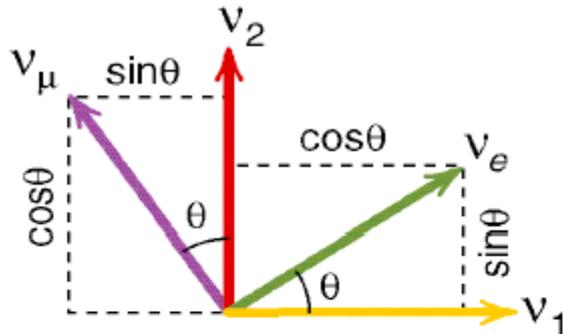


# Oscillazione di neutrini con massa

# Oscillazione di neutrini

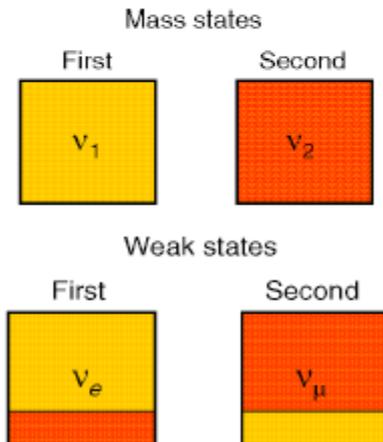
Ipotesi: i neutrini hanno massa, gli autostati dell'interazione debole non coincidono con gli autostati di massa



Per semplicità prendiamo accoppiamento a due neutrini

Gli autostati deboli  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$  sono una rotazione di quelli di massa  $\nu_1$  e  $\nu_2$ .

Analogia con matrice CKM per i quark.



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

# Oscillazione di neutrini

Nelle interazioni deboli vengono prodotti neutrini di flavour definito a una data energia.

Es:

$$\begin{aligned} | \nu(x) \rangle &= | \nu_e \rangle \\ &= c | \nu_1 \rangle + s | \nu_2 \rangle \end{aligned}$$

Gli autostati di massa evolvono in modo diverso nello spazio. Proprio per la differenza di massa hanno infatti impulso diverso:

$$\begin{aligned} | \nu(x) \rangle &= c | \nu_1 \rangle e^{i(Et - k_1 x)} \\ &+ s | \nu_2 \rangle e^{i(Et - k_2 x)} \end{aligned}$$

Dopo un certo percorso L si saranno generati neutrini di flavour differente:

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = | \langle \nu_\mu | \nu(t) \rangle |^2$$

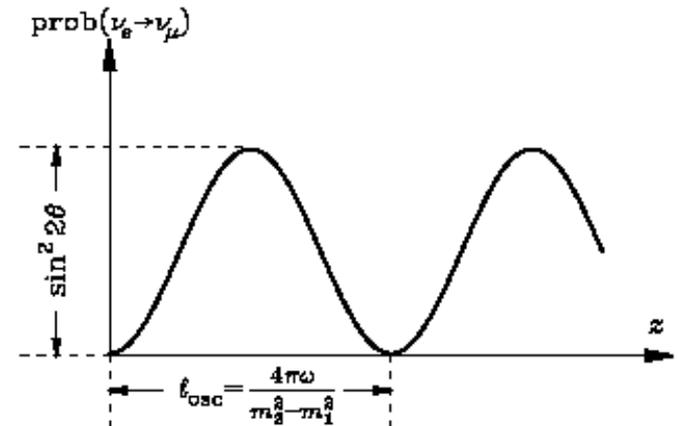
$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L) = \sin^2(\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 (eV^2)}{E (GeV)} L (km)\right)$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(L) = 1 - P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu}(L) \quad \Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$

Evidenze sperimentali:

Diminuzione del flusso di  $\nu_e$  solari

Diminuzione del flusso di  $\nu_\mu$  atmosferici



# Oscillazione di neutrini

Più in generale l'oscillazione è tra i tre neutrini: 
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Per i neutrini atmosferici  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  ( $\Delta m_{23}^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2$ ,  $\text{sen}^2 \theta_{23} \simeq 1$ )

Per i neutrini solari  $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$  ( $\Delta m_{12}^2 = 7 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2$ ,  $\text{sen}^2 \theta_{12} \simeq 0,25$ )

