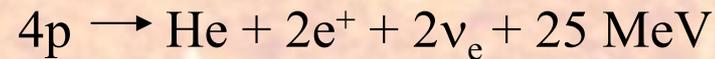


Neutrini solari

Daniele D'Armiento

- Il sole emette neutrini, creati nelle reazioni responsabili di tutta la produzione energetica

- La reazione complessiva è



L'energia viene in parte liberata nello spazio sotto forma di fotoni e in parte mantenuta come energia cinetica del plasma

Lo studio dei neutrini solari ci permette di

- capire i meccanismi che avvengono nel sole
- ottenere informazioni sui neutrini
(es. scoperta dell'esistenza dell'oscillazione dei sapori di neutrino)

- Il flusso di neutrini dal sole è collegato alla sua luminosità mediante le reazioni previste dallo Standard Solar Model (SSM)
- $L_{\alpha} = 3.85 \cdot 10^{26} \text{ W}$, $N_{\nu} = 2 L_{\alpha} / Q = 1.8 \cdot 10^{38} \text{ v/s}$
- Il flusso osservato a Terra è quindi $6.4 \cdot 10^{10} \text{ v (cm}^2 \text{ s)}^{-1}$
- Nonostante l'enorme flusso, la rivelazione di neutrini è resa difficile dalla bassissima probabilità d'interazione con la materia
($\sigma_{\text{debole}} \sim 10^{-40} \text{ cm}^2$, mentre $\sigma_{\text{forte}} \sim 1 \text{ mbarn}$)

Si può ottenere perciò la frequenza di interazione tra un ν e un bersaglio:

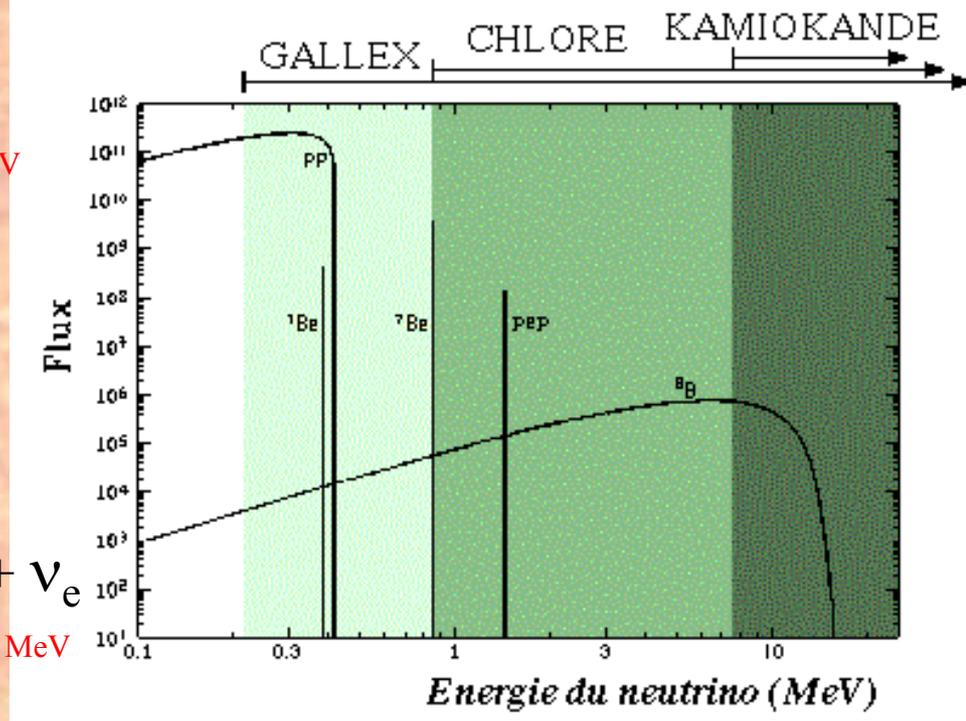
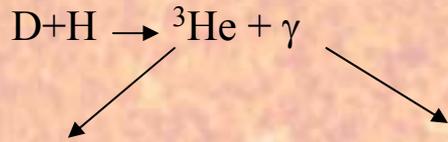
$$dN/dt = \sigma \cdot \phi$$

Si definisce il valore di $10^{-36} \text{ v s}^{-1}$ come **1 SNU**

Modello solare

- Equilibrio idrostatico e termico
- Enorme dipendenza dalla temperatura
- Dipendenza dalla profondità di produzione

Le principali reazioni che avvengono nel sole



Rivelare questi neutrini con queste energie significa confermare l'esistenza di queste reazioni nel sole

Rivelazione di neutrini

Sono due i modi più comunemente usati per rivelare i ν

- Esperimenti radiochimici

Forniscono il flusso integrato, in quanto la misura avviene con l'estrazione dei prodotti della reazione che innesca il ν , alla fine dell'acquisizione.

