Oscillazioni dei neutrini

INFN-Bologna , Novembre 1998

DRAFT/04

1 Introduzione

Nel Modello Standard i neutrini hanno massa nulla. Se così non fosse, una naturale estensione del modello rende per i neutrini gli autostati dell'interazione debole non coincidenti con gli autostati di massa. In questo scenario è possibile un cambiamento di sapore dei neutrini, cioé una loro oscillazione. La osservazione di fenomeni di oscillazione di sapore comporta quindi la presenza di masse non nulle per i neutrini, risultato con ricadute importanti in cosmologia. I neutrini, se di massa non nulla, sono infatti naturali candidati per risolvere (almeno in parte) il problema della massa mancante dell'universo.

Adottando un formalismo di tre neutrini [1], si ha che i tre autostati di sapore ν_e, ν_μ e ν_τ possono essere proiettati sugli autostati di massa $|\nu_i\rangle$ $(i = 1, 2, 3)$ attraverso la matrice unitaria di mixing U:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^{3} U_{\alpha i}\ |\nu_i\rangle \tag{1}$$

L'evoluzione temporale dell'autostato ν_α assume di conseguenza la forma:

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_{i=1}^{3} U_{\alpha i}\ |\nu_i(0)\rangle\ e^{-i\omega_i t} \tag{2}$$

dove ogni componente $|\nu_i\rangle$ evolve con una fase propria ω_i che vale :

$$\omega_i = \sqrt{p_\nu^2 + m_i^2} \simeq E_\nu + \frac{m_i^2}{2E_\nu} \Leftrightarrow E_\nu \gg m_i \tag{3}$$

Quindi , ad un fissato p_ν, i vari stati di massa viaggiano ciascuno con una fase diversa ed è quindi possibile che, dopo un dato tempo, si possano combinare in maniera differente generando un sapore diverso da quello iniziale.

1.1 Oscillazioni a due famiglie

Nel caso semplice a due autostati di massa, siano $|\nu_1\rangle$ e $|\nu_2\rangle$ i due autostati di massa e $|\nu_\alpha\rangle$ e $|\nu_\beta\rangle$ gli autostati dell'interazione debole, per la (1) si ha che:

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(0)\rangle &= \cos\theta|\nu_1(0)\rangle + \sin\theta|\nu_2(0)\rangle \\ |\nu_\beta(0)\rangle &= -\sin\theta|\nu_1(0)\rangle + \cos\theta|\nu_2(0)\rangle \end{aligned} \tag{4}$$

Ora applicando l'operatore di evoluzione temporale avremo che al tempo $t > 0$ i due autostati ν_α e ν_β assumeranno la forma:

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(t)\rangle &= \cos\theta|\nu_1(0)\rangle\ e^{-i\omega_1 t} + \sin\theta|\nu_2(0)\rangle\ e^{-i\omega_2 t} \\ |\nu_\beta(t)\rangle &= -\sin\theta|\nu_1(0)\rangle\ e^{-i\omega_1 t} + \cos\theta|\nu_2(0)\rangle\ e^{-i\omega_2 t} \end{aligned} \tag{5}$$

Supponiamo ora che al tempo t=0 si abbia un fascio costituito solo di ν_α allora, invertendo la (4), si ottiene per $|\nu_\alpha(t)\rangle$ l'espressione :

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \cos^2\theta|\nu_\alpha(0)\rangle \; e^{-i\omega_1 t} + \sin^2\theta|\nu_\alpha(0)\rangle \; e^{-i\omega_2 t} \tag{6}$$

Quindi la probabilità che dopo una distanza $L = ct$ il ν_α sia diventato un ν_β vale :

$$P_{(\nu_\alpha\to\nu_\beta)}(L) = 1 - P_{(\nu_\alpha\to\nu_\alpha)}(L) = |\langle\nu_\beta|\nu_\alpha(L)\rangle|^2 = \sin^2 2\theta \sin^2\left(\frac{1.27\;\Delta m^2\;L}{E_\nu}\right) \tag{7}$$

dove $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ è espresso in eV^2, L/E_ν in m/MeV o km/GeV.
La probabilità di oscillazione nel vuoto dipende dai due parametri dell'equazione (7): $\sin^2 2\theta$ che rappresenta l'ampiezza di oscillazione e $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ che è legata alla lunghezza di oscillazione

$$L_{osc} = \frac{\pi\;E}{1.27\;\Delta m^2} \tag{8}$$

Pertanto, per un dato esperimento, la sensibilità alle oscillazioni dei neutrini può essere espressa in termini del valore Δm^2 minimo raggiungibile per valori grandi di $\sin^2 2\theta$ e del valore minimo di $\sin^2 2\theta$ per Δm^2 grande. Il primo di questi è determinato dalla combinazione dei valori di L (distanza sorgente neutrini - rivelatore) e di E (energia dei neutrini) osservati nell'esperimento, mentre il secondo è dominato dalla statistica di eventi che può essere osservata, poiché determina l'ampiezza del fenomeno di oscillazione.

L'equazione 7 mette anche in evidenza che per una verifica diretta dell'ipotesi di oscillazione dei neutrini è importante avere apparati capaci di effettuare una misura delle frequenze di interazione in funzione del rapporto L/E.

1.2 Oscillazioni a tre famiglie

Le precedenti considerazioni sono naturalmente una semplificazione del caso più generale, che prevede un mixing di 3 neutrini. Una schematizzazione grafica molto utile per comprendere la situazione è data dalla rappresentanzione proposta in [2]. [Da completare...]

1.3 Oscillazioni nella materia

Le diverse interazioni di ν_e e $\nu_{\mu,\tau}$ con gli elettroni nella materia (per correnti neutre e cariche i primi, per sole correnti neutre i secondi) modificano le considerazioni precedenti (valide nel vuoto). Da notare che gli anti-ν non hanno comportamenti diversi per i diversi sapori.

Per tenere conto delle differenti interazioni per i ν_e e $\nu_{\mu,\tau}$, nella matrice di rotazione tra autostati deboli e di massa (equazione 1) al solo elemento (1,1) corrispondente alla transizione $\nu_e \to \nu_{\mu,\tau}$ viene aggiunto un termine che tiene conto di questa interazione "aggiuntiva" (a corrente carica) rispetto agli altri neutrini. Il termine aggiuntivo risulta proporzionale all'energia del neutrino e alla densità elettronica del mezzo attraversato.

La diagonalizzazione della matrice di mixing così modificata porta ad una differente parametrizzazione dell'angolo di mixing θ_m (nella materia) rispetto a quello nel vuoto, espresso dalla relazione

$$\tan 2\theta_m = \frac{\tan 2\theta_v}{1 - \frac{\sqrt{8} G_F N_e E}{\Delta m^2 cos 2\theta_v}} \tag{9}$$

dove G_F è la costante di Fermi, N_e la densità elettronica del mezzo attraversato, E l'energia del neutrino. Mikheyev e Smirnov hanno sottolineato la possibilità di una condizione di risonanza di oscillazione: il denominatore dell'equazione precedente si può annullare data l'energia dei neutrini e il valore di N_e per una particolare scelta di Δm^2.

Da notare che anche se l'angolo di mixing nel vuoto θ_v è molto piccolo si possono avere così oscillazioni apprezzabili $\nu_e \to \nu_{\mu,\tau}$ nella materia.

Questo modello per le oscillazioni di neutrino nella materia (normalmente riferito come effetto MSW) trova applicazione per le misure di neutrini solari e per quelli atmosferici.

Per i neutrini solari si hanno due possibili scenari con effetto MSW: il primo in cui l'effetto MSW avviene solamente nel Sole, il secondo in cui nel Sole si ha un effetto più elevato, ma successivamente una parte dei $\nu_{\mu,\tau}$ oscillati vengono "rigenerati" in ν_e nella Terra. I due scenari prevedono deformazioni diverse dello spettro energetico dei neutrini osservabili e, nel secondo caso, si dovrebbe avere anche una modulazione giorno/notte del segnale.

Le oscillazioni nella materia possono inoltre giocare un ruolo significativo nell'interpretazione dei dati sui neutrini atmosferici, per ciò che concerne i ν_e.

1.4 Neutrini sterili

L'insieme dei risultati sperimentali (che viene presentato nella sezione successiva) appare di difficile interpretazione nell'ambito di oscillazioni a tre sapori, a meno di "rinunciare" [3] a qualcuno dei dati esistenti. Questa affermazione sarà chiarita nella discussione dei risultati sperimentali.

Alcuni modelli introdotti per spiegare simultaneamente tutti i risultati sperimentali richiedono l'esistenza di un quarto neutrino [4] che non interagisce con la materia e , per questo motivo, viene definito "sterile". La sua presenza sarebbe rivelata solo tramite una mancanza di eventi NC e CC rispetto al flusso aspettato. Questo permettebbe anche di distinguere oscillazioni in neutrini sterili o ν_τ negli esperimenti a scomparsa (vedi sez. 2) se l'energia del neutrino incidente e' sotto soglia per la produzione di τ: infatti, per oscillazione in ν_τ, è possibile solo una interazione di tipo NC e non CC e quindi si abbassa solo il rate di CC, mentre per oscillazioni in sterile si abbasseranno ambedue i tipi di interazioni.

