

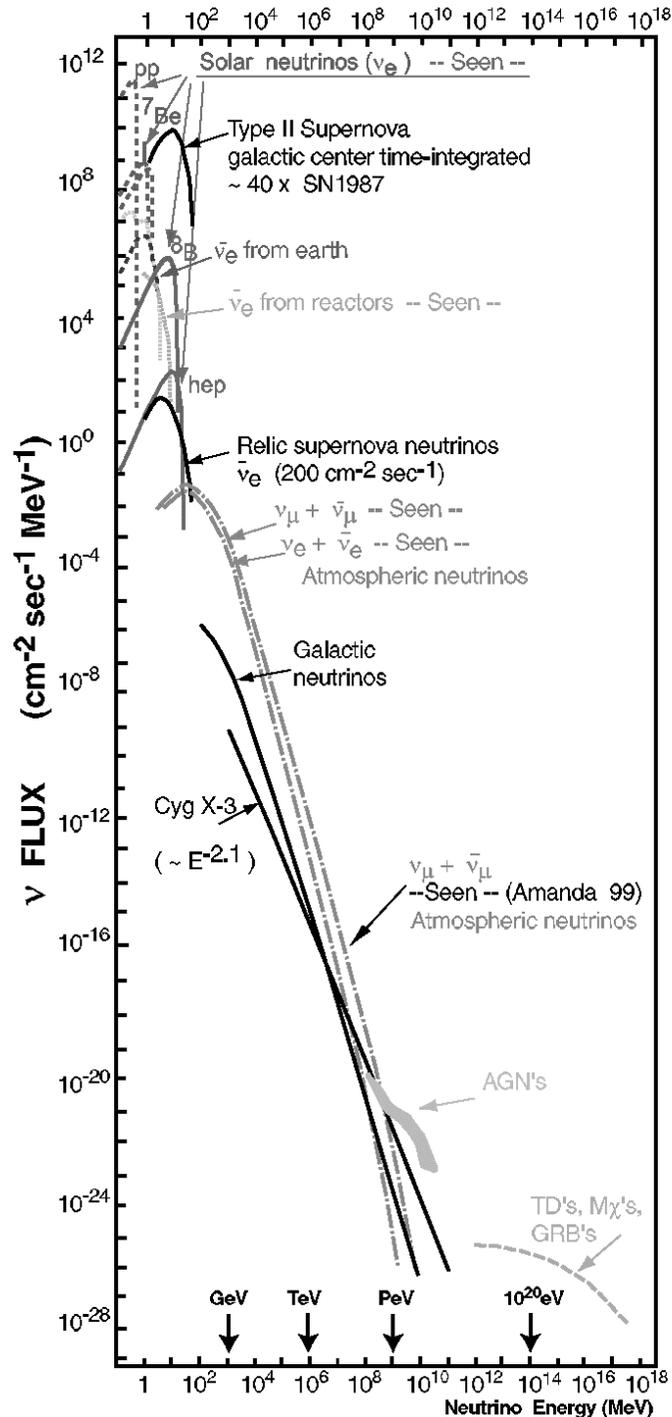
# Astrofisica e particelle elementari

aa 2007-08

Lezione 12

Bruno Borgia

# NEUTRINI



I neutrini essendo neutri ed avendo una piccola sezione d'urto possono provenire da una moltitudine di sorgenti: cosmologici, solari, dalle supernove, atmosferici, dalla radioattività terrestre.

I neutrini di origine cosmologica a circa 1 secondo dal Big Bang si sono disaccoppiati non riuscendo più a mantenere l'equilibrio termico nel decadimento inverso del neutrone, ciò che ha determinato il rapporto protone/neutrone e quindi la nucleosintesi. La densità dei neutrini attuale è  $113 \text{ cm}^{-3}$  per ogni sapore e la loro temperatura è 1.95 K.

I neutrini hanno vantaggi e svantaggi rispetto ai RC carichi:

↑ viaggiano in linea retta e quindi è possibile neutrino-astronomia;

↑ hanno una sezione d'urto piccola e quindi non sono soggetti al limite GKZ e possono giungerci dai bordi dell'universo;

↓ la piccola sezione d'urto impone rivelatori di grande massa

# NEUTRINI ATMOSFERICI

I neutrini sono la componente più abbondante dei raggi cosmici sulla Terra.

L'interazione dei neutrini con i nucleoni d'altra parte è molto piccola. La sezione d'urto per produrre un leptone carico nel range di energia 1 GeV - 1 TeV è dell'ordine di

$$\sigma \approx 0.5 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2 E_\nu(\text{GeV})$$

All'energia di 1 GeV il flusso di neutrini è  $\approx 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  da tutte le direzioni.

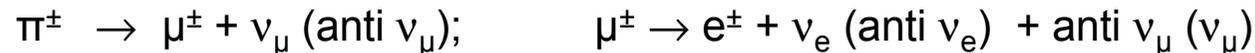
La frequenza di interazione dei neutrini atmosferici è

$$1 (\text{v/cm}^2 \text{ s}) \times (0.5 \cdot 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{ nucleone}) \times (6 \cdot 10^{32} \text{ nucleoni/kTon}) \times (3.15 \cdot 10^7 \text{ s/anno}) \approx \\ \approx 100 \text{ eventi/kT anno}$$

Di conseguenza sono necessari rivelatori di molti kT per studiare i neutrini cosmici.

Le sorgenti principali di neutrini atmosferici sono i decadimenti di  $\pi$ , K e  $\mu$ .

