlare dei neutrini è essenziale spiegare brevemente alcuni concetti basilari per la fisica delle particelle [2,3]: le nozioni di particelle elementari e interazioni fondamentali.

Una **particella elementare** può essere considerata come un elemento di materia di cui non si conosca la struttura. Agli esordi della fisica delle particelle, si riteneva che i costituenti ultimi della materia fossero solo quattro: protone, neutrone, fotone ed elettrone. Dei due nucleoni (protone e neutrone) è stata successivamente teorizzata una struttura interna formata da *quark*, mentre le altre due particelle conservano tuttora, nel modello teorico più accreditato, il *Modello Standard*, il carattere di elementarità.

Il *Modello Standard* è la teoria che oggi meglio descrive le particelle elementari e le loro interazioni, vale a dire le forze fondamentali che governano l'Universo, e spiega la composizione subnucleare della materia osservabile mediante un limitato numero di costituenti elementari. Secondo il Modello Standard le particelle interagiscono mediante quattro **forze fondamentali**: la forza nucleare forte e, in ordine di intensità decrescente, le forze elettromagnetica, la nucleare debole e la forza gravitazionale. Ogni interazione è mediata dallo scambio di particelle di campo, chiamate anche quanti mediatori, o bosoni vettori.

La *forza nucleare forte* si esercita tra i quark all'interno di protoni e neutroni e, inoltre, tiene uniti i nucleoni per formare i nuclei atomici. La *forza elettromagnetica*, originata dalle cariche elettriche, fa sì che gli elettroni restino legati al nucleo dell'atomo ed è responsabile dei fenomeni elettrici e magnetici. L'*interazione debole* è responsabile del decadimento beta (si veda par. 3) e della disintegrazione di molte particelle instabili, ed è coinvolta nei processi di combustione che fanno brillare le stelle, compreso il Sole. La *forza gravitazionale*, trascurabile a livello subnucleare, fa ruotare i pianeti attorno al Sole e ci tiene "legati" a terra. Essa coinvolge tutti gli oggetti e le particelle massive.

Le particelle vengono classificate come **leptoni** ed **adroni**. I leptoni (elettrone e^- , muone μ^- , tau τ^- ed i corrispondenti neutrini di tipo elettronico, muonico e tauonico, indicati con ν_e , ν_μ , ν_τ) sono particelle prive di struttura, quindi *elementari*, che interagiscono tramite la forza debole e/o la forza elettromagnetica, ma non partecipano della forza forte. Gli adroni, invece, sono soggetti a tutti i tipi di forza, ed interagiscono prevalentemente attraverso la forza forte. Si distinguono in mesoni (come i pioni π ed le particelle k) e *barioni*, come il protone p ed il neutrone n . Ai leptoni ed agli adroni si aggiungono, nel novero delle particelle, i *quanti mediatori* delle interazioni fondamentali.

Il Modello Standard prevede che tutti gli adroni (quindi anche protoni e neutroni) siano composti di unità più piccole, note come *quark*, caratterizzate da carica frazionaria. Figura 1 illustra schematicamente la struttura atomica e subatomica. Nel pannello di sinistra è rappresentato figurativamente un atomo: esso è caratterizzato da elettroni "orbitanti" attorno ad un nucleo centrale costituito da protoni e neutroni. Nel pannello di destra è schematizzata la struttura interna del nucleo e di protoni e neutroni.

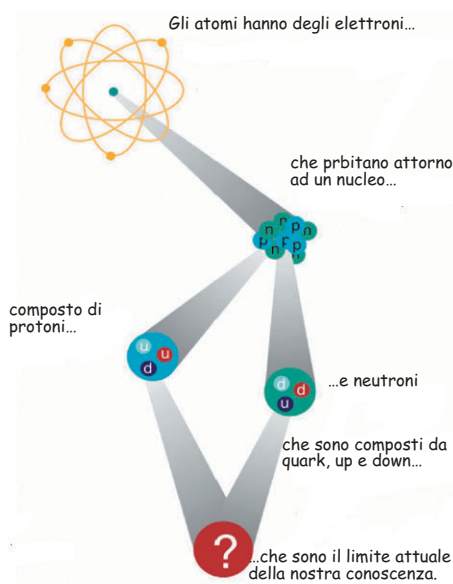
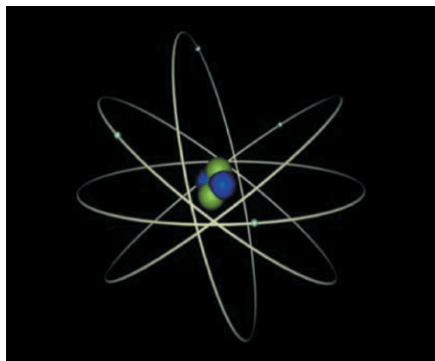


Figura 1: Dall'atomo alle sue sottostrutture: elettroni, nucleo, protoni, neutroni, quark.

Esistono sei tipi di quark, designati con le lettere u, c, t (con carica $2/3$) e d, s, b (con carica $-1/3$). Il Modello Standard prevede che la materia sia formata solo da due tipi di particelle elementari: i leptoni ed i quark (Figura 2).

