

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

Corso di Fisica delle Particelle Elementari

# LE OSCILLAZIONI DEI NEUTRINI

*Relazione di:*

Pietro Cavalleri  
Michele Consonni  
Alessandro Fontana  
Chiara Paleari

Anno Accademico 2003-2004

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1	La misura della massa dei neutrini . . . . .	3
1.2	La teoria delle oscillazioni . . . . .	3
1.3	La produzione dei neutrini nelle reazioni solari . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Gli esperimenti radiochimici</b>	<b>9</b>
2.1	Il problema dei neutrini solari . . . . .	9
2.2	Gallex e GNO . . . . .	9
2.2.1	Descrizione dell'esperimento . . . . .	10
2.2.2	Risultati . . . . .	11
2.3	Borexino . . . . .	12
<b>3</b>	<b>I rivelatori Cerenkov</b>	<b>13</b>
3.1	Super Kamiokande . . . . .	13
3.1.1	SK - Neutrini atmosferici . . . . .	13
3.1.2	SK - Neutrini solari . . . . .	16
3.2	SNO . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Studio dei neutrini da reattore</b>	<b>22</b>
4.1	CHOOZ . . . . .	22
4.2	KamLAND . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Studio di neutrini da acceleratore</b>	<b>25</b>
5.1	MINOS . . . . .	25
5.1.1	Fascio di neutrini . . . . .	25
5.1.2	Rivelatore <i>near</i> . . . . .	26
5.1.3	Rivelatore <i>far</i> . . . . .	27
5.1.4	Caratteristiche fisiche . . . . .	27
5.2	K2K . . . . .	28
5.3	CNGS . . . . .	30
5.4	Il rivelatore OPERA di CNGS . . . . .	31
5.4.1	Sensibilità del rivelatore . . . . .	33
5.4.2	Caratteristiche fisiche . . . . .	33
5.5	Il rivelatore ICARUS di CNGS . . . . .	33
5.5.1	Dinamica degli eventi . . . . .	34
5.5.2	Struttura del rivelatore . . . . .	35
5.5.3	Sensibilità dal rivelatore . . . . .	35
<b>6</b>	<b>Frontiere teoriche e sperimentali nella fisica dei neutrini</b>	<b>36</b>
6.1	Implicazioni della massività dei neutrini . . . . .	36
6.2	Le <i>neutrino factories</i> . . . . .	37



# 1 Introduzione

## 1.1 La misura della massa dei neutrini

A partire da quando Pauli postulò l'esistenza del neutrino per spiegare lo spettro del decadimento  $\beta$ , si iniziò a studiare se questa particella fosse o meno una particella massiva.

Attualmente esistono tre metodologie sperimentali atte a risolvere questo problema:

- la misura dello spettro del decadimento  $\beta$  all'*end point*;
- la ricerca del decadimento doppio  $\beta$  senza neutrino;
- la ricerca di evidenze dell'oscillazione dei neutrini tra diversi stati di sapore.

Tramite la prima tipologia si sono trovati i limiti superiori per le masse dei neutrini [1]:

$$\begin{aligned}m(\nu_e) &< 2.2 \text{ eV}, \\m(\nu_\mu) &< 190 \text{ KeV}, \\m(\nu_\tau) &< 18.2 \text{ MeV}.\end{aligned}$$

Per completare il quadro, bisogna aggiungere un limite cosmologico secondo il quale la somma delle masse dei neutrini non può superare i 6 eV, soglia oltre la quale l'universo collaserebbe.

Il decadimento doppio  $\beta$ , invece, è un importante test per verificare se il neutrino è una particella di Majorana piuttosto che di Dirac, come si assume usualmente nel Modello Standard. Nel primo caso il neutrino sarebbe la sua stessa antiparticella e avrebbe due possibili stati di polarizzazione (elicità Left o Right); invece, nel secondo caso  $\nu$  e  $\bar{\nu}$  sarebbero due particelle distinte ognuna delle quali esistente in natura in un solo stato di elicità.

Quindi, se la natura del neutrino fosse quella ipotizzata da Majorana, potrebbe avvenire il processo a due stadi:

$$\begin{aligned}n &\rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_{eR} \\ \bar{\nu}_{eR} (\equiv \nu_{eR}) + n &\rightarrow p + e^-, \end{aligned}$$

dando origine al decadimento  $2n \rightarrow 2p + 2e^-$ . Il miglior limite sperimentale per la massa del neutrino di Majorana è 0.35 eV.

Infine, l'ultimo metodo è una misura della differenza delle masse e non del valore assoluto di esse, come succede invece per i precedenti due esperimenti. Nonostante ciò, la presenza di oscillazioni dei neutrini sarebbe la dimostrazione della massività dei neutrini. Secondo la teoria, infatti, questo fenomeno non può coinvolgere particelle a massa nulla.

## 1.2 La teoria delle oscillazioni

L'idea che i neutrini potessero oscillare fu introdotta da Pontecorvo nel '57. Egli ipotizzò che gli stati dei neutrini prodotti nelle interazioni deboli fossero una sovrapposizione di differenti autostati di massa, in un modo simile a quanto accade per il sistema dei kaoni neutri.

Vediamo come funziona questo meccanismo per due soli neutrini.

Supponiamo che  $\nu_1$  e  $\nu_2$  siano due autostati dell'energia:

$$\begin{aligned} H\nu_1 &= E_1\nu_1 \\ H\nu_2 &= E_2\nu_2, \end{aligned}$$

dove  $E_j = p + \frac{m_j^2}{2p}$  è l'energia nell'approssimazione delle masse  $m_j$  dei neutrini molto più piccole del loro momento  $p$ . La loro evoluzione temporale è, quindi,  $v_j(t) = v_j(0)e^{-iE_j t}$ .

La trasformazione che porta gli autostati di massa in autostati di sapore, per la conservazione della norma, deve essere unitaria; pertanto possiamo scrivere la combinazione lineare nella forma

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}.$$

Ponendo come condizione iniziale  $\nu_\mu(0) = 1$  e  $\nu_e(0) = 0$ , che equivale ad avere un fascio puramente muonico, si ottiene  $\nu_1(0) = \cos\vartheta$  e  $\nu_2(0) = \sin\vartheta$ , da cui si ricava la probabilità al tempo  $t$  di rivelare ancora un neutrino muonico

$$P(t, \nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = |\nu_\mu(t)|^2 = 1 - \sin^2 2\vartheta \sin^2 \left( \frac{1.27 \Delta m^2 [eV^2] L [Km]}{E [GeV]} \right). \quad (1)$$

Ripetendo, invece, il ragionamento con tre diversi neutrini, con la matrice di mixing  $U$ , in cui è stata omessa la fase legata alla violazione di CP, parametrizzata come segue (con la convenzione  $s_{ij} = \sin\vartheta_{ij}$  e  $c_{ij} = \cos\vartheta_{ij}$ )

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

si ottengono probabilità che sono la somma di più termini oscillanti che coinvolgono tutti i tre angoli di miscelamento e tre differenze di massa.

Tuttavia, dal confronto dei risultati degli esperimenti sui neutrini atmosferici con quelli sui neutrini solari, in cui sono coinvolti due valori molto diversi per la variabile  $L/E$ , si deduce che  $\Delta m_{sol}^2 \ll \Delta m_{atm}^2$ . Ponendo come convenzione  $\Delta m_{sol}^2 = \Delta m_{12}^2$ , si ha  $\Delta m_{atm}^2 \approx \Delta m_{13}^2 \approx \Delta m_{23}^2$  e questo rende molto più semplice le formule.

Se, infatti, si pone a zero in prima approssimazione l'angolo  $\vartheta_{13}$ , i fenomeni di oscillazione dei neutrini atmosferici e solari non hanno parametri in comune e di conseguenza possono essere considerati distinti e trattati come oscillazioni tra due stati secondo l'equazione (1), coinvolgendo solo i sapori

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  per i neutrini atmosferici,
- $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  per quelli solari.

Successivamente nella relazione sarà sottointeso, per quanto detto sopra, che parlando di neutrini atmosferici i parametri  $\vartheta$  e  $\Delta m^2$  saranno riferiti agli autostati di massa 2 e 3 mentre, invece, parlando di neutrini solari i parametri saranno riferiti agli autostati 1 e 2.

In figura 1 è riportata una esemplificazione dei parametri di mixing e dello spettro delle masse dei neutrini. Si noti che a destra è schematizzato uno di

due possibili ordinamenti delle masse: l'ordinamento a *gerarchia normale*, in cui  $m_1 \approx m_2 \ll m_3$ . L'altro è chiamato a *gerarchia inversa* e prevede  $m_3 \ll m_1 \approx m_2$ . Con esperimenti sulle oscillazioni non si possono distinguere i due casi.<sup>1</sup>

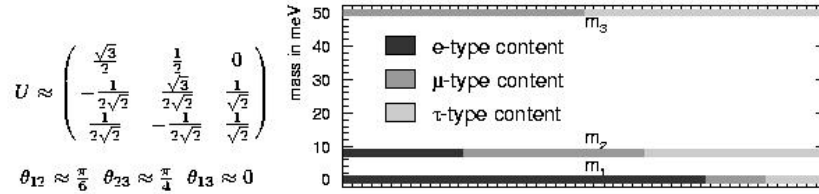


Figura 1: Esempificazione di una matrice di mixing e uno spettro delle masse (caso a *gerarchia normale*)

### 1.3 La produzione dei neutrini nelle reazioni solari

La prima fonte di neutrini che è stata utilizzata per il loro studio è il Sole.

Il Sole produce la sua energia tramite una catena di reazioni nucleari che hanno luogo nel nucleo, dove la temperatura raggiunge i 15 milioni di gradi. Il processo complessivo consiste nella fusione di quattro protoni in un nucleo di elio, con l'emissione di una grande quantità di energia sotto forma di raggi gamma, calore e neutrini. I fotoni emessi si propagano lentamente verso l'esterno del Sole subendo un gran numero di interazioni successive: ogni fotone emesso dal nucleo impiega circa un milione di anni per raggiungere la superficie del Sole. Di conseguenza le reazioni nucleari che hanno prodotto l'energia da cui ha origine la luce del Sole che osserviamo oggi sono avvenute un milione di anni fa. Le stesse reazioni nucleari che sono alla base dell'energia liberata dal Sole, originano anche un gran numero di neutrini di sapore elettronico. Questi neutrini, contrariamente ai fotoni, possono attraversare indisturbati il sole, senza subire interazioni e possono raggiungere la terra nelle stesse condizioni in cui sono stati prodotti dal nucleo dandoci così informazioni su cosa succede attualmente nel nucleo solare.

La struttura del Sole viene comunemente descritta attraverso il Modello Solare Standard che racchiude tutte le conoscenze di fisica e astrofisica; esso consente di prevedere i valori di molte grandezze fisiche tra cui anche il numero di neutrini prodotti e la loro energia caratteristica.

Guardiamo ora più nel dettaglio le reazioni nucleari che avvengono nel Sole e si accompagnano alla produzione di neutrini [2] [3]. Le reazioni più frequenti costituiscono la cosiddetta catena protone-protone. Il risultato complessivo della catena protone-protone, che è costituita da nove reazioni, è quello di generare un nucleo di elio a partire da quattro nuclei di idrogeno. La reazione che dà il via a tutte le altre è chiamata *p-p* e consiste nella fusione di due nuclei di idrogeno

<sup>1</sup>In realtà esistono delle misure che coinvolgono anche effetti di materia MSW tramite le quali si può studiare la gerarchia, ma queste sono pensabili solo con le *neutrino factories* (si veda la sezione 6.2).

in uno solo; questa stessa reazione è quella che produce il maggior numero di neutrini (oltre il 92%). I neutrini sono prodotti in altre due reazioni della catena, chiamate  ${}^7Be$  e  ${}^8B$ . I neutrini prodotti dalla reazione  ${}^8B$ , pur essendo solo una piccolissima parte del totale (circa lo 0.01%) sono i più facili da rivelare perché hanno un'energia maggiore. Al contrario quelli generati dalla reazione  $p-p$  sono molto difficili da rivelare perché hanno bassissima energia. Nella tabella 1 vediamo schematizzate tutte le reazioni che costituiscono la catena.

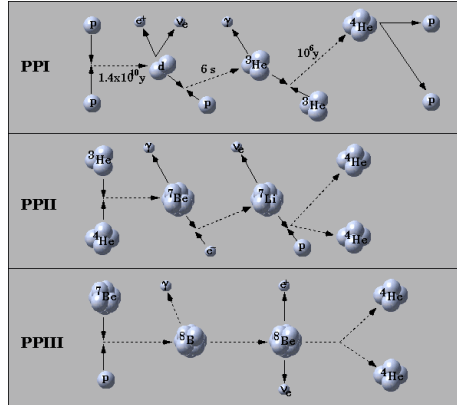
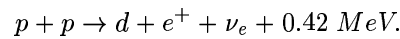


Tabella 1: Schema delle reazioni della catena solare

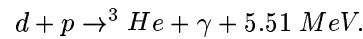
Conoscendo queste reazioni siamo in grado di prevedere il flusso di neutrini solari che ci attendiamo sulla terra. Consideriamo infatti le reazioni schematizzate nella prima riga della tabella, che abbiamo detto sono le maggiori responsabili della produzioni di neutrini.

- Il primo step è la combinazione di due protoni per formare l'unico sistema stabile a due nucleoni:

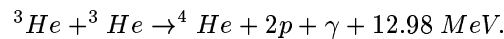


Il neutrino come prodotto finale segnala che è avvenuto un processo di interazione debole, che deve avvenire affinché un protone venga trasformato in neutrone.