Questi modelli sono legati al desiderio di riconciliare differenti risultati sperimentali, ma appaiono essere un'innaturale estensione *ad hoc* del Modello Standard non avendo una forte motivazione teorica.

2 Esperimenti sulle oscillazioni dei neutrini

Gli esperimenti sulle oscillazioni dei neutrini sono di due tipi:

- *a scomparsa*: se l'esperimento cerca di rivelare una riduzione nel flusso di neutrini del sapore originale ($P_{(\nu_\alpha \to \nu_\alpha)}$).
- *a comparsa*: se l'esperimento cerca di rivelare la transizione $\nu_\alpha \to \nu_\beta$ con $\beta \neq \alpha$ ($P_{(\nu_\alpha \to \nu_\beta)}$).

Possiamo evidenziare quattro tipologie di esperimenti:

- Esperimenti con neutrini solari
- Esperimenti con neutrini atmosferici
- Esperimenti con neutrini da reattori nucleari
- Esperimenti con neutrini da acceleratori

In questa rassegna consideriamo quindi gli esperimenti su oscillazioni condotti a partire da "sorgenti" di neutrini, trascurando tutte le problematiche e le ricerche relative al doppio decadimento beta senza neutrini. Si tralascia anche una discussione approfondita relativa al rapporto tra massa dei neutrini e materia oscura.

2.1 Esperimenti con neutrini solari

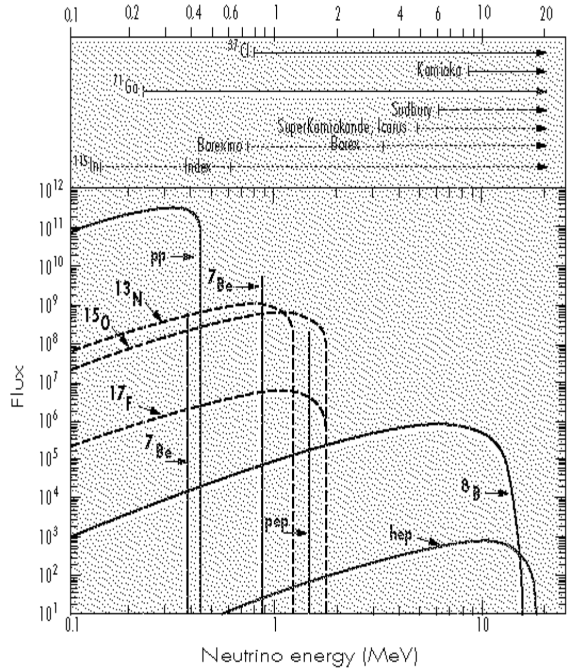


Figura 1: Spettro dei neutrini solari e intervallo di sensibilità dei diversi esperimenti

In Fig. 1 sono sommariamente riportati gli spettri attesi di neutrini dal Sole provenienti dalle varie reazioni nucleari della catena p-p e dal ciclo CNO e gli intervalli di sensibilità di vari esperimenti.

Il primo esperimento volto allo studio dei neutrini solari è stato Homestake, costituito di 615 tonnellate di C_2Cl_4, il quale rivela i ν_e tramite la reazione $\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow {}^{37}Ar + e^-$: la presenza di ${}^{37}Ar$ nell'apparato viene rivelata tramite processi radio-chimici e quindi la misura e' unicamente inclusiva. L' esperimento presenta una soglia di 0.8 MeV ed è sensibile a neutrini provenienti dalla reazione ${}^7Be + e^- \rightarrow {}^7Li + \nu_e$ (0.861 MeV).

Un simile metodo di misura è adottato da SAGE in Russia e GALLEX al Gran Sasso, i quali sfruttano pero' la reazione ${}^{71}Ga + \nu_e \rightarrow {}^{71}Ge + e^-$ che ha una soglia di 233 KeV, inferiore alla precendente. In tal modo e' possibile rivelare i neutrini di bassa energia prodotti nella reazione $p + p \rightarrow {}^2H + e^- + \nu_e$ ($\leq$ 0.42MeV).

Una diversa tecnologia e' adottata in Kamiokande e Superkamiokande: essi si basano su rivelatori Cherenkov ad acqua con una soglia più alta rispetto ai precedenti e quindi sensibili ai neutrini provenienti dalla reazione ${}^8B \rightarrow {}^8Be^* + e^- + \nu_e$ ($\leq$ 14.06MeV).

I risultati ottenuti dagli esperimenti citati e riportati nella sottostante Tabella 1.1 [5] [6] evidenziano un deficit di neutrini solari rispetto alle predizioni; il modello solare considerato per il calcolo dei flussi attesi è quello di Bahcall e Pinsonneault ($BP95$).

Esperimento	Soglia energetica	DATI/TEORIA($BP95$)
Kamiokande	7.0 MeV	$0.423 \pm 0.029 \pm 0.050$
SuperKamiok.	6.5 MeV	$0.358^{+0.09}_{-0.008}(stat.)^{+0.014}_{-0.010}(sist.)$
Homestake	0.814 MeV	$0.273 \pm 0.015 \pm 0.015$
SAGE	0.233 MeV	$0.556 \pm 0.047 \pm 0.036$
GALLEX	0.233 MeV	$0.504 \pm 0.073^{+0.036}_{-0.051}$

Tabella 1: Sommario degli esperimenti sui neutrini solari, flusso di neutrini misurato confrontato con quello predetto dal modello solare $BP95$.

Per la soluzione del problema sono stati seguiti due diversi approcci: una modifica dei modelli solari o una lettura dei risultati in termini di oscillazioni dei neutrini.

Allo stato attuale c'e' un ampio consenso che non sia possibile variare in alcun modo accettabile i parametri del modello solare standard per poter spiegare i dati esistenti [7]. Gli esperimenti al Gallio misurano un flusso di neutrini solari compatibile con quelli previsti dalla catena p-p per i quali l'incertezza della previsione e' del 1% . Non rimane quindi spazio per ^{7}Be ed il ^{8}B (che è formato a partire dal ^{7}Be nella catena di reazioni nucleari), i quali sono comunque osservati dagli altri esperimenti anche se in frazioni inferiori rispetto alle previsioni. Questa discrepanza non e' risolvibile con modifiche ai modelli solari che invece trovano supporto in altri tipi di misure (per es. dalla luminosità osservata, dall'eliosismologia...).

L'interpretazione in termini di oscillazioni di neutrini ha tre possibili scenari:

- Se l'oscillazione avviene nel vuoto, poiché $10^{10} \leq L/E \leq 10^{12}\ m/MeV$, si ottengono $\Delta m^2 \approx 10^{-10}$ eV^2 a $\sin^2 2\theta \approx 1$. In questo caso si dovrebbe osservare una variazione stagionale del deficit di neutrini (cambiando la distanza Terra-Sole). Questo scenario è detto usualmente "just-so".

- Se oscillazioni nella materia hanno luogo esclusivamente nel Sole si avrebbe $\Delta m^2 \approx 10^{-5}\ eV^2$ a $\sin^2 2\theta \approx 5 \cdot 10^{-2}$. Questa soluzione è usualmente detta "small mixing angle" (SMA). In questo caso si dovrebbe osservare una modifica dello spettro energetico dei neutrini.

- Infine è possibile trovare una soluzione che richiede una oscillazione piú forte nel Sole ed una successiva rioscillazione dei $\nu_{\mu,\tau}$ così prodotti nella Terra in ν_e. In questo caso si ottiene $\Delta m^2 \approx 10^{-5}\ eV^2$ e $\sin^2 2\theta \approx 1$. Questa interpretazione (detta "large mixing angle") appare attualmente sfavorita dai primi dati, negativi, di SuperKamiokande sulla ricerca di un'asimmetria giorno-notte che tale scenario predirebbe. Anche in questo caso è prevista una distorsione dello spettro energetico.

Va inoltre ricordato che sono stati proposti anche altri modelli più o meno esotici per la spiegazione dei neutrini solari (oscillazioni $\nu_e \to \bar{\nu}_e$, oscillazioni in neutrini sterili per esempio) che per brevità non vengono qui discussi. Per una discussione completa e aggiornata sullo stato degli studi sui neutrini solari si rimanda a [8].

2.2 Esperimenti con neutrini atmosferici

I neutrini atmosferici nascono come prodotti di decadimenti nelle cascate adroniche risultanti dalle collisioni dei raggi cosmici, costituiti prevalentemente da protoni, con i nuclei atmosferici.

La produzione di ν_e e ν_μ avviene secondo il processo:

$\pi^\pm \to \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu_\mu})$ seguito da

$$\mu^\pm \to e^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu_\mu}) + \nu_e(\bar{\nu}_e).$$

Da tali reazioni si prevede un rapporto ν_μ/ν_e tra i flussi di $\nu_\mu + \bar{\nu_\mu}$ e di $\nu_e + \bar{\nu_e}$ circa pari a 2 con un incertezza del 5%. L'uso di questa quantità permette una cancellazione delle incertezze teoriche sui rate assoluti attesi da ν_e e da ν_μ (di circa il 20% dovuti principalmente alle incertezze sul flusso primario di raggi cosmici e, in minore misura, alle funzioni di distribuzione partonica utilizzate e a effetti geomagnetici).