		LEPTONI (particelle che possono muoversi in solitudine)		QUARK (particelle che si trovano sempre in gruppo)	
Tutta la materia è composta dalle particelle "di prima generazione", qui a destra	PRIMA GENERAZIONE	ELETRONE Responsabile dell'elettricità e di reazioni chimiche. Ha carica -1.	NEUTRINO ELETTRONICO Particella con carica elettrica nulla, che interagisce molto poco con la materia. Ha massa poco superiore a 0.	UP Ha carica elettrica di $+2/3$. I protoni ne contengono 2, i neutroni 1.	DOWN Ha carica elettrica $-1/3$. I protoni ne contengono 1, i neutroni 2.
	SECONDA GENERAZIONE	MUONE Simile a un elettrone, ma con massa maggiore.	NEUTRINO MUONICO Viene creato insieme al muone, nel decadimento di alcune particelle.	CHARM Carica $+2/3$, massa 300 volte quella dell'up.	STRANGE Carica $-1/3$, massa 20 volte quella del down.
	TERZA GENERAZIONE	TAU Massa ancora più grande.	NEUTRINO TAUNICO Terzo tipo di neutrino. Si sospetta che i 3 neutrini si possano trasformare l'uno nell'altro.	TOP Ultimo scoperto: massa 34 mila volte l'up.	BOTTOM Massa pari a 500 volte quella del down.
BOSONI Così sono chiamate le particelle che trasportano le forze.	FOTONI Sono le particelle che portano la luce e tutte le onde elettromagnetiche.	GLUONI Sono le particelle che portano la forza forte, quella che tiene uniti i quark.	BOSONI VETTORI INTERMEDI Portano la forza debole. Scoperti da Carlo Rubbia.	W⁺ Z⁰	GRAVITONI Gli unici non ancora scoperti. Dovrebbero portare la forza di gravità.

Figura 2: Le particelle elementari previste dal Modello Standard.

Tutte le particelle si distinguono per: la loro massa, la carica elettrica e la vita media¹. Alle particelle è attribuito, poi, un insieme di numeri, chiamati *numeri quantici*² che sono, ad esempio: il numero leptonico, il numero barionico, la stranezza ecc. Ogni particella ha un'**antiparticella**, che si differenzia dalla corrispondente particella poiché possiede carica elettrica, numero barionico e numero leptonico opposti. Alcune particelle neutre, come il fotone ed il pione π^0 , coincidono con le loro antiparticelle.

I **neutrini** (ν) sono particelle elementari elettricamente neutre, appartenenti alla famiglia dei leptoni: come tali non interagiscono mediante interazione elettromagnetica, né forte, ma solo tramite interazione debole. È questa, dunque, una caratteristica peculiare che li rende molto difficili da rivelare: infatti essi possono attraversare da parte a parte la Terra (o il Sole) del tutto indisturbati. Occasionalmente, però, se l'energia a disposizione è sufficiente, l'interazione produce uno dei tre leptoni fondamentali, cioè un elettrone, oppure una particella μ o una particella τ .

In fisica delle particelle, si dice che il neutrino è caratterizzato da un *flavour* ("sapore"), che può essere elettronico, muonico, o di tipo tau. Il flavour è quindi una proprietà fisica che distingue i tre possibili tipi di neutrini ν_e , ν_μ , ν_τ nel modo seguente: un ν_e può produrre solo un elettrone, e non un μ o un τ , e così via.

È importante osservare che il Modello Standard prevede, nella sua versione di base, che i neutrini non abbiano massa. Se privi di massa, i neutrini viaggiano alla velocità della luce, conservando inalterato il loro *flavour* per tutta la loro esistenza (si parla anche di conservazione del *numero leptonico* di tipo e, μ , τ). Dimostrare che il *flavour* non si conserva e che il neutrino possiede una massa non nulla implica, dunque, una parziale revisione del Modello Standard. È proprio questo il focus degli studi sulla fisica del neutrino.

È importante capire, però, da dove provengono i neutrini. Le stelle, ed in particolare il Sole, sono immensi reattori che generano senza sosta neutrini. Ogni secondo, alcuni miliardi di queste invisibili particelle attraversano ogni centimetro quadrato del nostro corpo. I *neutrini solari* sono neutrini di tipo e (ν_e), prodotti, come dice il nome, dal Sole. Infatti, il Sole emette la sua energia, prodotta nella fornace nucleare, principalmente sotto forma di fotoni e di neutrini. Favoriti dall'assenza quasi totale di interazione con la materia, questi

¹ La maggior parte delle particelle conosciute, ad eccezione di quelle che costituiscono la materia ordinaria, è instabile.

² Questi numeri sono stati introdotti per giustificare, tramite le corrispondenti *leggi di conservazione*, le modalità di decadimento delle particelle. Alcune quantità si conservano rigorosamente, cioè non variano, in tutte le reazioni. Altri numeri quantici, invece, si conservano solo in particolari reazioni.

ultimi attraversano tutto lo spessore della stella alla velocità della luce, allontanandosi indisturbati nello spazio cosmico e portando un “messaggio incontaminato” direttamente proveniente dalla zona più interna ed insondabile del Sole.

I *neutrini atmosferici* sono neutrini di flavour elettronico e muonico (ν_e e ν_μ) che vengono copiosamente prodotti nell’atmosfera terrestre, attraverso una catena di reazioni nucleari originate dall’impatto dei *raggi cosmici*³ sull’aria. Figura 3 illustra schematicamente lo sciame di particelle create dall’impatto di raggi cosmici primari su nuclei della atmosfera terrestre.

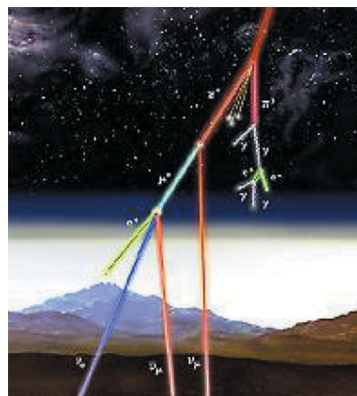


Figura 3: Particelle prodotte dalla interazione di raggi cosmici primari con l’atmosfera terrestre.

Altre sorgenti di neutrini sono: esplosioni di stelle massicce (dette supernovae), radioattività naturale, acceleratori di particelle, reattori nucleari.

