

Il Problema dei neutrini solari

Dall'esperimento di Homestake fino a SNO e KamLAND

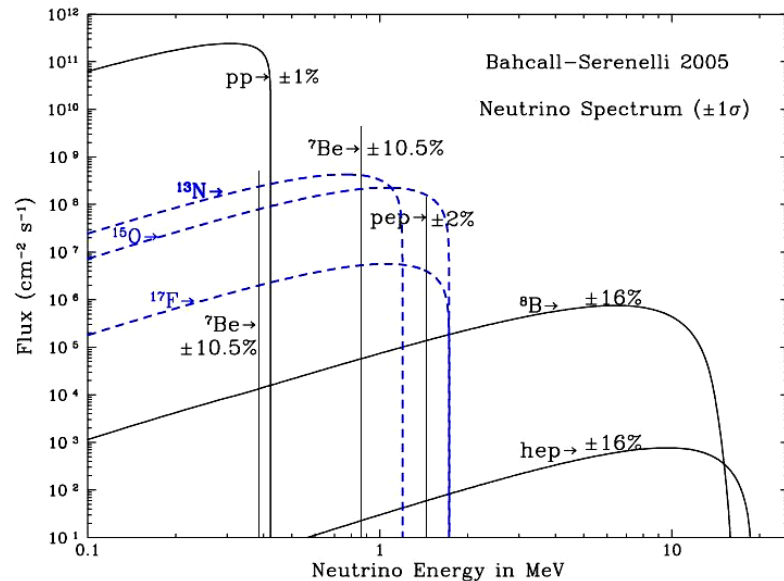
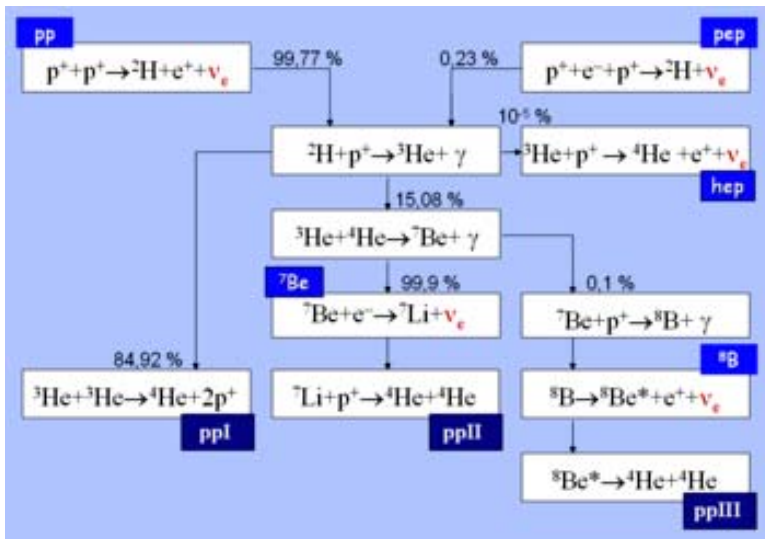
- 1)SSM (Solar Standard Model)
- 2)Homestake
- 3)Gallex – GNO
- 4)Kamiokande e Super Kamiokande
- 5)Massa e Oscillazione dei neutrini
- 6)SNO
- 7)KamLAND

Nicola Casali

Standard Solar Model (SSM)

L'idea dello studio dei neutrini solari nasce soprattutto come esigenza di verificare lo SSM .

Note le altre caratteristiche solari (luminosità, temperatura, etc) è possibile prevedere esattamente il flusso a terra di neutrini elettronici.



$$\Phi_{\nu_e}^{TOT} \approx 6.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

L'Idea

B. Pontecorvo propose nel 1951 di sfruttare la seguente reazione per rivelare i neutrini emessi dal sole:



La soglia per questa reazione è di 0.813 MeV



L'esperimento è sensibile in prevalenza ai neutrini solari derivanti dalla catena p-p III prodotti dal:



Queste premesse danno il via all'esperimento condotto da R. Davis nella miniera di Homestake.



1° Esperimento radiochimico per la rivelazione dei neutrini solari (Homestake 1964 – 1997)

La sezione d'urto del processo è molto bassa:

$$(1.14 \pm 0.04) \times 10^{-42} \text{ cm}^2$$

Si deve guadagnare sulle dimensioni del rivelatore poiché la frequenza di interazione teorica è altrettanto bassa!

$$\text{Eventi (Hz)} = \Phi_{\nu_e}^{8B} \times \sigma \approx 10^{-36} \rightarrow 1 \text{ SNU}$$

Con una vasca di grande volume (378000 l) riempita con tetracloroetilene si potevano ottenere circa da 4 a 11 eventi di interazione al giorno.

L'Argon radioattivo prodotto nell'interazione tra cloro e neutrini viene estratto dal bersaglio, con un procedimento chimico, e contato grazie al suo decadimento.