La matrice unitaria U si può scrivere nella forma:

Oscillazioni atmosferiche

CP violation phase

Oscillazioni solari

$$U = \begin{pmatrix} 1 & \cdot & \cdot \\ \cdot & c_{23} & s_{23} \\ \cdot & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & \cdot & s_{13} e^{i\delta} \\ \cdot & 1 & \cdot \\ -s_{13} e^{-i\delta} & \cdot & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} \\ -s_{12} & c_{12} \\ \cdot & \cdot & 1 \end{pmatrix}$$

4 parametri:

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta$$

Angolo che unisce parte solare e atmosferica

# Oscillazione di neutrini

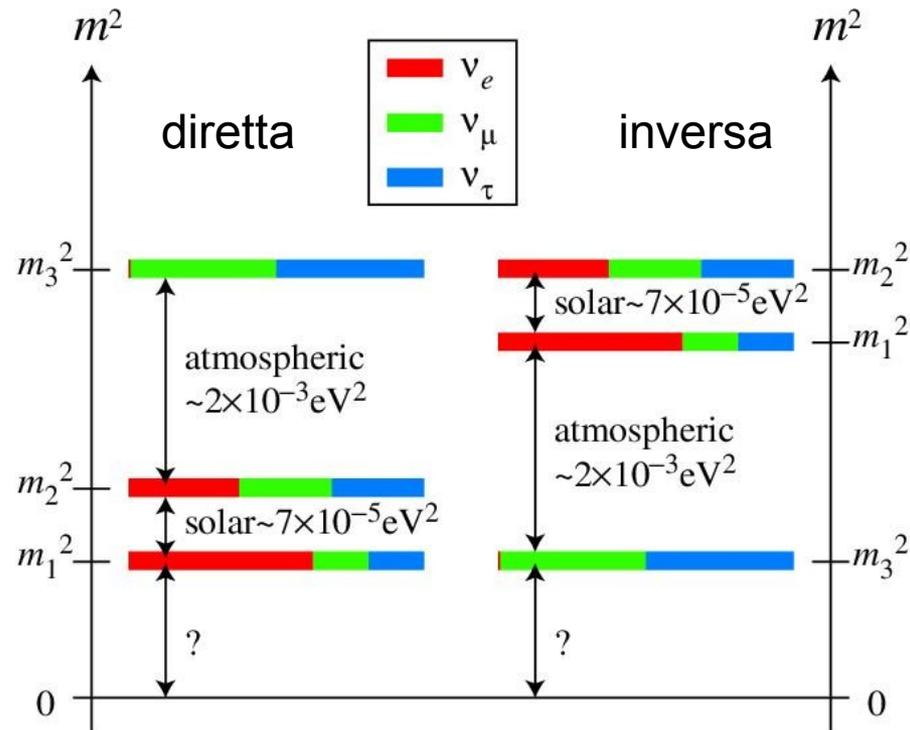
Esperimenti sulle oscillazioni hanno misurato i valori di  $\Delta m_{1,2}^2$  e  $\Delta m_{2,3}^2$  ma non i valori assoluti delle masse