Sono davvero molteplici le motivazioni scientifiche che hanno condotto agli studi sulla fisica del neutrino, aprendo un filone di ricerca di grande rilevanza nel panorama delle ricerche di fisica astroparticellare, sia a livello teorico che sperimentale. In prima istanza vi è un *input* di tipo teorico: l’idea del fisico italiano Bruno Pontecorvo (1957-58) che neutrini ed antineutrini possano *oscillare* (si veda par. 3), cioè trasformarsi in continuazione gli uni negli altri. L’ipotesi dell’oscillazione dei neutrini, come vedremo, verrà in seguito riproposta sotto un’altra forma.

Contestualmente a ciò vi è lo studio della massa del neutrino: il neutrino è particella priva di massa (*massless*) oppure no? Speculazioni teoriche hanno indotto la messa in opera di esperimenti di misura diretta della massa del neutrino (senza, però, esito positivo). Come sopra accennato, il Modello Standard prevede che i neutrini siano particelle prive di massa, ma il fenomeno di oscillazione richiede, invece, la presenza di una massa non nulla. Di qui l’importanza di una verifica sperimentale di tale processo.

³ La genesi dei raggi cosmici non è ancora perfettamente chiarita: alcuni provengono dal sole, altri da galassie molto lontane. In genere (*raggi cosmici primari*) si tratta di particelle, soprattutto protoni, con energia anche dell’ordine di alcune centinaia di GeV, che arrivano sulla Terra da tutte le direzioni dello spazio. Appena la radiazione primaria raggiunge l’atmosfera terrestre, interagisce con gli atomi ed i suoi costituenti, originando una moltitudine di particelle che noi chiamiamo *raggi cosmici secondari*. La prima di queste particelle piovute dal cielo è stata l’elettrone positivo detto anche *positrone* o *antielettrone*, primo esempio di antimateria.

Altro *input* di tipo teorico è rappresentato dagli studi concernenti il cosiddetto “modello solare standard”, ossia il modello teorico più accreditato che descrive il meccanismo di funzionamento del Sole. In base a calcoli effettuati utilizzando i più sicuri e conosciuti parametri del modello solare (luminosità, composizione chimica, temperatura, ...) è possibile determinare teoricamente i flussi solari di radiazione e particelle. Da tali flussi è possibile calcolare il valore teorico del flusso di neutrini solari. L'idea è di confrontare tali valori teorici con quelli misurati sperimentalmente, al fine di avvalorare o meno il modello.

A ciò si agganciano, come immediata conseguenza, questioni di tipo sperimentale (si veda anche par. 3): il *problema dei neutrini solari*, ossia un deficit nella misura del flusso di neutrini dal Sole rispetto alle attese teoriche di cui sopra, che non può essere giustificato entro i limiti delle incertezze sperimentali; la cosiddetta *anomalia dei neutrini atmosferici*, indicante un comportamento anomalo nelle misure condotte in esperimenti su neutrini atmosferici. Tali questioni hanno condotto alla messa in opera di una serie di esperimenti di grossissima portata, in termini sia di progettazione teorico-fenomenologica che di realizzazione tecnico-ingegneristica, ciascuno dei quali rappresenta un capolavoro di tecnologia ed ingegno. Tutti gli esperimenti hanno fornito risultati determinanti, ciascuno in modo autonomo, ma anche e soprattutto (ed è questo l'aspetto forse più affascinante di questo tipo di problematica) in combinazione con i risultati degli altri esperimenti, fino a convergere, dopo anni e lunghi sforzi verso un punto comune stimato come *la* soluzione attesa.

Ormai sappiamo che i neutrini hanno massa e sappiamo anche che oscillano; tuttavia, siamo ancora assai lontani dall'aver compreso a fondo ed in modo definitivo la fisica del neutrino. Perché, dunque, è importante continuare a studiare il neutrino? Molti aspetti ci sono tuttora oscuri: non conosciamo le masse assolute, ma solo le differenze di massa, ed è possibile che al neutrino siano connesse proprietà (ancora sconosciute) legate all'evoluzione dell'Universo. Potrebbero avere svolto un ruolo importante durante la cosiddetta *bariogenesi*, il processo che, nell'evoluzione dell'Universo, ha fatto prevalere la materia sull'antimateria. E potrebbero contribuire anche all'identificazione della *materia oscura* dell'Universo: si tratta di materia diversa da quella che conosciamo, di cui è certa l'esistenza ma non la natura, e che sembra costituire la gran parte dell'Universo. Infine, capire meglio questo fenomeno è necessario per avvicinarsi alla risposta di uno dei quesiti più difficili e profondi della fisica: qual è l'origine delle masse delle particelle elementari, e perché queste masse hanno determinati valori?

Le oscillazioni del neutrino

Un po' di storia ...

Il neutrino ha una data di nascita ben precisa. Il 4 dicembre 1930 Wolfgang Pauli, fisico austriaco tra i più noti e geniali della sua epoca, ebbe un'intuizione che si sarebbe rivelata ben presto decisiva per spiegare la *radioattività di tipo beta* di alcuni atomi. Come già detto, gli atomi sono caratterizzati da elettroni "orbitanti" attorno ad un nucleo centrale, costituito da protoni e neutroni. Accade che, in modo naturale, alcuni atomi emettano particelle dal nucleo: si dice, pertanto, che il nucleo è *instabile* ed il processo che si verifica è chiamato *decadimento radioattivo*.

Esistono tre tipi di decadimento [2,3]: alfa, beta e gamma. Nei nuclei degli elementi caratterizzati da *radioattività di tipo beta*, un neutrone del nucleo si trasforma in protone, con emissione di un elettrone e un antineutrino, formando in tal modo un nucleo più leggero (vedi Figura 4).