Le soglie di rivelazione possono raggiungere valori di energia molto bassi, rappresentano quindi l'unica possibilità di rivelazione di neutrini al di sotto di 1 MeV

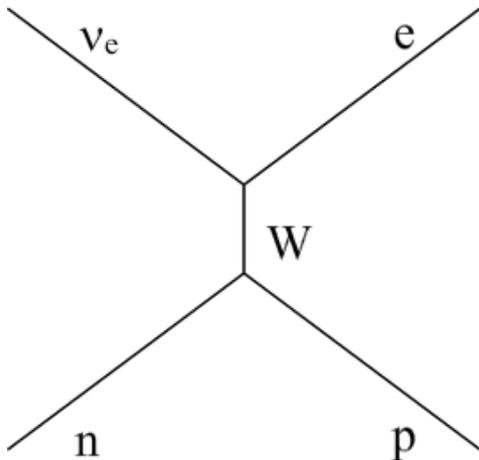
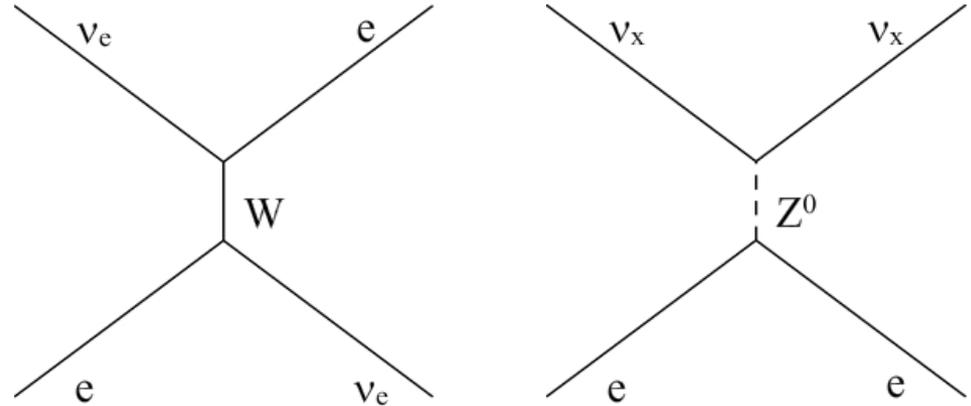
- Esperimenti in tempo reale

- Esempio SuperKamiokande, che misura l'energia e la direzione del neutrino fornendo uno spettro differenziale, sensibile solo a energie >5 MeV

E' necessario eseguire gli esperimenti sotto uno spesso strato di roccia per evitare il rumore costituito dai raggi cosmici

Nel secondo tipo di esperimenti, dove ad esempio il neutrino interagisce in acqua, avviene uno scattering $\nu + e^-$.

I ν_e possono interagire sia con corrente neutra che carica mentre i $\nu_{\mu,\tau}$ possono interagire solo con correnti neutre.

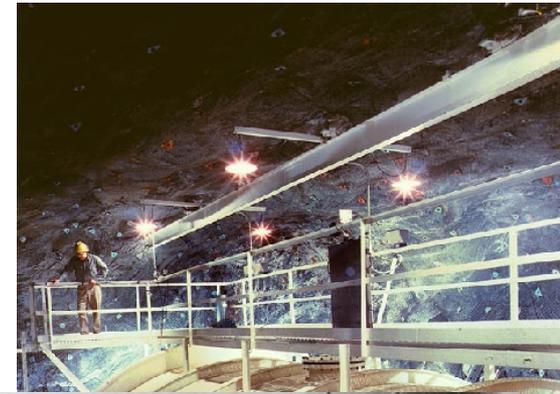


La prima misura effettuata sui neutrini solari fu eseguita da Davis e consisteva nel primo tipo (radiochimico): una piscina riempita con tetracloroetilene, nel quale il ν interagisce con corrente carica e trasforma un atomo di ^{37}Cl in ^{37}Ar

Esperimento di Davis (1968)

- Serbatoio di 26.000 litri di C_2Cl_4 ,
localizzato in una miniera a 1500m sotto terra
- Si osserva solo il numero di neutrini, ma non la direzione
- L'Ar prodotto viene poi estratto con elio e rivelato mediante
successivo decadimento in Cl con emissione di un e^-
(periodo di circa 35 giorni)