La catena di decadimento del  $\pi$  è



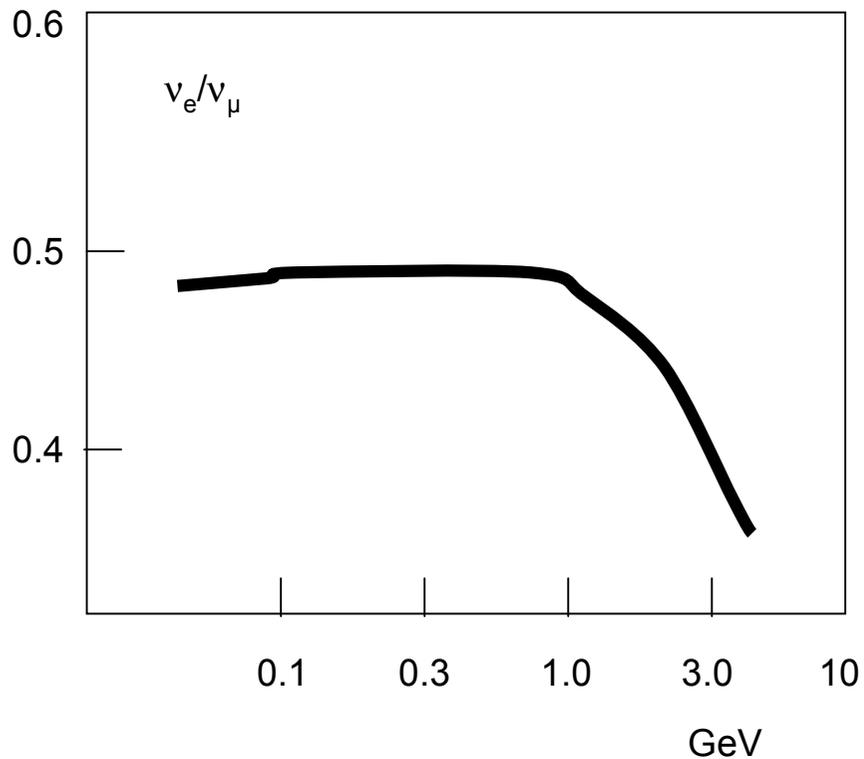
Quando le condizioni sono tali che tutte le particelle decadono, ci aspettiamo che

$$\nu_\mu \approx \text{anti } \nu_\mu \approx 2 \nu_e$$

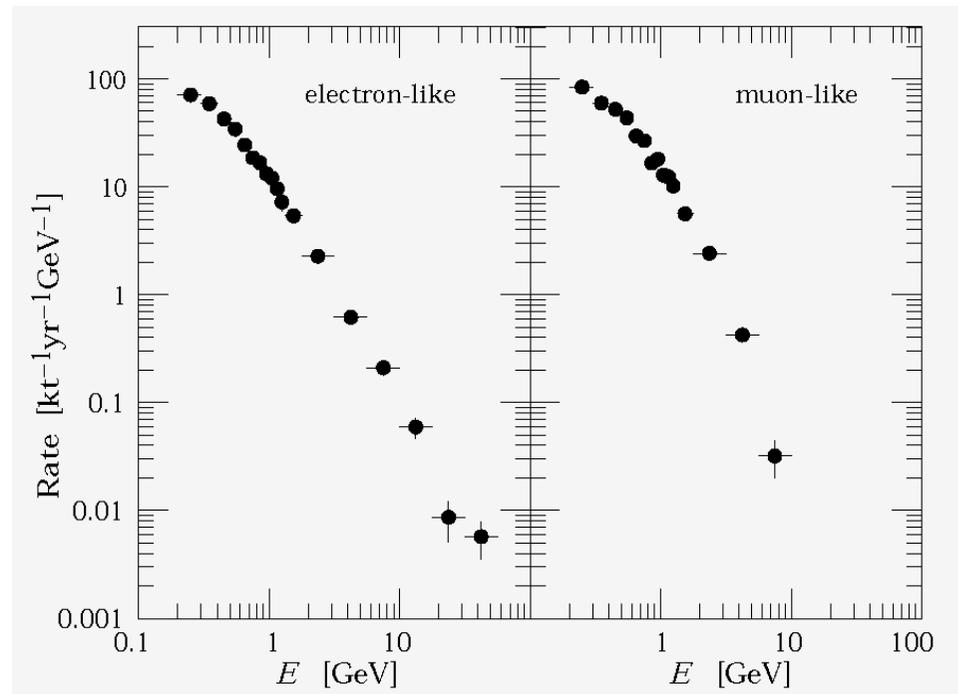
Inoltre la cinematica del decadimento è tale per cui ciascun neutrino trasporta circa la stessa energia.

Nell'atmosfera la lunghezza di decadimento del  $\mu$ , con l'energia, diventa rapidamente maggiore della quota di produzione dei mesoni stessi per cui il rapporto  $\nu_e / \nu_\mu$  decresce rapidamente e l'unica sorgente di  $\nu_e$  diventa il decadimento  $K_L^0 \rightarrow \pi e \nu_e$ .

# NEUTRINI ATMOSFERICI



Rapporto  $\nu_e/\nu_\mu$  (neutrini+antineutrini) prodotti in atmosfera



Energia visibile dei neutrini in SuperKamiokande

# ESPERIMENTI

- I neutrini atmosferici hanno il massimo dell'energia intorno ai 250 MeV e quindi si possono rivelare tramite le reazioni:

$$\nu + e \rightarrow \nu + e$$

$$\nu_e + N \rightarrow \nu_e + X$$

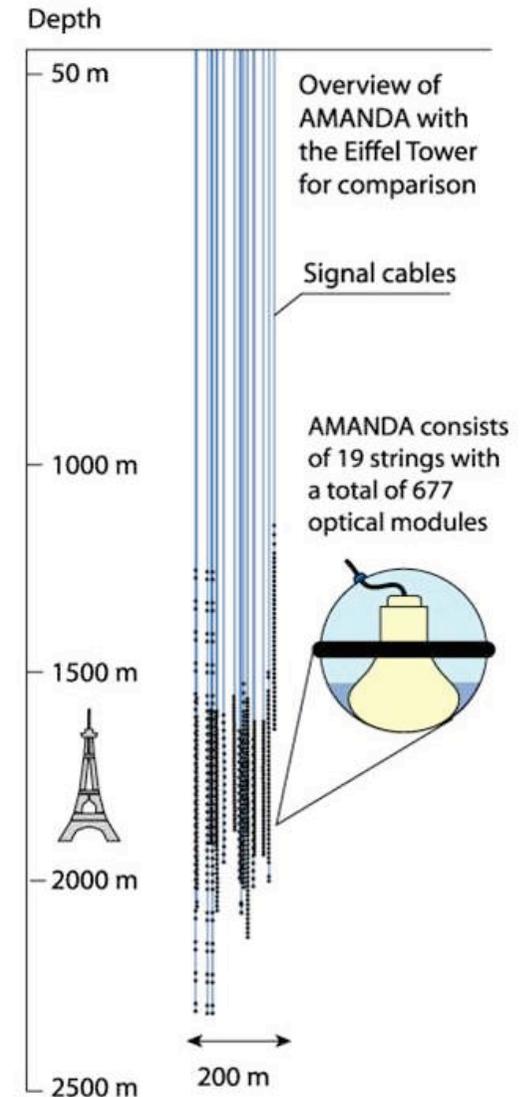
$$\nu_e + N \rightarrow e + X$$

$$\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + X$$

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$$

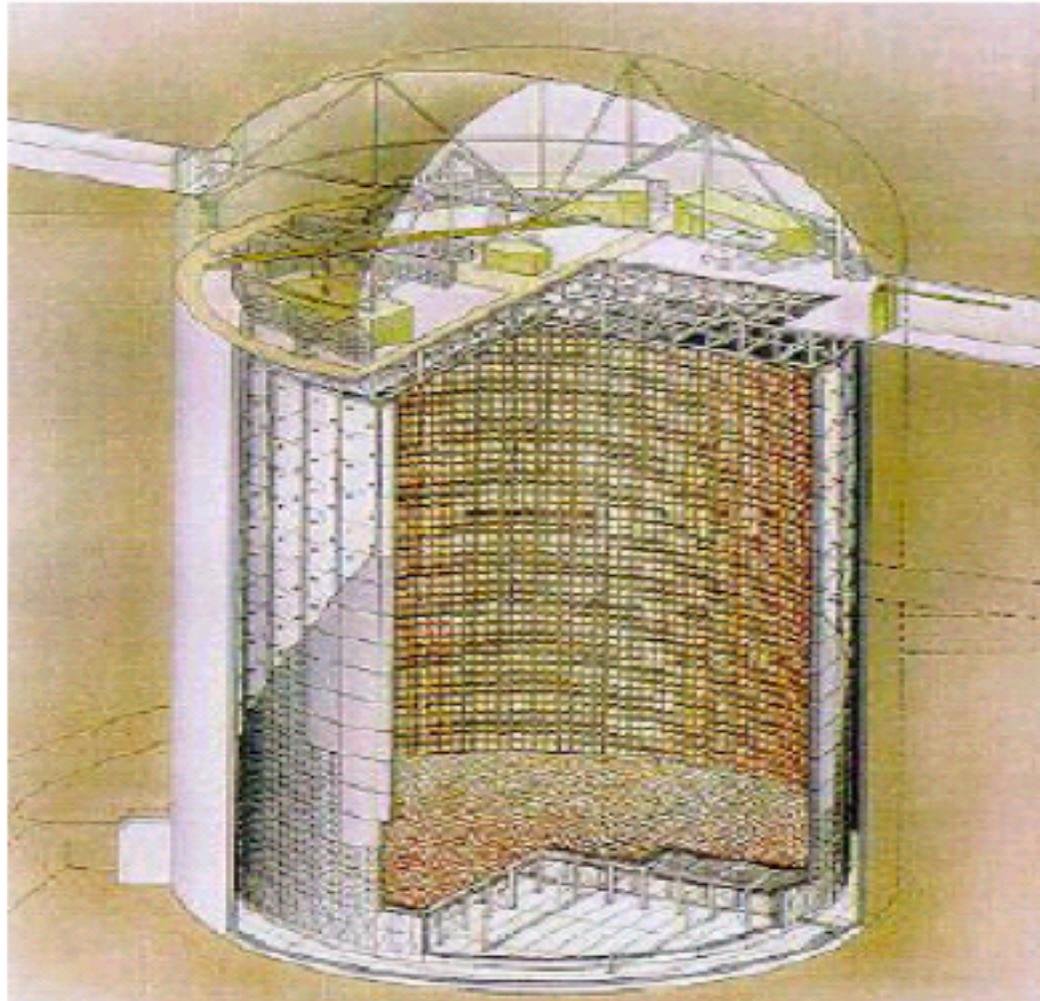
L'ultima reazione è possibile solo se i neutrini hanno energia superiore alla soglia di produzione del  $\mu$ .

- Sudbury Neutrino Observatory* (SNO): effetto Cerenkov in 1 kT acqua pesante,  $\nu_e + {}^2\text{H} \rightarrow \text{p} + \text{p} + \text{e}$
- Kamioka Neutrino Detection Experiment* (Kamiokande): effetto Cerenkov 2 kT acqua; soglia 7 MeV
- SuperKamiokande: Cerenkov 50 kT acqua, 14 000 fotomoltiplicatori; soglia 5 MeV
- Antartic Muon And Neutrino Detector Array* (AMANDA): Cerenkov nel ghiaccio polare