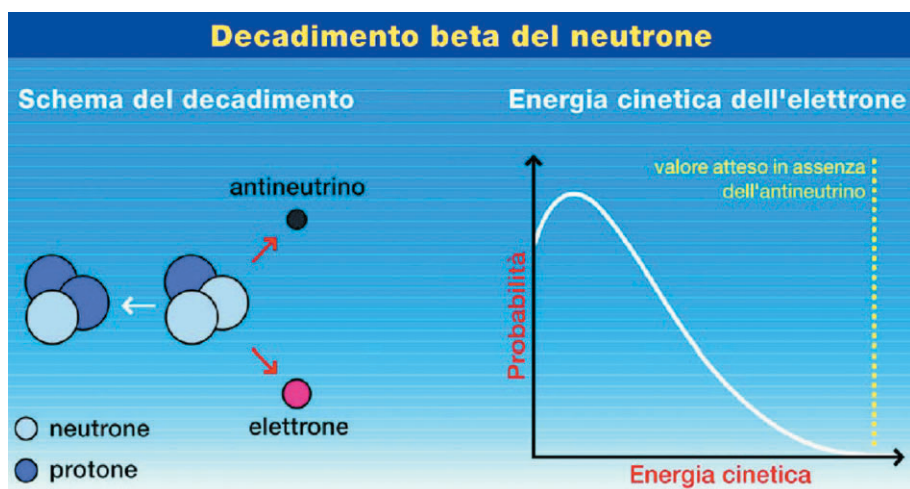


Figura 4: Decadimento beta del neutrone e distribuzione di probabilità in funzione dell'energia cinetica dell'elettrone.

L'energia rilasciata nel decadimento, pari alla differenza di massa fra il nucleo iniziale e quello finale, si trasforma nella massa dell'elettrone e in energia cinetica dei prodotti di decadimento. Processi di questo tipo sono di natura statistica e vengono descritti in termini di probabilità che il fenomeno si verifichi. Queste probabilità dipendono dall'energia delle particelle.

Se non ci fosse l'antineutrino, tutta l'energia cinetica si trasferirebbe

all'elettrone, essendo trascurabile lo "spostamento" del nucleo per via della sua grande massa. In questo caso, l'energia cinetica dell'elettrone sarebbe ben definita (barra verticale nel grafico a destra in Figura 4) e calcolabile per ogni nucleo radioattivo. La presenza dell'antineutrino, invece, comporta che tale energia si ripartisca tra elettrone e antineutrino, in modo casuale. È proprio di qui che parte la storia del neutrino.

Sperimentalmente, infatti, si osservava (1930) che l'energia cinetica dell'elettrone emesso dal nucleo dell'atomo radioattivo variava in modo continuo. Pauli, dunque, ipotizzò che in coppia con l'elettrone venisse liberata una nuova particella molto leggera e priva di carica, quindi difficilmente rivelabile. Fu Enrico Fermi, tre anni dopo, a ribattezzare *neutrino* la particella ipotizzata da Pauli, formulando per la prima volta una teoria coerente del neutrino e delle altre particelle allora note (elettrone, protone e neutrone). Nasceva la *Teoria delle Interazioni Deboli*, in cui il neutrino gioca un ruolo cruciale.

Solo nel 1956 Frederick Reines e Clyde L. Cowan riuscirono a rivelare sperimentalmente l'esistenza del neutrino, grazie a una ricerca condotta sulle particelle prodotte nei reattori nucleari. In realtà, Reines e Cowan rilevarono non già i neutrini, ma gli *antineutrini*, le corrispondenti particelle nel mondo dell'antimateria. In ogni caso, l'osservazione sperimentale degli antineutrini fornì la prova inconfutabile dell'esistenza del neutrino stesso. Questo importante risultato sperimentale suggerì al fisico italiano Bruno Pontecorvo [4], fra il 1957 e il 1958, una primitiva idea di oscillazione della coppia neutrino-antineutrino.

A partire dagli anni '60 si iniziò a mettere in atto una serie di esperimenti volti a studiare queste misteriose particelle, al fine di indagarne i meccanismi di interazione e fornire prove di verifica della teoria. Nel 1968, e dopo diversi anni di preparazione, ad Homestake, una ex-miniera d'oro situata nel Sud Dakota, Raymond Davis jr. e i suoi collaboratori si proponevano, per la prima volta, di misurare il flusso dei neutrini provenienti dal Sole e di confrontarlo con le attese teoriche derivanti dal cosiddetto *modello solare standard*⁴. L'esperimento sin dall'inizio rivelò un chiaro deficit dei neutrini solari misurati, rispetto al valore atteso in base alla teoria. Nacque così il '*problema dei neutrini solari*', che ha continuato a turbare i sonni dei fisici per più di trent'anni e che, come vedremo, solo recentemente ha trovato una soluzione.

Il deficit dei neutrini solari misurato da Davis e l'esistenza di più neutrini indussero Pontecorvo e Gribov a riproporre, nel 1969, la primitiva ipotesi di oscillazione fatta da Pontecorvo [4]: l'oscillazione doveva avvenire tra diversi

⁴ All'epoca, infatti, la conoscenza del Sole e delle reazioni nucleari che avvengono al suo interno era già sufficientemente accurata da consentire un significativo confronto con i dati sperimentali.

tipi di neutrini, il che era possibile *solo se i neutrini avevano massa* e, più precisamente, masse diverse per neutrini di tipo diverso. L'ipotesi fu di grande impatto nella comunità scientifica, poiché in questi anni l'idea dominante, supportata dall'osservazione sperimentale, era che i neutrini fossero particelle prive di massa, come i fotoni.