Sperimentalmente i neutrini atmosferici sono principalmente osservati tramite le interazioni a corrente carica nell'apparato. La direzione del neutrino viene ricostruita a partire dalla direzione del leptone generato. In questo modo si ricostruiscono le lunghezze L percorse dal neutrino. Esse variano da circa 15 Km (se il neutrino è generato "sopra" il detector), a circa 13000 Km (se è generato agli antipodi della Terra). Considerando lo spettro energetico di tali neutrini (E $\approx$ GeV) si coprono quindi regioni di L/E da 2 a $2 \cdot 10^4\ m/MeV$ raggiungendo sensibilità a oscillazioni con Δm^2 fino a $10^{-4}\ eV^2$.

Storicamente gli esperimenti (anche perché disponevano di poca statistica) hanno presentato i risultati in termini della grandezza R definita come:

$$R = \frac{(\frac{\nu_\mu}{\nu_e})_s}{(\frac{\nu_\mu}{\nu_e})_t} \tag{10}$$

dove il numeratore rappresenta il valore del rapporto tra il flusso di ν_μ e ν_e misurato dagli esperimenti mentre il denominatore rappresenta la stessa quantità predetta dalla teoria. Un valore di R minore di 1 può essere interpretato sia come un deficit di ν_μ sia come un eccesso di ν_e. Per questo motivo è importante misurare separatamente il flusso dei due (anche se, come discusso prima, le incertezze teoriche saranno non trascurabili).

I risultati di alcuni esperimenti sul rapporto R (sommando su tutti gli eventi ad angoli zenitali diversi) sono riportati in Tabella 1.2 [5] [9]

Esperimento	R
NUSEX	$0.96^{+0.32}_{-0.28}$
Frejus	$1.00 \pm 0.015 \pm 0.08$
Kamiokande sub-GeV	$0.60^{+0.06}_{-0.05} \pm 0.05$
Kamiokande multi-GeV	$0.57^{+0.08}_{-0.07} \pm 0.07$
SuperKamiok. sub-GeV	$0.63 \pm 0.03 \pm 0.05$
SuperKamiok. multi-GeV	$0.65 \pm 0.05 \pm 0.08$
IMB (sub-GeV)	$0.54 \pm 0.05 \pm 0.11$
Soudan-2 (prel. Vancouver)	$0.64 \pm 0.11^{+0.05}_{-0.06}$

Tabella 2: Sommario dei principali esperimenti sui neutrini atmosferici, rapporto tra il flusso di ν_μ e ν_e misurato e teorico.

Valori di R inferiori alle attese sono stati ottenuti da rivelatori Cherenkov ad acqua sotterranei come Kamiokande, Superkamiokande in Giappone e IMB negli Stati Uniti; nonostante misure ottenute da due esperimenti con calorimetri quali NUSEX e Frejus con una statistica minore fossero consistenti con le attese teoriche, l'altro esperimento calorimetrico Soudan-2 ha riportato valori di R simili a quelli misurati in esperimenti Cerenkov.

Una tecnica di misura diversa consiste nell'osservare il rate di muoni provenienti dal basso, generati cioè dalle interazioni di ν_μ nella roccia sottostante l'apparato. Questa misura è maggiormente dipendente dalle incertezze teoriche sul flusso. Questa misura è effettuata per esempio dagli esperimenti BAKSAN, MACRO e SuperKamiokande. MACRO al Gran Sasso ha ottenuto per il rapporto tra il flusso di muoni che vanno verso l'alto indotti da neutrini misurato e previsto un valore inferiore alle attese: $0.74 \pm 0.036 \pm 0.046 \pm 0.13$ [10]. In questo caso però le energie dei neutrini studiate sono più alte ($\approx$ 100 GeV) di quelle caratteristiche degli eventi contenuti: il confronto non è quindi diretto.

Una rassegna completa dell'interpretazione dei dati prima della pubblicazione dei risultati di SuperKamiokande è [11]. Come esempio di misura assoluta dei flussi per ν_e e ν_μ riportiamo invece proprio i risultati di SuperKamiokande, che hanno la maggiore statistica. Gli eventi sono classificati come totalmente contenuti, (sub-GeV) se i prodotti d'interazione sono contenuti nel volume del rivelatore, o come parzialmente contenuti (multi-GeV), se almeno una traccia esce dal volume del rivelatore. I dati mostrati in Fig. 2 [9] indicano una chiara dipendenza del deficit nel flusso di ν_μ e non per quello di ν_e

dall'angolo zenitale. Di conseguenza i dati di SK risultano di per sé solo marginalmente compatibili con oscillazioni $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ [2]. I dati risultano invece consistenti con oscillazioni a due sapori $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ con $\sin^2 2\theta > 0.82$ e $5\times10^{-4} < \Delta m^2 < 6\times10^{-3}$. Un confronto tra le regioni ammesse nel piano $\sin^2 2\theta$, Δm^2 per Kamiokande e Superkamiokande è presentato in Fig. 3.

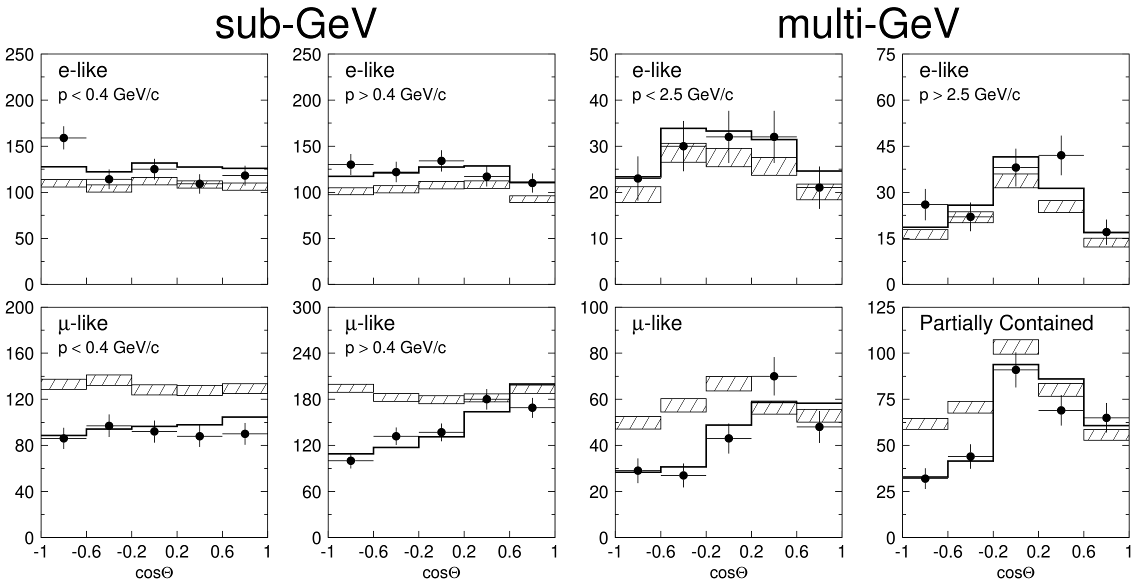


Figura 2: Distribuzioni dell'angolo zenitale di eventi muonici ed elettronici di tipo sub-GeV e multi-GeV. Le regioni tratteggiate mostrano i risultati attesi da simulazioni Monte Carlo senza oscillazioni. Le linee continue rappresentano il best-fit delle predizioni per oscillazioni nel canale $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$.

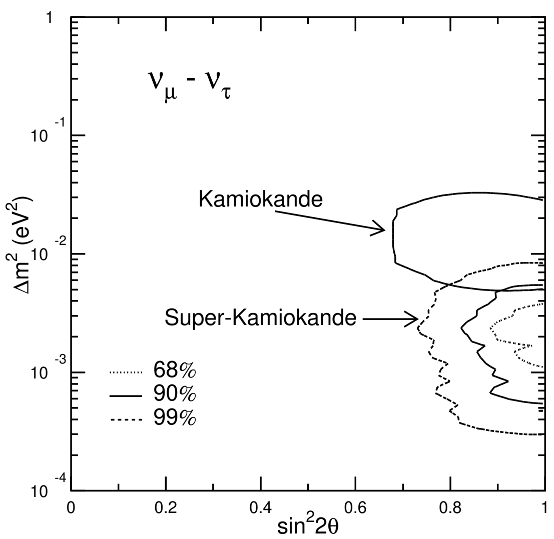
2.3 Esperimenti con neutrini da reattori nucleari

Questi esperimenti studiano i $\bar{\nu_e}$ provenienti dal decadimento β dei neutroni prodotti nelle reazioni di fissione nucleare ($E_\nu > 1.8 MeV$). Trattandosi di sorgenti artificiali di neutrini, le condizioni sperimentali sono maggiormente sotto controllo.