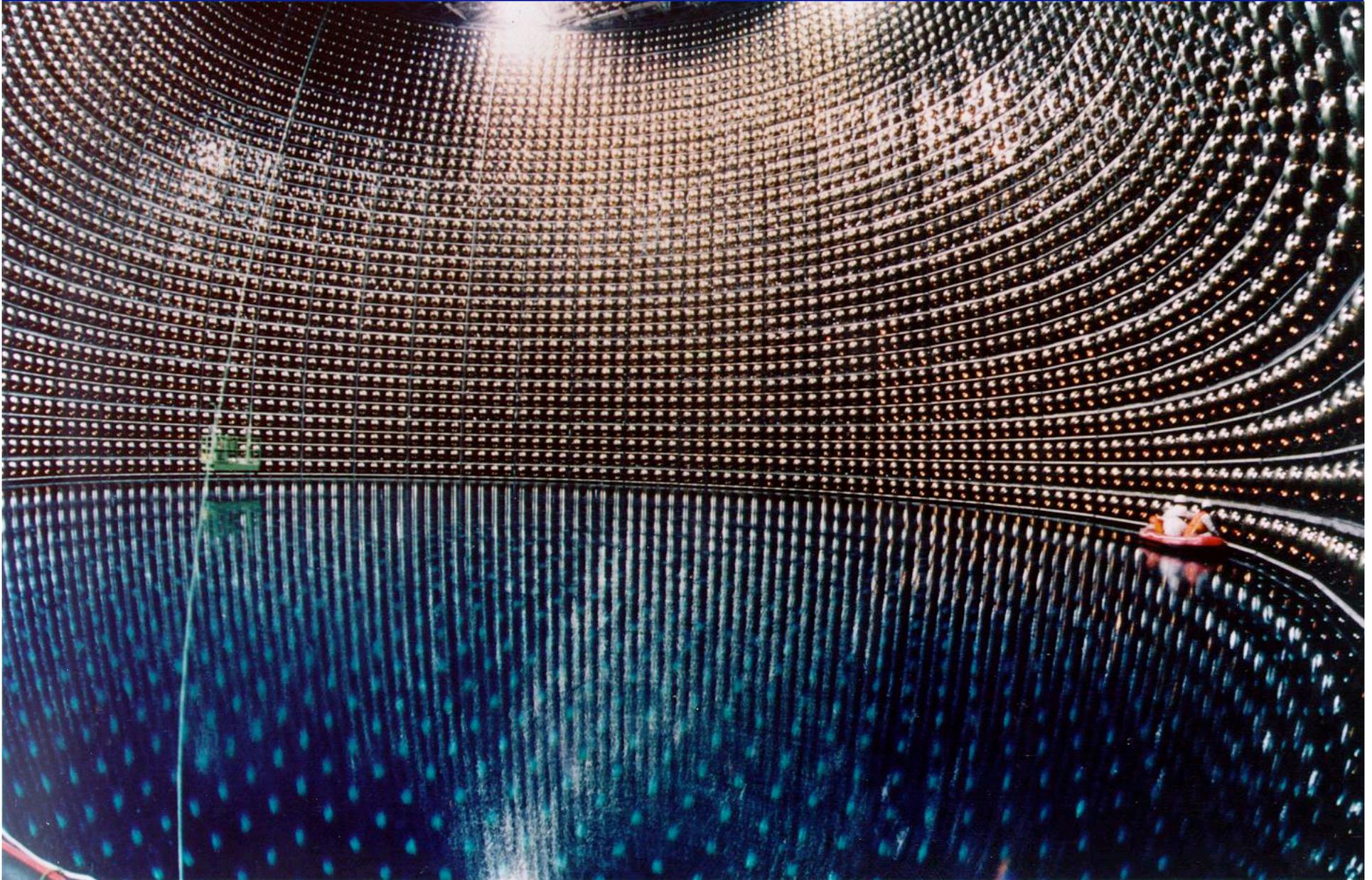


# SUPERKAMIOKANDE

50 000 tonnellate di acqua  
14 000 fotomoltiplicatori  
soglia 5 MeV

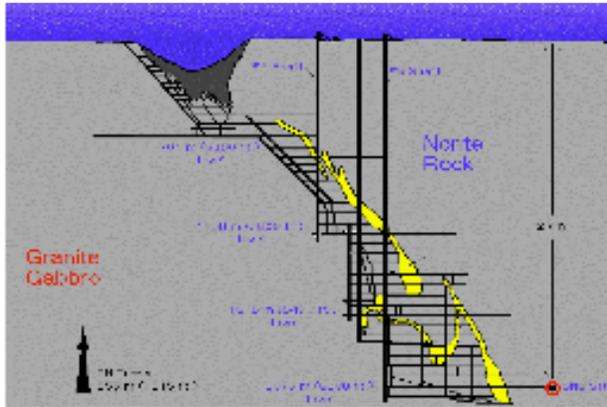


# SUPERKAMIOKANDE



# SNO

## Sudbury Neutrino Observatory



1000 tonnes  $D_2O$

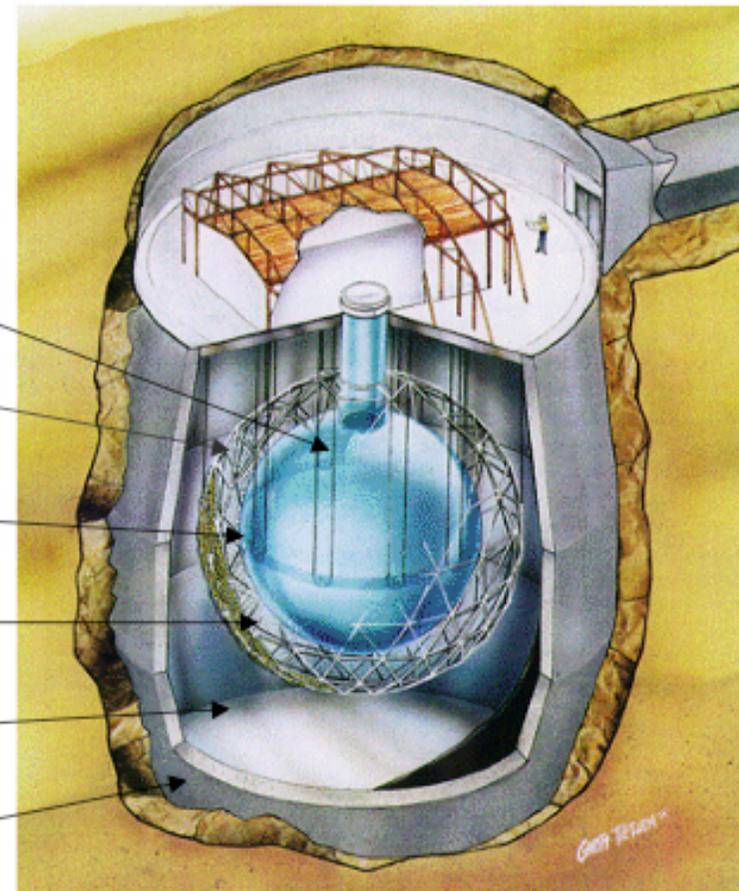
Support Structure  
for 9500 PMTs,  
60% coverage

12 m Diameter  
Acrylic Vessel

1700 tonnes Inner  
Shielding  $H_2O$

5300 tonnes Outer  
Shield  $H_2O$

Urylon Liner and  
Radon Seal



# OSCILLAZIONE DEI NEUTRINI (1)

I neutrini sono prodotti in autostati di sapore e si propagano in autostati di massa.

Trattiamo il caso di due autostati di sapore per semplicità.

Un particolare autostato di sapore è descritto nella sua propagazione come sovrapposizione lineare degli autostati di massa e quindi evolve temporalmente con frequenze differenti dovute alla diverse masse. Consideriamo il mescolamento  $\nu_e \nu_\mu$ :

$$\nu_e = \nu_1 \cos\theta + \nu_2 \sin\theta$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin\theta + \nu_2 \cos\theta$$

Se  $E$  è l'energia del neutrino, le ampiezze degli autostati di massa in funzione del tempo saranno

$$\nu_1 = \nu_1(0) \exp(-iE_1 t)$$

$$\nu_2 = \nu_2(0) \exp(-iE_2 t)$$

in unità  $\hbar/2\pi=c=1$ .