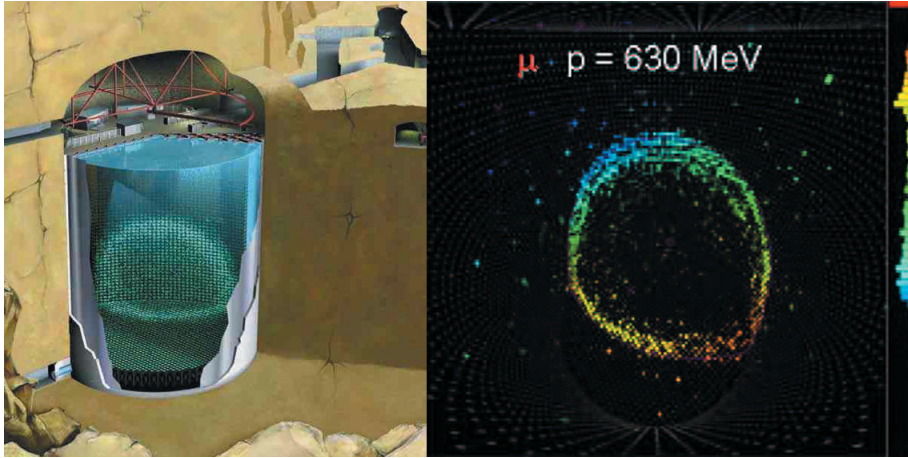


Figura 5: A sinistra: schema del rivelatore sotterraneo di SuperKamiokande; a destra: evento di interazione di un muone all'interno del rivelatore.

Nel 1987 giunsero i primi dati di un nuovo esperimento, Kamiokande, situato in Giappone, nella miniera⁵ di Kamioka, dove venne installato un grande rivelatore ad acqua che consentiva l'osservazione del leptone prodotto dall'interazione del neutrino con l'acqua stessa. L'esperimento era in grado di rivelare i neutrini atmosferici provenienti da qualunque direzione. Kamiokande proseguì con SuperKamiokande (Figura 5), un esperimento basato sulla stessa tecnologia, ma con un serbatoio enormemente più grande [5].

Nel 1999 iniziò la presa dati un altro esperimento, Gallex, installato in Italia nel Laboratorio del Gran Sasso dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). L'esperimento fornì risultati di grande importanza per il problema dei neutrini solari. Esito negativo dettero, invece, i primi tentativi di riprodurre in laboratorio le oscillazioni del neutrino: esperimenti agli acceleratori Chorus e Nomad, nel laboratorio del CERN di Ginevra, esperimenti ai reattori nucleari

⁵ L'osservazione dei neutrini è facilitata in esperimenti condotti a grandi profondità nel sottosuolo, ove la roccia circostante fa da schermo per tutte le altre particelle provenienti dal cosmo o dalla radioattività naturale.

Chooz, in Francia, e Palo Verde, negli USA. Tutti questi esperimenti compiuti con neutrini ‘artificiali’, cioè neutrini prodotti in laboratorio, sebbene non abbiano permesso di osservare le oscillazioni, si sono rivelati importanti poiché hanno contribuito a definirne meglio le caratteristiche.

Come già accennato, Kamiokande e SuperKamiokande erano in grado di rivelare i neutrini atmosferici e la loro direzione di provenienza. In particolare anche i neutrini provenienti dal basso (cioè i neutrini che, prodotti nell’emisfero opposto a quello dove è situato il rivelatore, hanno attraversato la Terra prima di essere rivelati – Figura 6 a sinistra). In particolare, SuperKamiokande misurò un rapporto fra neutrini muonici e neutrini elettronici inferiore del 30% rispetto a quanto atteso: è quella che venne indicata come ‘*anomalia dei neutrini atmosferici*’ [5]. Un’analoga attività sperimentale si svolgeva in Italia al Gran Sasso con l’esperimento MACRO.

Nel 1998 la collaborazione di SuperKamiokande mostrò in modo inconfutabile che l’anomalia dei neutrini atmosferici poteva essere interpretata in termini di “scomparsa” dei neutrini di tipo muonico, tanto più marcata quanto più lungo era il percorso che i neutrini avevano compiuto attraversando la Terra. L’unica convincente interpretazione era il **processo di oscillazione dei neutrini**, durante il tragitto, su distanze dell’ordine del diametro terrestre. In particolare, rimanendo i neutrini elettronici di fatto immutati rispetto all’attesa, l’oscillazione doveva essere interpretata come una transizione dei neutrini muonici in neutrini tau. Questo risultato venne confermato anche dall’esperimento Macro.

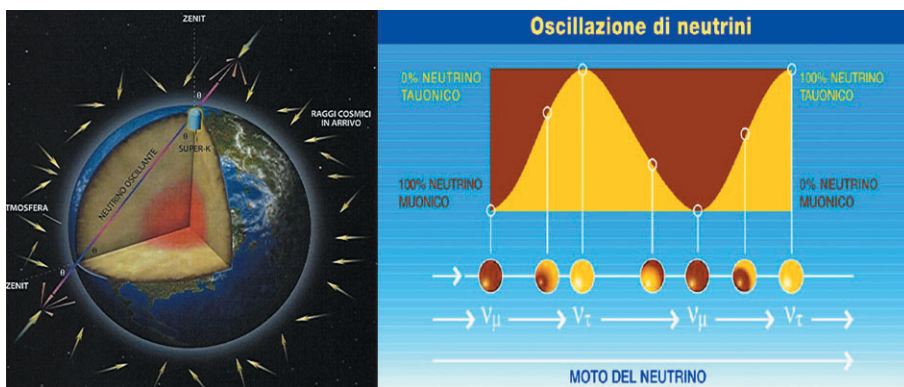


Figura 6: A sinistra: esperimento SuperKamiokande; a destra: processo di oscillazione del neutrino ν_{μ} in ν_{τ} .