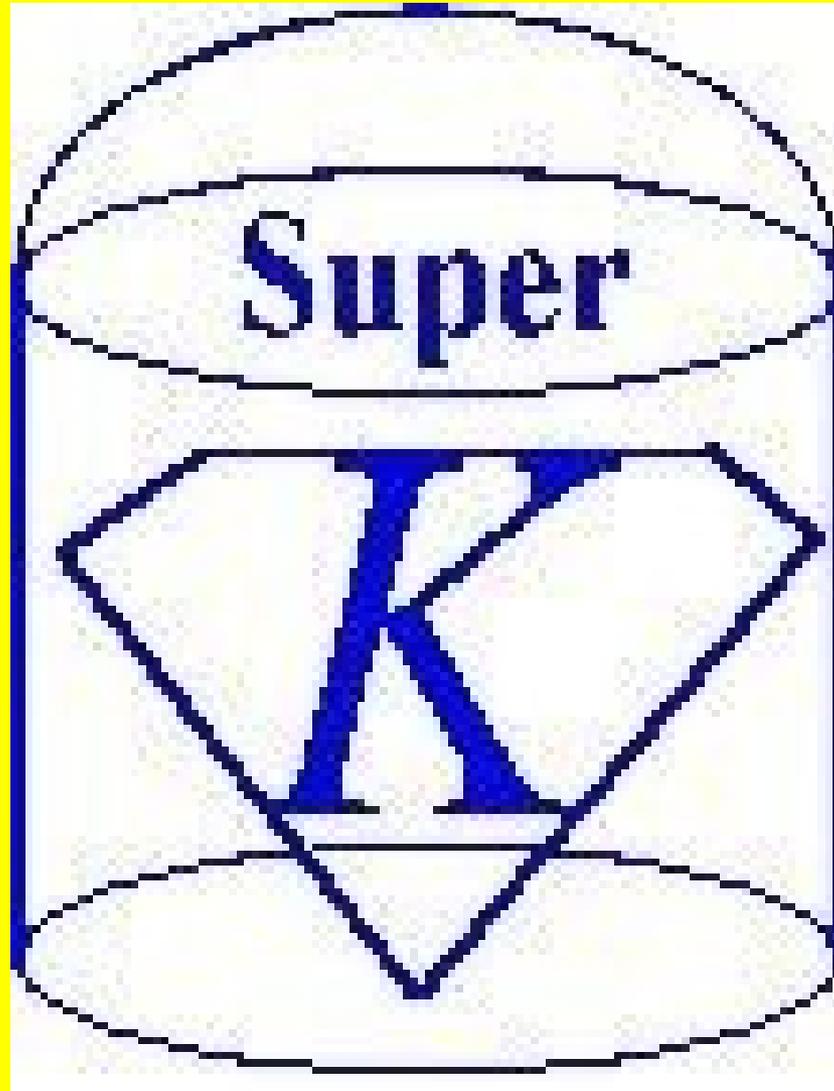
Due possibilità:

Gerarchia diretta

Gerarchia inversa

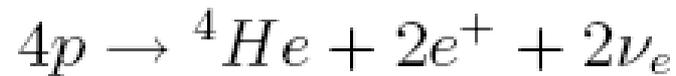


# Super-Kamiokande



# I neutrini solari: perché studiarli

Le stelle come il nostro Sole brillano grazie alla reazione di fusione nucleare

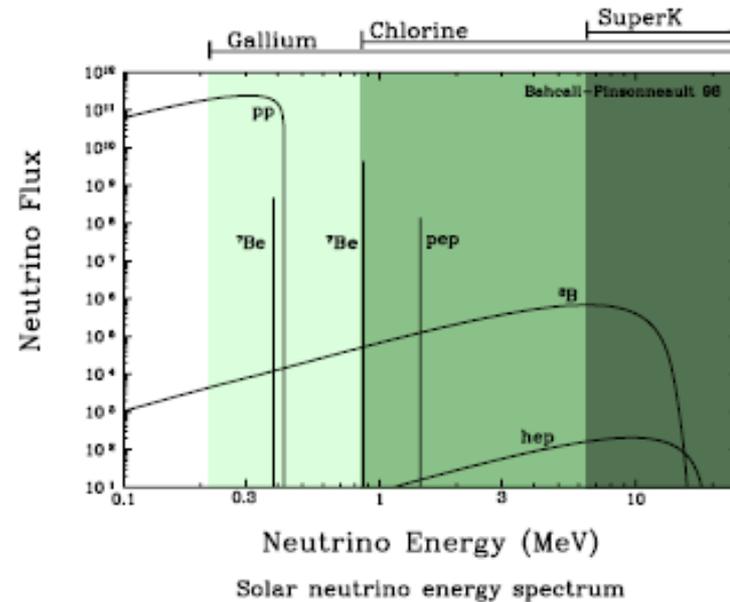
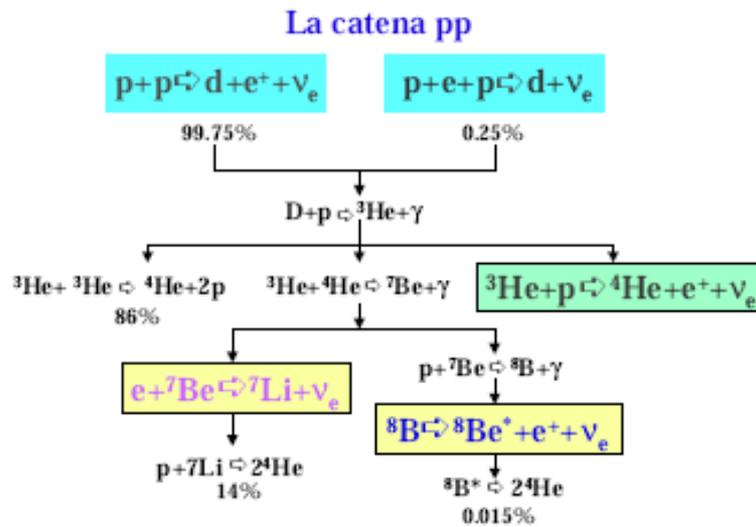