Risultato dell'esperimento e possibili interpretazioni

Il flusso dei neutrini solari era solamente 1/3 di quello aspettato:

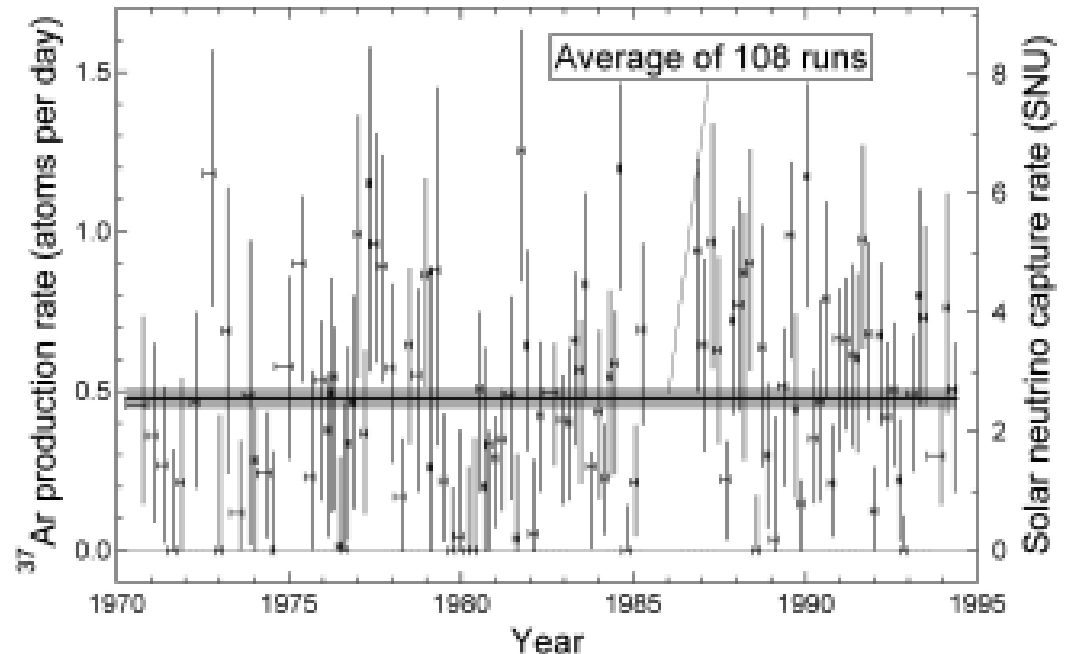
$(2,56 \pm 0.16) \text{ SNU}$ [$1 \text{ SNU} = 10^{-36}$ neutrini catturati/(atomi sec)]

rispetto ai $(7.6 \pm 1.1) \text{ SNU}$
previsti nel SSM.

$$\frac{\Phi_{spe}}{\Phi_{teo}} \approx \frac{1}{3}$$

Le tre possibili spiegazioni:

- 1) Il SSM è errato
- 2) L'esperimento di Homestake è errato
- 3) I neutrini possiedono una massa ed oscillano nei loro tre possibili stati di sapore leptonic



Ancora esperimenti radiochimici: GALLEX e GNO (Gran Sasso 1991 – 2003)

Entrambi questi esperimenti sfruttano la reazione: $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$

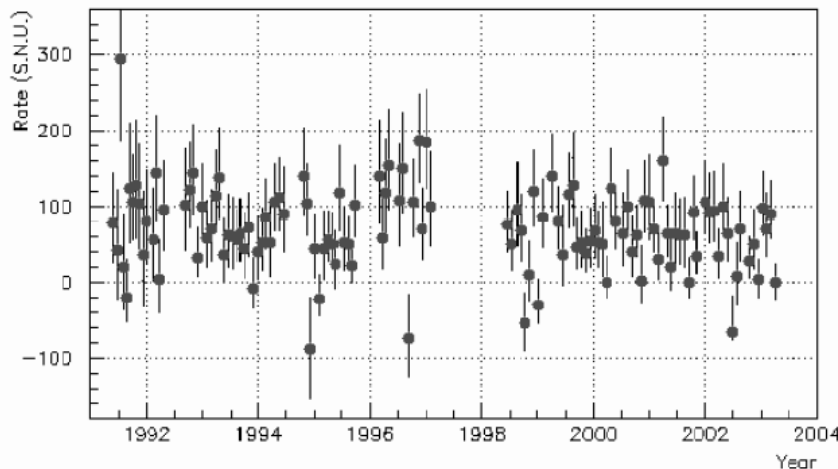
La differenza sostanziale rispetto al precedente esperimento è la soglia della reazione: questa volta è 0.233 MeV → sono sensibile anche ai neutrini provenienti dalle reazioni primarie del ciclo p-p.



sono sensibile a molti più eventi!

Il rivelatore consiste in 100 tonnellate di soluzione acquosa in cui sono disciolti circa 30 tonnellate di Gallio.