In Figura 6 è rappresentato il processo di oscillazione dei neutrini ν_{μ} e ν_{τ} . Il fenomeno dell’oscillazione si spiega supponendo che i due neutrini non

abbiano di per sé massa definita, bensì siano *miscele di stati*⁶, con massa definita e diversa, che indicheremo ad esempio con ν_1 e ν_2 . D'altra parte, neutrini di massa diversa hanno una diversa evoluzione nel tempo e ciò contribuisce a cambiare la miscela degli stati ν_1 e ν_2 . Accade che, dopo aver percorso un certo tratto della sua traiettoria, il neutrino, inizialmente di tipo ν_μ , non è più un puro stato ν_μ , poché le componenti ν_1 e ν_2 che lo costituivano, si sono modificate in modo differente. Il neutrino assume, allora, una componente via via crescente di ν_τ , che si aggiunge alla componente di tipo ν_μ . Dopo un certo intervallo di tempo o, equivalentemente, dopo aver compiuto un certo percorso, il neutrino si converte interamente in ν_τ . È questo il fenomeno di “*oscillazione del neutrino*” (si parla anche di “*oscillazione di flavour*” del neutrino).

Da questo momento, l'oscillazione continua con le stesse modalità: diminuisce la componente di ν_τ e il neutrino si trasforma nuovamente in ν_μ . L'oscillazione procede come illustrato in Figura 6, dove il *flavour* del neutrino è rappresentato dal colore. Il periodo di oscillazione, cioè il tempo necessario perché sia compiuta un'oscillazione completa, dipende dalla differenza di massa dei due neutrini ν_1 e ν_2 e dall'energia.

Va notato che l'oscillazione dei neutrini muonici in neutrini tauonici, osservata da SuperKamiokande, è una convincente interpretazione del deficit dei neutrini muonici; la transizione, però, non può essere rivelata direttamente. La diretta osservazione della transizione è possibile solo grazie all'*apparizione del neutrino tau*. Infatti, nell'interazione con la materia il neutrino può rimanere tale (ma in tal caso non possiamo riconoscerlo), oppure può convertirsi nel suo leptone⁷. Può quindi accadere che un neutrino inizialmente ν_μ dia luogo, per effetto della oscillazione, ad un leptone τ , invece che a un μ^- . La rivelazione di questa apparizione, mai osservata sperimentalmente, è il principale obiettivo dell'esperimento OPERA (si veda par. 5), attualmente in corso ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN.

Con la scoperta dell'oscillazione dei neutrini atmosferici, gli studi sul neutrino si sono intensificati soprattutto nel settore dei neutrini solari. A Sudbury, in Canada, venne messo in atto l'esperimento SNO (*Sudbury Neutrino Observatory*), per la misura diretta dei neutrini solari, più sofisticato dei precedenti. Il risultato (anno 2002) fornì una conferma definitiva dell'intuizione

⁶ Questa ipotesi deriva dalla Meccanica Quantistica, la quale ammette l'esistenza di miscele di stati di massa diversa, esistenza confermata sperimentalmente.

⁷ Perché questo accada, però, il neutrino non può più rimanere una miscela di stati, deve assumere un'identità precisa, o ν_μ o ν_τ . Tuttavia, non possiamo sapere come riapparirà (cioè a quale leptone darà origine): possiamo solo valutare la probabilità che dia luogo a un μ^- oppure a un τ^- in base alla frazione di ν_μ e ν_τ che in quel momento lo caratterizza.

di Pontecorvo e, al tempo stesso, del Modello Solare.

Contestualmente giunsero i dati di un nuovo esperimento, KamLAND, situato in Giappone e progettato per rivelare gli effetti di oscillazione dei neutrini emessi dai reattori giapponesi e coreani, su distanze medie dell'ordine di qualche centinaio di chilometri. KamLAND, adottando la combinazione giusta di energia e di distanza, è stato in grado di rivelare lo stesso effetto di oscillazione che emergeva dal complesso degli esperimenti sui neutrini solari [6], in particolare dai dati di SNO. Lo straordinario accordo fra i dati dei due esperimenti si è rivelato decisivo [6]: il problema dei neutrini solari, dopo tanti anni di sforzi, è risolto. Inoltre la combinazione di tutti i dati degli esperimenti di oscillazione del neutrino ha condotto ad una straordinaria conclusione: il neutrino oscilla e, quindi, ha massa non nulla.

Esperimento CNGS e rivelatore OPERA

A completamento del quadro relativo agli esperimenti sul neutrino vi è OPERA. L'esperimento OPERA ricopre un ruolo fondamentale nell'ambito degli esperimenti di nuova generazione. Come già detto nel par. 3, gli esperimenti sino ad oggi condotti convergono in modo indiretto verso una conferma del processo di oscillazione tra neutrini. Tuttavia, il test conclusivo per confermare l'ipotesi dell'oscillazione è l'apparizione, cioè l'*osservazione diretta*, di neutrini di tipo τ in un fascio puro di neutrini di tipo μ : è questo l'obiettivo dell'esperimento OPERA.

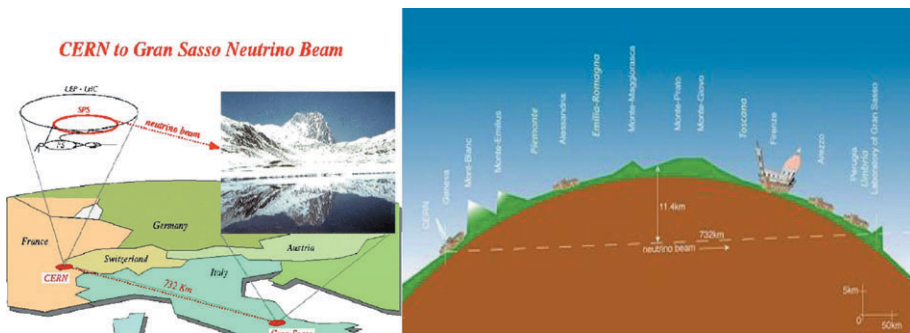


Figura 7: Esperimento CNGS. Il fascio di neutrini prodotti al CERN di Ginevra (vedi pannello di sinistra) viene indirizzato sui laboratori del Gran Sasso viaggiando sotto terra (immagine a destra).