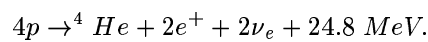
- Formato il deuterio è molto facile che si verifichi la reazione



- A questo punto dobbiamo attendere che si verifichi



- Quindi, questo ciclo ha la seguente reazione netta:



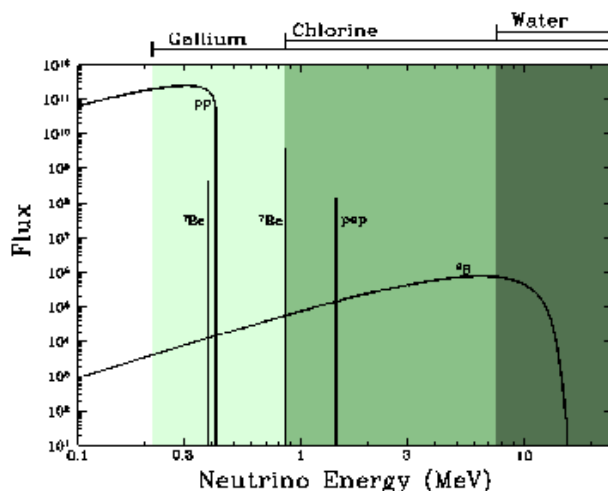


Figura 2: Spettro energetico dei neutrini solari

Dal ciclo p-p possiamo quindi calcolare che ogni 25 MeV di energia solare sono prodotti due neutrini possiamo calcolare il flusso di neutrini aspettati sulla terra provenienti da questa reazione:  $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Questo valore è caratterizzato da una piccola incertezza perché dipende poco dalla nostra conoscenza della struttura del Sole. È questo il motivo che ha portato grande interesse nel cercare di costruire esperimenti in grado di rivelare neutrini prodotti da questa reazione, seppur caratterizzati da una bassissima energia. I primi pionieristici esperimenti in USA e Giappone furono solamente in grado di rilevare il flusso di neutrini provenienti dalle reazioni successive, per cui il deficit osservato nel loro flusso lasciò nel dilemma: abbiamo una prova del fenomeno delle oscillazioni o dobbiamo rivedere la stima fornita dal Modello Solare Standard, non tanto attendibile per i neutrini non prodotti nella reazione primaria?

Nel grafico di figura 2 vediamo le energie caratteristiche dei neutrini prodotti dalle diverse reazioni della catena. La componente più abbondante del flusso è quella che deriva da p-p e ha uno spettro continuo tra 0 e 0.42 MeV. La componente successiva è la linea monoenergetica a 0.862 MeV proveniente dal  ${}^7\text{Be}$ , che produce anche una debole linea a 0.384 MeV. Il decadimento del  ${}^8\text{B}$  contribuisce in piccola parte al flusso totale di neutrini (esso è pari circa a  $10^{-4}$  volte il flusso da p-p) ed è caratterizzato da uno spettro continuo che raggiunge i 14 MeV.

Origine	Flusso ( $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
$p-p$	$58400 \pm 600$
${}^7\text{Be}$	$4800 \pm 430$
${}^8\text{B}$	$5.15 \pm 0.98$

Tabella 2: Flusso di neutrini atteso dalle diverse reazioni solari

La tabella 2, invece, esprime il flusso di neutrini che teoricamente ci aspetta-

mo sulla terra con la corrispondente incertezza teorica. L'incertezza in queste predizioni dipende dallo stadio della reazione di provenienza all'interno della catena. Si ha  $\delta\phi_\nu(p-p) \approx 1\%$ ,  $\delta\phi_\nu({}^7\text{Be}) \approx 9\%$  e  $\delta\phi_\nu({}^8\text{B}) \approx 20\%$ ; questo ultimo valore risulta essere così elevato perché il flusso di neutrini provenienti da questa reazione dipende fortemente dal valore della temperatura del Sole ed è inoltre legato alla scarsa precisione con cui è stata misurata la sezione d'urto della reazione.

Naturalmente non solo il Sole ma anche tutte le altre stelle producono neutrini, ma essi giungono sulla terra con un'intensità molto debole a causa dell'enorme distanza che ci separa dalle stelle: di conseguenza risulta praticamente impossibile distinguerli dai neutrini solari. Un'eccezione è costituita dall'esplosione delle supernovae, stelle massive che dopo aver esaurito il loro combustibile nucleare collassano ed esplodono. Esse emettono un'enorme quantità di energia sotto forma di luce, materia, ed anche di antineutrini. Se la supernova esplose nella nostra galassia la quantità di neutrini emessa è molto alta. Questi neutrini vengono emessi in un unico fiotto che dura una decina di secondi e contengono informazioni importantissime sul meccanismo con cui avviene l'esplosione. L'ultima supernova galattica è esplosa nel 1987 e in quell'occasione si sono catturati per la prima volta una decina di neutrini emessi in queste *catastrofi cosmiche*. Gli esperimenti attualmente in funzione permetteranno di rilevare un numero di neutrini da supernova molto più elevato.

Bisogna tener presenti alcuni problemi che si riscontrano nel tentativo di studiare i neutrini solari.

Gli esperimenti che cercano di studiare queste particelle sono collocati sotto terra. Bisogna infatti tener presente che, nonostante il numero di neutrini solari che raggiunge la terra sia altissimo (in un secondo ogni centimetro quadrato è attraversato da oltre 60 miliardi di neutrini solari), questi sono così elusivi che le loro interazioni con i rivelatori sono rarissime. D'altra parte ci sono altre particelle, come ad esempio quelle provenienti dai raggi cosmici secondari prodotti nell'atmosfera, che hanno una probabilità miliardi di volte maggiore di interagire con i rivelatori. Se gli esperimenti di neutrini solari si svolgessero in superficie le interazioni dei raggi cosmici con il rivelatore sommergerebbero il flebile segnale dei neutrini solari. Utilizzando invece laboratori sotterranei, la roccia assorbe i raggi cosmici, eliminando così la maggior fonte di rumore. Perciò si ha che i raggi cosmici che raggiungono il Laboratorio rappresentano solo lo 0.00001% di quelli che arrivano in superficie; al contrario i neutrini sono così poco interagenti da poter attraversare grandissimi spessori di roccia (ad esempio circa 1400 metri per il Laboratorio del Gran Sasso) e raggiungere indisturbati il rivelatore.

La posizione sotterranea, seppur necessaria, non è di per sé sufficiente per consentire una rivelazione efficace dei neutrini: questi sono infatti così elusivi che per avere la speranza di catturarne qualcuno è necessario utilizzare rivelatori molto grandi e massicci. Basta infatti pensare che in media soltanto un neutrino all'anno interagisce con il corpo di una persona.

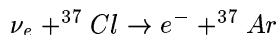
## 2 Gli esperimenti radiochimici

### 2.1 Il problema dei neutrini solari

Quando nel 1957 Pontecorvo fece l'ipotesi di oscillazione dei neutrini, solo i neutrini elettronici erano noti ed egli considerò la transizione di neutrini elettronici sinistrorsi e destrorsi. Nel 1962 fu scoperto anche il neutrino muonico e nel 1967 Pontecorvo generalizzò la sua idea di oscillazioni di neutrini elettronici e muonici. Egli considerò le oscillazioni di neutrini solari e prevede che, a causa della trasformazione dei  $\nu_e$  prodotti nel Sole in  $\nu_\mu$ , il flusso a Terra dei  $\nu_e$  solari dovrebbe essere circa la metà di quello previsto dai modelli.

Questa previsione fu fatta prima che venissero ottenuti i risultati del primo esperimento sui neutrini solari ad opera di Davis, il quale, per il suo lavoro sui neutrini, nel 2002 divise il premio Nobel per la fisica con Koshiba.

Per rivelare i neutrini solari a Homestake nel '68, Davis utilizzò il metodo radiochimico proposto da Pontecorvo nel 1946, ossia la reazione:



Per eliminare o almeno ridurre il fondo dovuto alla radiazione cosmica, l'esperimento consistente in un serbatoio contenente 615 tonnellate di tetracloroetilene, fu collocato in una miniera alla profondità di circa 1.4 Km sottoterra. In due mesi di misura dal  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  utilizzando la reazione appena scritta furono prodotti 20 atomi circa di Argon che vennero estratti da un volume contenente circa  $2.2 \times 10^{30}$  molecole di  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ . Questi atomi di Argon sono instabili con una vita media di circa 35 giorni. Essi furono estratti dal serbatoio usando del gas di elio e contati osservando i loro decadimenti in contatori proporzionali a basso fondo.

Il primo risultato dell'esperimento di Davis, ottenuto negli anni 1969-70, fu inaspettato: il numero di eventi misurati era tra due e tre volte inferiore a quello atteso per lo stesso tempo di misura dal modello accettato per il Sole e dal Modello Standard. Si ottenne infatti un flusso di neutrini pari a  $2.1 \pm 0.3 \text{ SNU}$ , dove SNU significa *Solar Neutrino Unit* ed è pari alla rivelazione di un neutrino al secondo per  $10^{36}$  atomi del target. I risultati previsti erano invece di circa  $7.9 \pm 2.6 \text{ SNU}$  [3].

Questa discrepanza tra il numero di neutrini solari predetti dalle teorie e il numero nettamente inferiore di neutrini solari rilevati sperimentalmente prese il nome di *problema dei neutrini solari* (SNP). L'unica spiegazione che finora sembra essere soddisfacente è proprio il fenomeno delle oscillazioni di sapore previsto da Pontecorvo.

Guardiamo ora due esperimenti più recenti situati nei laboratori del Gran Sasso costruiti per studiare il flusso dei neutrini solari: Gallex e Borexino.

### 2.2 Gallex e GNO

L'esperimento Gallex è stato il primo esperimento di radiochimica ad indagare la natura dei neutrini solari di tutte le energie (a differenza di altri esperimenti di questo tipo che hanno luogo in America e Giappone che non riescono a rilevare quelli prodotti dal ciclo p-p che costituiscono la parte predominante del flusso solare) e ha raccolto dati ininterrottamente dal 1991 al 1997 riportando un numero di neutrini pari al 60% circa di quello previsto dalle teorie, è stato

poi sostituito nel 1998 da GNO, una sua versione più avanzata che ha quindi maggiore sensibilità.

### 2.2.1 Descrizione dell'esperimento

Il rivelatore usato per GNO [4] è costituito da una grande tanica contenente una soluzione di cloruro di gallio  $GaCl_3$  in acqua e acido cloridrico avente una massa complessiva di 101 tonnellate contenente 30.3 tonnellate di gallio naturale che corrisponde circa a  $10^{29}$  nuclei di  $^{71}Ga$ . I neutrini solari aventi energia sufficientemente elevata possono interagire con i nuclei di  $^{71}Ga$  che costituiscono circa il 40% del gallio presente nella soluzione. Questo processo beta-inverso converte il nucleo di gallio che interagisce con il neutrino in un nucleo di germanio  $^{71}Ge$ : nonostante l'elevata massa del rivelatore e l'elevato numero di neutrini che lo attraversano, l'interazione si verifica meno di una volta al giorno.

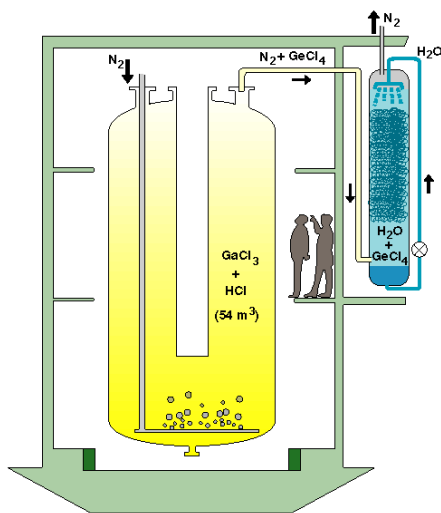


Figura 3: Il rivelatore di GNO

Gli atomi di germanio prodotti sono radioattivi e decadono attraverso una cattura elettronica di nuovo in  $^{71}Ga$ . La vita media di un atomo di  $^{71}Ge$  è circa 16 giorni, così il germanio si accumula nella soluzione fino a raggiungere l'equilibrio, quando il numero di atomi prodotti dalle interazioni dei neutrini è uguale a quello degli atomi che decadono. Infatti, detti  $N$  e  $\tau$  rispettivamente il numero di atomi di germanio e la loro vita media,

$$\begin{aligned} dN &= Rdt - N/\tau dt = 0 \\ \Rightarrow R &= N/\tau \end{aligned}$$

e da  $R$  si deduce, conoscendo la sezione d'urto dell'interazione neutrino-nucleo e il tempo di raccolta, il flusso di neutrini che ha attraversato il rivelatore.

Poiché gli atomi di germanio hanno proprietà chimiche molto diverse da quelle del gallio, questi possono essere separati dal resto della soluzione mediante una delicata procedura chimica, che prevede un intenso flossaggio di azoto.

L'estrazione degli atomi di germanio dalla soluzione viene ripetuta una volta ogni quattro settimane circa; con questa tecnica è possibile estrarre i circa 10-12 atomi di germanio che sono presenti nella soluzione disciolti in  $10^{29}$  atomi di gallio.

Gli atomi di germanio estratti dalla soluzione vengono convertiti in gas germano  $GeH_4$  che viene inserito in un contatore proporzionale. In questo modo è possibile contare il numero di atomi di germanio prodotti dalle interazioni coi neutrini semplicemente contando il numero di decadimenti radioattivi che hanno luogo nel contatore proporzionale.

Il contatore proporzionale tuttavia non rivela solo i rari decadimenti del germanio ai quali siamo interessati ma anche i segnali prodotti da altre sorgenti radioattive come ad esempio i decadimenti nelle rocce circostanti che costituiscono un disturbo alla misura. Poiché, nonostante la grande schermatura del laboratorio, questi segnali di disturbo sono più frequenti di quelli del germanio, è stato necessario sviluppare delle tecniche che consentissero di distinguere gli uni dagli altri. I conteggi vengono effettuati per un periodo di sei mesi, permettendo un completo decadimento del  $^{71}Ge$ . Al conteggio fatto in questo modo è poi applicata una correzione che tiene conto del contributo dato ai segnali osservati da altri fenomeni che non dipendono dall'interazione dei neutrini solari, principalmente provenienti dall'interazione all'interno della soluzione di muoni ad alta energia provenienti dai raggi cosmici, dalla radioattività naturale e da rumore di fondo che può essere confuso con decadimento di atomi di germanio. Queste correzioni sono dell'ordine di una piccola percentuale del segnale.