I risultati:



→ $(67,6 \pm 3,7)$ SNU
da confrontare con un
valore teorico di (128 ± 7) SNU

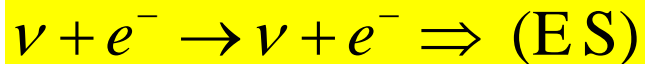
$$\frac{\Phi_{spe}}{\Phi_{teo}} \approx \frac{1}{2}$$

Evoluzione degli esperimenti

Da esperimenti radiochimici, che misurano il flusso medio su tempi dell'ordine del mese, si passa ad esperimenti detti in tempo reale, i quali rivelano il singolo evento di interazione istantaneamente.

Questo grazie alla luce Cherenkov emessa da particelle veloci prodotte nell'interazione dei neutrini con la materia.

Ad esempio:



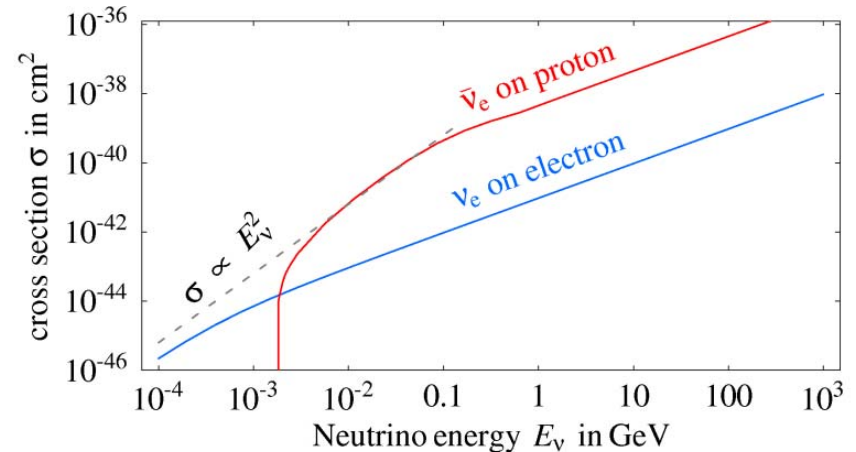
$$\sigma(\nu_e) = 0.93 \times 10^{-41} \text{ cm}^2 E_\nu / \text{GeV}$$

$$\sigma(\nu_\mu, \nu_\tau) = 0.18 \times 10^{-41} \text{ cm}^2 E_\nu / \text{GeV}$$

(Kamiokande, Super Kamiokande)

I vantaggi di questo tipo di esperimenti sono molteplici:

- 1) La reazione è accessibile a tutti i neutrini $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$
- 2) La direzione di scattering dell'elettrone è fortemente dipendente da quella del neutrino iniziale

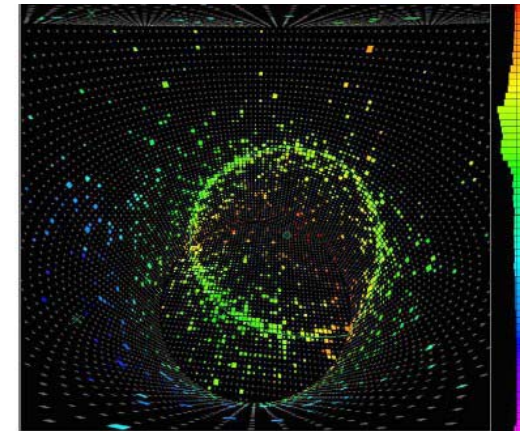
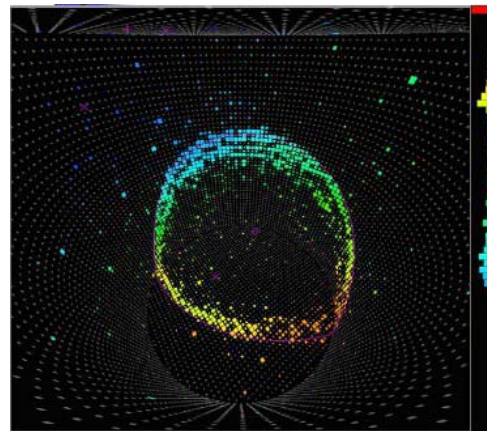
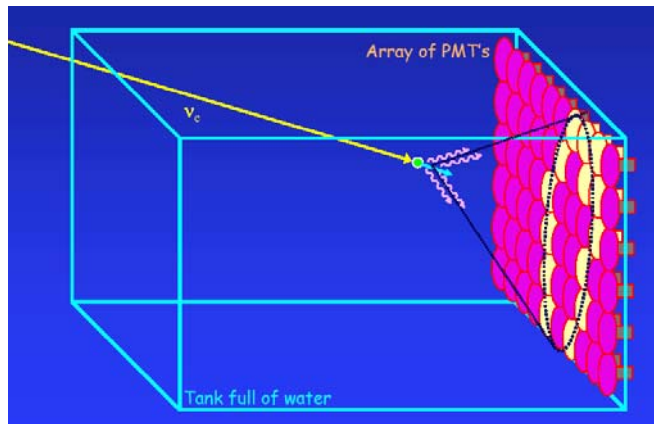
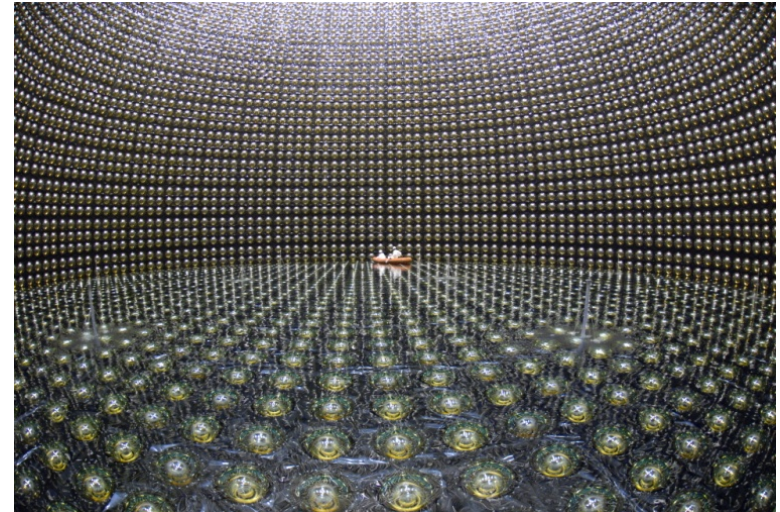