L'esperimento, il cui rivelatore è situato nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) di Assergi, utilizza un fascio di neutrini prodotti dall'esperimento CNGS del CERN (*Centre Européen Recherche Nucleaire*) di Ginevra [7,8]. Tale

fascio viaggia per ben 730 km (ad una profondità di 11 km sottoterra) fino a raggiungere il rivelatore di Opera (Figura 7). La grande distanza tra sorgente del fascio e rivelatore (*long base-line*) è stata appositamente progettata, sulla base anche dei precedenti risultati sperimentali, al fine di rendere l'esperimento idoneo alla osservazione dell'oscillazione.

Esperimento CNGS

CNGS è l'acronimo di *Cern Neutrino to Gran Sasso*: si tratta di un fascio quasi puro di ν_μ prodotti nel seguente modo [7]. Un fascio di protoni, accelerati dall'acceleratore SPS del Cern (Figura 8), viene diretto su di un bersaglio di grafite. A seguito del processo di collisione vengono prodotte particelle π^+ e k^+ , le quali, passando attraverso un tunnel (cosiddetto *di decadimento*) lungo

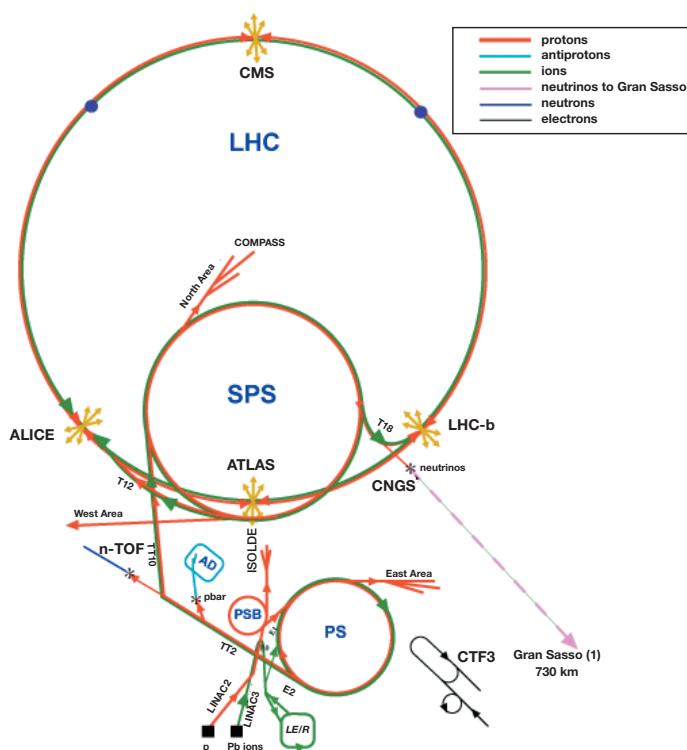


Figura 8: Schema di tutti gli acceleratori operanti al CERN. Si noti sulla destra la linea di fascio del SPS che va al CNGS e quindi al Gran Sasso.

quasi 1 km, decadono e danno luogo ad altre particelle e neutrini. I neutrini vengono selezionati e collimati (cioè resi “fascio”) verso il Gran Sasso.

La Fisica di OPERA

Con riferimento a Figura 9, il rivelatore di Opera è strutturato come segue [8]. L'unità base (Figura 9c) è una cella costituita da una lastra di materiale passivo e denso (piombo), spessa 1 mm, seguita da un film sottile fatto di una coppia di strati di *emulsione nucleare* di 40 micron (1 micron = 10^{-6} metri), separati da una base plastica di 200 micron. Queste celle sono unite assieme a formare un “mattoncino” (*brick*) rimuovibile, e i mattoncini sono usati per costruire “pareti” (*walls*), *moduli* e *supermoduli*. Ogni supermodulo del rivelatore consiste di 31 di moduli (Figure 9a e 9b). Il rivelatore è completato da sistemi

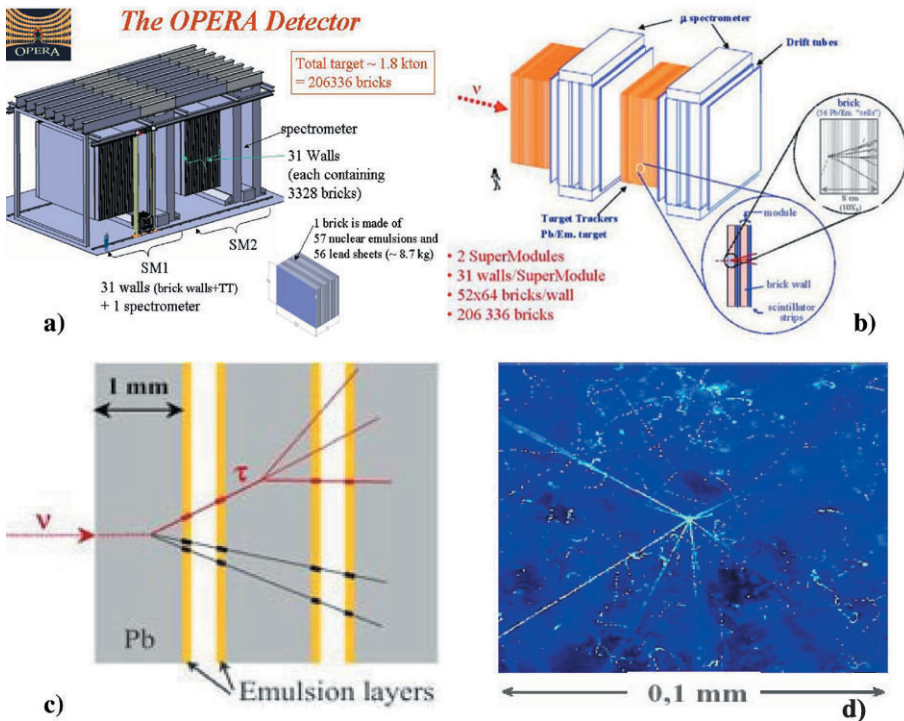


Figura 9: a) e b) Due viste schematiche dell'intero rivelatore di Opera; c) Unità di base del rivelatore composta di strati di Piombo ed emulsioni fotografiche; d) Esempio di interazione di neutrino in emulsione nucleare.

di tipo elettronico per la determinazione in tempo reale della posizione dell'evento di interazione.