L'esperimento CHOOZ [12], in Francia, fa uso di un calorimetro a scintillatore liquido ($\approx 4.8\ ton$) e - a differenza di passati esperimenti (per es. BUGEY) con detector molto vicino al reattore - è posizionato ad una distanza di 1 Km dal reattore. L'esperimento rivela i $\bar{\nu_e}$ tramite la reazione di decadimento β inverso:

$$\bar{\nu_e} \ + \ p \ \rightarrow \ e^+ \ + \ n$$

Il rivelatore è schermato dai raggi cosmici da 300 mwe di roccia che riduce in maniera sensibile il fondo. La distanza dal reattore fa operare CHOOZ ad un valore medio di $L/E \ \sim \ 300\ m/MeV$ che permette di rivelare oscillazioni nel canale a scomparsa $\bar{\nu_e} \ \rightarrow \ \nu_x$ (ove x indica un qualunque flavour) con sensibilità in Δm^2 fino a $10^{-3}\ eV^2$.



8. cm

Figura 3: Regioni permesse nel piano $\sin^2 2\theta$ e Δm^2 per oscillazioni $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ basate sui dati di Suprkamiokande e Kamiokande.

CHOOZ ha misurato un rapporto tra gli eventi rivelati e quelli attesi pari a:

$$R_{s/t} = 0.98 \pm 0.04(stat) \pm 0.04(syst) \tag{11}$$

non riscontrando evidenza per oscillazioni (si veda la Fig. [?] per le regioni conseguentemente escluse) dei neutrini elettronici per valori nel piano $\sin^2 2\theta$, Δm^2:

$\sin^2 2\theta > 0.18$ e $\Delta m^2 > 0.9 \cdot 10^{-3}\ eV^2$

2.4 Esperimenti con neutrini da acceleratori

I neutrini (essenzialmente di tipo muonico) sono ottenuti dal decadimento delle particelle cariche prodotte inviando un fascio di protoni contro una data targhetta. Gli esperimenti misurano il flavour del neutrino interagente dal leptone prodotto nelle reazioni a corrente carica del tipo:

$$\nu_l\ +\ N\ \rightarrow\ l\ +\ X \qquad \text{dove} \quad l = e, \mu, \tau$$

o la corrispondente reazione con antineutrini.

Gli esperimenti agli acceleratori sono usualmente divisi in due categorie: short baseline (L $\approx$ 1 Km) e long baseline (L $\approx$ 100 Km). Finora sono stati realizzati solo esperimenti short baseline. I primi studiano regioni di Δm^2 dell'ordine dell'eV^2 mentre i secondi si

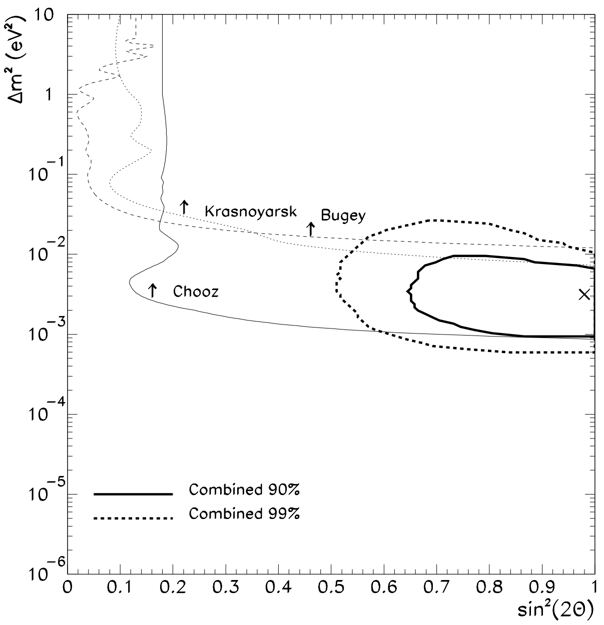


Figura 4: Zona esclusa da CHOOZ per oscillazioni $\bar{\nu}_e \rightarrow \nu_x$ (ove x indica un qualunque flavour) e confronto con precedenti esperimenti.

occuperanno, se realizzati, di regioni di Δm^2 minori. Essendo l'energia del fascio variabile ciò permette di esplorare regioni diverse di massa. La limitazione principale è costituita dalle intensità del fascio di neutrini che si ottengono.

2.4.1 Short Baseline

NOMAD [13] è un esperimento *a comparsa* il cui scopo è rivelare ν_τ a partire da un fascio di ν_μ prodotti da un fascio di 450 GeV di protoni dell' SPS del CERN. Il rivelatore dista 625 m dalla sorgente del fascio ed con un bersaglio attivo di 2.7 ton; l'apparato si basa su una misura ed identificazione delle particelle prodotte facendo uso di camere a deriva, TRD e un calorimetro. L'esperimento è sensibile a $\Delta m^2 > 1\ eV^2$ e ad angoli di mixing $\sin^2 2\theta < 5 \times 10^{-3}$. L'analisi dei dati relativi al 1995 hanno portato a stabilire un limite pari a $\sin^2 2\theta_{\mu\tau} < 4.2 \times 10^{-3}$ per valori di $\Delta m^2 > 1\ eV^2$ con livello di confidenza del 90%.

Un altro esperimento al CERN è CHORUS [14] che ricerca interazioni a corrente carica di ν_τ come possibile indicazione di oscillazione nel canale $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. L'apparato usa 770 Kg di emulsioni per la misura del vertice di decadimento del τ e vari alri rivelatori. Anche in questo caso l'analisi dei dati relativi al 1994-1995 non ha evidenziato candidati di eventi da τ ponendo come limite $\sin^2 2\theta_{\mu\tau} < 1.2 \times 10^{-3}$ (90% $C.L.$).

L'esperimento KARMEN [15] (Rutherford Appleton Laboratory , UK) usa i neutrini prodotti da un fascio di protoni di 800 MeV/c. Neutrini ν_μ, ν_e e $\bar{\nu_\mu}$ sono prodotti con intensita' uguali dai decadimenti a riposo $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ e $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu_\mu}$ (i π^- sono assorbiti prima di decadere mentre i π^+ decadono quasi fermi). Le energie dei neutrini misurati sono monoenergetiche per i ν_μ e si estendono fino a 52 MeV per ν_e e $\bar{\nu_\mu}$.

L'esperimento e' basato su un calorimetro a scintillatore liquido di 56 ton posto a 17 m dalla sorgente posto a 90^o rispetto al fascio e quindi meno sensibile a decadimenti in volo. Per rivelare $\bar{\nu_e}$ la principale reazione osservata è quella di cattura di $\bar{\nu_e}$ su protone e successiva termalizzazione del neutrone prodotto. Per rivelare ν_e l'esperimento osserva reazioni a corrente carica su ^{12}C che producono un elettrone prompt e formazione di ^{12}N il quale a sua volta decade, dopo un certo tempo, in ^{12}C e un positrone: la rivelazione ritardata dell'elettrone e del positrone caratterizza questo processo.

Karmen ha posto dei limiti superiori nei canali a comparsa $\bar{\nu_\mu} \to \bar{\nu_e}$ e $\nu_\mu \to \nu_e$ pari rispettivamente a:

$\sin^2 2\theta < 8.5 \times 10^{-3}$ per $\Delta m^2 \geq 100 eV^2$ e
$\sin^2 2\theta < 4.0 \times 10^{-2}$ per $\Delta m^2 \geq 100 eV^2$

Recentemente [16] sono stati pubblicati nuovi risultati ottenuti con una configurazione sperimentale progredita rispetto alla precedente (KARMEN2), relativi al canale $\bar{\nu_\mu} \to \bar{\nu_e}$ dai quali si ottiene:

$\sin^2 2\theta < 1.3 \times 10^{-3}$ per $\Delta m^2 \geq 100 eV^2$ (90% C.L.).

Infine LSND [17] (Liquid Scintillator Neutrino Detector) ha una massa totale di 167 ton ed e' posto a 30 m dalla sorgente (E_p= 800 MeV, $36 < E_\nu < 52.6$ MeV). L'intensita' del fascio è superiore rispetto a Karmen come pure la sua energia media (questo perche' l'apparato è posizionato lungo la direzione del fascio). L'esperimento ha riportato i dati sulla probabilità di oscillazione per i canali $\bar{\nu_\mu} \to \bar{\nu_e}$ e $\nu_\mu \to \nu_e$, i primi ottenuti da decadimenti a riposo di μ^+ i secondi da decadimenti in volo di π^+. La prima reazione e' rivelata come in Karmen, per la seconda l'esperimento si basa sulla sola ossevazione degli elettroni prodotti con energia tra 60 e 200 MeV.
Per quanto riguarda il canale $\bar{\nu_\mu} \to \bar{\nu_e}$ LSND ha riscontrato (per eventi con un positrone di energia compresa tra 20 e 60 MeV) un eccesso di $51.0^{+20.2}_{-19.5} \pm 8.0$ eventi che danno una probabilità di oscillazione P pari a:

$P(\bar{\nu_\mu} \to \bar{\nu_e}) = (0.31 \pm 0.09 \pm 0.05)\%$

Per ciò che concerne il canale $\nu_\mu \to \nu_e$ i dati sembrano evidenziare oscillazioni in accordo con un valore per P pari a:

$P(\nu_\mu \to \nu_e) = (0.26 \pm 0.10 \pm 0.05)\%$

Le due analisi di LSND hanno errori sistematici e fondi diversi e sono compatibili. Questo costituisce attualmente l'unica evidenza di oscillazioni in esperimenti ad acceleratori.