Kamiokande & SuperKamiokande (1983 – OGGI)

Un grande vasca cilindrica ([D=16.5 m, h=16m] K; [D=39.3m, h=41,4m] SK) riempita con acqua pura; la superficie interna ricoperta con (1000 K; 11000 SK) fotomoltiplicatori di 50 cm di diametro. La soglia per l'emissione di luce C in acqua è di $\beta = 0.75$

La rivelazione di un evento è associata alla rivelazione del caratteristico “ring” emesso dalla radiazione Cherenkov.

Dal ring si può inoltre risalire alla direzione dell'elettrone diffuso, noto il tempo di arrivo dei fotoni sui fotomoltiplicatori.



Risultati riguardo il flusso di neutrini solari per K & S K

L'energia di soglia per registrare un evento venne fissata a 9.3 MeV abbassata poi a 7 MeV, per diventare infine 5 MeV ne SK.

Con tali condizioni l'esperimento è sensibile solo ai neutrini provenienti dalla reazione 8B

I risultati:

$$K \quad \Phi(\nu_e) = (2.80 \pm 0.19) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

$$SK \quad \Phi(\nu_e) = (2.35 \pm 0.02) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

$$\frac{\Phi_{spe}}{\Phi_{teo}} \approx \frac{1}{2}$$

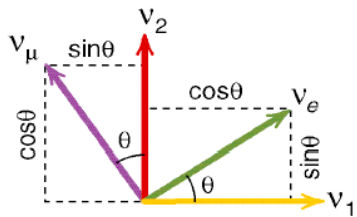
Nel frattempo lo SSM era stato verificato e non sembrava essere sbagliato; allo stesso tempo più esperimenti in tutto il mondo confermavano il deficit di neutrini solari

L'ipotesi di neutrini con massa e la possibilità di oscillazione

In analogia a ciò che accade nel settore dei quark, si può pensare che gli autostati di flavor ν_e, ν_μ, ν_τ delle interazione deboli, siano una combinazione lineare degli autostati di massa ν_1, ν_2, ν_3 che descrivono la propagazione fisica del neutrino; questi differenti autostati sono legati dalla seguente matrice U:

$$\nu_\alpha \equiv \sum_i U_{\alpha,i} \cdot \nu_i$$

Per adesso poniamoci nel caso semplici di due autostati di massa e di flavor.



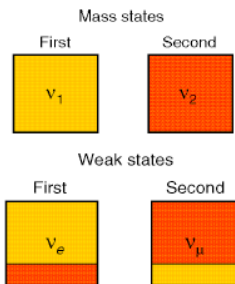
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \mathcal{G} & \sin \mathcal{G} \\ -\sin \mathcal{G} & \cos \mathcal{G} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$|\nu_e\rangle = \cos \mathcal{G} |\nu_1\rangle + \sin \mathcal{G} |\nu_2\rangle \Rightarrow \text{per } t = 0$$

$$|\nu_e(t)\rangle = e^{-iE_1 t} \cos \mathcal{G} |\nu_1\rangle + e^{-iE_2 t} \sin \mathcal{G} |\nu_2\rangle$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu)$$

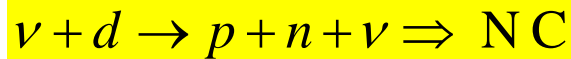
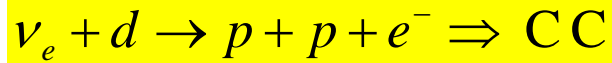


$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \left| \langle \nu_\mu | \nu_e(t) \rangle \right|^2 = \sin^2(2\mathcal{G}) \sin^2(\Delta M^2 L / 4E)$$

SNO (Sudbury Neutrino Observatory 1999 - 2006)

E' un esperimento in tempo reale: il rivelatore contiene 1000 T di acqua pesante D_2O , con una superficie ricoperta da 10000 fototubi.