- I ν facilmente osservabili sono quelli del 8B
hep troppo pochi
- Stimati 6 SNU dalla catena p-p



Si osservano 1/3 dei ν aspettati: (2.56 ± 0.23) SNU

Possibili cause:

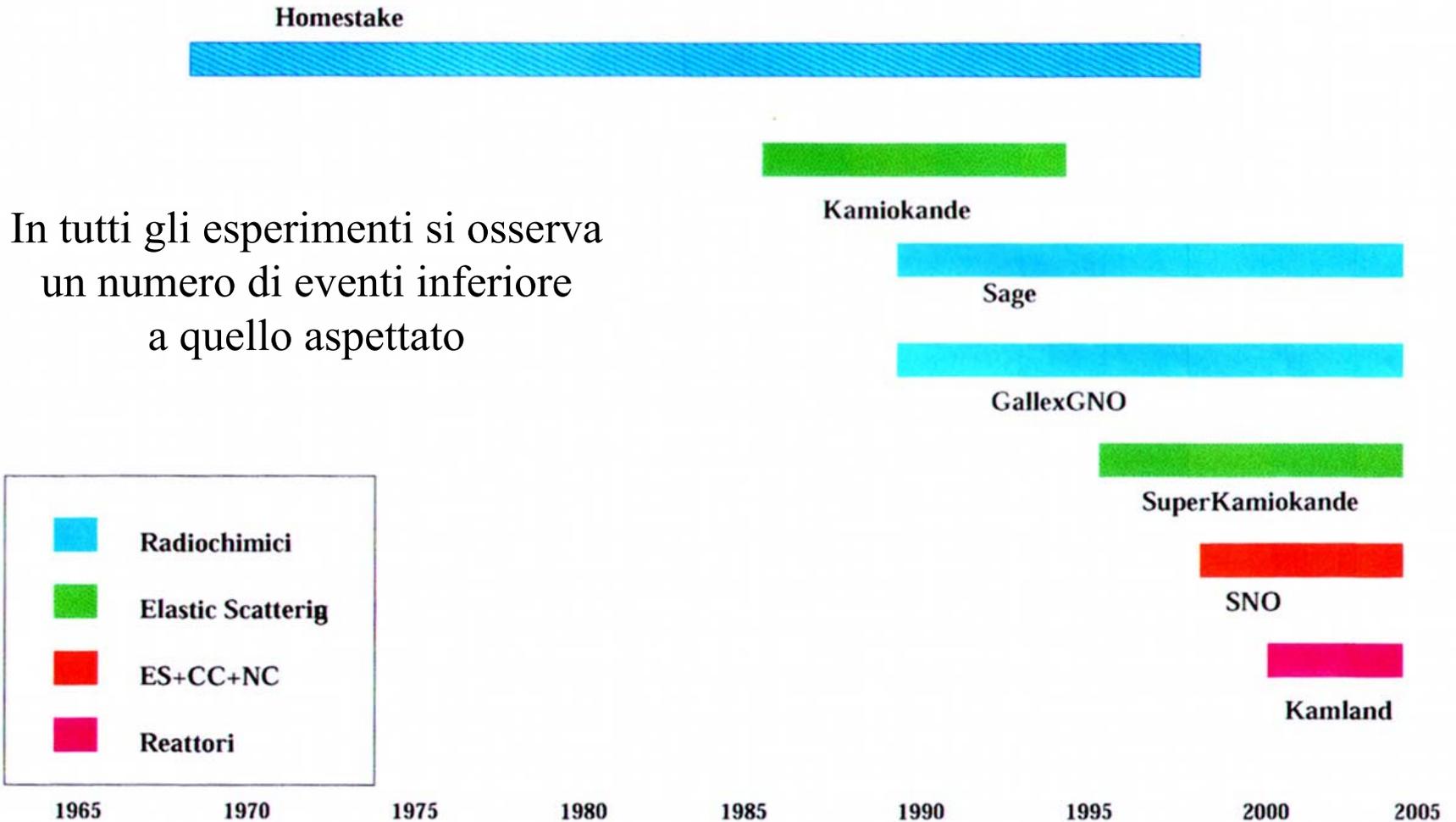
- È sbagliato il modello solare?
- È sbagliata la misura
o il calcolo della σ per l'interazione $\nu+Cl$?
- E' sbagliata la fisica del ν ?