In Fig. 5 vengono riportate le regioni del piano $\sin^2 2\theta$ e Δm^2 escluse da KARMEN2 confrontate con quelle ottenute da altri esperimenti; sono anche presenti le regioni ammesse da LSND. I limiti di Chooz non sono riportati perche' coprono una zona cinematica molto differente (si veda Fig. [?]).

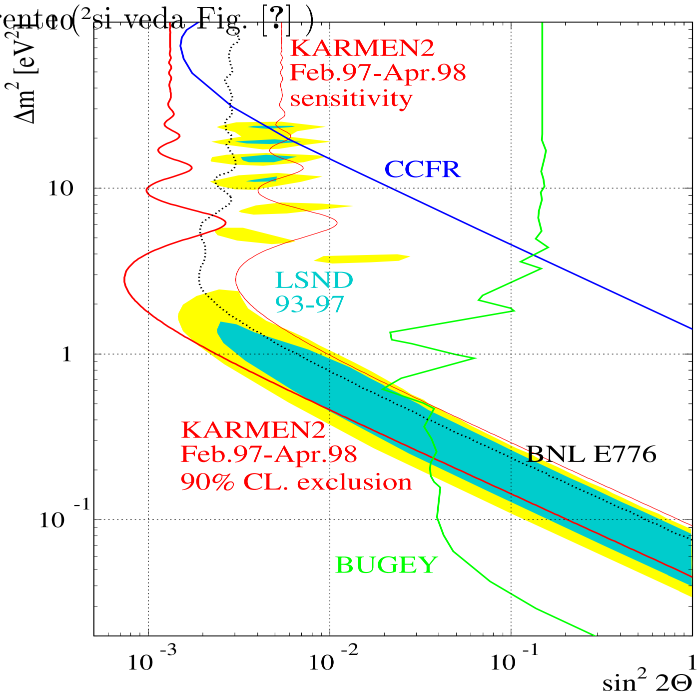


Figura 5: Sensibilità e regioni escluse al 90% C.L. da KARMEN2 confrontate con altri esperimenti (BUGEY, CCFR e BNLE776) e con le regioni permesse da LSND (aree ombreggiate). La curva di KARMEN2 denominata 'sensitivity' indica l'upper-limit piu' stringente per avere oscillazioni.

3 Esperimenti futuri

Per ciascuna delle diverse tipologie di esperimento esaminate vediamo ora le prospettive future [18].

3.1 Neutrini solari

Nel prossimo futuro tre esperimenti di seconda generazione, approvati e in fase di avanzata costruzione, forniranno nuovi dati sui neutrini solari: GNO, SNO e Borexino. A questi si aggiunge ICARUS per il quale una prima unita' di 600 ton e' in fase di realizzazione.

1. GNO (Gallex Neutrino Observatory, Gran Sasso)
   L'esperimento costituisce un upgrade di Gallex e porterà a circa 100 ton di Gallio la massa bersaglio. I rate di neutrini catturati saranno quindi studiati con maggiore precisione. E' allo studio inoltre un miglioramento della tecnica di estrazione degli atomi di Germanio attraverso l'impiego di "micro-calorimetri criogenici" (cristalli di qualche mg mantenuti a temperatura di qualche milli-Kelvin su cui depositare

il materiale radiochimico. Il decadimento dell'atomo di Ge produce sul cristallo un aumento di temperatura misurabile).

2. SNO (Sudbury Neutrino Observatory)
E' un rivelatore Cherenkov di 1000 t di acqua pesante. Tale esperimento potrà misurare sia interazioni a corrente carica del tipo $\nu_e + d \to p + p + e^-$ sia interazioni a corrente neutra del tipo $\nu_\alpha + d \to p + n + \nu_\alpha$ con $\alpha = e, \mu, \tau$. In pratica potrà effettuare una misura dello spettro di ν_e dal sole a energie simili a quelle di SuperKamiokande (si veda la Fig. 1) e comtemporaneamente una misura del flusso totale di neutrini dal sole indipendente dal flavour.

3. BOREXINO (al Gran Sasso)
L'esperimento rivelerà in scintillatore liquido (300 tonn, $E_{th} \approx 600$ KeV) le interazioni dei neutrini solari provenienti dal ^7Be che hanno un'energia di 861 KeV e dal ^8B. La misura si basa sulla rivelazione dell'elettrone prodotto in interazione elastiche neutrino-elettrone (energie tra 264 KeV e 664 KeV) , ed e' quindi sensibile a tutti e tre i flavour di neutrini. Rispetto ai precedenti rivelatori Borexino misurerà lo spettro dei neutrini (non è più quindi un esperimento semplicemente "a conteggio"). Eventuali distorsioni rispetto allo spettro atteso costituirebbero una chiara indicazione di oscillazioni nella materia.

4. ICARUS (Gran Sasso)
L'esperimento propone una TPC ad Argon liquido che rappresenta allo stesso tempo un calorimetro molto omogeneo ad alta granularitá ed una 'camera a bolle' con lettura elettronica capace di fornire immagini tri-dimensionali. Dovrebbe essere capace di soglie intorno ai 4-5 MeV. Attualmente è in fase di costruzione un modulo da 600 ton; l'esperimento finale dovrebbe raggiungere le 5000 ton. Recentissimamente (10/10/98) la collaborazione ha proposto la costruzione di 30 Kton esternamente ai laboratori. In tale caso la fisica sarebbe principalmente orientata all'apparizione di τ nel fascio CERN/Gran Sasso.

In futuro un ulteriore passo in avanti sara' rappresentato da esperimenti di 'terza' generazione capaci di misurare la spettro dei neutrini solari in maniera completa, inclusi quelli provenienti dalla catena p-p. Quattro proposte sono attualmente allo studio : Hellaz, Heron, SuperMunu e Lencse.

1. HELLAZ [19]
L'esperimento si propone di realizzare una TPC con elio alla temperatura dell'Azoto liquido (77 K). Nel rivelatore finale proposto, l'elio in forma gassosa ($\approx$ 7 ton) si trovera' ad una pressione di 5 bar e si dovrebbero rivelare neutrini di 200 KeV provenienti dal ciclo pp con una densità di 0.003 g/cm^3. Osserva il rinculo di elettroni prodotti dallo scattering dei neutrini su di essi, raccogliendo con camere a drift gli elettroni prodotti per ionizzazione ($\approx 10^3$ per 100 KeV e^-).

2. HERON [20]
Anche questa proposta prevede l'utilizzo di elio come bersaglio, ma allo stato superfluido (densità 0.14 g/cm^3) sempre osservando lo scattering di neutrini su elettroni.

Un e^- di 50 KeV produce $\approx 10^3$ fotoni uv, che vengono rivelati da silici posti esternamente al liquido. Un vantaggio rispetto a HELLAZ è ovviamente la dimensione molto più ridotta del rivelatore finale (10 ton di He in 125 m^3 contro 7 ton in 2000 m^3).

3. "SuperMUNU" [21]
   Si tratta di una proposta per un rivelatore di 2000 m^3 di CF_4 (gas che ha il vantaggio importante di non operare a temperature criogeniche), con osservazione dello scattering su elettrone. Questa proposta rappresenta uno sviluppo dell' esperimento MUNU [22] operante al reattore di Bugey .

4. LENCSE [23]
   L'esperimento proposto è basato su uno scintillatore liquido arrichito sino al 15% con Itterbio (Yb) o Gadolinio (Gd) che permettono reazioni di cattura di ν_e a bassissima energia. L'esperimento si propone di misurare neutrini con energia intorno ai 300 KeV provenienti dalle reazioni pp nel sole. La capacità di misurare le energie permetterebbe all'apparato di effettuare una misura completa dello spettro dei neutrini solari. Nella prima fase la massa totale potrebbe aggirarsi intorno alle 100 ton. Poiché questo esperimento misura le sole correnti cariche, per ciò che riguarda il flusso dei neutrini provenienti dal ^{7}Be risulta complementare a Borexino (che osserva scattering di $\nu_{e,\mu,\tau}$ su elettroni): l'insieme dei risultati dei due esperimenti dovrebbe essere discriminante tra vari modelli (oscillazioni in neutrino sterile o $\nu_{\mu,\tau}$.

Una rassegna completa e aggiornata di proposte di detector su neutrini solari si trova in [24].

3.2 Neutrini atmosferici

I recenti risultati di SuperKamiokande hanno ridato impulso alle misure dei neutrini atmosferici. Le nuove proposte puntano soprattutto alla misura della frequenza di interazione in funzione del rapporto tra la distanza percorsa dal neutrino e la sua energia (L/E). Inoltre, per discriminare eventuali neutrini sterili, viene richiesta una buona efficinenza di rivelazione sia per le interazioni a corrente neutra che per quelle a corrente carica (vedi sezione 1.4). Le principali proposte sino ad ora presentate usano i Laboratori del Gran Sasso con base per l'esperimento e differiscono per un diverso approccio nella misura dell'impulso del muone prodotto in interazione CC . Le proposte qui' esaminate sono : Icarus, Nice, Aqua-rich, High Density Detector.