Supponiamo di avere a  $t=0$  solo neutrino-elettrone. Invertendo la coppia di equazioni di sopra, si ha:

$$\nu_1(0) = \nu_e(0) \cos\theta$$

$$\nu_2(0) = \nu_\mu(0) \sin\theta$$

$$\nu_e(t) = \nu_1(t) \cos\theta + \nu_2(t) \sin\theta$$

L'ampiezza del neutrino-elettrone diventa

$$A_e(t) = \nu_e(t) / \nu_e(0) = \cos^2\theta \exp(-iE_1 t) + \sin^2\theta \exp(-iE_2 t)$$

# OSCILLAZIONE DEI NEUTRINI (2)

L'intensità diventa

$$I_e(t)/I_e(0) = A_e A_e^* = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2[(E_2 - E_1)t/2]$$

Per  $m \ll E$  si ha

$$E = p + m^2/2p$$

e indicando con  $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ , la probabilità di trovare unon stesso sapore a distanza  $L = ct$ , sarà

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2[1.27 \Delta m^2 L/E]$$

e quindi

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$$

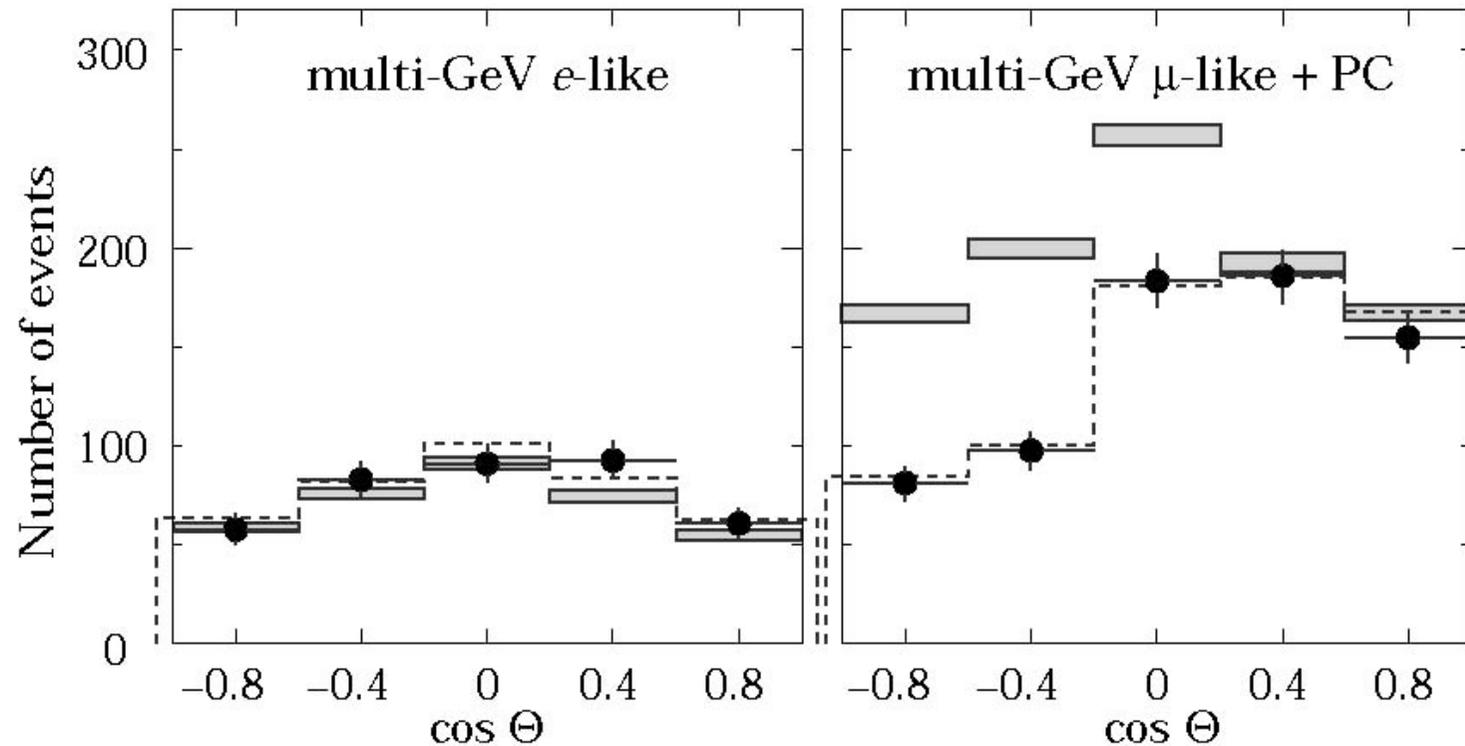
dove  $\Delta m^2$  è espresso in  $(\text{eV}/c^2)^2$ ;  $E$  in GeV e  $L$  in km.

Se in un apparato sotterraneo si osservano gli eventi di neutrino in funzione dell'angolo di incidenza rispetto allo zenith, si avranno neutrini prodotti a circa 20 km sulla verticale, neutrini orizzontali prodotti a circa 200 km di distanza e neutrini provenienti dalla parte opposta della Terra prodotti a circa 12 000 km dal rivelatore.

I  $\nu_e$  non mostrano effetti attribuibili alle oscillazioni, mentre i  $\nu_\mu$  provenienti dall'atmosfera opposta sono soppressi.

Ciò è attribuito ad oscillazioni  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ .

# OSCILLAZIONE DEI NEUTRINI (3)



Distribuzione zenithale degli eventi. I rettangoli sono i valori aspettati per assenza di oscillazioni mentre le linee sono fit ai dati con parametri di oscillazione.

La soppressione è circa 1/2 e poiché il valor medio di  $\sin^2 [1.27 \Delta m^2 L/E]$  è 1/2, ciò significa che  $\sin^2 2\theta \approx 1$  ovvero mescolamento massimo. Si trova che la differenza  $\Delta m^2 \approx 3 \cdot 10^{-3} (\text{eV}/c^2)^2$

# KAMLAND

1,000 ton liquid scintillator neutrino detector

1st phase experiment

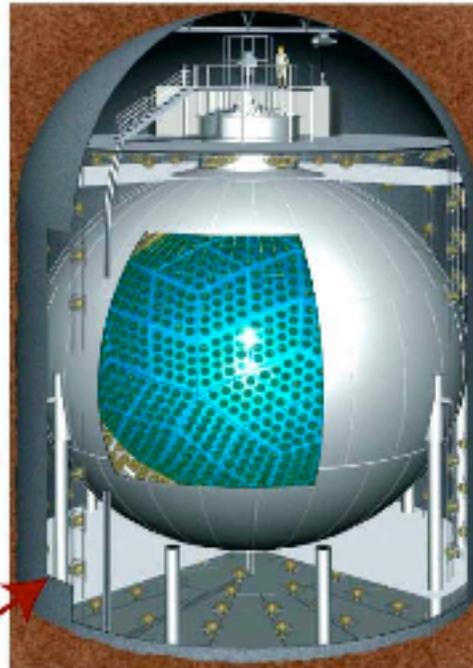
( $E_{th} = 1.8 \text{ MeV}$ )