Successiva
verifica del
modello solare
(Bahcall)

Successivi esperimenti
confermano il risultato

Ipotesi dell'oscillazione (Pontecorvo, Gribov)

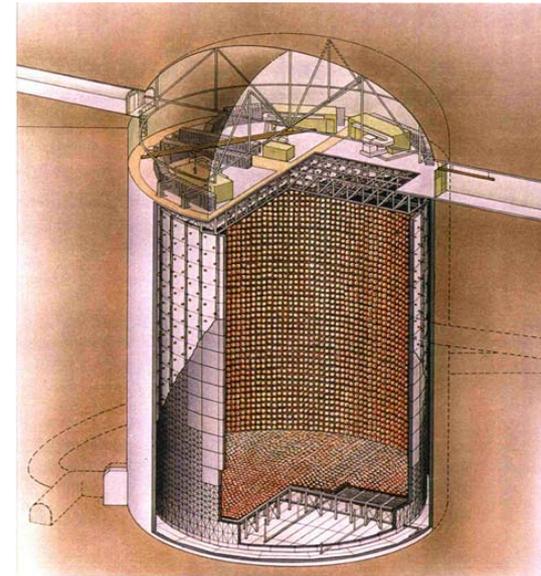
Esperimenti sui neutrini solari: timetable



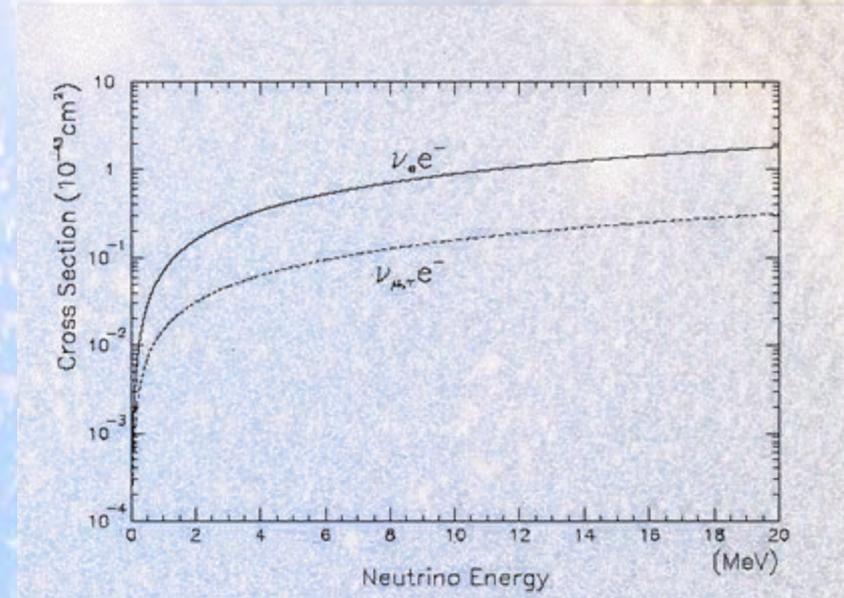
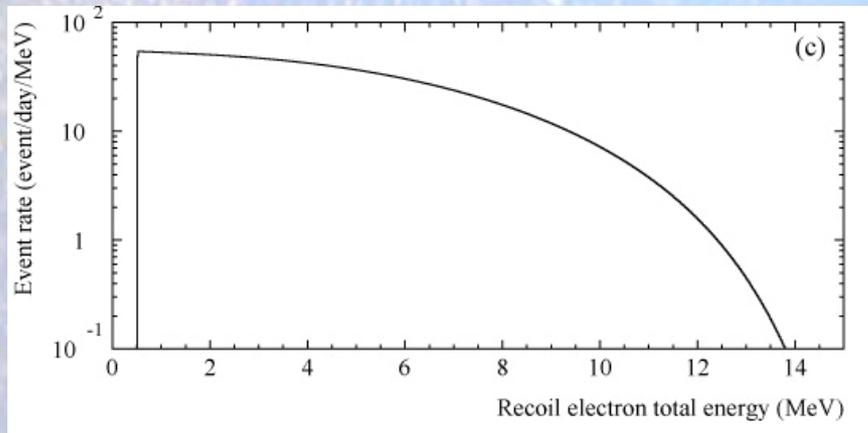
SuperKamiokande

Operativo dal 1996, ha un volume totale di 50kton d'acqua come bersaglio per l'interazione $\nu + e^- \longrightarrow \nu + e^-$