### 2.2.2 Risultati

L'esperimento Gallex misurò le interazioni di neutrini solari con atomi di gallio per 1594 giorni con un incertezza del 10% ottenendo un flusso di neutrini [5]:

$$77.5 \pm 6.2(stat) \pm 4.5(sist) \text{ SNU.}$$

Dal 1998 sono poi cominciate delle nuove serie di misure con il progetto GNO, proseguite fino 2002. Un totale di circa 200 decadimenti di germanio sono stati rilevati nei 1240 giorni di esposizione ai neutrini solari. Si è così trovato un flusso di neutrini di

$$65.2 \pm 6.4(stat) \pm 3.0(sist) \text{ SNU.}$$

Si può quindi vedere che un grande risultato di GNO è stato quello di ridurre l'errore sistematico. Un'idea per il futuro è inoltre quella di aumentare la massa del gallio a 60 e poi a 100 tonnellate. Combinando i risultati dei due esperimenti, per un totale di 2834 giorni di rilevazioni si ottiene

$$70.8 \pm 4.5(stat) \pm 3.8(sist) \text{ SNU.}$$

I valori ottenuti da GNO sono però pari solo al 55% circa di quelli attesi.

Il deficit di neutrini osservato da Gallex e GNO non può essere imputato ad errori o difetti nella procedura sperimentale. Il rivelatore infatti è stato calibrato per ben due volte utilizzando una sorgente artificiale capace di produrre neutrini aventi caratteristiche simili a quelle dei neutrini solari: i risultati ottenuti in queste misure sono in perfetto accordo con quelli previsti teoricamente una volta note le caratteristiche e l'intensità della sorgente artificiale.

### 2.3 Borexino

Il risultato principale che si vuole ottenere con Borexino [6] è la misura diretta del flusso di neutrini solari derivanti dalla reazione che coinvolge  ${}^7\text{Be}$ , indipendentemente dal sapore con cui arrivano sulla terra, mediante uno scattering neutrino-elettrone in uno scintillatore liquido. Una volta avviato esso sarebbe il primo esperimento di spettroscopia di neutrini con energia inferiore al MeV.

Questi risultati sarebbero utili per risolvere l'incompatibilità osservata tra i risultati ottenuti da Gallex e Sage da una parte e da Kamiokande e SK dall'altra. Nei primi due esperimenti, infatti, gli unici in cui si sono riusciti a studiare anche neutrini di bassa energia, sembrerebbe che il flusso di neutrini solari che arriva sulla Terra, essendo di molto inferiore alle previsioni teoriche, sia costituito esclusivamente dai  $\nu$  prodotti dalla reazione p-p. Questo comporterebbe l'assenza del  ${}^7\text{Be}$  e quindi del  ${}^8\text{B}$  nel Sole. Al contrario, l'esperimento Super Kamiokande, basandosi sull'effetto Cerenkov ad acqua, è in grado di studiare solo i neutrini con un'energia maggiore di 5 MeV e in esso si è rivelato un flusso di neutrini solari provenienti quindi da  ${}^8\text{B}$ . Una delle finalità di Borexino è, pertanto, sciogliere questo dubbio.

La costruzione di Borexino è stata preceduta dal CTF (Counting Test Facility), prototipo dell'esperimento, in funzione per diversi anni, costituito da una sfera di plastica trasparente di 2 metri di diametro contenente 4 tonnellate di scintillatore liquido posto al centro di una struttura formata da 100 fotomoltiplicatori, il tutto immerso in acqua purissima. Il prototipo è dedicato allo studio delle schermature necessarie per ridurre il fondo dovuto alla radiazione naturale della roccia circostante.

La costruzione di Borexino è iniziata nel 1996. L'esperimento sarà simile al suo prototipo, ma la sfera avrà un diametro di 8.5 m riempita con 300 tonnellate di scintillatore e osservata da 2200 fotomoltiplicatori, il tutto immerso in 2400 tonnellate di acqua purissima che funge da assorbitore per le particelle della radiazione naturale provenienti dalla roccia circostante.

La rivelazione dei neutrini è legata quindi allo scattering  $\nu - e$  usando la spettroscopia LS (*liquid scintillator*). I fotoni emessi dalla scintillazione danno una misura dell'energia degli eventi nel rivelatore, l'emissione è però isotropa e non si possono quindi ricavare informazioni sulla direzione del fascio di neutrini.

Lo scattering neutrino-elettrone è un processo di cui conosciamo precisamente la sezione d'urto. Il fatto, inoltre, utile e interessante nell'idea di questo esperimento è che, come visto prima, conosciamo precisamente l'energia che caratterizza i neutrini prodotti da  ${}^7\text{Be}$  (0.862 MeV). Lo spettro dell'elettrone di rinculo sappiamo quindi che mostrerà uno spigolo Compton a 0.66 MeV, dal momento che questo è inizialmente fermo.

Per problemi di rumore di fondo ci si aspetta di riuscire a studiare questo spettro in Borexino tra 0.25 e 0.8 MeV. Ci si aspetta una frequenza di rivelazioni di circa 18000 all'anno, che paragonata con quella di altri esperimenti precedenti, pari circa a 100, fa intendere che Borexino potrebbe portare interessanti risultati.

Per ora però purtroppo l'esperimento è chiuso per problemi *ecologico-politici* dati dall'inquinamento delle acque dovuto al grande utilizzo di liquidi nei laboratori del Gran Sasso.

## 3 I rivelatori Cerenkov

La tecnica radiochimica è stata la prima con cui sono stati analizzati i neutrini solari.

Tuttavia, successivamente si è introdotto l'utilizzo dei rivelatori Cerenkov, coi quali è possibile ricostruire energie, direzione e tempo di arrivo di ogni singolo evento, a differenza dei rivelatori radiochimici che, invece, restituiscono soltanto la media di queste quantità calcolata su più eventi.

I più recenti esperimenti che utilizzano la tecnica Cerenkov per rivelare i neutrini sono Super Kamiokande e SNO.

### 3.1 Super Kamiokande

Super Kamiokande nasce come ampliamento di un impianto sperimentale costruito per la ricerca del decadimento del protone: Kamiokande. Infatti, proprio l'analisi del fondo di Kamiokande ha rivelato la capacità dell'apparato di studiare lo strano comportamento dei neutrini e, pertanto, si è sperato che un rivelatore identico ma 10 volte più grande avrebbe potuto confermare che i neutrini cambiano di sapore nel corso della loro vita.

Nel 1997, all'interno di Monte Ikenoyama, a 250 Km da Tokyo, viene costruito, quindi, un serbatoio di acciaio inossidabile contenente 50000 tonnellate di acqua ultrapura circondato da 11000 tubi fotomoltiplicatori atti a rivelare i lampi di luce Cerenkov prodotti in seguito alle interazioni dei neutrini con i nuclei presenti nell'acqua.

Le 50000 tonnellate d'acqua di SK sono divise tra due volumi cilindrici concentrici, un primo interno controllato da fototubi rivolti verso il centro e un secondo, che circonda il primo, i cui fototubi sono rivolti verso l'esterno. In questo modo, SK può distinguere tre categorie di eventi: quelli completamente contenuti (nessuna particella carica entrante né uscente), quelli parzialmente contenuti (solo particelle cariche in uscita) e gli eventi con particelle cariche in ingresso. Questa classificazione fornisce elementi utili per l'identificazione del processo che è avvenuto. Inoltre, il cilindro esterno produce una schermatura dalla radiazione proveniente dalle rocce della montagna, la quale a sua volta protegge l'apparato dal fondo esterno.

SK nel periodo 1997-2002 ha raccolto dati sia sui neutrini provenienti dal Sole, caratterizzati da energie dell'ordine della decina di MeV, sia sui neutrini con energie dell'ordine dei GeV prodotti dai raggi cosmici incidenti coi nuclei dell'atmosfera.

#### 3.1.1 SK - Neutrini atmosferici

I raggi cosmici primari sono costituiti da nuclei, principalmente protoni e ogni collisione con l'atmosfera produce sciami di particelle secondarie, fra cui sono abbondanti i pioni. Questi decadono seguendo nella maggior parte dei casi questa catena di processi:

$$\begin{aligned}\pi^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \\ \mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu.\end{aligned}$$

In prima approssimazione, dunque, il rapporto atteso tra numero di neutrini muonici ed elettronici è due.

SK può misurare questo rapporto grazie alla capacità di distinguere l'anello di luce Cerenkov lasciato dal passaggio di un  $e^\pm$  da quello di un  $\mu^\pm$  e, tramite questo, di risalire al sapore del neutrino che ha generato l'evento. Infatti, l'elettrone a energie superiori a 800 KeV, cioè la soglia per vedere luce Cerenkov in acqua ( $n = 1.33$ ), forma uno sciame elettromagnetico e quindi il suo anello è sfuocato e poco definito, a differenza invece di un muone che, essendo più pesante, ha una traiettoria ben definita e forma un anello molto delineato. Un esempio di questa differenza è mostrato in figura 4.

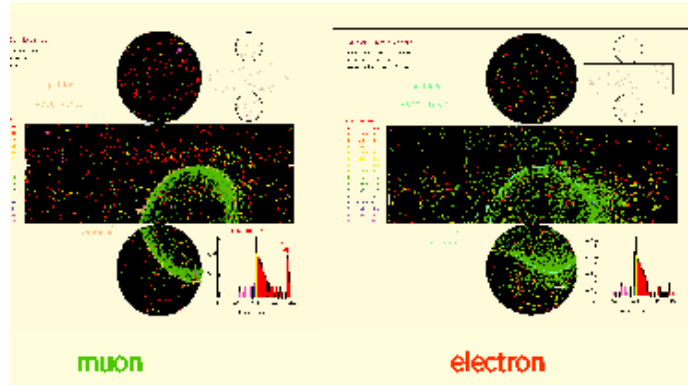


Figura 4: Confronto tra gli anelli Cerenkov prodotti da un muone e da un elettrone

La misura ottenuta da SK viene espressa solitamente come rapporto tra i dati sperimentali e il valore atteso dalle simulazioni Monte Carlo:

$$\frac{(\#\mu/\#e)_{mis}}{(\#\mu/\#e)_{sim}} = 0.61 \pm 0.03(stat) \pm 0.05(sist),$$

che indicativamente significa 1.3 neutrini muonici per ognuno di quelli elettronici [7] [8].

Questo deficit è difficilmente spiegabile senza ammettere che i neutrini oscillino tra diversi stati di sapore e viene comunemente chiamato *anomalia dei raggi cosmici (CRA)*.

Per confermare questo risultato si possono utilizzare considerazioni sulla direzione di arrivo dei neutrini. I raggi cosmici arrivano all'atmosfera terrestre in quantità uniforme da ogni direzione e, quindi, una discrepanza tra numero di neutrini che arrivano dall'alto (rispetto allo zenit del luogo) e che arrivano dal basso sarebbe una forte indicazione del cambiamento di sapore dei neutrini in volo.

Infatti, come si nota dalla figura 5, la distanza percorsa dal neutrino è strettamente collegata con l'angolo zenitale  $\Theta$ . In presenza di oscillazioni, pertanto, il valore atteso di neutrini di un certo sapore varia a seconda dell'angolo di provenienza seguendo l'equazione (1), mentre in assenza di questo fenomeno il numero di neutrini dovrebbe essere praticamente costante al variare di  $\Theta$ .

Il fattore di maggior disturbo per questa misura è la deflessione provocata dal campo magnetico terrestre sui raggi cosmici incidenti, che intacca la distribuzione angolare uniforme di questi ultimi. La soluzione a questo problema è scartare

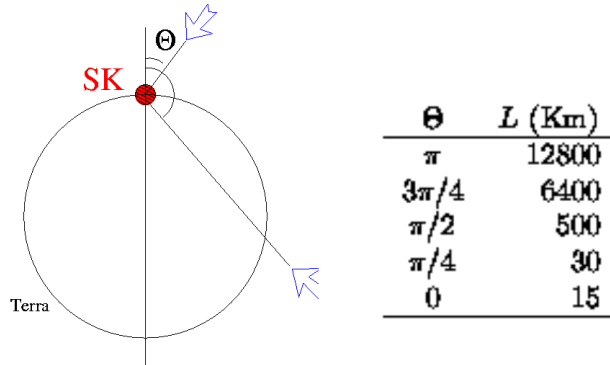


Figura 5: Dipendenza della distanza percorsa dall'angolo zenitale

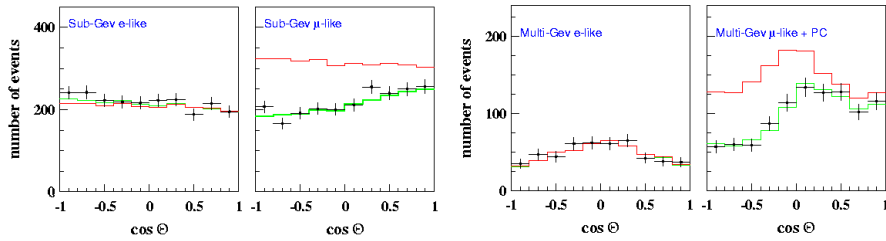


Figura 6: Risultati di SK sui neutrini atmosferici

gli eventi di bassa energia, in modo che la deviazione della loro traiettoria sia trascurabile.

Gli eventi osservati a SK indicano un numero di neutrini elettronici in accordo con le previsioni in assenza di oscillazioni, ma un'abbondante mancanza di neutrini muonici provenienti dal basso, come mostrato nei grafici in figura 6 [9].

Poiché i neutrini di tipo  $\tau$  non sono osservati da SK, in quanto per produrre un evento di corrente carica dovrebbero avere un'energia  $E \gtrsim M_\tau = 1.78 \text{ GeV}$  che pochi neutrini atmosferici raggiungono, e poiché non si osserva un incremento di  $\nu_e$ , questo risultato oltre ad essere un indizio dell'oscillazione dei neutrini porta anche a dedurre che l'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  è decisamente sfavorita rispetto a quella  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ .

Tuttavia, l'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  è in parte compensata dai  $\nu_e$ , inizialmente presenti nel flusso atmosferico, che oscillano in  $\nu_\mu$ ; perciò SK lascia lo stesso un margine di possibilità per questo tipo di oscillazione nei neutrini atmosferici. L'esperimento che dovrebbe smentire o confermare questo tipo di oscillazioni è CHOOZ, di cui si parlerà nella sezione 4.1.