- Neutrino Oscillation Search by Reactor Anti-neutrinos



- Terrestrial Anti-neutrino Detection

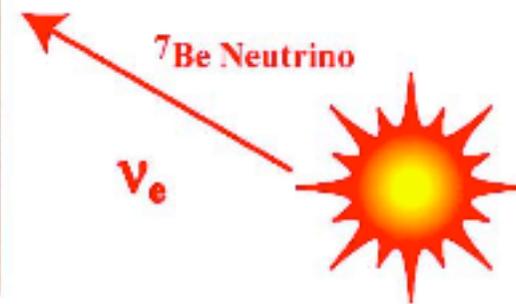


2nd phase experiment

( $E_{th} = 300 \text{ keV}$ )

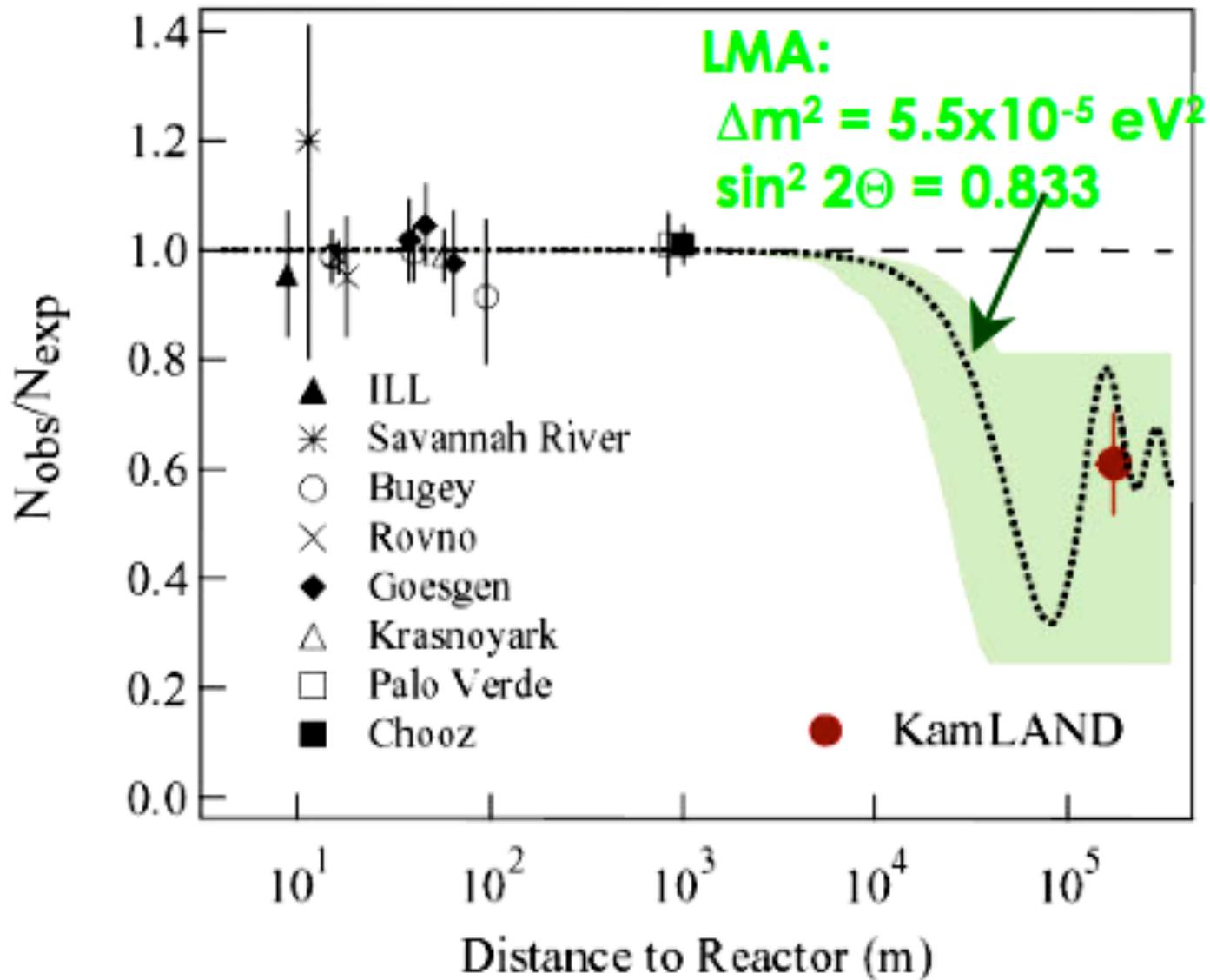


- Solar neutrino Detection



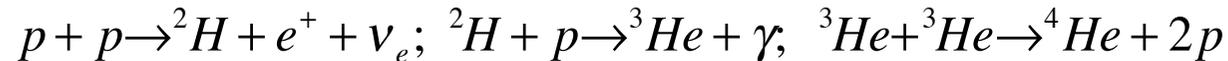
supernova-burst  $\nu$ , relic supernova  $\nu$ ,  
atmospheric  $\nu$ , Proton Decays, . . .

# OSCILLAZIONI NEUTRINO (4)



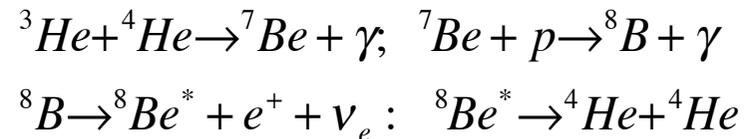
# NEUTRINI SOLARI

La gran parte dei neutrini prodotti dal Sole provengono dalla reazione protone-protone che dà inizio alla catena di reazioni pp:



Il neutrino ha un'energia massima di 0.420 MeV.

Neutrini di energia maggiore sono generati in una catena diversa dalla catena pp:



Il neutrino del Boro ha un'energia massima di 15 MeV.