- Serbatoio cilindrico alto 41.4 m , diametro 39.3m
- Rivelatore interno da 32kton, h=36.2m, $\phi=33.8m$
- Volume fiduciale 22kton
- 11146 PMT, risoluzione temporale 3ns
- Aria purificata pompata dalla cupola per evitare contaminazione del Radon



- L'enorme volume d'acqua è il bersaglio per i neutrini \longrightarrow scattering elastico
- L'elettrone di rinculo emette radiazione Cherenkov, che viene rivelata dai fotomoltiplicatori (soglia per gli $e^- = 0.77\text{MeV}$)
- Si misura l'energia e la direzione d'incidenza dell'elettrone, fortemente correlata con quella del ν

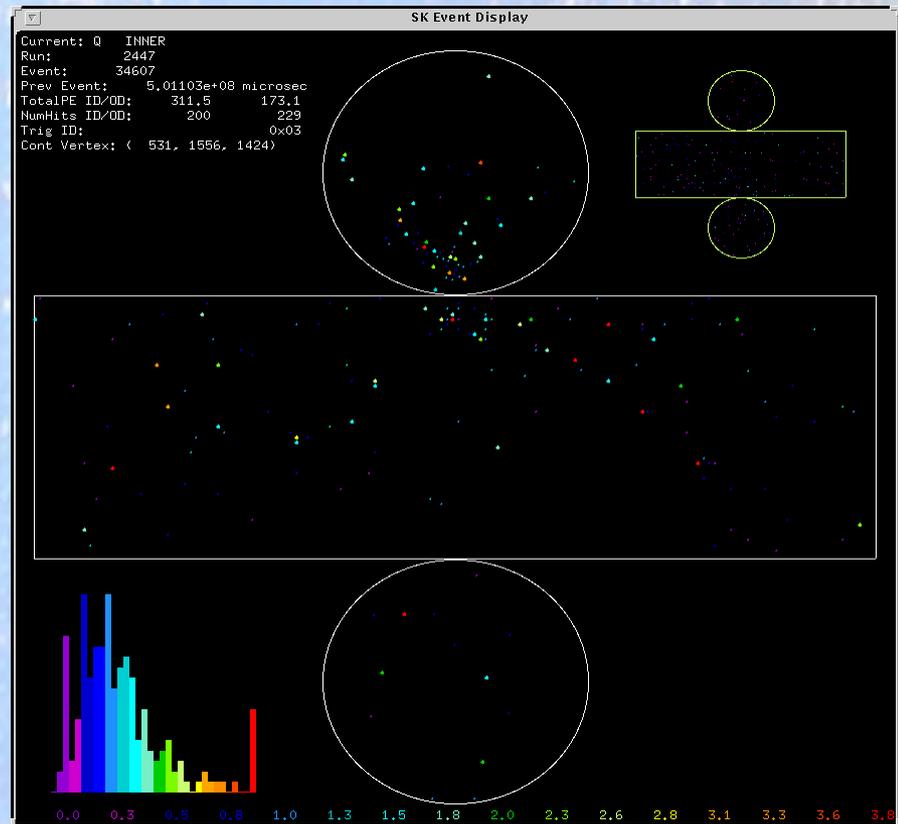
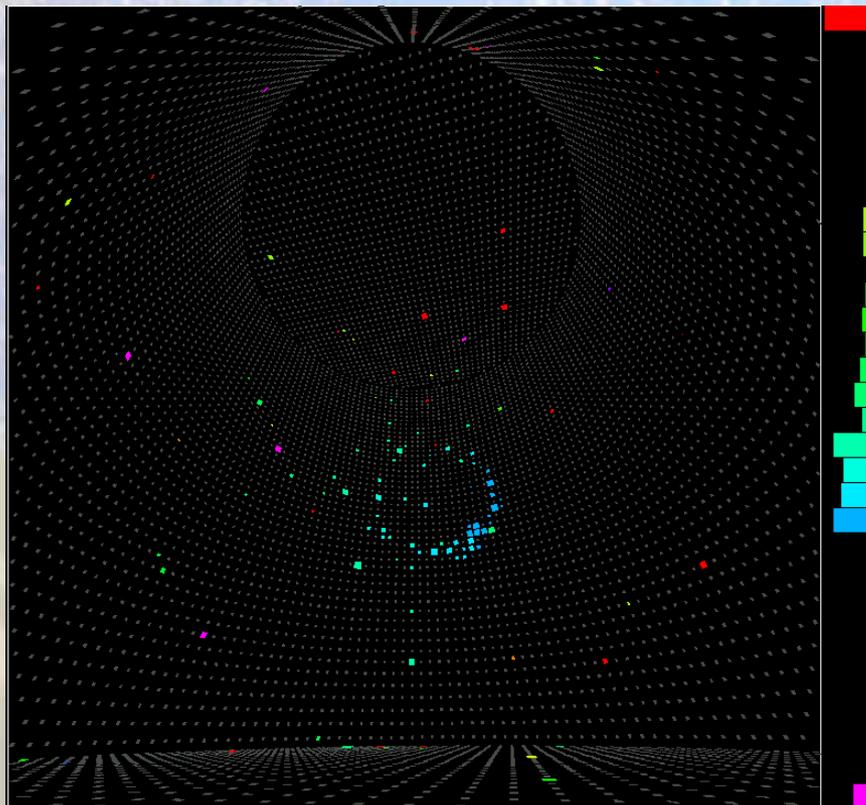