- "High density detector" [25]
  Si tratta di un rivelatore di semplice concezione composto da tubi a streamer limitato e ferro. La misura dell'impulso e' basata sul range dei muoni rivelati e la loro direzione e' determinata dall'identificazione del vertice o, se questo manca, dall'aumento dei residui sulla traccia a causa del multiple-scattering. Nella proposta si prevedono 30 Kton di Ferro distribuite su 3 moduli con area 12×12 m^2. In tale configurazione, dopo quattro anni di presa dati si prevede di poter misurare $\Delta m^2 \geq 10^{-4}$ eV^2

- ICARUS (vedi descrizione precedente)
  Con le 600 ton del modulo iniziale dovrebbe raggiungere $\Delta m^2 \approx 10^{-4}$ eV^2 dallo studio dei neutrini atmosferici.

- NICE
  E' una proposta per un calorimetro di grande massa: due moduli di 12×12×8 m^3 composte da barre di ferro e scintillatore (300+300). L'esperimento preferisce una misura di impulso del muone tramite un campo magnetico esterno e un preciso sistema tracciante. L'esperimento dovrebbe misurare $\Delta m^2 \geq 3\ 10^{-4}$ eV^2.

- AQUA-RICH
  Proposta di un rivelatore Cherenkov ad acqua di grandi dimensioni che utilizza una tecnica innovativa (immagini focalizzate da specchi sferici) rispetto a Superkamiokande. L'esperimento si prefigge di misurare l'impulso delle particelle di bassa anergia facendo uso dell'allargamento del anello Cherenkov dovuto al multiple-scattering. In questa opzione, se l'evento non e' particolamente ricco di particelle, e' possibile anche una stima diretta dell'energia del neutrino tramite la misura di tutte le particelle prodotte nell'interazione. La massa totale proposta oscilla tra le 125 kton e le 180 kton a seconda della soluzione tecnica adottata. Per i neutrini atmosferici si propone di fare una misura di grande precisione della distribuzione in L/E con sensibilità fino a $1 \cdot 10^{-4}$ a maximal mixing. E' previsto operare non nei laboratori sotterranei (le dimensioni del detector sono tali da non poter essere installato nelle hall del Gran Sasso), ma in superficie.

3.3 Neutrini da reattori

A nostra conoscenza, solo l'esperimento giapponese denominato Kamland prosegue gli studi con questi tipi di neutrini. L'esperimento dovrebbe prendere dati intorno al 2000.

- KAMLAND
  E' un esperimento costituito da 1000 tonnellate di scintillatore liquido che verrà posto, in condizioni di ottima schermatura, nel sito dove era posto precedentemente Kamiokande. Si propone di raggiungere una soglia di circa 1 MeV per osservare lo spettro di $\bar{\nu}_e$ prodotto dalle 17 centrali nucleari giapponesi (l'80% di questo flusso proviene da centrali che si trovano a L $\approx$ 100-200 km). L'osservazione di deficit e distorsioni in tale spettro rispetto a quello atteso, permette di studiare la regione di $\Delta m^2 \sim 10^{-4} - 10^{-5}$ eV^2.

3.4 Short baseline

Numerose proposte sperimentali sono state fatte con lo scopo di misurare con maggiore precisione la regione investigata da Karmen e LSND, oppure di far tesoro dell'esperienze precedenti per proporre nuove misure di comparsa per il ν_τ. Nessuna pero' e' stata a tutt'oggi approvata.

- TOSCA (Cern)
  Questo esperimento si propone una ricerca a comparsa nel canale $\nu_\mu \to \nu_\tau$ utilizzando la WANF del SPS del CERN. Rispetto alla setup attuale (utilizzata da CHORUS e NOMAD) il fascio andrebbe upgradato (aumento del repetition rate del SPS e diminuzione dell'energia dei protoni a 350 GeV). Il detector proposto è costituito da emulsioni nucleari (2400 kg) seguite da micro-strip al silicio ad alta precisione e da un calorimetro elettromagnetico. A maximal mixing questo apparato raggiungerebbe sensibilità per $\Delta m^2 \approx 10^{-1}$ eV^2.

- BooNE (Booster Neutrino Experiment al Fermilab)
  Questo esperimento si propone di confermare (o confutare) il risultato di LSND usando un beam dump di protoni di 8 GeV. Si propone, in quella regione di masse (0.1 - 1 eV^2), di raggiungere sensibilità ad angoli di mixing più piccoli di quelli raggiunti da LSND e KARMEN. [aggiungere descrizione apparato]

- I216 (Cern)
  Questo esperimento per ora viene denominato "I216" dal numero di protocollo dalla LOI presentata al CERN-PS nel 97. In sostanza anche qui l'idea e' di esplorare la regione di $\Delta m^2 \approx 1$ eV^2, $\sin^2(\vartheta) \approx 10^{-3}$ con il fascio del PS ($< E_\nu > \approx 1.5$ GeV) effettuando un esperimento a comparsa di ν_e in un fascio di ν_μ. Sono proposti due detector uguali a 130 e 885 m dal proton target e si osserverebbero differenze nelle interazioni di ν_e. I detector consisterebbero di un tracking calorimeter con elevata granularità (300 piani di tubi a streamer e 300 piani di scintillatore) che agisce anche da target per le interazioni di neutrino seguito da due rivelatori con minore granularità per il contenimento degli sciami elettromagnetici e la misura del momento dei muoni.

- NESS
  E' una proposta anglo-tedesca proveniente dal gruppo di KARMEN e dal fascio ISIS. Si farebbe uso del fascio della progettata ESS (European Spallation Source) [26] con un guadagno nell'intensità dei neutrini di un fattore 60 rispetto a ISIS, ma con spettro analogo a quello attuale di Karmen (si veda la descrizione fatta del fascio descrivendo tale esperimento). NESS (un rivelatore ad acqua Cerenkov di 1000 kt) [27] avrebbe condizioni di shielding migliori di Karmen2 e si propone di raggiungere sensibilità fino $\sin^2 2\theta = 6 \cdot 10^{-5}$ per grandi Δm^2 e di $3 \cdot 10^{-2}$ a maximal mixing.

- ORLaND
  E' una proposta americana [28] per un rivelatore di 1580 ton di scintillatore liquido, finemente segmentato e utilizzerebbe un nuovo fascio di bassa energia prodotto dalla Spallation Neutron Source facility proposta ad Oak Ridge. Tale fascio avrebbe una luminosità maggiore della LAMPF usata a LSND.

3.5 Long Baseline

L'aumento della distanza tra la sorgente del fascio di neutrini e i rivelatori rende possibile l'esplorazione di regioni di Δm^2 minori in modo da ottenere risultati confrontabili con quelli ottenuti dagli esperimenti sui neutrini atmosferici. I parametri caratteristici del fascio risultano essere E_o (energia dei protoni dumpati), la distanza L e l'intensità in protoni all'anno N_p.

Attualmente sono in fase di realizzazione due esperimenti di tipo Long Baseline (KEK, FermiLab/Minos), mentre un terzo e' in fase di studio (CERN/Gran Sasso). Una dettagliata discussione comparativa dei fasci è trattata in [29]

- Giappone: è in fase di costruzione l'esperimento $K2K$ (fascio di neutrini dal KEK alla miniera Kamioka con parametri E_o=12 GeV, L=250 Km, $N_p = 3.3{\times}10^{19}$ yr^{-1}). Usando lo stesso metodo di rivelazione dei neutrini atmosferici di Superkamiokande si intendono studiare le stesse regioni in Δm^2 di tale esperimento, con una sensibilità limite a maximal mixing di 2×10^{-3} eV^2. E' previsto prendere dati dal gennaio 1999 e disporrà anche di un "near-detector" al KEK per controllare il fascio. Per il tipo di fascio e di detector utilizzati non è sensibile all'apparizione del τ.

- Fermilab: l'esperimento MINOS (nella miniera Soudan) prevede lo studio di neutrini prodotti al Fermilab. Il fascio (NuMI - Neutrinos at the Main Injector) ha parametri E_o=120 GeV, L=730 Km, N_p=$2{\times}10^{20}$ yr^{-1}. Il rivelatore proposto (10 Kton) è per ora essenzialmente un calorimetro al ferro magnetizzato anche se si parla di un upgrade del design con inserimento di emulsioni nucleari (similmente ad altre proposte: TOSCA, OPERA). Per valori di $\Delta m^2 > 5{\cdot}10^{-3}$ ritiene di poter identificare statisticamente l'apparizione del τ.

- CERN/Gran Sasso: Sono in fase di progettazione vari esperimenti che utilizzerebbero il fascio di neutrini proveniente dal CERN, percorrendo quindi una distanza di 732 Km. Esiste un rapporto di riferimento sul fascio proposto (NGS beam) a cura del comitato CERN-INFN [30]. Le caratteristiche del beam NGS (HE, di alta energia) sono E_o=400 GeV, L=730 Km, N_p=$3{\times}10^{19}$ yr^{-1}, $E_\nu \approx 20$ GeV, Recentemente (30/09/98) il comitato CERN/INFN ha anche proposto due fasci di più bassa energia ($E_\nu \approx 10$ GeV (LE1) e $E_\nu \approx 7$ GeV (LE2)) con rate ovviamente minori. Ovviamente i due approcci si focalizzano o alla comparsa del τ (fascio HE) o ad una elevata sensibilità alla scomparsa (LE1 e LE2). Con entrambe le scelte, va comunque detto che a tali energie, considerando che $L = 732$ Km, si coprono con difficoltà le regioni in Δm^2 studiate da Superkamiokande.