In figura 7, inoltre, sono mostrati gli eventi da neutrino osservati in funzione di  $L/E_\nu$ . In presenza di oscillazioni il grafico dovrebbe riprodurre l'equazione (1); questo andamento caratteristico non si può vedere a causa degli errori statistici, la cui ampiezza è, soprattutto ad alte energie, superiore al periodo di oscillazione e di conseguenza i dati osservati sono circa la media di una o più

oscillazioni, cioè 1/2.

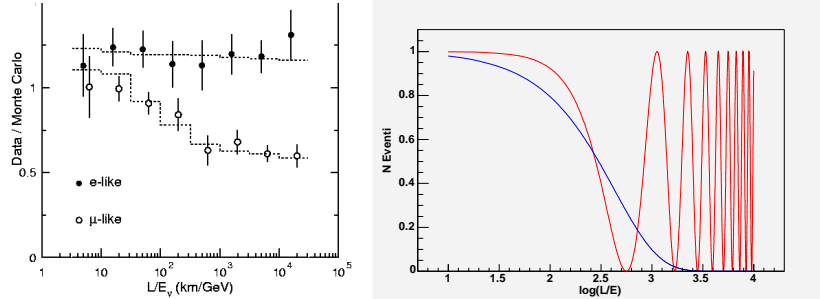


Figura 7: A destra il pattern atteso per le oscillazioni (in rosso) e per il decadimento (in blu); a sinistra i risultati delle misure

Nonostante questa incertezza, il grafico è in accordo con il fenomeno di oscillazione dei neutrini, i quali se sparissero attraverso un altro meccanismo, ad esempio decadendo, formerebbero un andamento esponenziale decrescente a zero e non a 1/2, come invece succede.

Un'altra possibilità che giustifichi i dati ottenuti da SK, oltre all'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ , è l'esistenza di una quarta famiglia di neutrini, in cui il neutrino  $\mu$  si potrebbe trasformare. Questa famiglia, però, difficilmente può essere attiva, poiché altrimenti sarebbe in contraddizione con 84 esperimenti di LEP che hanno determinato che la larghezza di risonanza della  $Z^0$  è compatibile solo con tre sapori di neutrini attivi. Un nuovo sapore dovrebbe, dunque, interagire solo con la gravità. Alcuni sostengono questa ipotesi in quanto essa spiegherebbe anche i dati di *Los Alamos* ( $0.2 < \Delta m^2 < 2 \text{ eV}^2$ ) esperimento che ha destato grande scalpore ma che non è ancora stato riprodotto.<sup>2</sup>

I livelli di confidenza dei fit per le diverse possibilità sono esposti in tabella 3.

Mode	best fit parameters		# $\sigma$
	$\sin^2 2\vartheta$	$\Delta m^2 \text{ (eV}^2\text{)}$	
$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$	1.00	$2.5 \times 10^{-3}$	0.0
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	0.97	$5 \times 10^{-3}$	8.9
$\nu_\mu \rightarrow \nu_s$	0.96	$3.6 \times 10^{-3}$	4.4
$\nu_\mu$ decay			9.0
$\nu_\mu$ decay in $\nu_s$			3.8

Tabella 3: Livelli di confidenza dei fit per i dati di SK

### 3.1.2 SK - Neutrini solari

I neutrini provenienti dal sole sono molto meno energetici di quelli atmosferici e la reazione più efficace per il loro rivelamento è lo scattering elastico elettrone-neutrino. Tale reazione, però, non permette di identificare il sapore del neutrino

<sup>2</sup>Per una descrizione dell'esperimento e dei risultati ottenuti si veda [10].

in arrivo, in quanto è accessibile a tutti i tipi di neutrini, anche se con sezioni d'urto differenti.

Per misurare il flusso, quindi, si suppone che tutti i neutrini solari ci arrivino nel sapore elettronico, così come prevede il Modello Solare, e se il valore ottenuto non corrisponde con quello atteso significa che nel flusso è presente una componente di neutrini non elettronici. Infatti, per calcolare il flusso si divide il numero di eventi osservati per la sezione d'urto dello scattering  $\nu_e - e$ , ma questa formula non è esatta se gli eventi osservati sono causati anche da neutrini di altro sapore.

In questo modo, SK ha trovato un flusso di neutrini pari a

$$\Phi_{ES} = 2.35 \pm 0.02(stat) \pm 0.08(sist) \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} [9],$$

dato decisamente inferiore a quello previsto per i neutrini provenienti dal Boro (vedi tabella 2).

SK seleziona gli eventi da neutrino da analizzare attraverso principalmente due criteri. Il primo impone una soglia energetica di 5 MeV, sotto cui il segnale sarebbe troppo influenzato dalla radioattività di fondo; questo è il motivo per cui SK non può rilevare neutrini provenienti da altre reazioni solari. Il secondo, invece, è la richiesta che la direzione e l'istante di arrivo del neutrino siano coerenti con la posizione del Sole.

## 3.2 SNO

SNO è un rivelatore Cerenkov situato ad una profondità di 2 Km (equivalente a 6000 m d'acqua) in una vecchia miniera in Canada; esso usa acqua pesante ultra pura contenuta in un recipiente acrilico trasparente di 12 m di diametro. I fotoni Cerenkov generati nell'acqua pesante sono rivelati da 9456 tubi fotomoltiplicatori (PMT) montati su una sfera geodesica di acciaio inossidabile di 17 m di diametro immersa in acqua normale ultra-pura per fare da scudo alla radioattività delle rocce circostanti.

Anche SNO studia solo i neutrini solari con energia maggiore di 5 MeV, quindi quelli del Boro. La peculiarità di SNO è quella di rivelare separatamente le reazioni di corrente carica, di corrente neutra e di scattering elastico; tale capacità, dovuta all'utilizzo di acqua pesante, è fondamentale se si vuole provare che i neutrini oscillano, cioè che non mantengono sempre lo stesso sapore. Infatti, di queste reazioni, la prima è sensibile solamente ai neutrini elettronici, in quanto per energie nell'ordine dei MeV gli altri neutrini non hanno energia sufficiente per generare i corrispondenti leptoni carichi, mentre le altre sono sensibili a tutti i sapori. La reazione di corrente neutra (o dissociazione di un deutone), avvenendo tramite scambio di un bosone  $Z$ , ha uguale sezione d'urto per i tre neutrini. Invece, nello scattering elastico i neutrini elettronici hanno maggiore sezione d'urto degli altri in quanto lo scattering può avvenire sia tramite scambio di  $Z$  che di  $W^+$  e  $W^-$ , mentre per gli altri sapori lo scambio di  $W$  è vietato dalla conservazione dei numeri leptonici. I diagrammi di Feynman per questi eventi sono riportati in figura 8.

SNO ha preso dati per circa un anno e mezzo e al termine di questa prima fase dell'esperimento erano stati rivelati 1967 eventi attribuibili all'assorbimento di neutrini, 576 alla scissione di deutoni e 263 allo scattering elastico; conoscendo le varie sezioni d'urto si ha che tali dati corrispondono rispettivamente ai seguenti

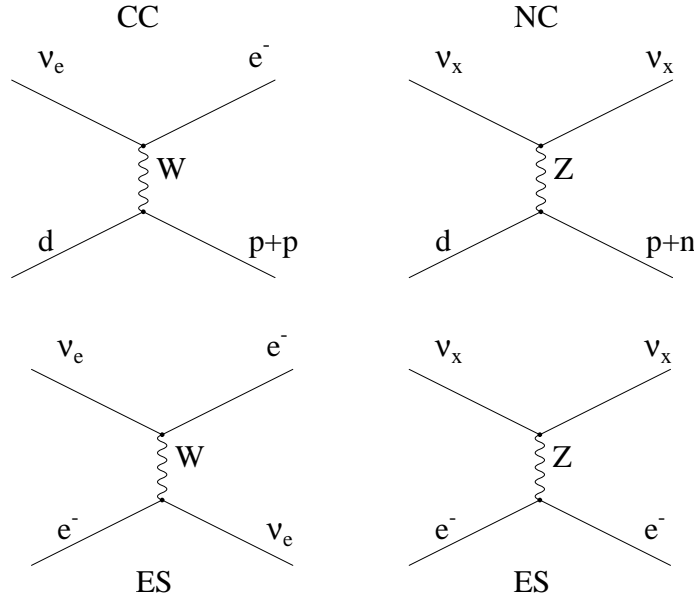


Figura 8: Diagrammi di Feynman per gli eventi studiati a SNO: CC, NC ed ES

flussi di neutrini [13], espressi in  $10^6 cm^{-2} s^{-1}$

$$\begin{aligned}\Phi_{CC} &= 1.76 \pm 0.06(stat) \pm 0.09(sist), \\ \Phi_{ES} &= 2.39 \pm 0.24(stat) \pm 0.12(sist), \\ \Phi_{NC} &= 5.09 \pm 0.44(stat) \pm 0.45(sist).\end{aligned}$$

Noi sappiamo che i neutrini solari sono neutrini elettronici quindi, se ogni neutrino rimanesse nel suo autostato di sapore, avremmo dovuto ottenere che  $\Phi_{CC} = \Phi_{NC}$ ; questi risultati invece differiscono per più di 5.3 deviazioni standard mostrando inequivocabilmente la presenza di neutrini non elettronici nel fascio di neutrini proveniente dal Sole e confermando l'ipotesi che i neutrini oscillino. A rafforzare questa idea c'è anche il fatto che  $\Phi_{NC}$  è perfettamente compatibile con il flusso di neutrini previsto dal Modello Solare, confermando che le nostre ipotesi riguardo i meccanismi di produzione di energia che avvengono nel Sole sono corrette.

È interessante cercare di capire come i ricercatori di SNO siano riusciti a superare problemi fondamentali come la distinzione di eventi dovuti a neutrini da quelli dovuti o al rumore elettronico di fondo piuttosto che alla radioattività ambientale, pressochè ineliminabile, ed infine come è stato possibile distinguere se l'evento associato ad un neutrino fosse dovuto ad una reazione di corrente carica o a corrente neutra o scattering elastico. Per capire l'importanza di una valutazione corretta del fondo basta osservare la tabella 4; non è una tabella completa, è riferita solo agli eventi di corrente carica ma è indicativa della quantità enorme di falsi eventi che sono stati scartati.

In più di un anno di raccolta dati sono stati rivelati oltre 300 milioni di eventi e poco più di 1000 erano attribuibili a neutrini. La prima scrematura è stata quella del fondo strumentale: l'apparato elettronico può produrre falsi

<b>Analysis step</b>	<b>Number of events</b>
Total event triggers	355 320 964
Neutrino data triggers	143 756 178
$N_{hit} \geq 30$	6 372 899
Instrumental background cuts	1 842 491
Muon followers	1 809 979
High level cuts <sup>a</sup>	923 717
Fiducial volume cut	17 884
Threshold cut	1 169
<b>Total events</b>	<b>1 169</b>

<sup>a</sup>Reconstruction figures of merit, prompt light, and  $\langle \theta_{ij} \rangle$ .

Tabella 4: Falsi eventi scartati per le reazioni di corrente carica

segnali che però hanno caratteristiche ben diverse da quelle di un lampo di luce Cerenkov e possono essere scartati facilmente osservando la posizione dei PMT colpiti (non formano nemmeno approssimativamente una circonferenza). Un'ulteriore imposizione può essere quella di considerare un evento come dovuto a neutrini solo nel caso in cui i PMT colpiti siano più di 30. Gli eventi che passano questa prima selezione sono sottoposti alla ricostruzione del vertice, ovvero all'identificazione del punto in cui esso ha avuto origine, sfruttando le potenzialità del rivelatore Cerenkov tarato con una sorgente di  $^{16}N$ . Si definisce quindi un volume fiduciale di 5.5 metri di raggio e vengono scartati gli eventi che hanno origine al di fuori di questo volume fiduciale. È stato scelto un raggio leggermente minore di quello del contenitore di  $D_2O$  in primo luogo perché le reazioni di NC e CC avvengono lì con maggiore probabilità, poi per eliminare incertezze associate alla ricostruzione dell'origine degli eventi vicino al contenitore acrilico.

Potrebbero anche esserci lampi di luce Cerenkov associati a muoni (nonostante lo schermo di due chilometri di roccia), che però sono facilmente rintracciabili in quanto, come detto in precedenza, gli anelli di luce Cerenkov di muoni ed elettroni sono molto differenti. Un altro set di impulsi da rimuovere, e che può essere facilmente scambiato per eventi di corrente neutra, è quello dato dalla radioattività di elementi delle catene del torio e dell'uranio (in particolar modo Tallio e Bismuto) che si trovano anche nei materiali del rivelatore stesso; tale attività genera neutroni liberi che possono essere catturati dai nuclei di deuterio. Sono state fatte analisi sull'energia dei  $\gamma$  emessi da Tl dopo un decadimento beta e parecchie simulazioni numeriche riguardo l'isotropia di tali raggi.

L'altro problema è quello di capire da che tipo di reazione è stato prodotto l'evento rivelato. SNO non è in grado di fare ciò univocamente, la distinzione avviene solo a livello statistico considerando numerosi eventi ed evidenziando le possibili differenze tra le reazioni. Gli eventi dovuti a corrente neutra possono essere distinti dagli altri poiché la cattura di un neutrone, in seguito alla dissociazione del deutone, genera un raggio  $\gamma$  di energia ben definita che per fotoemissione produrrà un elettrone dall'energia cinetica nota; gli elettroni generati dall'assorbimento di neutrini e da scattering elastico hanno invece uno

spettro di energie più ampio.

Lo scattering elastico dà origine a elettroni che si propagano in direzione opposta a quella del sole (figura 10 a sinistra) mentre la luce Cerenkov dovuta a CC o NC può avere orientazione qualsiasi. Inoltre lo scattering elastico può avvenire con uguale probabilità sia nello strato di acqua pesante che nell'acqua normale all'esterno del rivelatore acrilico (figura 10 a destra).

C'è stata in seguito, da fine 2001 a inizio 2003, una seconda fase dell'esperimento. È stato aggiunto NaCl all'acqua pesante per migliorare la cattura di neutroni liberati dalle reazioni di corrente neutra; si è ottenuta così una migliore statistica che ha confermato in pieno i risultati della prima fase.