- I fotoni rivelati dai PM sono pochissimi, circa 7 fotoni/MeV, contro circa 400 emessi
- Il numero di eventi osservati è molto basso a causa della σ

E' quindi necessario distinguere con elevata precisione il segnale dal rumore

Metodo di misura

- L'energia è proporzionale al numero di γ Č ovvero al numero di PM colpiti (in eventi poco energetici)
- L'elettrone in acqua percorre pochi cm \longrightarrow origine puntiforme

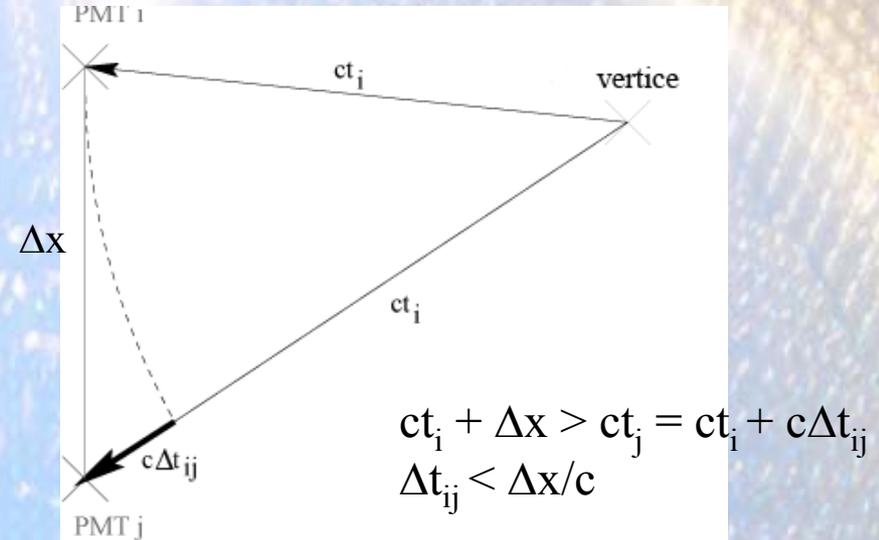


Metodo di misura

- Ricostruzione del vertice di origine (dai tempi di hit di ciascun PM)

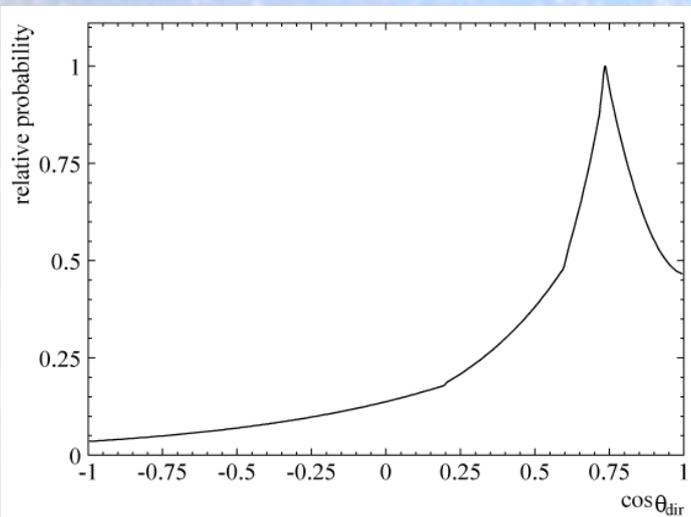
$$\tau_i = t_i - |\vec{v} - \vec{h}_i|/c$$

$$g(\vec{v}) = \sum_{i=1}^N e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\tau_i - t_0}{\sigma_t} \right)^2}$$