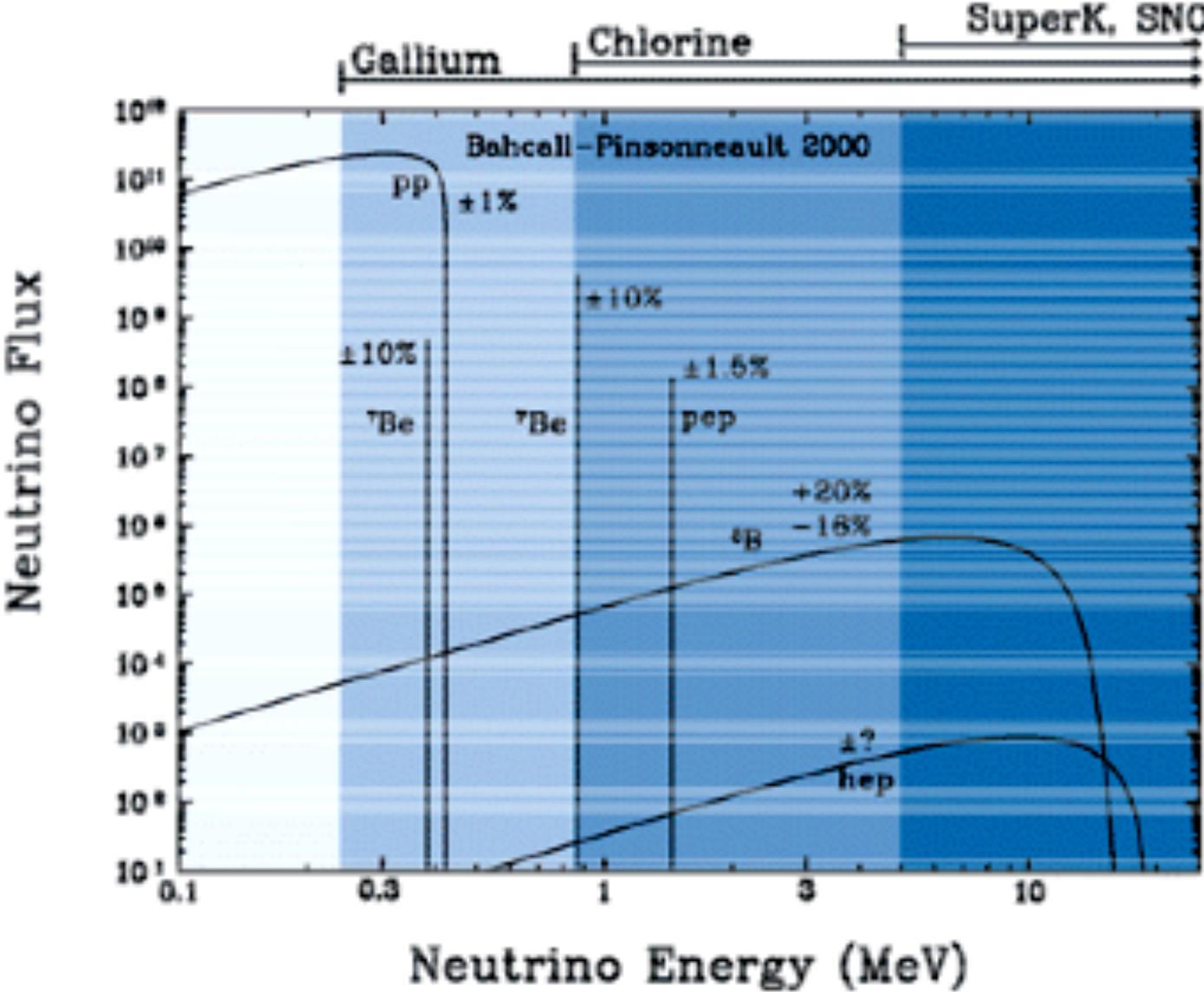
Lo spettro di energia dei neutrini solari è mostrato nella figura seguente.

Le misure di neutrini solari sono riportate in unità di 1 SNU (Solar Neutrino Unit)  
=  $8.6 \cdot 10^{-32}$  eventi-neutrino/(giorno nucleo)

dove nel numero citato entra la sezione d'urto per il materiale utilizzato per la reazione col neutrino.

Per misurare 1 SNU con un rivelatore che contenga  $10^{31}$  nuclei, ci si deve attendere 1 cattura di neutrino al giorno. Il rivelatore con un elemento pesante,  $A \approx 50$ , avrebbe circa 800 t di materiale.

# NEUTRINI SOLARI



# RIVELAZIONE NEUTRINI SOLARI

- *Metodi radiochimici:*

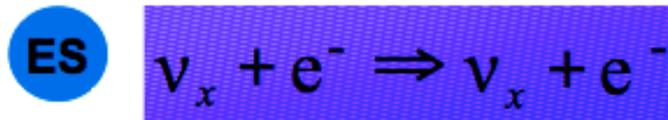
- $^{37}\text{Cl}^{17} (\nu, e^-) ^{37}\text{Ar}^*$  soglia 814 keV. L'apparato è alla profondità di 1.5 km in una miniera d'oro a Homestake, nel Sud Dakota. Il bersaglio è costituito da 615 t di tetracloroetilene,  $\text{C}_2\text{Cl}_4$ , contenente  $2 \cdot 10^{30}$  nuclei dell'isotopo  $^{37}\text{Cl}$ . Il gas nobile  $^{37}\text{Ar}$  decade con tempo di dimezzamento di 35 d di nuovo in  $^{37}\text{Cl}$ .
- $^{71}\text{Ga}^{31} (\nu, e^-) ^{71}\text{Ge}^*$  soglia 233 keV. GALLEX è situato nel laboratorio del Gran Sasso e contiene 30 t di cloruro di gallio in soluzione. SAGE è collocato in una miniera vicino a Baksan in Russia e contiene 60 t di gallio metallico liquido. Il  $^{71}\text{Ge}$  decade con vita di dimezzamento in 11.4 giorni di nuovo in  $^{71}\text{Ga}$  e vengono contati gli elettroni Auger.

- *Metodo diretto via scattering elastico  $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$  :*

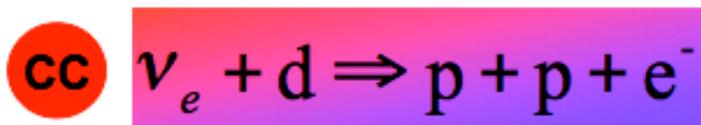
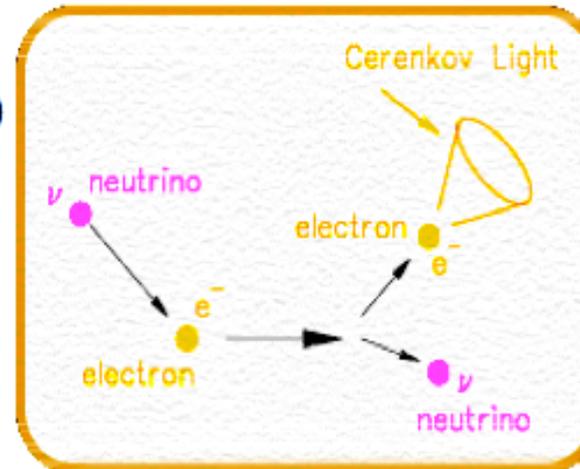
- L'elettrone diffuso è misurato tramite la luce Cerenkov e quindi si può determinare l'energia, la direzione ed il tempo di arrivo.