Come SK, anche SNO ha elaborato una misura per verificare che il processo di sparizione dei neutrini sia dovuto ad oscillazioni e non a un decadimento. Quest'ultima ipotesi, infatti, può essere scartata andando ad analizzare le dif-

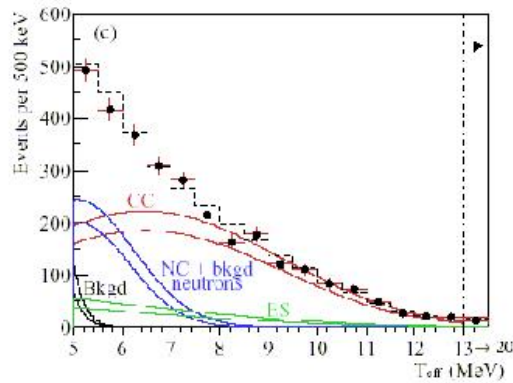


Figura 9: Numeri di eventi associati a neutrini in funzione della loro energia. La curva NC è molto più stretta delle altre

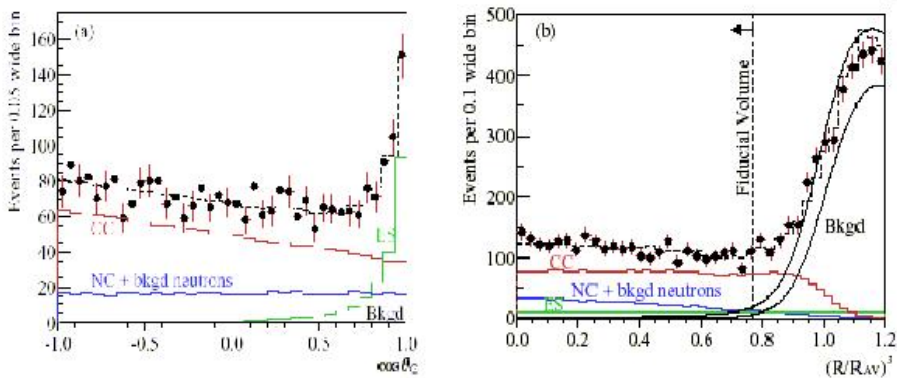


Figura 10: A sinistra: numero eventi in funzione dell'angolo tra il sole e i PMT coinvolti nelle diverse rivelazioni. A destra: distribuzione radiale dell'origine degli eventi. RAV è il raggio del contenitore acrilico

ferenze tra i flussi di neutrini rivelati durante il giorno o la notte. La distanza media di SNO dal Sole è maggiore di notte piuttosto che di giorno, quindi se i neutrini di sapore elettronico decadessero in quelli di un altro invece di oscillare otterremmo un  $\Phi_{CC}$  diurno leggermente maggiore di quello notturno. Definisco a questo punto il rapporto di asimmetria

$$A = \frac{A_n - A_d}{A_n + A_d}.$$

Si ottiene che  $A_{CC}$  è maggiore di zero per più di 2.2 deviazioni standard mentre  $A_{NC}$  è minore di zero per 1.2 deviazioni standard favorendo notevolmente l'ipotesi di oscillazione e confermando quindi le conclusioni di Super Kamiokande sui neutrini atmosferici [13].

L'analisi dei dati di SNO, che considera anche il contributo degli effetti di materia nel Sole (MSW)<sup>3</sup>, favorisce notevolmente una soluzione con un grande angolo di mescolamento (LMA); rimangono ancora possibili, ma meno probabili le soluzioni con angolo di mescolamento piccolo (SMA) e quelle con differenze di massa molto piccole (LOW). Il fit migliore viene rappresentato, nel piano dei parametri riportato in figura 11, con una stella:

$$\begin{aligned} \Delta m^2 &= 7.1 \pm 0.8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \vartheta &= 32.5^\circ \pm 2.3^\circ \end{aligned}$$

SNO rigetta l'ipotesi di mescolamento totale ( $\vartheta = 45^\circ$ , come invece avviene per i neutrini atmosferici) all'equivalente di più di 5 deviazioni standard.

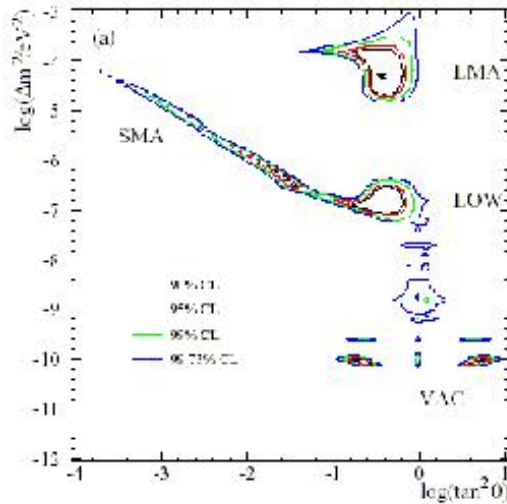


Figura 11: Piano dei parametri di mixing

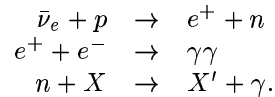
<sup>3</sup>Per una trattazione di questo effetto si veda, ad esempio, la sezione 9.7 di [2].

## 4 Studio dei neutrini da reattore

Esperimenti come CHOOZ e KamLAND studiano i flussi di antineutrini provenienti da reattori di centrali nucleari. L'importanza di questi esperimenti sta nel fatto che i decadimenti  $\beta$  degli elementi che fanno da combustibile al reattore generano un flusso di  $\bar{\nu}_e$  puro con uno spettro di energie ben definito mentre i neutrini atmosferici e solari hanno incertezze molto maggiori, in quanto influenzati anche dall'effetto MSW.

### 4.1 CHOOZ

CHOOZ è un esperimento che misura il flusso di  $\bar{\nu}_e$  proveniente da un reattore distante poco più di 1 Km. L'apparato di rivelazione si trova nelle Ardenne, nella Francia nord-orientale. Viene sfruttata la reazione di decadimento  $\beta$  inverso:



La prima reazione libera 1.02 MeV mentre il neutrone, che ha energia cinetica piuttosto bassa, viene catturato da un nucleo di idrogeno. Il tempo di cattura è di 190  $\mu s$  ma il rivelatore di CHOOZ, essendo drogato per lo 0.1% con gadolinio, lo riduce a 30  $\mu s$  producendo 3  $\gamma$  con un'energia totale di 8 MeV. Tale sequenza di impulsi genera una traccia ben riconoscibile persino all'energia di soglia che è 1.02 MeV; la sezione d'urto della reazione  $\beta$  inverso è ben nota.

CHOOZ studia l'anomalia dei raggi cosmici (CRA): come visto nella sezione di Super Kamiokande il flusso di  $\nu_\mu$  atmosferici dovrebbe essere circa due volte quello dei  $\nu_e$ , ma sperimentalmente si verifica che il rapporto è di poco maggiore a 1. Le due spiegazioni più plausibili sono:

1. i  $\nu_\mu$  oscillano in  $\nu_\tau$ ;
2. oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ .

Lo scopo principale di CHOOZ è quello di escludere il secondo processo, già sfavorito dai dati di SK.

CHOOZ ha un valore di L/E di 300  $m/MeV$ , paragonabile a quello dei neutrini atmosferici; quindi se l'ipotesi due fosse corretta ci dovrebbe essere una riduzione del flusso di  $\bar{\nu}_e$  (così come i  $\nu_\mu$  oscillano in  $\nu_e$ , può avvenire anche il contrario). Infatti, la CRA implica valori di  $\Delta m^2 = 0.001 eV^2$  e  $\sin^2 2\vartheta \approx 0.8$  cioè  $\vartheta = 40^\circ$  e tali valori causerebbero un cambiamento notevole nello spettro degli  $\bar{\nu}_e$  rivelati da CHOOZ.

Nelle zone ammesse per i parametri di mixing dei neutrini atmosferici non si è osservata nessuna oscillazione e, quindi, la prima ipotesi risulta nettamente privilegiata dai risultati di CHOOZ [14].

Questo esperimento afferma, dunque, che la differenza  $\Delta m^2$  fra gli autostati di massa 1 e 2 dev'essere minore di  $10^{-3} eV^2$  (vedi figura 13) a meno che si considerino angoli di mescolamento molto piccoli, cosa che tutti gli esperimenti (SNO in testa) respingono con forza a favore della soluzione LMA.

## 4.2 KamLAND

KamLAND (Kamioka Liquid scintillator Neutrino Detector) è un esperimento che analizza antineutrini elettronici di energie comprese tra 2 e 8 MeV partito nel 2002 e attualmente in corso. L'apparato è installato sotto la stessa montagna di Super Kamiokande ed è circondato da reattori nucleari mediamente distanti 180 Km, così da essere particolarmente sensibile alle oscillazioni nel range di  $L/E$  dei neutrini solari.

Il rivelatore, mostrato in figura 12, è schermato da 1000 metri di roccia della montagna sotto cui è costruito ed è ulteriormente protetto dalle radiazioni esterne per mezzo di un involucro di acqua di 2 metri di spessore. Il bersaglio è costituito da 1000 tonnellate di liquido scintillatore.

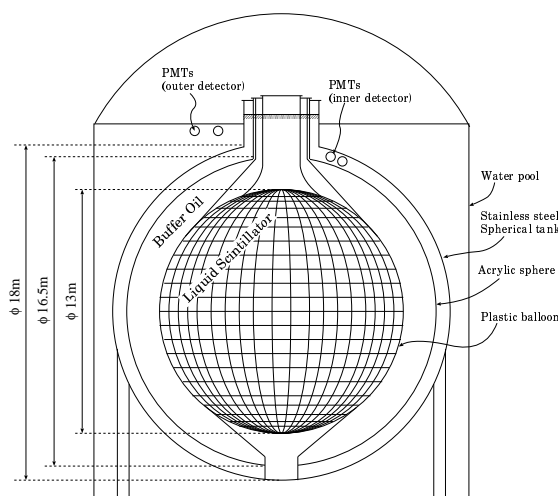


Figura 12: Schema del rivelatore KamLAND

Il segnale che identifica l'interazione di  $\bar{\nu}_e$  nel rivelatore è lo stesso di CHOOZ: l'osservazione di un decadimento  $\beta$  inverso tramite il rilevamento di un positrone seguito a una certa distanza temporale da un fotone di energia definita, in questo caso 2.2 MeV, emesso successivamente alla cattura di un neutrone da parte di un protone. Proprio questa correlazione temporale tra i due eventi rende il fondo molto ridotto.

Quindi KamLAND, oltre a non essere influenzato né dalle incertezze sul Modello Solare né dalle assunzioni del modello MSW, grazie a questo efficiente metodo di rivelamento ha un segnale molto pulito e per questo è il primo esperimento potenzialmente in grado di determinare con un'incertezza soddisfacente il valore dei parametri di mixing per i neutrini solari.

I dati raccolti nel primo anno di funzionamento [15], riassunti in figura 13 a sinistra, presentano un difetto nel numero di neutrini osservati, il cui miglior accordo con la teoria delle oscillazioni si ha per  $\sin^2 2\theta = 1$  e  $\Delta m^2 = 6.9 \times 10^{-5} eV^2$ , anche se non si possono escludere altre soluzioni all'interno della zona LMA (Large Mixing Angle). La linea verticale tratteggiata mostra la soglia di 2.6 MeV sotto la quale i dati sono stati scartati per quest'analisi. Infatti, al di

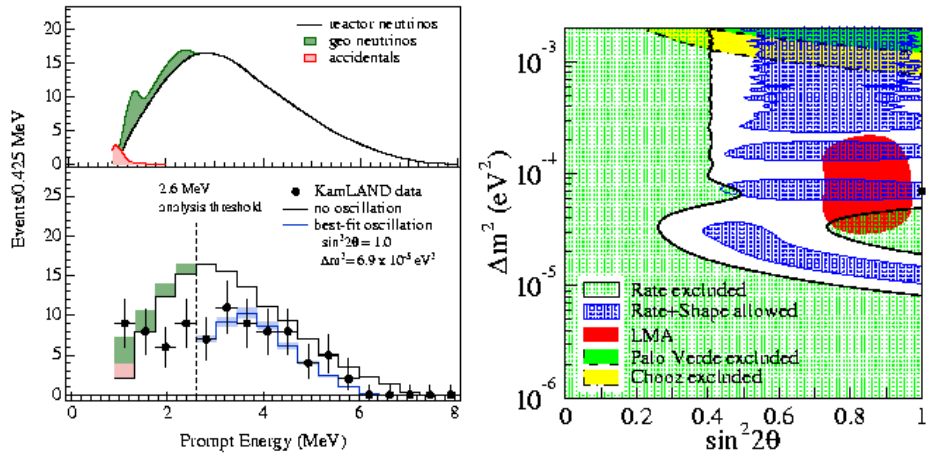


Figura 13: Analisi dei dati osservati da KamLAND nel primo anno di attività e riepilogo dei parametri di mixing

sotto di questa energia lo spettro dei neutrini provenienti da reattore è sporcato da neutrini provenienti dall'ambiente e quindi difficilmente controllabili.

Un riepilogo dei possibili valori per i parametri  $\Delta m^2$  e  $\sin^2 2\theta$  è riportato nel grafico a destra della stessa figura.

## 5 Studio di neutrini da acceleratore

### 5.1 MINOS

Gli ultimi esperimenti progettati per lo studio dei neutrini prevedono l'utilizzo di acceleratori in grado di produrre fasci di neutrini, in modo da avere un flusso controllabile e in parte regolabile in energia, intensità e distanza percorsa dalle particelle. Quest'ultimo parametro è vincolato, in quanto, per osservare una differenza di massa dei neutrini così piccola come sembra dagli esperimenti precedenti, ammesso che essa esista, è necessario osservare i cambiamenti di un fascio di neutrini dopo che essi abbiano percorso una distanza molto lunga. Infatti, il valore di  $L/E$  deve essere pari a circa  $1/\Delta m^2$  e, per energie dell'ordine dei GeV (necessarie per consentire che tutti i neutrini dei diversi sapori produca eventi di corrente carica),  $L$  risulta dell'ordine delle parecchie centinaia di Km. Di conseguenza, questo tipo di esperimento deve avere come presupposto la possibilità di generare un fascio di neutrini molto intenso poiché sulle lunghe distanze c'è una tendenza del fascio ad affievolirsi.