- Ricostruzione della direzione (l'elettrone preserva la direzione del v incidente)

$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta} \longrightarrow \theta \text{ in acqua } 42^\circ$$



Calibrazione

- Trasparenza dell'acqua: elettroni dal decadimento di μ
- PMT: guadagno, singolo fotone, timing
- Energia, con LINAC, Nickel, elettroni da μ
- Trigger, con Nickel

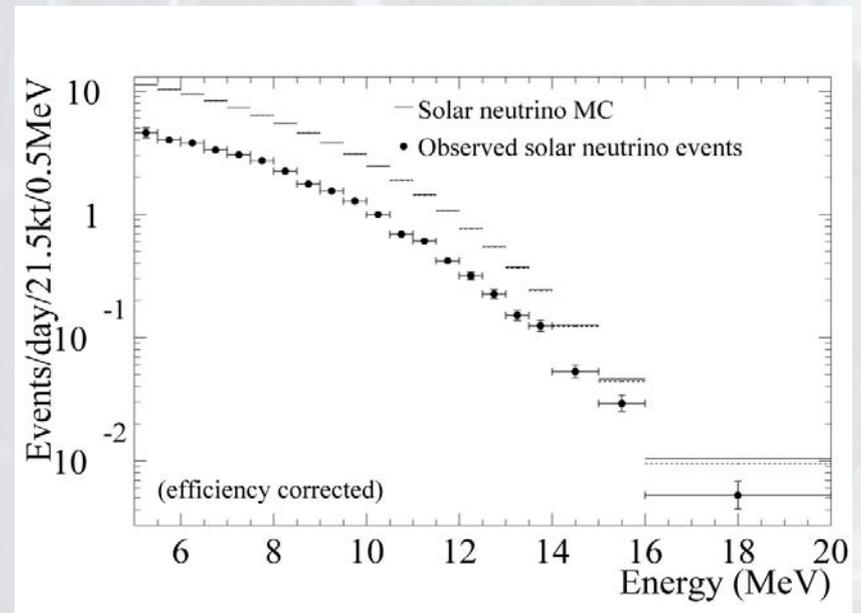
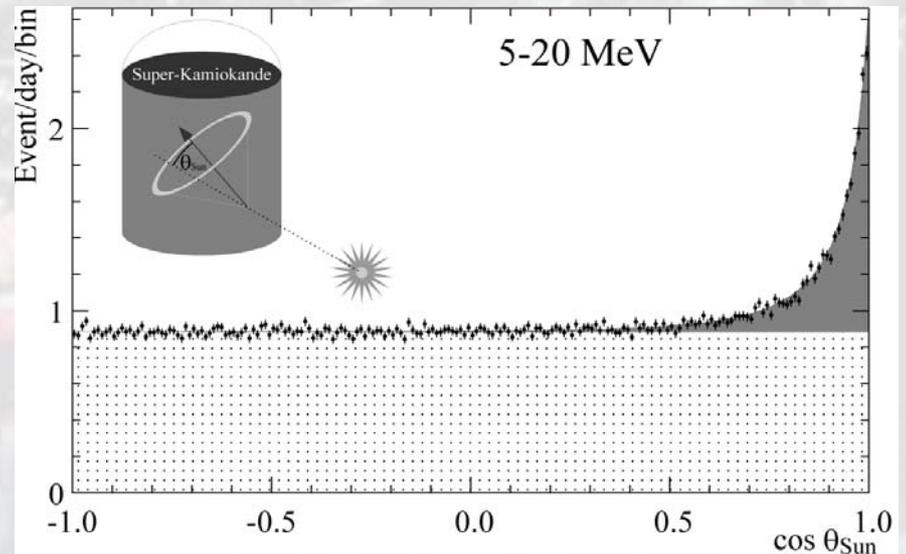
Tagli ed eliminazione rumore

- Eliminazione del radon nell'aria, purificazione acqua, rivelatori di radon
- Spallation events
- Gli eventi al di fuori del volume di fiducia si scartano

La distribuzione degli eventi di fondo è casuale,
non c'è correlazione con la posizione del sole

Risultati

- Chiara correlazione tra il segnale e la posizione del sole ($\cos \theta_{\text{sun}}$)
il segnale è sovrapposto a un fondo piatto
- 22400 ν rivelati (13 al giorno)
Flusso $2.35 \pm 0.1 \cdot 10^6 \text{ (cm}^2 \text{ s)}^{-1}$ (^8B)
- Rilevati migliaia di μ al secondo
- Distribuzione in energia
Dati / SSM = 0.46
- Sono stati misurati anche i neutrini dalla reazione hep fissando un limite superiore: $73 \cdot 10^3 \text{ (cm}^2 \text{ s)}^{-1}$