# SNO

## $\nu$ Reactions in SNO

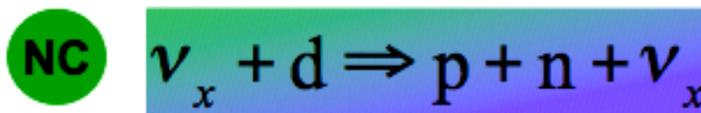
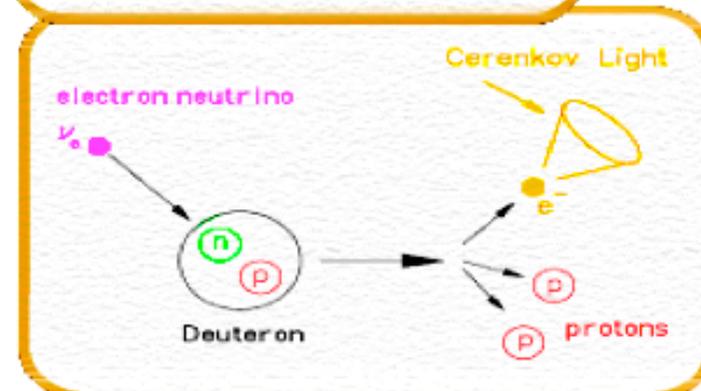


- Both SK, SNO
- Mainly sensitive to  $\nu_e$ , less to  $\nu_\mu$  and  $\nu_\tau$
- Strong directional sensitivity



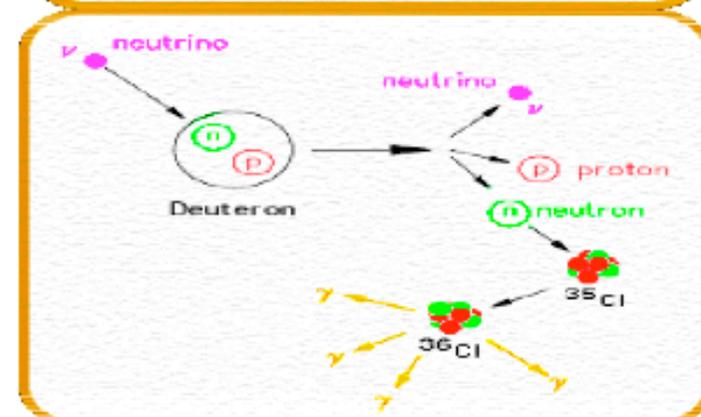
- Good measurement of  $\nu_e$  energy spectrum
- Weak directional sensitivity  $\propto 1-1/3\cos(\theta)$

-  $\nu_e$  ONLY



- Measure total  $^8\text{B}$   $\nu$  flux from the sun.

- Equal cross section for all  $\nu$  types



# RISULTATI NEUTRINI SOLARI

Esperimento		reazione	soglia (MeV)	Flusso/SSM
GALLEX+SAGE	CC	$\text{Ga}(\nu, e)\text{Ge}$	0.2	$0.58 \pm 0.04$
HOMESTAKE	CC	$\text{Cl}(\nu, e)\text{Ar}$	0.8	$0.34 \pm 0.03$
SNO	CC	$\nu + \text{D} \rightarrow \text{p} + \text{p} + e$	$\approx 5$	$0.35 \pm 0.03$
SUPERKAMIOK	ES	$\nu + e \rightarrow \nu + e$	$\approx 5$	$0.46 \pm 0.01$
SNO	ES	$\nu + e \rightarrow \nu + e$	$\approx 5$	$0.47 \pm 0.05$
SNO	NC	$\nu + \text{D} \rightarrow \text{p} + \text{n} + \nu$	$\approx 5$	$1.01 \pm 0.12$

# RISULTATI $\nu$ SOLARI

- Gli esperimenti che misurano CC hanno un flusso molto al disotto di quello atteso, mentre SNO/CC è consistente con il valore predetto. Ciò dipende dal fatto che l'interazione di corrente neutra è la stessa per tutti i sapori dei neutrini e quindi è indipendente dalle oscillazioni. Inoltre è una conferma del Modello Solare Standard (SSM).
- Il rapporto Flusso/SSM è minore per gli esperimenti che non misurano i neutrini di bassa energia, implicando un fattore di soppressione dipendente dall'energia. Inoltre i risultati di SuperKamiokande e SNO sono in ottimo accordo con i risultati di CC tenendo conto che in ES contribuiscono anche le NC di tutti i sapori.
- Wolfenstein, Mikhaev e Smirnov hanno messo in evidenza come la soppressione dipendente dall'energia sia dovuta a modifica delle oscillazioni per effetti di attraversamento di materia; meccanismo MSW. L'effetto è dovuto al diverso comportamento dei  $\nu_e$  di bassa energia nella materia, in quanto hanno interazioni di NC e di CC. Mentre i  $\nu_\mu$  e i  $\nu_\tau$  non hanno l'energia sufficiente per produrre rispettivamente il  $\mu$  e il  $\tau$ .

# NEUTRINI DA SUPERNOVA TIPO II

Nel collasso gravitazionale di una stella in una stella di neutroni, avvengono processi di fotodisintegrazione dei nuclei di ferro prima e successivamente fotodisintegrazione dei nuclei di elio. Il collasso provoca anche la neutronizzazione ovvero il processo inverso al decadimento beta:



I neutrini sono emessi con un'energia di qualche MeV in un fiotto di  $10^{56}$  -  $10^{57}$  in pochi millisecondi portando via  $\approx 5\%$  dell'energia totale gravitazionale.

Quando la densità del nucleo supera  $10^{15}$  kg/m<sup>3</sup>, il nucleo diventa opaco anche ai neutrini. Il nucleo entra in una fase di equilibrio termico in cui vengono prodotti in egual quantità neutrini ed antineutrini di tutti i sapori.

Poiché solo i neutrini sono in grado di emergere dal nucleo, essi emergono in un tempo tra 0.1 e 1 secondo con un'energia media di 15 MeV trasportando il 99% dell'energia gravitazionale. Il flash luminoso trasporta solamente l'1%.

La Supernova SN1987A nella Grande Nuvola di Magellano è stata osservata non solo nell'ottico, ma per la prima volta anche con i neutrini da Kamiokande e da IMB.

L'impulso dei neutrini fu osservato circa 7 ore dopo il segnale ottico.

# SN1987A



# NEUTRINI DA SN1987A