Nel caso dell'esperimento MINOS i neutrini sono forniti dal Main Injector che si trova presso i laboratori del Fermilab. Il fascio di neutrini muonici è generato utilizzando i protoni da 120 GeV. Il fascio viene analizzato da un primo sistema di rivelazione (*near*) a circa 1 km di distanza dalla sorgente e dopo aver percorso 735 Km in circa 0.0025 secondi viene nuovamente rianalizzato da un altro sistema di rilevamento (*far*) presso la miniera di Soudan in Minnesota. Il rivelatore *far* è composto da un blocco di 5400 tonnellate formato da acciaio alternato a strisce plastiche per il rilevamento di particelle. Questo sandwich di plastica ed acciaio registra il momento dei muoni uscenti tracciando il loro cammino mentre si muovono attraverso una piastra di acciaio magnetizzato. A causa della bassa sezione d'urto su circa  $10^{18}$  neutrini che attraversano il rivelatore in un anno solo 9000 danno luogo ad un evento. Il rivelatore *near* è di fatto una copia in miniatura del rivelatore *far*. È molto importante sottolineare che i rivelatori sono sensibili a tutti e tre i tipi di neutrino. L'esperimento, dunque, misura e compara le caratteristiche del fascio ad un Km dalla sorgente e a 735 Km dalla sorgente in questo modo si possono avere informazioni sulle oscillazioni e sulla massa del neutrino.

#### 5.1.1 Fascio di neutrini

Il fascio di neutrini è generato utilizzando i protoni da 120 GeV estratti dal Main Injector utilizzando tecniche di estrazione risonante standard. Vengono poi indirizzati verso un bersaglio e guidati sottoterra con un angolo di  $3.3^\circ$  in direzione di MINOS. L'acceleratore fornirà  $4 \times 10^{13}$  protoni per impulso.

Il bersaglio contro cui vanno i protoni è un cilindro di piccolo diametro e lunghezza 160 cm di grafite o berillio opportunamente segmentato. La segmentazione fa in modo che i pioni e i kaoni prodotti riescano a lasciare il bersaglio prima di interagire loro stessi col bersaglio. Il fascio di adroni risultante viene selezionato in segno e inviato verso un elemento focalizzante e quindi trasportato verso il tubo di decadimento. Il progetto del sistema di focalizzazione è stato modificato in seguito agli esperimenti di Super Kamiokande. Infatti, in un primo momento era stato proposto di utilizzare un sistema di tre magneti a corno che selezionasse gli adroni per avere un fascio di neutrini derivante con

energie tra gli 8 e i 25 GeV, ma per l'analisi di  $\Delta m^2$  piccoli è stato ritenuto più conveniente avere un flusso di neutrini maggiore a energie minori. Il sistema che dovrebbe essere adottato si basa su due magneti mobili a corno parabolico che riescono a coprire lo stesso range energetico del progetto originale, anche se il flusso risulta inferiore per valori alti di energia.

Il tubo di decadimento è un cilindro sottovuoto di 1 metro di diametro e lungo 675 metri. Lungo questo tubo i pioni e i kaoni decadono e generano i neutrini muonici. Considerando la distanza tra il bersaglio e il tubo di decadimento (50 m) la lunghezza totale di decadimento è di 750 m. Dopo il tubo di decadimento è posto un blocco assorbitore per impedire agli adroni che non sono decaduti di proseguire il viaggio. La roccia dolomitica che separa il primo assorbitore dal rivelatore *near* dovrebbe ulteriormente garantire l'assorbimento dei  $\pi$  e dei  $K$ .

### 5.1.2 Rivelatore *near*

Il rivelatore *near* serve principalmente come riferimento per il rivelatore MINOS dando informazioni dirette sullo spettro in energia dei neutrini prima che essi abbiano la possibilità di oscillare. In questo modo si riduce notevolmente la dipendenza da simulazioni basate sul metodo Monte Carlo.

Per far sí che i dati presi al primo rivelatore siano comparabili con quelli di MINOS le caratteristiche del fascio e dei rivelatori nelle due località devono essere il più simile possibile, o almeno bisogna conoscere e capire bene quali sono le differenze.

Le differenze fondamentali sono:

- lo spettro energetico dei neutrini nelle due località può essere differente. Questo dipende dal punto in cui è avvenuto il decadimento dei  $\pi$  e dei  $K$ , tali differenze possono essere minimizzate usando la parte centrale del fascio di neutrini;
- il flusso di neutrini al rivelatore *near* è maggiore di quello a MINOS e questo è dovuto essenzialmente alla dispersione angolare;
- il fondo di raggi cosmici è molto minore a MINOS poiché il rivelatore si trova ad una maggiore profondità, ma, nonostante il rapporto tra il tasso di interazione dei raggi cosmici che si ha nei due rivelatori è molto diverso dall'unità, va considerato che i valori assoluti dei due ritmi sono molto bassi ( $1.8 \times 10^{-3} m^{-2} s^{-1}$  a MINOS e  $1.6 m^{-2} s^{-1}$  al rivelatore *near*).

Il progetto del rivelatore *near* cerca di emulare il rivelatore *far* in tutte le caratteristiche più importanti. È formato da una serie di lastre d'acciaio alternate a materiale scintillante. La forma base è quella di un prisma a base ottagonale con le basi perpendicolari al fascio di neutrini con al centro delle facce ottagonali un buco che serve per l'induzione del campo magnetico. L'altezza delle facce ottagonali è di 3.8 m la larghezza è di 4.8 m. Lungo la dimensione longitudinale il rivelatore è composto da quattro stadi.

- Stadio di proibizione. In questa parte non vengono usate o misurate interazioni da neutrini, serve a impedire che ci sia un fondo dovuto ai neutroni.
- Bersaglio. Consiste in uno strato di un metro di acciaio entro il quale devono cadere i vertici degli eventi da neutrino.

- Regione dello sciame adronico. Questa parte deve essere abbastanza lunga da contenere interamente gli sciame prodotti dalle interazioni da neutrino che avvengono nel bersaglio. Ha uno spessore di 1.5 m ed è composta di acciaio.
- Spettrometro muonico. Questa parte serve a rivelare i muoni e a misurare la curvatura del loro momento. Lo spessore (4 m) è determinato dal fatto che l'accuratezza da raggiungere è quella del rivelatore *far*.

Poiché la dispersione trasversa degli sciame adronici è di circa mezzo metro alle energie di lavoro, non è necessario che tutta la superficie ottagonale sia sensibile ma solo un'area corrispondente a circa la metà dell'ottagono.

Gli elementi base del rivelatore sono delle strisce scintillatrici larghe 4 cm permeate di fibre a spostamento di lunghezza d'onda. A causa dell'alto ritmo e il piccolo numero di canali verrà eseguita una lettura di ogni striscia scintillatrice nei primi tre stadi del rivelatore. La lunghezza delle strisce varia da 1.5 a 2.7 metri.

Nello spettrometro muonico l'intera superficie d'acciaio è ricoperta dalle strisce scintillatrici. La lettura di informazioni dalle strisce nel rivelatore *near* avverrà da un solo capo e l'orientazione delle strisce stesse sarà alternata tra un piano e quello successivo.

### 5.1.3 Rivelatore *far*

La forma base è ancora quella di un prisma a base ottagonale sdraiato e orientato in direzione del Fermilab e composto da una serie di lastre di acciaio. Il rivelatore nel suo complesso è formato da due super moduli, messi uno dietro l'altro, ognuno dei quali è formato da 242 strati scintillatori e 243 lastre di acciaio tutte bucate nel centro per far passare una corrente da 15 KA che induce un campo magnetico medio di 1.5 Tesla. La larghezza massima del rivelatore è di 8 metri. Ogni strato scintillatore è composto da 192 strisce larghe 4 cm e lunghe al più 8 m. L'orientazione delle strisce varia di  $90^\circ$  tra due lastre successive, entrambi i capi delle strisce sono accoppiati ad un tubo fotomoltiplicatore a multipixel. Otto fibre differenti provenienti da otto strisce differenti e separate di circa un metro nel rivelatore sono accoppiate a un singolo pixel.

### 5.1.4 Caratteristiche fisiche

Le possibili misure possono essere divise in tre gruppi: misure statistiche, identificazione delle oscillazioni tra neutrino muonico e neutrino elettronico e studio dei canali di decadimento dei  $\tau$ .

Le misure statistiche possono fornire informazioni sia sul ritmo sia sugli spettri energetici di fenomeni da interazione via corrente carica (CC) o via corrente neutra (NC). Nel caso delle interazioni via corrente carica entrambe le misure producono risultati che sono indipendenti dal modo di oscillazione. In ogni caso l'oscillazione di  $\nu_\mu$  risulterà dalla diminuzione di eventi CC da  $\nu_\mu$  e gli spettri energetici degli eventi CC possono essere usati per le misure sui parametri di oscillazione comparando gli spettri energetici ai due rivelatori per quantificare quanti sono gli eventi mancanti e lo spettro energetico degli eventi mancanti. La misura della diminuzione di eventi CC da  $\nu_\mu$  è legata a  $\sin^2 2\theta$  e la loro energia media darà una misura di  $\Delta m^2$ .

Un altro tipo di misura statistica può essere ottenuto dalle analisi sulle correnti neutre o meglio dal rapporto tra eventi NC ed eventi CC. Il vantaggio di considerare il rapporto deriva dal fatto che questo non richiede, in prima approssimazione, la conoscenza dei flussi presso il rivelatore *near* e il rivelatore *far* e introduce meno errori sistematici.

MINOS ha una grande capacità nel distinguere eventi da  $\nu_\mu$  e  $\nu_e$  via corrente carica e via corrente neutra grazie alla possibilità di fare misure precise sulle forme degli sciame adronici ed elettromagnetici. Gli eventi via CC di neutrini elettronici depositeranno la maggior parte della loro energia immediatamente nello sciame e la larghezza traversa dello sciame sarà più stretta degli sciame originati da eventi NC adronici, che in questo caso costituiscono il rumore di fondo.

## 5.2 K2K

Questo esperimento nasce dalla collaborazione tra scienziati giapponesi, coreani e americani. Il progetto prevede di indirizzare il fascio di neutrini prodotto a KEK sottoterra fino al rivelatore Super Kamiokande in modo tale da poter sfruttare quest'ultimo, che è il più grande rivelatore di neutrini attualmente esistente, per analizzare neutrini prodotti artificialmente.

Presso il KEK un fascio di protoni da 12 GeV viene indirizzato verso un bersaglio di alluminio. L'interazione dei protoni produce un intenso getto di particelle subatomiche secondarie. Un sistema di magneti a corno, formati da grandi strutture di alluminio che generano un intenso impulso elettrico, producono un campo magnetico altamente concentrato, questo campo più la struttura a corno stessa sono progettati in modo da focalizzare solo quelle particelle che decadono in neutrini muonici all'interno dei duecento metri del condotto e deviare a assorbire tutte le altre particelle. Alla fine del condotto di decadimento è posto un blocco assorbitore in acciaio e altri cento metri di terra che fungono ancora da assorbitore per bloccare le particelle che non sono decadute. Il risultato finale è un fascio di neutrini muonici (99%  $\nu_\mu$  1%  $\nu_e$ ) caratterizzati da un'energia di 1.3 GeV. Di fatto per condizioni energetiche e lunghezza di volo ci si trova ad analizzare regioni di  $\Delta m^2$  esplorate negli esperimenti di neutrini atmosferici. Il fascio è indirizzato sottoterra con un angolo di inclinazione di circa un grado. A questo punto il fascio di neutrini entra in un primo rivelatore (*near*) composto a sua volta da un rivelatore a effetto Cerenkov da 1000 tonnellate d'acqua più una catena di altri rivelatori: il primo chiamato Fine Grained Detector (FGD) è uno scintillatore a fibra plastica, il secondo è composto da vetro al piombo e infine c'è un rivelatore di muoni.

Lo scintillatore a fibra è composto da una plastica acrilica drogata con materiale fluorescente tale da emettere luce ultravioletta qualora venisse attraversata da una particella carica. Questo materiale scintillante può essere formato in sottili fibre ottiche che possono essere prodotte come fogli di fibre. Osservando uno schieramento di fogli di fibre scintillanti attraverso un sistema di monitoraggio si può risalire al luogo in cui è passata la particella carica. Nel rivelatore *near* di K2K ci sono 20 moduli di fibre composti 4 strati di fibra scintillante gli strati sono impacchettati e visionati da un sistema di 24 videocamere. I moduli di fibra scintillante sono posti tra i bracci del serbatoio che contiene l'acqua per l'effetto Cerenkov, in questo modo gli eventi osservati con la fibra scintillante sono gli stessi osservati dal rivelatore Cerenkov.

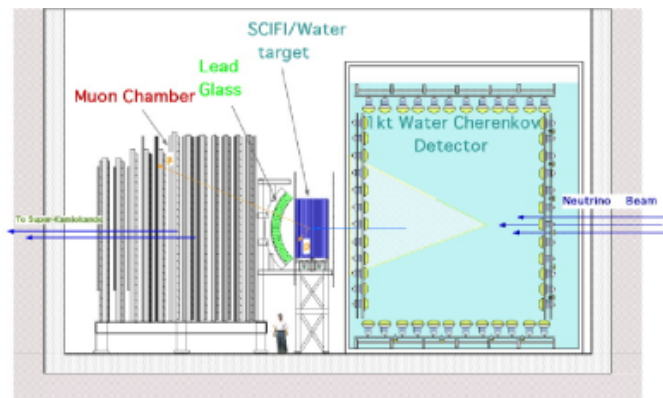


Figura 14: Il rivelatore *near* di K2K

Il rivelatore a vetro e piombo ha una densità molto alta e un alto indice di rifrazione, in questo modo gli elettroni che entrano in questo rivelatore producono una cascata e rilasciano la loro energia su una breve distanza, dando luogo ad un lampo luminoso dovuto ad effetto Cerenkov.

Il principio di funzionamento del rivelatore di muoni del K2K si basa sulla proprietà dei muoni di essere altamente penetranti: a differenza delle altre particelle essi riescono ad attraversare notevoli spessori di materiale. Questo rivelatore è infatti composto da 20 lastre di ferro intervallate con rivelatori di particelle detti contatori proporzionali. Il rivelatore di muoni è molto utile per distinguere gli eventi provocati da neutrini muonici.