Il puzzle

- Lo spettro differenziale osservato è coerente con quello aspettato, a parte un fattore $\frac{1}{2}$
- Conferma dell'esperimento di Davis circa la mancanza dei neutrini dal sole

Ipotesi: oscillazione di neutrino

Con l'esperimento SNO si giunge a una conclusione del puzzle



SNO è in grado di osservare lo scattering NC su deuterio

E quindi misura il flusso totale dei ν in accordo col flusso predetto dallo SSM

Si deduce che tutti gli altri esperimenti, essendo sensibili solo ai ν_e , osservano una riduzione degli eventi dovuta a una variazione del flavour dei neutrini

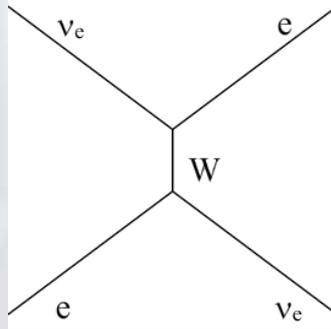
Il modello solare è giusto

Ipotesi: oscillazione di neutrino

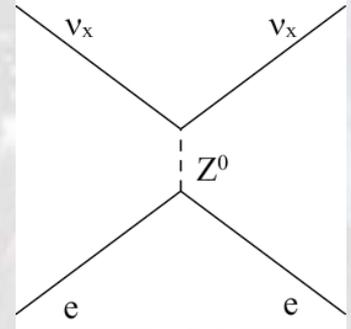
- La piccola discrepanza tra le osservazioni di SuperKamiokande e di Davis dipende dal fatto che osservavano ν diversi, e dalle diverse sezioni d'urto per i processi di scattering

$$\nu + e^- \longrightarrow \nu + e^-$$

SK vede l'elettrone, che può essere diffuso sia da ν_e che da $\nu_{\mu,\tau}$



I due processi avvengono con frequenze diverse circa 80% $\nu_e + e^-$, mentre per $\nu_{\mu,\tau} + e^-$ si riduce a circa 20%



Invece l'esperimento di Davis era sensibile solo ai ν_e : $\phi_{\nu}^{osservati} = 1/3 \text{ SSM}$

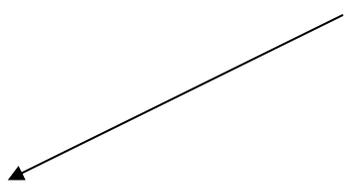
Quindi SK vede una somma dei $\nu_e + \nu_{\mu,\tau}$: $\phi_{\nu}^{osservati} = 1/3(0.8)\nu_e + 0.2 \nu_{\mu,\tau} \sim 1/2 \text{ SSM}$

Ipotesi: oscillazione di neutrino

Dinamica di oscillazione

- Nasce ν_e
- Combinazione degli autostati di massa
- I coefficienti cambiano lungo il viaggio
- La probabilità di interagire come ν_e cambia

Coefficienti determinati dagli angoli
nella matrice di mixing



Evidenza per una massa dei neutrini diversa da zero

Il modello standard non è completo

I tentativi di misura diretta della massa dei neutrini hanno finora portato solo a definire limiti superiori sempre più piccoli.

Conclusioni

- La produzione di neutrini è collegata alle reazioni che avvengono nel sole, se la luminosità dipendesse anche da altre reazioni troveremmo una discordanza tra le misure di ν e l'energia irradiata.
Si è quindi giunti a un'ottima comprensione del funzionamento del sole, su cui nacquero dubbi due secoli fa e rimasero per molto tempo privi di verifiche sperimentali
- Si è compiuto un ulteriore passo verso la comprensione della natura dei neutrini:
 - oscillazione di sapore
 - massa
- Rimane da completare la misura del flusso di neutrini ad energie inferiori, per studiare l'oscillazione a energie diverse

Referenze

- Solving the mystery of missing neutrinos, John Bahcall, www.nobel.se
- Neutrinos from the sun, J.Bahcall, Scientific American, V. 221, no.1, 1969, pp28-37
- M. Mezzetto, IFNF Padova, lezioni di dottorato di ricerca, 2006
- Solar neutrino measurements in SuperKamiokande I
arxiv:hep-ex/0508053v2 , 2005