→ Studio dei neutrini stellari che ci permette di studiare le stelle e le reazioni che avvengono al loro interno.

→ In conseguenza di alcuni esperimenti sono state osservate caratteristiche interpretabili come oscillazione di neutrino. Per oscillare i neutrini devono avere massa.

# I neutrini solari: la produzione

Predizioni dello SSM (Standard Solar Model) sul flusso di neutrini



# I neutrini solari: le proprietà

Neutrini emessi dal Sole al secondo (dalla relazione tra luminosità e reazione nucleare nel Sole)

$$N = 2 \frac{L_{\odot}}{1,6 \cdot 10^{-13} \cdot 26,1} \simeq 1,8 \cdot 10^{38} \text{s}^{-1}$$

Flusso neutrini sulla terra

$$\Phi = \frac{1}{4\pi D^2} \frac{2L_{\odot}}{Q - 2E_{\nu}} \geq \frac{2L_{\odot}}{Q 4\pi D^2} \simeq 6,4 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$$

Frequenza interazioni rilevabili ( $E(\nu) \simeq 1 \text{MeV}$ )

$$\sum \Phi \cdot \sigma(\text{sezione d'urto}) \sim 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \cdot 10^{-46} \text{cm}^2$$



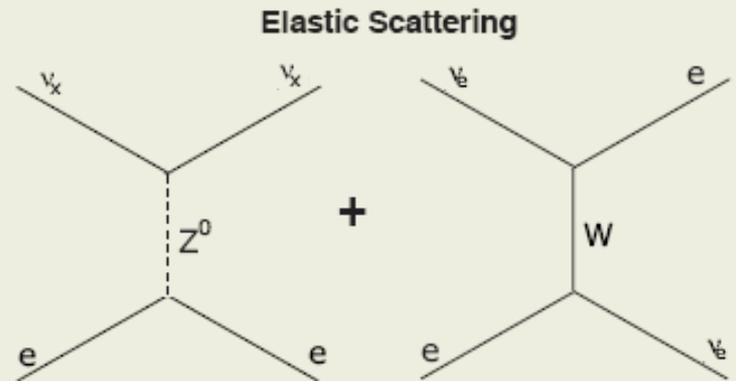
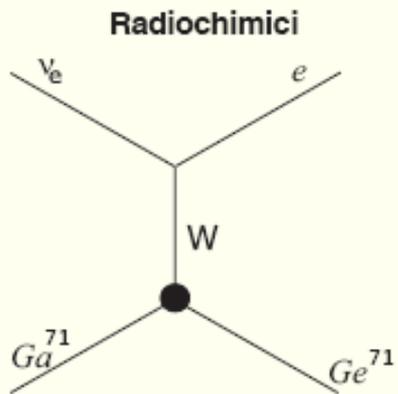
Difficili da osservare