Il fascio di neutrini dopo aver attraversato questo rivelatore composto percorre circa 250 Km sottoterra prima di arrivare a Super Kamiokande. Quest'ultimo consiste in un serbatoio da 50000 tonnellate di acqua purificata. Una massa d'acqua così grande è necessaria a causa della piccolissima sezione d'urto dei neutrini. Super Kamiokande si trova in una miniera nel Giappone centro-settentrionale. Il rivelatore si trova nel sottosuolo per essere schermato dalle particelle cariche presenti nei raggi cosmici. I neutrini viaggiano ad una velocità molto prossima a quella della luce (al limite uguale se la loro massa fosse nulla) ed impiegano circa  $825 \mu s$  per andare da KEK a Super-K.

I neutrini prodotti da KEK possono essere distinti dai neutrini cosmici grazie ad analisi di tipo angolare essendo ben nota la direzione di incidenza dei neutrini. È inoltre possibile restringere la ricerca grazie ad un sistema di temporizzazione degli apparati strumentali fornito dal sistema GPS.

Come già visto per l'esperimento MINOS anche in K2K i dati sulla possibilità di oscillazione di neutrino derivano dal confronto sui dati presi dal rivelatore *near* e *far* e in effetti questo è il primo esperimento che ha messo in evidenza l'oscillazione di neutrini. Infatti se non ci fosse oscillazione ci si aspetterebbero nell'arco di due anni (K2K ha funzionato tra l'aprile del 1999 e l'aprile del 2001) 80.1 eventi da muone nel volume utile di Super-K con un errore del 10% mentre si sono registrati solo 56 eventi da neutrino muonico. Il rapporto tra eventi osservati ed eventi attesi è di  $0.7 \pm 0.09$  (*sist*). I dati sono inconsistenti con l'ipotesi di non oscillazione ad un livello del 97%.

Sebbene i risultati siano abbastanza consistenti con la differenza di mas-

sa al quadrato  $\Delta m^2$  che giace tra  $1.5$  e  $3.9 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$  e mixing massimale ( $\sin^2 2\theta = 1$ ) con un livello di confidenza del 90% è ancora troppo prematuro trarre conclusioni circa le oscillazioni di neutrini.

Nel novembre del 2001 Super Kamiokande ha dovuto sospendere l'attività a causa di un incidente, ma dall'estate del 2003 l'acquisizione per l'esperimento K2K è ricominciato con la volontà di raccogliere il doppio di dati che sono stati raccolti nella prima sessione. I dati disponibili sulla seconda sessione di misure aggiornati all'Aprile del 2003 mostrano che su 26.4 eventi attesi in assenza di oscillazione ne sono stati misurati solo 16 dando un rapporto tra eventi osservati ed attesi di  $0.61 \pm 0.15(stat)$  [17].

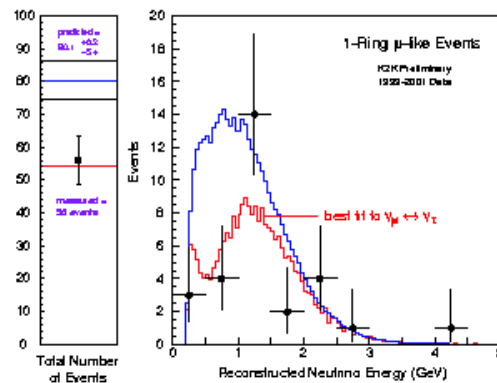


Figura 15: I risultati dei primi anni di funzionamento di K2K

### 5.3 CNGS

È il progetto europeo per la rivelazione di oscillazione di neutrini da fascio. Mentre MINOS e K2K sono concentrati sull'osservazione della sparizione di neutrini muonici con fasci a bassa energia CNGS vuole cercare l'apparizione di neutrini  $\tau$  in un fascio altamente energetico di neutrini muonici a 730 km dalla sorgente. Quindi, in questo tipo di esperimento è necessario partire con un fascio di neutrini selezionato in sapore che sia molto puro e visto che si vuole analizzare l'apparizione di  $\nu_\tau$  questi dovranno essere molto energetici per poter produrre, nell'interazione con la materia del bersaglio, i leptoni carichi ad essi associati.

Poiché l'esperimento non si concentra sulla sparizione di neutrini muonici, non è necessario l'utilizzo dei rivelatori *near* come avviene per MINOS o K2K, le informazioni sulla composizione in sapore e in energia del fascio sono ottenute con tecniche statistiche.

CNGS produrrà i neutrini  $\mu$  per mezzo di protoni da 400 GeV del complesso SPS del CERN. I protoni colpiranno un bersaglio di grafite generando un fascio secondario di particelle che verrà "filtrato" passando per magneti focalizzanti ottenendo un fascio di  $\pi^+$  e  $K^+$  ad una energia compresa tra i 20 e i 50 GeV. In questo modo si otterrà un fascio di neutrini altamente energetici con un'energia media di 17 GeV. Questo farà sì che una volta avvenuta l'oscillazione in neutrini  $\tau$  questi ultimi siano abbastanza energetici da creare via interazione di corrente

carica con adroni il leptone  $\tau$ . Nei laboratori del Gran Sasso il flusso di  $\nu_\mu$  dovrebbe corrispondere a  $3.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-2} \text{ anni}^{-1}$  con un 2.1% di antineutrini muonici uno 0.8% di  $\nu_e$  e meno del 0.05% di antineutrini elettronici. Il numero di interazioni con corrente carica atteso dai  $\nu_\mu$  è di 2600 per Kton all'anno. Se l'oscillazione tra neutrino  $\mu$  e neutrino  $\tau$  dovesse essere confermata il numero di  $\tau$  prodotti via interazione corrente carica al Gran Sasso dovrebbe essere di circa 15 per Kton all'anno, per una differenza di massa quadratica di  $2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ .

La ricerca sulla apparizione di  $\nu_\tau$  si basa sull'osservazione di eventi prodotti da interazioni di correnti cariche con decadimento di  $\tau$  in tutti i possibili modi di decadimento. La reazione via CC che dà informazioni sull'apparizione di  $\nu_\tau$  è  $\nu_\tau + n \rightarrow p + \tau$ . L'analisi finale sarà sulle particelle generate dal decadimento del  $\tau$ . I modi di decadimento del  $\tau$  utilizzabili sono:

- $\tau \rightarrow \nu_\tau \nu_e e$
- $\tau \rightarrow \nu_\tau \nu_\mu \mu$
- $\tau \rightarrow \nu_\tau \pi$
- $\tau \rightarrow \nu_\tau \rho$

Uno dei problemi fondamentali è legato al fatto che il ritmo di eventi riconducibili a  $\tau$  (e quindi a  $\nu_\tau$ ) è molto basso ed è, dunque, necessario separare gli eventi  $\nu_\tau$  da tutti gli altri eventi associati ad altri sapori di neutrino e rendere questi ultimi un semplice rumore di fondo. A questo scopo il rivelatore dovrà identificare gli eventi sfruttando le caratteristiche proprietà di  $\tau$ , che è caratterizzato da una vita media trascurabile ( $2.9 \times 10^{-13} \text{ s}$ ), e la mancanza di una certa quantità di momento trasverso dovuta alla presenza di  $\nu_\tau$  nello stato finale.

Ci sono due rivelatori proposti: OPERA e ICARUS, che utilizzano due differenti approcci per l'identificazione di eventi. OPERA osserva la tipologia dei decadimenti di  $\tau$  in emulsione nucleare, mentre ICARUS distingue gli eventi da interazione carica attraverso un'analisi cinematica utilizzando la rivelazione elettronica delle particelle mediante una time projection chamber (TPC) riempito con argon liquido.

## 5.4 Il rivelatore OPERA di CNGS

Il principio dell'esperimento OPERA è quello di osservare le traiettorie dei  $\tau$  e dei prodotti di decadimento in sottili strati di emulsione. Per incrementare la massa del bersaglio (1.8 Kton) le pellicole di emulsione sono intervallate con strati di piombo dello spessore di un millimetro. La pellicola di emulsione di OPERA consiste in due strati (spessore  $50 \mu\text{m}$ ) di emulsione messi su entrambe le facce di una lastra di materiale plastico dello spessore di 200 mm. L'unità di rivelazione base, chiamata ECC, è in sostanza un mattone ottenuto mettendo insieme 56 piastre di piombo e pellicole di emulsione, più una pellicola supplementare in testa al blocco e un'altra chiamata foglio sostituibile separato dal resto del rivelatore da 2 millimetri di plastica. Il foglio sostituibile può essere separato dal mattone per le analisi e verrà utilizzato per una prima localizzazione della traccia prodotta dalle interazioni del neutrino. Le dimensioni di uno di questi mattoni sono  $12.5 \times 10.2 \times 7.5 \text{ cm}^3$ . In termini di lunghezza di radiazione un mattone corrisponde ad uno spessore di  $10 X_0$ .

Per raggiungere le 1.8 Kton di massa per il bersaglio sono installati 206336 mattoni e disposti a formare delle pareti contenenti 64 bracci di 52 mattoni e sono separate l'una dall'altra da piastre verticali di bersagli che possono tracciare elettroni. Nel complesso OPERA consiste di due parti identiche dette super moduli ognuno dei quali è composto da una sezione di bersaglio e da uno spettrometro muonico.

Lo spettrometro muonico misura la carica e il momento dei muoni che passano attraverso un campo magnetico di 1.6 Tesla disposto perpendicolarmente al fascio di neutrini. La sezione bersaglio di ogni super modulo è composto da 31 pareti di mattoni. Il modulo per il tracciamento di elettroni, invece, composto da due lastre di strisce scintillatrici lunghe 6.6 metri e disposte nelle due direzioni (X,Y), è installato dietro ognuna delle pareti. Il compito dei rivelatori elettronici sarà quello di dare informazioni su dove è avvenuta l'interazione da neutrini e quindi correlare l'interazione al mattone dove essa è avvenuta. Le strisce scintillatrici hanno larghezza di 2.6 cm e spessore 1 cm sono dotate di fibre WLS (*WaveLength Shifter*) per una lettura attraverso un tubo fotomoltiplicatore a multi anodo da 64 canali. Si attende un'efficienza nel trovare il blocco dove è effettivamente avvenuta l'interazione di circa 70 - 80%. Una volta trovato il mattone dove si presume sia avvenuta l'interazione quest'ultimo viene rimosso per le analisi successive.

Le analisi procedono in questo modo: il mattone che è sospettato di aver registrato un evento viene rimosso, viene staccato il foglio sostituibile e quest'ultimo viene sviluppato e la pellicola viene scandagliata per cercare la traccia generata dall'interazione da neutrino. Se non viene trovata nessuna traccia allora il mattone non viene più analizzato e un altro al suo posto viene rimosso dalla parete. Quando un evento da neutrino viene osservato sul foglio sostituibile allora si procede allo sviluppo dell'intero mattone. Dopo lo sviluppo l'emulsione viene mandata ad un microscopio che scandaglia la pellicola alla ricerca di vertici da neutrino e nodi in prossimità di tali vertici.

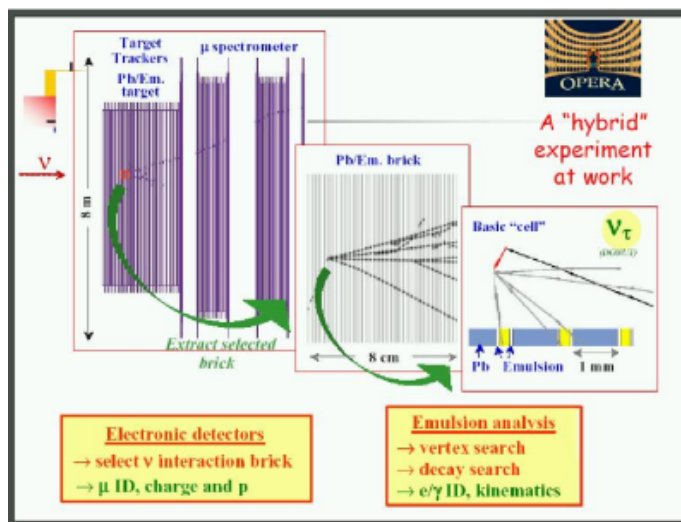


Figura 16: Funzionamento del rivelatore OPERA

### 5.4.1 Sensibilità del rivelatore

La risoluzione angolare per la ricostruzione delle tracce sul film è di circa 2 mrad e questo limite alla precisione è dovuto principalmente alla sensibilità del microscopio usato per le analisi delle tracce e dal sistema di digitalizzazione.

Lo spessore dei mattoni e l'alta precisione nella ricostruzione delle tracce fanno dei mattoni stessi dei buoni calorimetri elettromagnetici e al CERN in test preliminari si è misurata un'efficienza del 90 % nel ricostruire sciami di particelle.

L'energia stessa degli sciami può essere trovata contando il numero di tracce ricostruite in un cono di 50 mrad attorno all'asse del fascio di elettroni usati per i test. La risoluzione trovata con questa tecnica è di  $40\%/\sqrt{E}$ .

Tutte queste caratteristiche mostrano la capacità di OPERA nello studio del decadimento  $\tau \rightarrow e$  e nello studio di apparizioni di neutrini elettronici provocati da oscillazioni di neutrini muonici.

### 5.4.2 Caratteristiche fisiche

I canali di decadimento per il  $\tau$  analizzati da OPERA sono il decadimento muonico, il decadimento elettronico e quello in adroni. Essi sono classificati in decadimenti lunghi e brevi. I decadimenti brevi corrispondono a quelli in cui il  $\tau$  decade nella stessa lastra di piombo in cui avviene l'interazione del neutrino. Questi eventi vengono selezionati in base ai parametri di impatto delle tracce dei figli di  $\tau$  rispetto al vertice di interazione. Nei decadimenti lunghi, invece, il  $\tau$  non decade nella stessa lastra dove è avvenuta l'interazione del neutrino e la sua traccia deve essere ricostruita in sequenza dall'analisi delle pellicole. Gli eventi  $\tau$  sono selezionati attraverso osservazioni sull'angolo tra il  $\tau$  e i suoi figli. Il numero di segnali attesi dall'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  è funzione del canale studiato per i tre differenti valori di  $\Delta m^2$ , ovvero fissato un canale di decadimento del  $\tau$  variando la differenza di massa quadratica si ottengono gli eventi attesi.