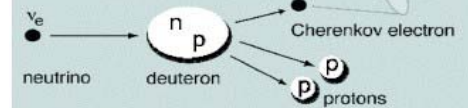
Tre reazioni possono essere osservate con il deuterio:



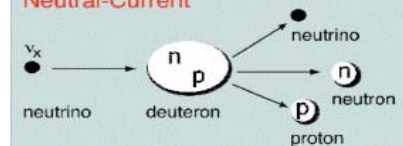
SNO può dare una misura diretta del flusso solare di neutrini indipendentemente dal loro flavor e quindi indipendentemente dalle loro oscillazioni!



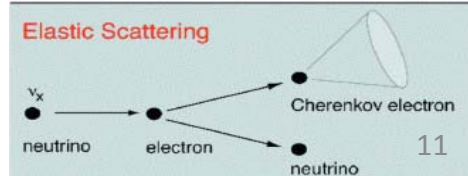
Charged-Current



Neutral-Current



Elastic Scattering



Risultati (eventi osservati per ogni reazione)

$$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \Rightarrow CC \rightarrow 1833 \pm 174$$

$$\nu + d \rightarrow p + n + \nu \Rightarrow NC \rightarrow 717 \pm 177$$

$$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^- \Rightarrow (\text{scattering elastico}) \rightarrow 273 \pm 27$$

$$\Phi(\nu_e) = \Phi(CC)$$

$$\Phi(\nu_\mu, \nu_\tau) = \Phi(NC) - \Phi(CC)$$

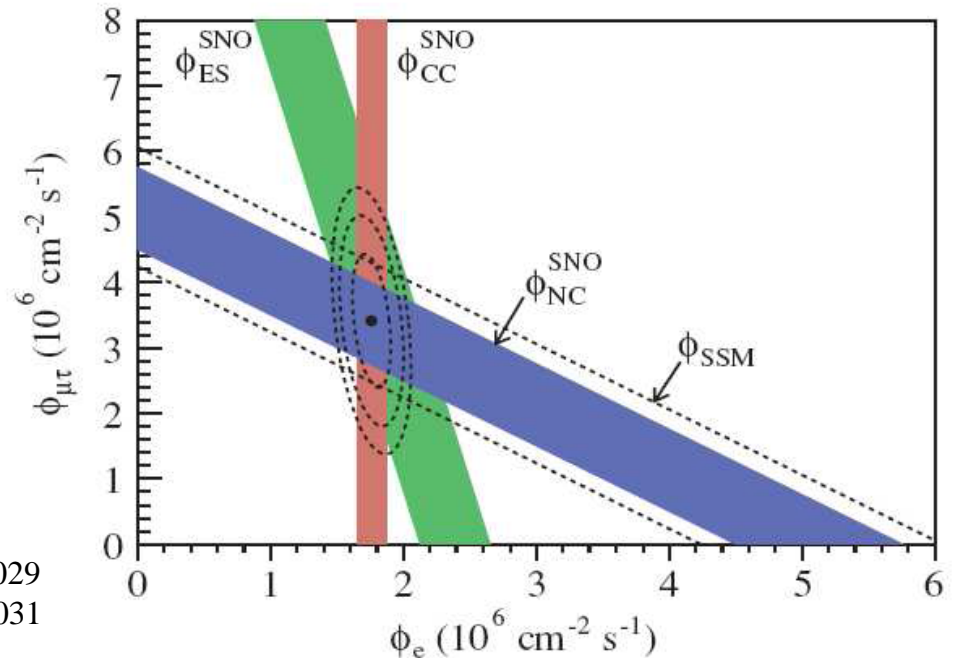
$$R_{ee} = \Phi(CC)/\Phi(NC) = 0.34 \pm 0.023_{-0.031}^{+0.029}$$

Conclusioni

$$\Phi(CC) = 1.76_{-0.05}^{+0.06} \text{stat} \text{ }_{-0.09}^{+0.09} \text{syst}$$

$$\Phi(ES) = 2.39_{-0.23}^{+0.24} \text{stat} \text{ }_{-0.12}^{+0.12} \text{syst}$$

$$\Phi(NC) = 5.09_{-0.43}^{+0.44} \text{stat} \text{ }_{-0.43}^{+0.46} \text{syst}$$



1) 2/3 dei ν_e raggiungono la terra come ν_μ e/o ν_τ

2) Il flusso totale di neutrini è in accordo con il SSM

Verifica oscillazione dei neutrini

Come si possono verificare le oscillazioni dei neutrini solari ad un reattore?