dove

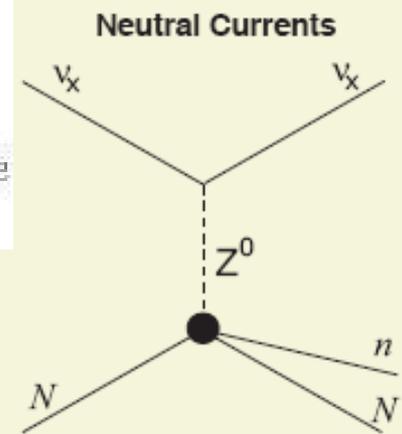
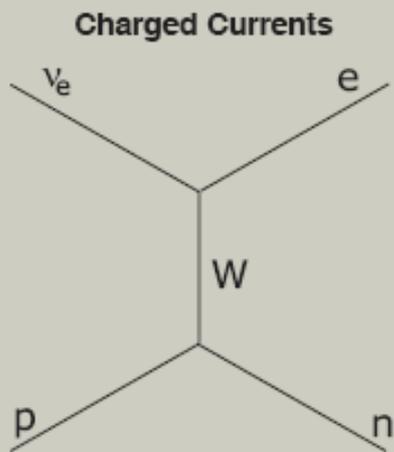
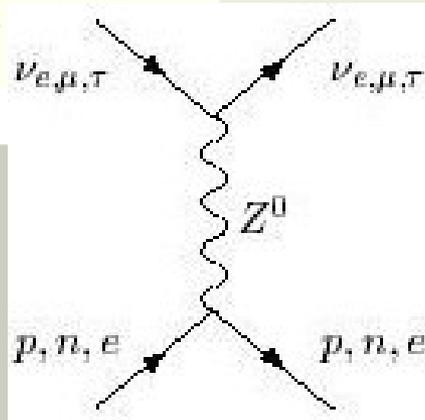
$$L_{\odot} = 3,846 \cdot 10^{26} \text{W}, D = 1,496 \cdot 10^{11} \text{m}, Q = 24,68 \text{MeV}$$

# Tipologie esperimenti

- **Esperimenti radiochimici**: raccolte dati di alcuni mesi per avere un singolo valore (per le misure di energia prendono gli spettri integrali). Possono avere una soglia di rivelazione molto bassa (fino al ciclo principale *pp*).
- **Esperimenti in tempo reale**: ogni interazione viene rilevata e registrata con le sue proprietà in tempo reale (per le misure di energia producono uno spettro differenziale), ma hanno soglie alte ( $>5$  MeV  $\Rightarrow$  solo ciclo B ed *hep*).



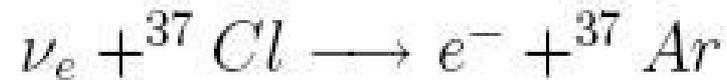
$$\frac{\sigma(\nu_{\mu,\tau})}{\sigma(\nu_e)} \simeq 0.15$$



# Esperimento Homestake

(R. Davis et al.)

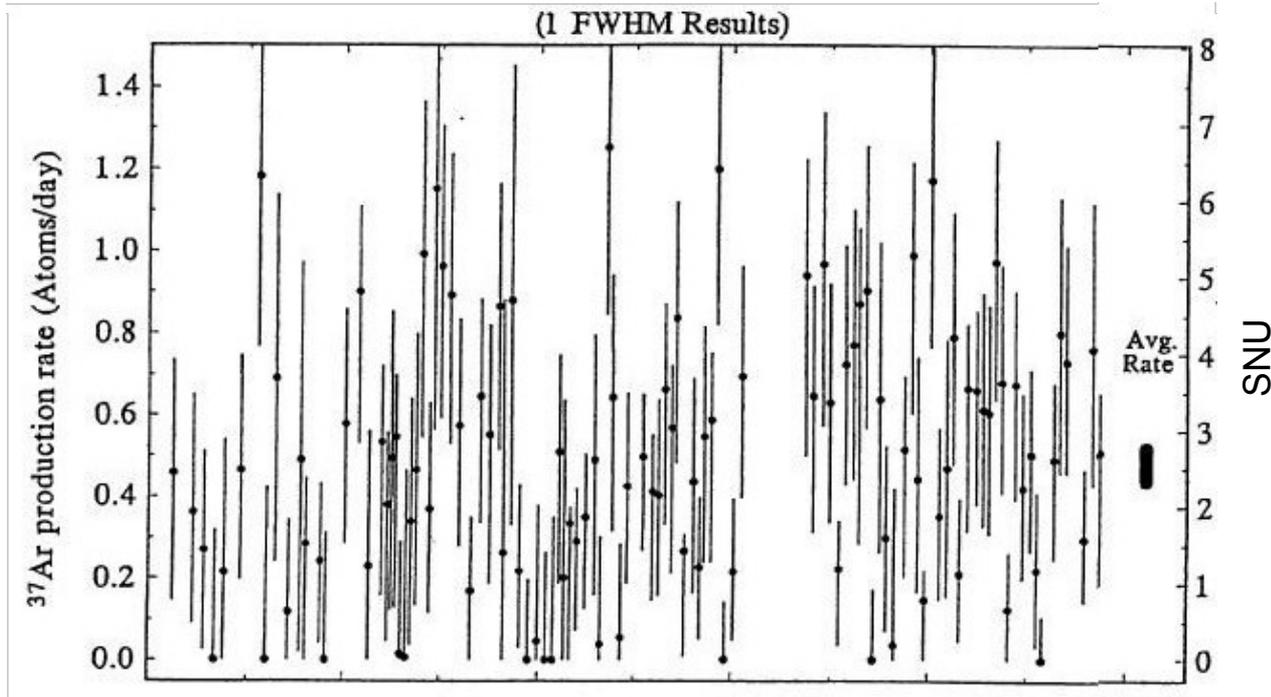
Proposto nel 1964, operativo dal 1967 al 1994, è stato il primo (e a lungo il solo) esperimento sui neutrini solari. E' un esperimento di tipo radiochimico che studia la reazione