Le *emulsioni nucleari* sono costituite di micro-cristalli di bromuro di argento immersi in uno strato di gelatina. Dopo lo sviluppo chimico, il fissaggio e il lavaggio, il percorso di una particella è visibile come una sequenza di grani neri di grandezza circa 0.5 micron. Le tracce vengono osservate in tre dimensioni e ingrandite per mezzo di microscopi ottici.

A seguito del processo di oscillazione $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$, occorso nel tragitto dal Cern al Gran Sasso, il fascio di neutrini rivelato da Opera al Gran Sasso [8] non sarà più costituito solo da neutrini ν_{μ} (fascio puro), ma conterrà una componente di neutrini ν_{τ} . Questi neutrini, interagendo con il materiale bersaglio del rivelatore daranno luogo ai leptoni del corrispondente tipo, cioè particelle τ , le quali, a loro volta decadranno, dando luogo ad altre particelle (e, μ, \dots) come prodotti di decadimento. Per poter osservare direttamente i prodotti del decadimento del leptone τ si utilizzano le emulsioni nucleari. In particolare, l'emulsione è usata come dispositivo di tracciamento, ossia per osservare il percorso, e i decadimenti del τ sono identificati dalla osservazione diretta dell'angolo di decadimento.

Opera è stato inaugurato ufficialmente l'11 Settembre 2006 e ad oggi sono stati ricostruiti diverse centinaia di interazioni da neutrino. La fase di acquisizione dati continuerà per i prossimi cinque anni.

Conclusioni

A settant'anni dall'intuizione di Pauli sulla esistenza dei neutrini, studiarli costituisce ancora una frontiera non esplorata della nostra comprensione del mondo delle particelle "elementari", quelle, cioè, che non sono a loro volta costituite da altri componenti ancora più fondamentali.

In questo articolo si è affrontata la problematica legata alla fisica del neutrino, partendo dall'aspetto teorico ed analizzando le "questioni aperte" di natura sperimentale, concernenti i neutrini atmosferici e solari. Seguendo un *excursus* storico si è cercato di fornire, sebbene sinteticamente, una panoramica sugli esperimenti effettuati e tuttora in corso. Da tutti gli esperimenti di oscillazione è emerso che i neutrini oscillano e, quindi, che hanno massa. Risultato, questo, di notevole importanza, in quanto indicativo di una fisica che si spinge oltre i confini del Modello Standard. Tuttavia, restano ancora alcuni problemi irrisolti: la determinazione delle masse assolute del neutrino; il ruolo dei neutrini in ambito cosmologico, in relazione alla cosiddetta *materia*



oscura dell'Universo e nell'ambito del processo di *bariogenesi*. Infine, i neutrini possono fornire risposte interessanti e fondamentali circa l'origine delle masse delle particelle elementari, consentendo di mettere a posto i tasselli mancanti nell'ambito del quadro teorico.

Cosa può insegnare la fisica del neutrino nel contesto scolastico? La fisica del neutrino insegna la tenacia, lo spirito di collaborazione, la capacità di far fronte ad imprevisti, la volontà di sapere per il puro piacere di sapere, la pazienza, il grande ingegno che la mente umana può maturare, quale si ritrova riflesso in grandi personalità come Fermi, Pontecorvo, per citare solo alcuni nomi (i più noti), con un pensiero rivolto anche alle personalità meno note, ma tuttavia degne di grande merito. Tutto questo è importante sottolineare, al di là poi del risultato specifico della ricerca. Ed è essenziale che i ragazzi imparino a leggere tra le righe e ad apprezzare un simile lavoro di ricerca come esempio di notevole spessore umano e scientifico, da calare, magari, ovviamente in forma traslata, nella politica della vita quotidiana per accrescere il proprio bagaglio etico e valoriale.

Bibliografia

- [1] J. Gates, *“L'arte della fisica”*, Di Renzo Editore, 2006.
- [2] A. Caforio, A. Ferilli, *“Fisica”*, Le Monnier, 2005.
- [3] B. Povh, K. Rith, *“Particelle e nuclei”*, Bollati Boringhieri, 1998.
- [4] B. Pontecorvo, *“B. Pontecorvo selected scientific works. Recollections on B. Pontecorvo”*, edited by S.M. Bilenky et al., Società Italiana di Fisica, 1997.
- [5] Kamiokande Collaboration, H. Hrata et al. Physics Letters B 205, pag. 416, 1988; Super-Kamiokande Collaboration, S. Fufuda et al. Physical Review Letters 86, pag 5651, 2001.
- [6] G.L. Fogli, E. Lisi, A. Palazzo, A.M. Rotunno, *“Solar neutrino oscillation parameters after first KamLAND results”*, Physical Review D 67, pag. 073002, 2003; A.M. Rotunno, *“The KamLAND Impact on Neutrino Oscillations”*, nel libro dei Proceedings “Erice 2003, From quarks to black holes”, p. 515, edito da A. Zichichi, Hackensack, World Scientific, 2005.
- [7] sito ufficiale del CERN: <http://www.cern.ch>
- [8] sito ufficiale di Opera: <http://operaweb.web.cern.ch/operaweb/index.shtml>