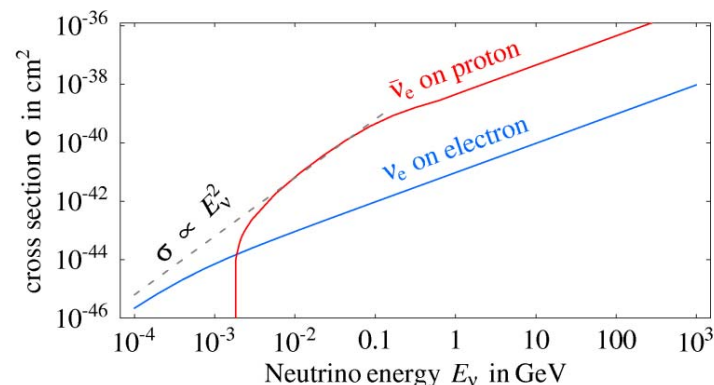
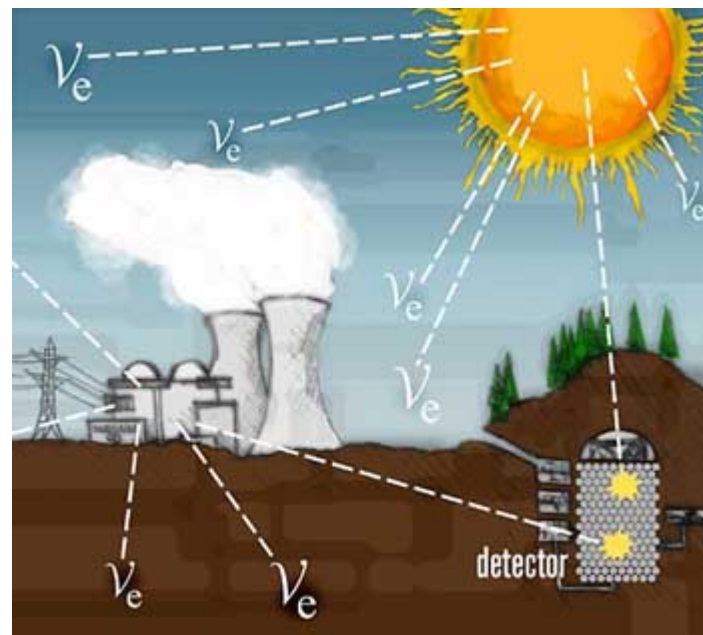
$$D_{T-S} \approx 150 \text{ milioni di Km} \quad D_{\text{Reattore}} \approx 150 \text{ Km}$$

$$E_{\nu_e} \approx \text{qualche MeV} \quad E_{\bar{\nu}_e} \approx \text{qualche MeV}$$

In presenza di materia la formula di oscillazione si complica (Teoria MSW).

Se le oscillazioni dei neutrini avvengono su distanze dell'ordine di 1 U.A. un esperimento ai reattori non vedrebbe nulla!

Con i risultati di SNO però si afferma, quella che viene chiamata, teoria del Large Mixing Angle (LMA) e di conseguenza un ΔM che fissava le scale di L/E ad un valore tipico degli esperimenti ai reattori. Quindi se LMA è vera, questi esperimenti, devono misurare le oscillazioni dei neutrini!



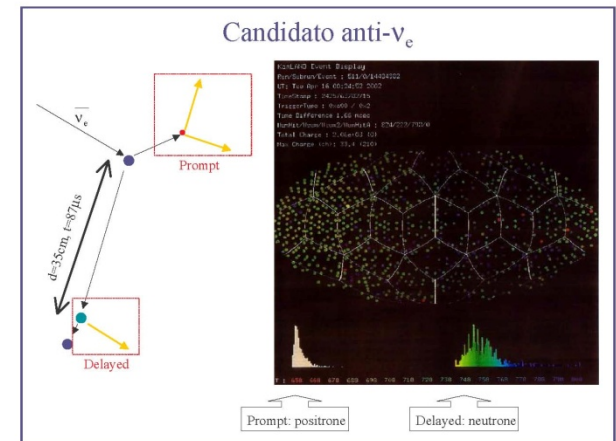
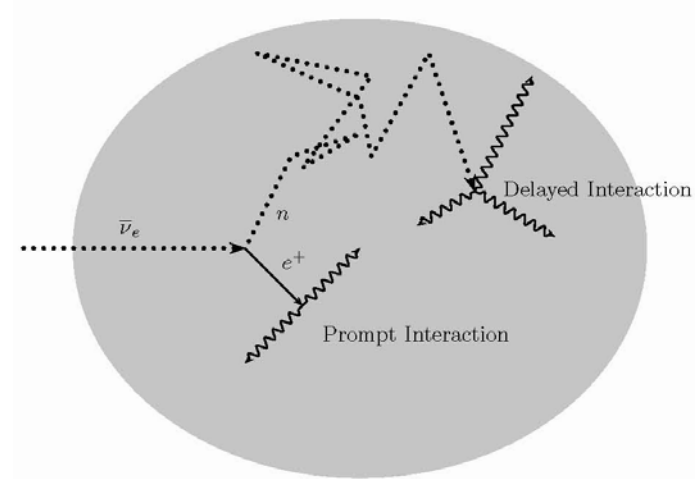
Neutrini da Reattore

Gli esperimenti ai reattori osservano la seguente reazione:



Il rivelatore consiste in una vasca contenente uno scintillatore liquido circondato da fotomoltiplicatori.