  - ICARUS (vedi descrizione precedente), che con le 600 ton del modulo iniziale dovrebbe raggiungere in un anno $\Delta m^2 \approx 9 \cdot 10^{-3}$ eV^2. La recente proposta per 30 kt (all'esterno) aumenterebbe ovviamente di molto la possibilità di "vedere" la comparsa del τ. Ritiene di poter identificare circa (20,420) τ per $\Delta m^2 =$ (1,5)$\cdot$ 10^{-3} eV^2.
  - OPERA, che si basa su lastre di piombo intervallate da 4 piani distanziati di emulsioni che fungono da tracciatori e permettono anche la ricostruzione del decadimento dei τ. Uno spettrometro magnetizzato consente anche il riconoscimento e la misura dell'impulso dei muoni. La massa totale prevista è di 750

ton, con cui ritiene di misurare (5,9,37,90) τ per Δm^2 = (1.8,2.5,5,8)$\cdot$ 10^{-3} eV^2.

- NOE, che e' composto da camere a transizione di radiazione (TRD) che fungono anche da targhetta a consentono la ricostruzione del vertice dell'interazione ed il riconoscimento degli elettroni. Le camere TRD sono intervallate con calorimetri a fibre scintillanti. L'esperimento usa i TRD (2.4 kton) per le misure a comparsa e tutto il rivelatore (7 kton) per quelle a scomparsa.
- NICE (vedi descrizione precedente), che per le caratteristiche del rivelatore funzionerebbe solo a scomparsa e su fasci di bassa energia. A maximal mixing dovrebbe raggiungere sensibilità a $\Delta m^2 \approx 10^{-3}$ eV^2 utilizzando il fascio di più bassa energia attualmente proposto dal comitato CERN/INFN.
- AQUA-RICH (vedi descrizione precedente), che, per il fascio di neutrini di più bassa energia, potrebbe coprire le regioni di Δm^2 di Superkamiokande fino forse a $8 \cdot 10^{-4}$ osservando la distorsione in energia dello spettro. Ricostruisce l'energia del neutrino incidente in una frazione significativa degli eventi a corrente carica.

4 Riassunto dei risultati e loro discussione

4.1 Situazione sperimentale

La figura 6 mostra nel piano $\sin^2 2\theta$ - Δm^2 le zone di oscillazione dei neutrini secondo gli esperimenti che hanno un segnale positivo.

- $\Delta m^2 \approx$ 1 eV^2
  Il risultato positivo di LSND (in una regione di Δm^2 molto rilevante per le implicazioni cosmologiche) è ora messo in discussione dai risultati di Karmen, che comunque non potrà mai escludere in maniera soddisfacente tutta la zona permessa da LSND poiché il fascio di cui dispone è di minore intensità.

- neutrini atmosferici ($\Delta m^2 \approx 10^{-3}$ eV^2)
  I rate osservati da numerosi esperimenti con tecniche diverse mostrano concordemente un deficit di neutrini atmosferici. L'interpretazione di tali risultati non è comunque facile a causa delle incertezze sistematiche sui flussi. Per quanto riguarda Superkamiokande, l'interpretazione in termini di oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, già favorita dall'analisi dei flussi per ν_μ e ν_e, trova supporto nei risultati di CHOOZ che non danno evidenza di oscillazioni per i $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ nella stessa zona. In ogni caso i risultati di Kamiokande e SuperKamiokande appaiono marginalmente compatibili.

- neutrini solari ($\Delta m^2 \approx 10^{-5}$ (MSW) o 10^{-10} eV^2)
  Rispetto al modello solare standard tutti gli esperimenti registrano un deficit di neutrini, dato sperimentale che non appare in discussione. Cosi pure l'impossibilità di spiegare con modifiche al modello solare tale deficit. Un'analisi che tiene conto di tutti i dati esistenti [8] tende a favorire gli scenari "just-so" e MSW small mixing angle (lo scenario con rigenerazione nella Terra - large mixing angle - appare in

difficoltà per i risultati preliminari di SuperKamiokande riguardo a effetti giorno-notte e distorsione dello spettro).

4.2 Prospettive

- $\Delta m^2 \approx 1$ eV^2
  I risultati contradditori tra LSND e Karmen2 necessitano nuove misure sperimentali. Nuovi input potrebbero essere forniti da BooNe e "I216" se approvati. Questi esperimenti, grazie ad una statistica maggiore, estenderebbero anche la regione di $\sin^2 2\theta$ osservata.

- neutrini atmosferici ($\Delta m^2 \approx 10^{-3}$ eV^2)
  La figura 7 [31] mostra un confronto tra i risultati di SuperKamiokande per oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$, i limiti di altri esperimenti ad acceleratori e le proiezioni per alcuni degli esperimenti futuri sul long-baseline. Il long-baseline di KEK può raggiungere la zona di SuperKamiokande, ma ha una sensibilità a maximal mixing non inferiore a 2×10^{-3}. L'esperimento MINOS può coprire regioni confrontabili con KEK ed inoltre, anche se con frequenze basse, propone di effettuare una misura a comparsa del τ. Nella figura sono anche riportate le regioni coperte dal long-baseline del Gran Sasso con due dei vari esperimenti proposti, Icarus e Noe: come si vede saranno misurabili i Δm^2 più alti della zona definita da SuperKamiokande. Se venisse scelto il fascio di più bassa energia gli esperimenti NICE e AQUA-RICH si propongono di raggiungere sensibilità di $\Delta m^2 \approx 10^{-3}$.

- neutrini solari ($\Delta m^2 \approx 10^{-5}$ (MSW) o 10^{-10} eV^2)
  Borexino dovrebbe aiutare a chiarire la situazione dei neutrini solari osservando direttamente lo spettro dei neutrini apparentemente "mancanti" indotti dal ^{7}Be (vedi sez. 2.2) . Al contempo SNO effettuerà una misura dei flussi di ν da tutti i flavour eventualmente provenienti dal sole. Un flusso inferiore rispetto a quello atteso nel canale a correnti neutre costituirebbe una forte indicazione verso modelli con neutrini sterili. In un futuro più lontano, esperimenti realmente innovativi sui neutrini solari non si dovranno limitare a misure di conteggio ma anche di spettro (come SuperKamiokande e Borexino) e possibilmente di bassissima energia (LENCSE, HELLAZ,SuperMUNU) (osservazione dello spettro p-p come mostrato in Fig. 1).

4.3 Discussione ed interpretazioni

Fermo restando la necessità di ulteriori conferme sperimentali, i risultati positivi sin qui ottenuti con i neutrini solari, atmosferici e, in parte, da acceleratori (vedi LSND) hanno generato numerosi tentativi teorici di interpretazione e unificazione [32]. Come discusso nell'introduzione, modelli che introducono termini di massa per i neutrini devono anche tenere conto del problema della materia oscura nell'universo. I neutrini risultano essere naturali candidati di *hot dark matter* con masse intorno alla decina di eV. Va ricordato

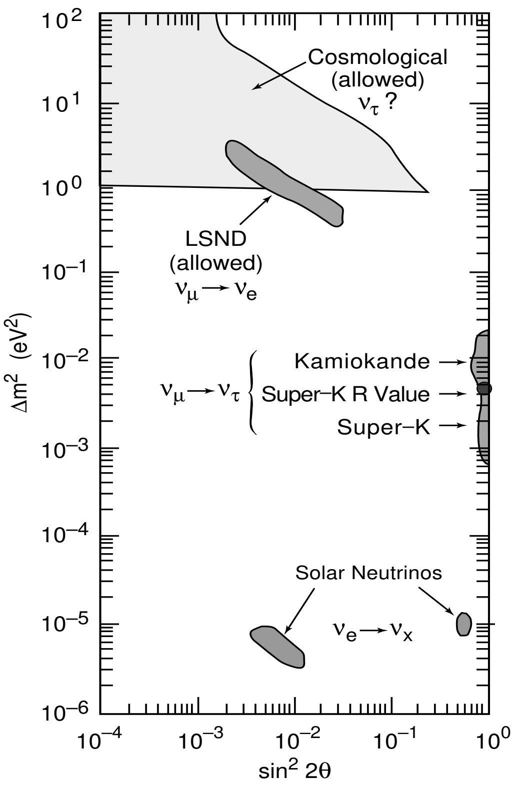


Figura 6: Regioni nel piano Δm^2 $\sin^2 2\theta$ in cui si ha evidenza per oscillazioni dei neutrini.