Canale	$\Delta m^2$ ( $10^{-3} eV^2$ )			$\epsilon$	Fondo
	1.6	2.5	4		
$\tau \rightarrow e$	1.6	3.9	9.9	3.4%	0.16
$\tau \rightarrow \mu$	1.3	3.2	8.2	2.8%	0.29
$\tau \rightarrow h$	1.4	3.2	8.2	2.9%	0.20
Totale	4.3	10.3	26.3	9.1%	0.65

Tabella 5: OPERA eventi attesi dopo 5 anni per differenti valori di massa e differenti canali di decadimento con relativa efficienza di rilevazione e rumore [18]

## 5.5 Il rivelatore ICARUS di CNGS

Lo scopo di ICARUS è di ricostruire la cinematica degli eventi con sufficiente precisione da permettere di selezionare gli eventi interessanti e ridurre al minimo e rigettare il rumore. La tecnologia che viene applicata permette di creare delle immagini in tre dimensioni su una larga scala di tempi grazie ad una camera riempita con argon liquido che garantisce una risoluzione spaziale simile a quella

ottenibile con la camera a bolle ( $\approx 3$  mm) ma con una lettura elettronica e una sensibilità continua. Una caratteristica importante di questo rivelatore è l'estrema purezza dell'argon utilizzato infatti in esso vi è meno di una particella per miliardo di impurità, permettendo agli elettroni di muoversi nell'argon per distanze maggiori di 1.5 m.

### 5.5.1 Dinamica degli eventi

Il neutrino  $\tau$  arriva nella camera riempita con argon liquido e interagisce con i nuclei di argon dando luogo all'interazione via CC  $\nu_\tau + Ar \rightarrow \tau + K$  e successivamente il  $\tau$  decade in un tempo molto breve nei modi sopra esposti. I canali su cui lavora ICARUS sono il decadimento in elettroni e quello in  $\rho$  e il successivo decadimento di quest'ultimo in pioni. Il canale preferenziale di decadimento è quello in elettroni. Questi elettroni sono caratterizzati da un momento trasverso piuttosto piccolo e hanno la tendenza a formare angoli grandi rispetto all'asse di incidenza dei neutrini grazie a questa caratteristica gli eventi da decadimento  $\tau$  sono distinguibili dai segnali dati da leptoni  $\mu$  generati via CC dai  $\nu_\mu$  presenti nel fascio, infatti i  $\mu$  lasciano tracce per ionizzazione molto ben distinte nell'argon e sono caratterizzati da un elevato potere di penetrazione ed essendo più massivi dell'elettrone la loro traiettoria è meno disturbata dagli altri atomi che incontrano. Il rumore di fondo nell'esperimento è dato essenzialmente dalla presenza di neutrini elettronici. La distinzione tra eventi interessanti e fondo avviene ancora tramite analisi sul momento trasverso degli elettroni, tramite osservazioni sullo spettro energetico.

Nel decadimento di tipo adronico il fondo è provocato dai  $\nu_\mu$  che interagiscono via NC, producendo  $\pi^0$ . La discriminazione tra eventi interessanti e rumore in questo caso non può avvenire per osservazione dell'energia ma vengono utilizzati criteri di isolamento per gli adroni associati all'evento da  $\nu_\tau$ .

Il numero di eventi attesi dall'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  dipende dal canale di decadimento del  $\tau$  studiato e dai tre differenti valori di  $\Delta m^2$  in condizioni di pieno mixing presi in considerazione per il calcolo.

Canale	$\Delta m^2$ ( $10^{-3} eV^2$ )			$\epsilon$	Fondo
	1.6	2.5	4		
$\tau \rightarrow e$	3.7	9	23	4.4%	0.7
$\tau \rightarrow \rho DIS$	0.6	1.5	3.9	0.8%	<0.1
$\tau \rightarrow \rho QE$	0.6	1.4	3.9	0.7%	<0.1
Totale	4.9	11.9	30.5	5.9%	0.7

Tabella 6: ICARUS eventi attesi dopo 5 anni per differenti valori di massa e differenti canali di decadimento con relativa efficienza di rilevazione e rumore [18]

La luce di scintillazione provocata dalla ionizzazione nell'argon liquido è usata per dare un preciso riferimento temporale della traccia. Il read-out è portato a termine da 3 piani paralleli ricoperti di fili il primo dei quali è posto di fronte al catodo con i fili disposti orizzontalmente e gli altri due con i fili posti ad angoli di  $\pm 60^\circ$  rispetto al primo. Il passo del reticolo è 1 mm. La risoluzione spaziale è di  $250 \mu m$  nella direzione del moto ( $z$ ) e 1 mm nelle direzioni  $x$  e

y. Quando una particella ionizzante attraversa il volume utile del rivelatore vengono prodotte coppie elettrone-ione positivo che vengono guidate verso il piano raccoglitore.

L'energia depositata da una particella ionizzante lungo il suo percorso ( $dE/dx$ ) è misurata accuratamente da un raccoglitore di carica su ogni filo della lastra con un tempo di campionamento di 400 n. Poiché il momento delle particelle può essere misurato dal range delle particelle o da analisi sullo scattering multiplo, il sistema fornisce un chiaro metodo per l'identificazione di particelle leggere.

### 5.5.2 Struttura del rivelatore

L'unità più piccola del rivelatore consiste in un serbatoio da 300 tonnellate di argon liquido e costituisce metà del modulo T600. Viene generato un forte campo elettrico uniforme perpendicolare ai fili utilizzando i fili stessi come anodo e una lastra metallica posta dall'altra parte della camera come catodo. Il campo elettrico fa in modo che gli elettroni, prodotti per ionizzazione, riescano ad attraversare gli 1.5 m di larghezza della camera e arrivare fino ai fili stessi. Poiché il dispositivo registra sia la coordinata del filo che da segnale sia il tempo di deriva e conoscendo la velocità di deriva degli elettroni nell'argon liquido si può avere una immagine bidimensionale dell'evento nel piano perpendicolare al piano dei fili. Questa apparecchiatura è già disponibile ed utilizzata per ricerche su neutrini solari.

Per l'esperimento CNGS si vuole costruire un modulo rivelatore da 3000 tonnellate che sarà composto da 5 moduli T600 per poter raggiungere una massa di argon sensibile da 2.35 Kton. Il modulo T3000 nel suo complesso sarà pronto nel 2006.

### 5.5.3 Sensibilità del rivelatore

La grande quantità di mezzo tracciante permette di identificare e campionare sciami elettromagnetici e adronici. L'energia degli sciami è ottenuta dall'integrazione della carica raccolta dai fili del dispositivo di raccolta. Tutto ciò fa sì che ICARUS abbia un'eccellente capacità calorimetrica con una risoluzione energetica molto alta. Poiché non c'è alcun campo magnetico applicato il momento dei muoni è misurato utilizzando lo scattering multiplo coulombiano. La risoluzione sul momento dei muoni è di circa 10% per muoni da 10 GeV.

Per migliorare queste prestazioni, al momento si sta pensando di aggiungere uno spettrometro magnetico.

## 6 Frontiere teoriche e sperimentali nella fisica dei neutrini

### 6.1 Implicazioni della massività dei neutrini

Il fatto che il neutrino abbia massa può avere conseguenze molto importanti in ambito cosmologico, infatti la sua massa potrebbe risolvere il cosiddetto enigma della materia oscura. La struttura dell'universo e la sua evoluzione dipendono evidentemente dal campo gravitazionale e le osservazioni astronomiche hanno messo in luce la presenza di materia che col proprio campo gravitazionale influenza maggiormente l'evoluzione di strutture come galassie e gruppi di galassie. Un esempio è dato dalla rotazione delle stelle attorno all'asse centrale della galassia: le osservazioni sul moto e sulle velocità di rotazione suggeriscono che le stelle nella regione più esterna sono soggette ad un campo gravitazionale formato da una grande quantità di materia che si troverebbe nelle regioni periferiche. Il problema è che a questo campo non si riesce ad associare nessuna sorgente visibile dato che la maggior parte della materia visibile è concentrata nel centro della galassia piuttosto che nella periferia. Altri indizi della presenza di questa materia oscura provengono, ad esempio, dalla distribuzione delle velocità degli ammassi di galassie.

Considerate queste osservazioni è stato calcolato che il 90% della materia presente nell'universo è materia oscura. Il problema ora è capire da cosa sia formata questa materia oscura e in questo verso sono state avanzate molte ipotesi che considerano la materia oscura come materia ordinaria (materia barionica) condensata in strutture come nane brune o buchi neri. Un'altra ipotesi che sta prendendo sempre più piede è che la materia oscura sia formata dai neutrini. Infatti, anche se questi hanno una massa piccolissima, sono talmente numerosi (permeano l'universo come la radiazione) che anche una massa 30000 volte più piccola della massa dell'elettrone potrebbe spiegare parte della materia oscura. Va tuttavia sottolineato che per fare in modo che il neutrino da solo possa risolvere il problema della materia oscura bisognerebbe imporre una massa di 30 eV per un modello con universo chiuso. Tuttavia insorgono altri problemi poiché il principio di Pauli limiterebbe il numero totale di neutrini e la massa da imporre per risolvere il problema dovrebbe essere di 80 eV, in ogni caso in contrasto col limite cosmologico citato nell'introduzione.

L'ipotesi più probabile è quindi che la materia oscura sia data da un insieme di contributi e tra questi il neutrino, nel caso fosse verificata la sua massa, giocherebbe senz'altro un ruolo determinante.

Il fatto che il neutrino abbia una massa non nulla, inoltre, ha delle implicazioni anche di carattere teorico. Infatti, la massa del neutrino non trova posto in nessun modo nel Modello Standard e questo farebbe pensare che questo modello sia in realtà contenuto in una descrizione delle particelle elementari più ampia, come ad esempio modelli supersimmetrici e teorie di Grande Unificazione. Grazie a questi nuovi meccanismi teorici, si spiegherebbe anche l'enorme divario (6 ordini di grandezza) tra le massa dei leptoni carichi e neutri, discrepanza che attualmente risulta artificiosa.

## 6.2 Le *neutrino factories*

I progetti più avanzati, attualmente in lavorazione, prevedono lo studio della violazione di CP e la verifica del teorema di invarianza di CPT nel sistema delle oscillazioni dei neutrini.

Tali misure prevedono il confronto tra

- $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$  e  $P(\bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha)$ , quantità che devono essere uguali se CPT è conservata;
- $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)$  e  $P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta)$ , che sono uguali solo in caso di non violazione di CP.

Queste misure, tuttavia, richiedono fasci ad altissima luminosità e focalizzazione. Fasci con queste caratteristiche si pensa possano essere prodotti nelle *neutrino factories*, cioè in lunghi canali di produzione e decadimento di muoni, dando così origine ad un fascio con uguali componenti di neutrini elettronici e muonici. Il generatore di neutrini verrebbe, poi, puntato verso il basso con angoli di incidenza con la Terra di gran lunga superiori a quelli degli attuali acceleratori, in modo da indirizzare il fascio a un rivelatore distante migliaia di Km dal luogo di produzione, distanza necessaria per uno studio accurato di effetti così piccoli come la violazione di CP.



## Riferimenti bibliografici

- [1] P. Aliani, V. Antonelli, R. Ferrari, M. Picariello and E. Torrente-Lujan, AIP Conf. Proc. **655** (2003) 103 [arXiv:hep-ph/0211062].
- [2] D. H. Perkins, “Introduction to high energy physics”, Addison-Wesley P.C., 4 ed. (2000).
- [3] LNGS, “I neutrini solari”.  
[http://www.lngs.infn.it/site/exppro/gno/neutrini\\_solari.html](http://www.lngs.infn.it/site/exppro/gno/neutrini_solari.html)
- [4] LNGS, “Description of the gallium detector”.  
[http://www.lngs.infn.it/site/exppro/gno/gno\\_exp.html](http://www.lngs.infn.it/site/exppro/gno/gno_exp.html)
- [5] LNGS, “Data taking and results”.  
[http://www.lngs.infn.it/site/exppro/gno/gno\\_results.html](http://www.lngs.infn.it/site/exppro/gno/gno_results.html)
- [6] G. Alimonti *et al.* [Borexino Collaboration], Astropart. Phys. **16** (2002) 205 [arXiv:hep-ex/0012030].
- [7] E. Kearns, T. Kajita, Y. Totsuka, Le Scienze **374** (1999) 36.
- [8] Y. Fukuda *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], Phys. Lett. B **433** (1998) 9 [arXiv:hep-ex/9803006].
- [9] M. B. Smy [Super-Kamiokande Collaboration], arXiv:hep-ex/0206016.
- [10] C. Athanassopoulos *et al.* [LSND Collaboration], Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 1774 [arXiv:nucl-ex/9709006].
- [11] A. B. McDonald, R. Joshua, K. Wark, D. L. Wark, Le Scienze **417** (2003) 54.
- [12] G. A. McGregor [SNO Collaboration], arXiv:nucl-ex/0205006.
- [13] S. N. Ahmed *et al.* [SNO Collaboration], arXiv:nucl-ex/0309004.
- [14] M. Apollonio *et al.* [CHOOZ Collaboration], Phys. Lett. B **466** (1999) 415 [arXiv:hep-ex/9907037].
- [15] K. Eguchi *et al.* [KamLAND Collaboration], Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 021802 [arXiv:hep-ex/0212021].
- [16] D. A. Petyt, “A Study of Parameter Measurement in a Long-Baseline Neutrino Oscillation Experiment”, Ph.D. Thesis, University of Oxford (1998).
- [17] I. Kato [K2K Collaboration], arXiv:hep-ex/0306043.
- [18] D. Duchesneau [OPERA Collaboration], eConf **C0209101** (2002) TH09 [Nucl. Phys. Proc. Suppl. **123** (2003) 279] [arXiv:hep-ex/0209082].
- [19] G. Altarelli, “Implicazioni Teoriche delle Masse dei Neutrini”, Seminario tenuto all’Università Roma Tre (22 Nov 2001).  
<http://www.roma3.infn.it/seminari/topical/Altarelli.ppt>