L'interazione viene rivelata tramite una coincidenza tra il segnale del positrone e il segnale ritardato dovuto all'emissione di un raggio γ , conseguenza della cattura del neutrone. Si può risalire all'energia del neutrino considerando l'impulso del neutrone trascurabile, secondo la relazione:



$$T(e^+) = E(\bar{\nu}_e) + m(p) - m(n) - m(e) = E(\bar{\nu}_e) - 1.8 \text{ MeV}$$

La conferma ai reattori: KamLAND (2002 – 2004)

Il primo esperimento con reattori a grande distanza: 53 potenti reattori intorno a KamLAND ad una distanza media di 150 Km;

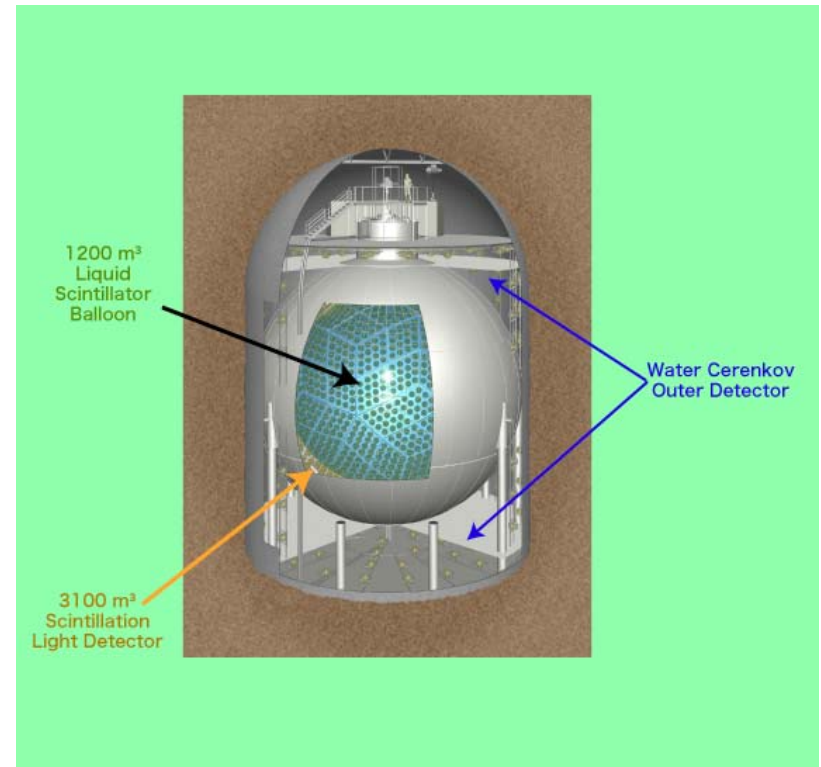
il rivelatore consiste in 1000 T di scintillatore puro circondato da 1879 fotomoltiplicatori; il tutto sospeso in olio non scintillante.

La probabilità di sopravvivenza del $\bar{\nu}_e$ è:

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu) = \\ = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(1.27 \Delta M^2 L / E)$$