con energia di soglia pari a 814KeV => sensibile ai neutrini del ciclo del boro, del berillio ed *hep*.

SSM prevede 1,5 atomi di  ${}^{37}\text{Ar}$  prodotti al giorno in una vasca con 390m<sup>3</sup> di C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> (124,8T di  ${}^{37}\text{Cl}$ ).

# Risultati Homstake



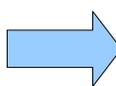
Predizione SSM:

$$7.7_{-1.0}^{+1.2} \text{ SNU}$$

Rate misurata:

$$2.56 \pm 0.16 \text{ (stat)} \pm 0.16 \text{ (syst)} \text{ SNU}$$

$$\Phi^{meas} / \Phi^{theory} \approx \frac{1}{3}$$

(  oscillazioni? )

# Esperimento Super-Kamiokande

E' un esperimento in tempo reale volto a misurare il flusso di neutrini solari rivelando gli elettroni prodotti secondo la reazione



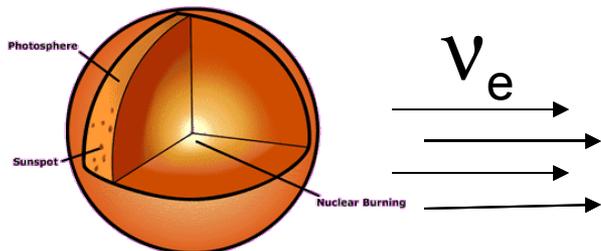
con sez. d'urto

$$\begin{cases} \sigma_{total} = 8.96 \times 10^{-44} \text{ cm}^2 & \text{per } \nu_e \\ \sigma_{total} = 1.58 \times 10^{-44} \text{ cm}^2 & \text{per } \nu_\mu, \nu_\tau \end{cases}$$

La differenza è dovuta al fatto che i neutrini  $\mu$  e  $\tau$  (che si formano per oscillazione) interagiscono solo con NC.