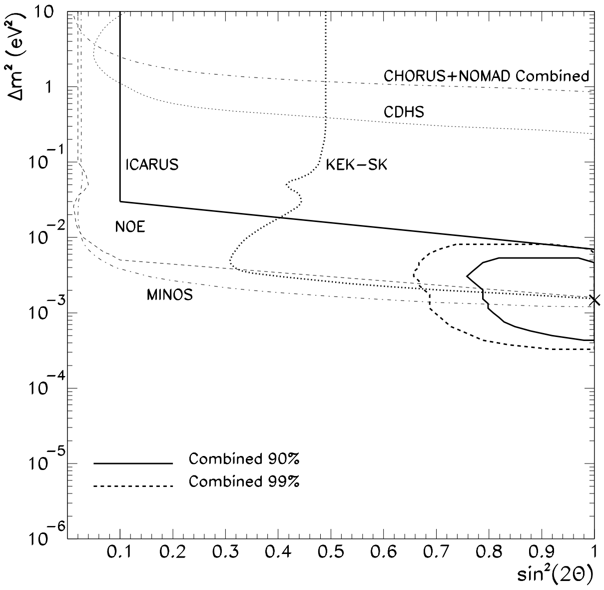


Figura 7: Regioni nel piano Δm^2 $\sin^2 2\theta$ in cui SuperKamiokande ha evidenza per oscillazioni di $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ e confronto con i limiti pubblicati e le regioni esplorate da altri esperimenti sul fascio. .

però che modelli cosmologici basati solo su materia non barionica relativistica come candidati per la materia oscura non sembrano in grado di spiegare le strutture osservate delle galassie, favorendo modelli "misti" (barioni, assioni e neutrini come candidati per materia oscura).

Mantenendo il numero dei neutrini a tre, è possibile ricondurre le misure sui neutrini atmosferici e solari ad oscillazioni $\nu_\mu - \nu_\tau$ (i primi) e $\nu_e - \nu_\mu$ (i secondi). In questo quadro un modello attraente è quello già accennato descritto in [2] per la gerarchia di masse che propone. Risulta però incompatibile l'inclusione del risultato di LSND (che vede oscillazioni $\nu_\mu \to \nu_e$).

Un relativo successo nel mettere insieme i vari risultati e' stato ottenuto con modelli a quattro neutrini, i tre noti più un quarto sterile (ν_s), che interagisce con in bosoni W e Z in maniera molto piu' debole che i neutrini dello SM. Come gia' detto in sez. 1.4, in questo caso e' importante per il futuro avere energie dei neutrini sotto soglia di produzione del τ ed una misura del rapporto tra interazioni a corrente carica (CC) e quelli a corrente neutra (NC) o direttamente del rate di interazioni NC.

5 Conclusioni

Gli esperimenti attualmente in presa dati o in fase di costruzione dovrebbero chiarire entro il 2001/2002 alcuni aspetti importanti della situazione sperimentale attuale (SK con più statistica, SNO, Borexino, K2K). Come suggerito in [3] è opportuno distinguere tra esperimenti che forniscono *evidenze di mixing* e *evidenze di oscillazioni*. Nella prima categoria ricadono gli esperimenti che registrano rate *totali* anomali di eventi da neutrino, mentre nella seconda quelli che effettuano una più delicata osservazione di *spettri* di eventi in funzione di L e di E. Gli esperimenti di cui sopra appartengono a quest'ultima categoria e nuove proposte future non possono che porsi come obiettivo misure di questo tipo perche' sono le uniche che permetteranno di effettuare una misura vera e propria dei parametri di mixing.

Per le oscillazioni di neutrino le direzioni di ricerca possibili appaiono quindi essere le seguenti:

- ν_e
  Effettuare misure di spettri di neutrini solari, inclusi quelli della catena p-p per capire quali sono le sorgenti (p-p, ^{7}Be ...) che mostrano un deficit. In parallelo occorre chiarire la situazione riguardo ai risultati contraddittori di LSND e Karmen investigando ad acceleratori la regione con $\Delta m^2 \approx 1$ eV^2 e $\sin^2 2\theta$ dell'ordine di 10^{-3} (quindi piu' bassi della zona coperta da Chooz). Per far questo occorrono rivelatori con capacità di chiara separazione tra interazioni di ν_e e ν_μ e fasci di intensita' maggiore di quelli finora usati;

- ν_μ
  Sull'onda dei risultati di SuperKamiokande e' necessaria una misura di precisione della frequenza di interazioni in funzione di distribuzione L/E. La regione di Δm^2 di SuperKamiokande puo' essere coperta esperimenti a scomparsa sia con un long-baseline o con neutrini atmosferici . Il parametro sperimentale più critico risulta

la misura dell'energia del muone, anche per alte (decina di GeV) energie per raggiungere Δm^2 piu' piccoli. Ricordiamo pero' che i risultati di SuperKamiokande si riferiscono a soli eventi quasi-elastici ($E_\nu \approx$ 1 GeV): poter osservare e ricostruire eventi di maggiore complessita' pemetterebbe un notevole aumento di statistica e la possibilita' di misure piu' precise. Inoltre questi tipi di esperimenti dovranno permettere anche una buona misura di interazioni ν_e perche' e' solo dallo studio comparato dei flussi ν_e, ν_μ che e' possibile una buona determinazione dei parametri di mixing [2].

- $\nu_{\tau,s}$

  Per gli esperimenti long-baseline a comparsa del τ la misura si presenta estremamente difficile perche', sebbene l'osservazione di pochi eventi τ sarebbe interessante di per se, bisognera' ricorrere a rivelatori ad elevata granularità e grande massa per poter avere una statistica sufficiente alla misura precisa in funzione di L/E e dei parametri di oscillazione.

  Per i vari esperimenti (con neutrini solari, da fascio o da atmosferici), occorre progettare esperimenti capaci di misurare interazioni NC e CC per evidenziare l'oscillazione in neutrini sterili ;

Riferimenti bibliografici

[1] Boris Kayser with Francoise Gibrat Debu and Frederic Perrier "The Physics of Massive Neutrinos", World Scientific Lecture Notes in Physics, Vol. 25.

[2] G.L. Fogli et al., hep-ph/9808205.

[3] G.L. Fogli et al., hep-ph/9706230.

[4] D.O. Caldwell et al., Phys. Rev. D 48, 3259 (1993).

[5] Yusuke Koshio for Super-Kamiokande Collaboration, "Recent results from Super-Kamiokande", (5-3-1998).

[6] "Measurements of Solar Neutrino Flux from Super-Kamiokande's First 300 Days", (17-6-1998).

[7] J.N. Bachall,hep-ph/9702257.

[8] J.N. Bachall et al., hep-ph/9807216.

[9] The Super-Kamiokande Collaboration, "Evidence for Oscillation of atmospheric neutrinos", hep-ex/9807003.

[10] The MACRO Collaboration, "Measurements of the Neutrino-induced upgoing muon flux using MACRO", hep-ex/9807005.

[11] G.L. Fogli et al., Phys. Rev. D 55, 4358 (1997).

[12] "Initial Results from the CHOOZ Long Baseline Reactor Neutrino Oscillation Experiment", hep-9711002.

[13] The NOMAD Collaboration, "A search for $\nu_\mu \to \nu_\tau$ oscillations using the NOMAD detector", CERN-EP/98-57, (9-4-1998).

[14] The CHORUS Collaboration,"Search for $\nu_\mu \to \nu_\tau$ oscillation using the τ decay modes into a single charged particle", CERN-EP/98-73, (13-5-1998).

[15] "KARMEN limits on $\nu_e \to \nu_\tau$ Oscillations in $2-\nu$ and $3-\nu$ Mixing Schemes", hep-ex/9801007, (8-1-1998).

[16] "The Search for Neutrino Oscillations $\bar{\nu_\mu} \to \bar{\nu}_e$ with KARMEN", K. Eitel and B. Zeinitz for the KARMEN Collaboration, hep-ex/9809007, (9-9-1998).

[17] "Evidence for Neutrino Oscillations from the LSND Experiment", (URL: http://www.neutrino.lanl.go3v/LSND/DNP.html).

[18] vedi http://www.hep.anl.gov/NDK/Hypertext/nuindustry.html per gli indirizzi web di molti degli esperimenti citati qui' di seguito.

[19] T. Ypsilantis et al. , CERN LPC-92-31.

[20] S.R. Bandler et al., Phys. Rev. Lett. 74, 3169 (1997)

[21] C. Broggini, talk given at Erice school (1997)

[22] Nucl. Instr. and Methods, A396, 115 (1997)

[23] R. S. Raghavan, " Real time spectroscopy of solar pp Neutrinos and $\nu_e$capture in ^{176}Yb, unpublished; R. S. Raghavan Phys. Rev Lett. 78 (1997) 3618.

[24] R.E. Lanou, hep-ph/9808033.

[25] , P. Picchi et al. hep-ph/9805249.

[26] J. Finney et al., http://www.isis.rl.ac.uk/ess/essintro.htm

[27] G. Drexlin et al., http://www.isis.rl.ac.uk/ess/neut_ess.htm

[28] T.A. Gabriel et al., http://www.phys.subr.edu/HE-group/orland.htm

[29] G. Battistoni e P. Lipari, hep-ph/9807475

[30] C. Acquistapace et al., preprint INFN/AE-98/05 (1998)

[31] M.C. Gonzales-Garcia et al., Contirbution to Vancouver ICHEP98 Conference.

[32] J. Valle , hep-ph/9809234v2.