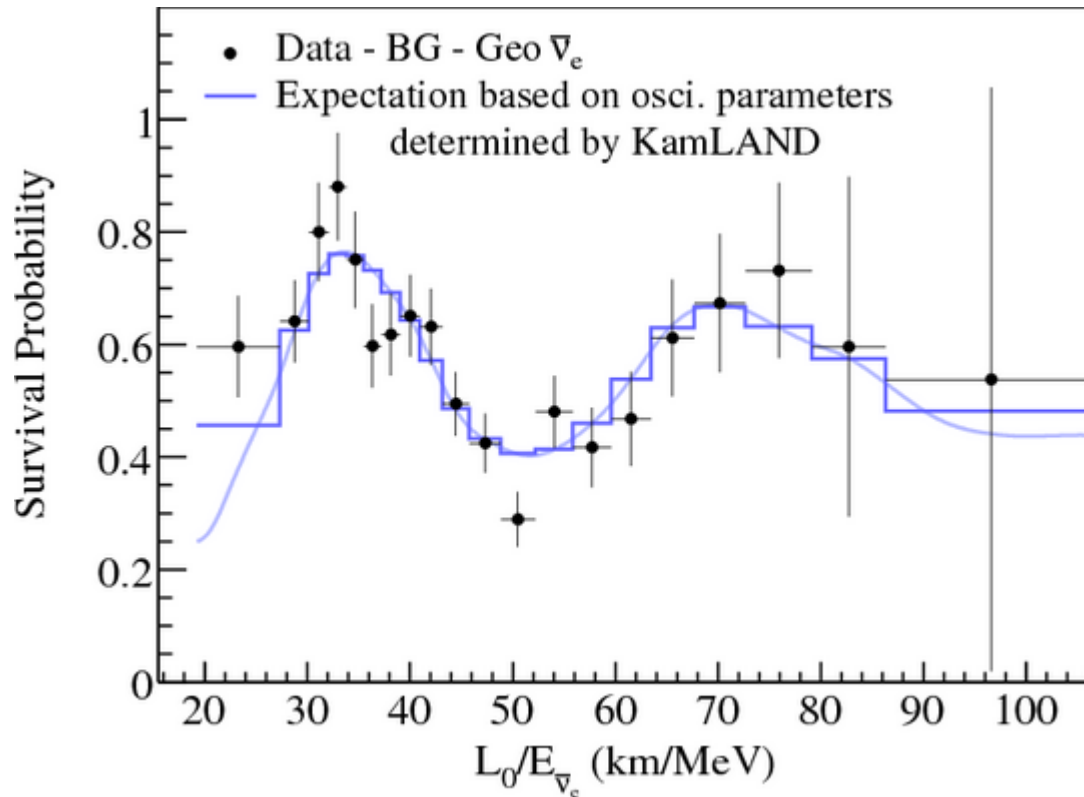
Noto il flusso di neutrini alla sorgente; misurato quello a KamLAND, si ha una misura diretta della probabilità di sopravvivenza e quindi dei parametri di oscillazione:

θ & ΔM



Risultati

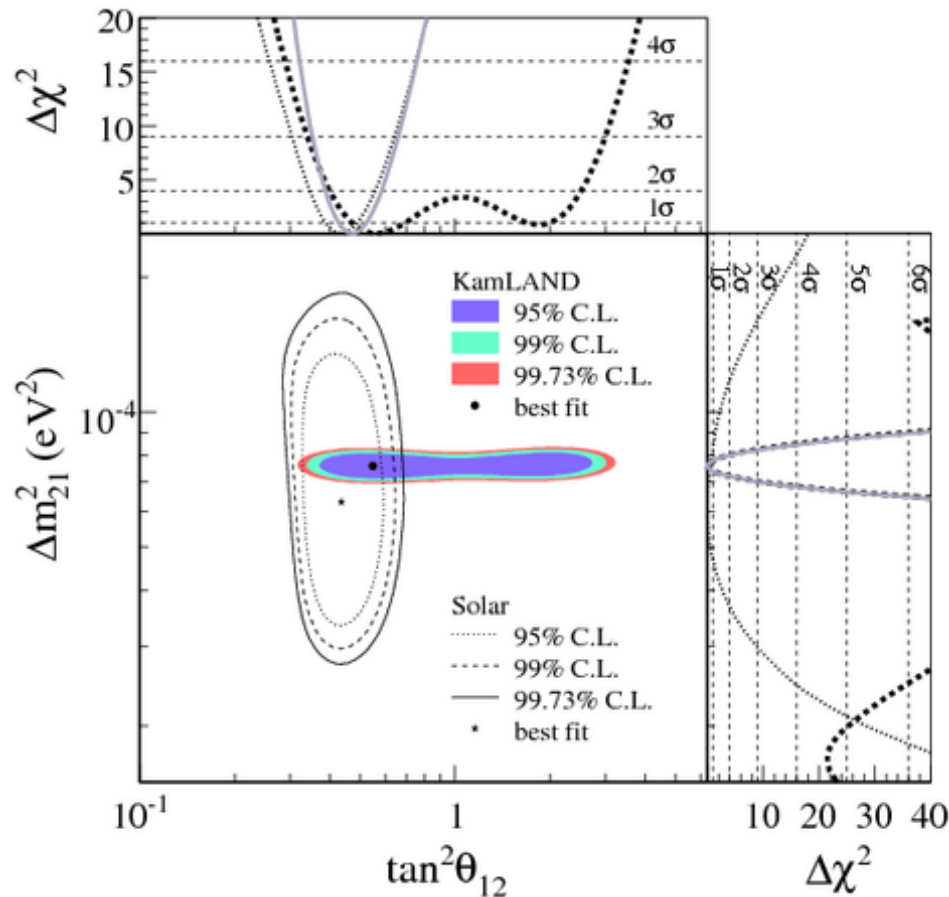
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 0.658 \pm 0.044_{stat} \pm 0.047_{syst}$$



Conclusioni

I neutrini possiedono una massa ed oscillano nei loro autostati di flavor.

Riassumendo e comparando tutti gli esperimenti precedentemente descritti si può arrivare a questa conoscenza dei parametri di oscillazione per i neutrini solari:



$$\Delta M^2 = \left(7.59^{+0.21}_{-0.21}\right) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\tan^2 \mathcal{G} = 0.47^{+0.06}_{-0.05}$$

$$\mathcal{G} \cong 34^\circ$$