# S-K: caratteristiche

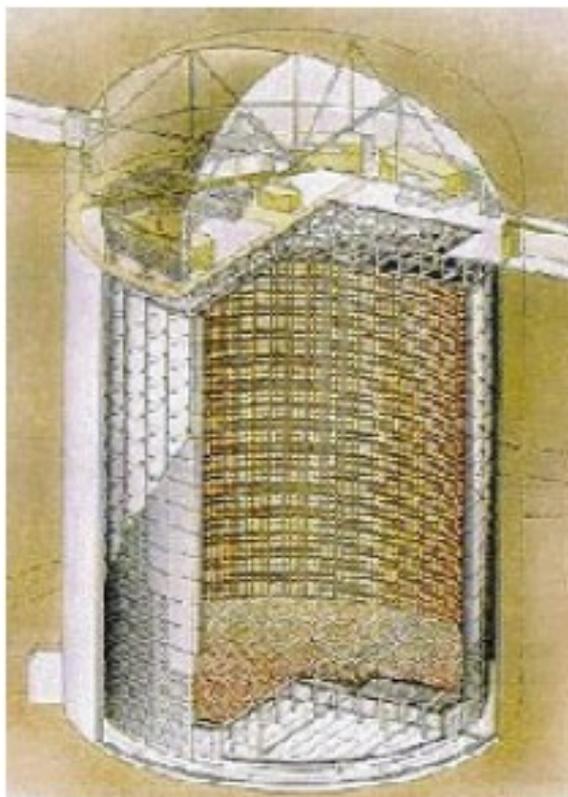
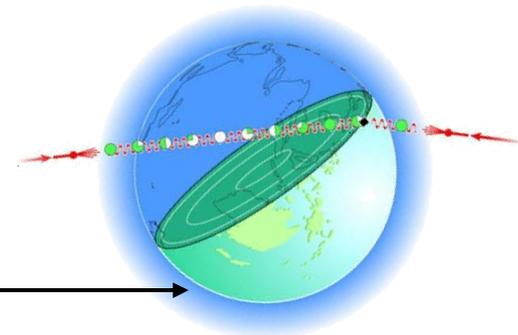
source



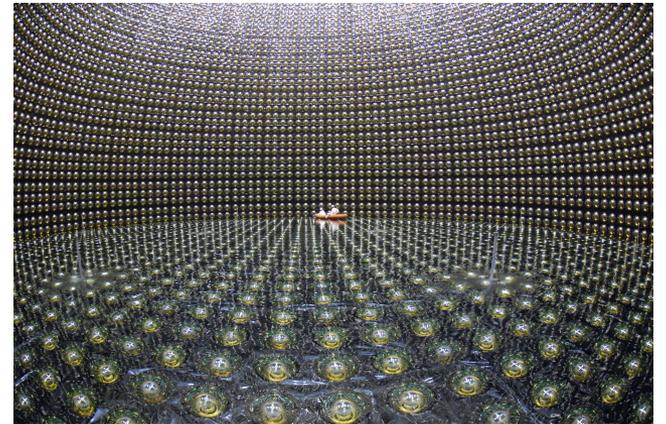
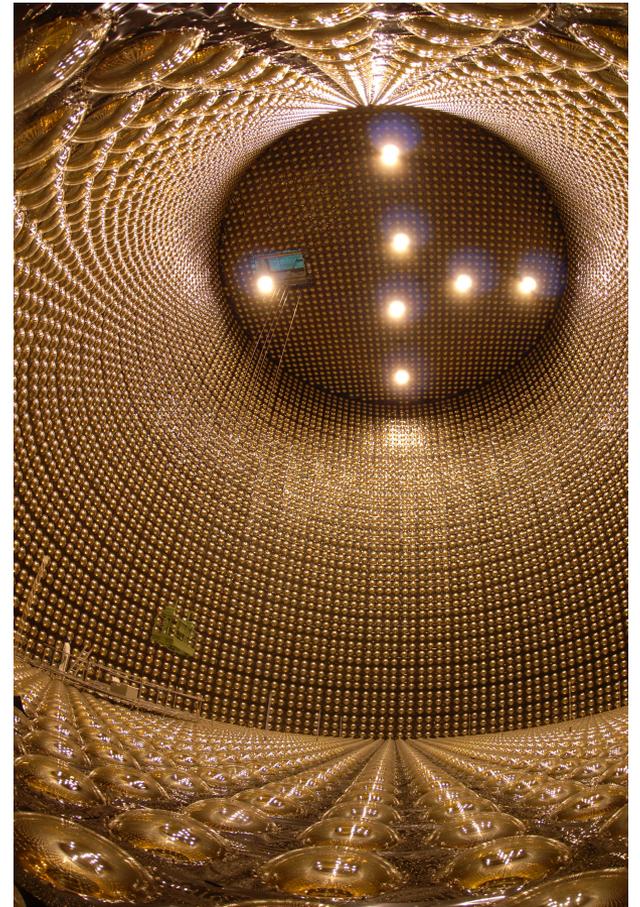
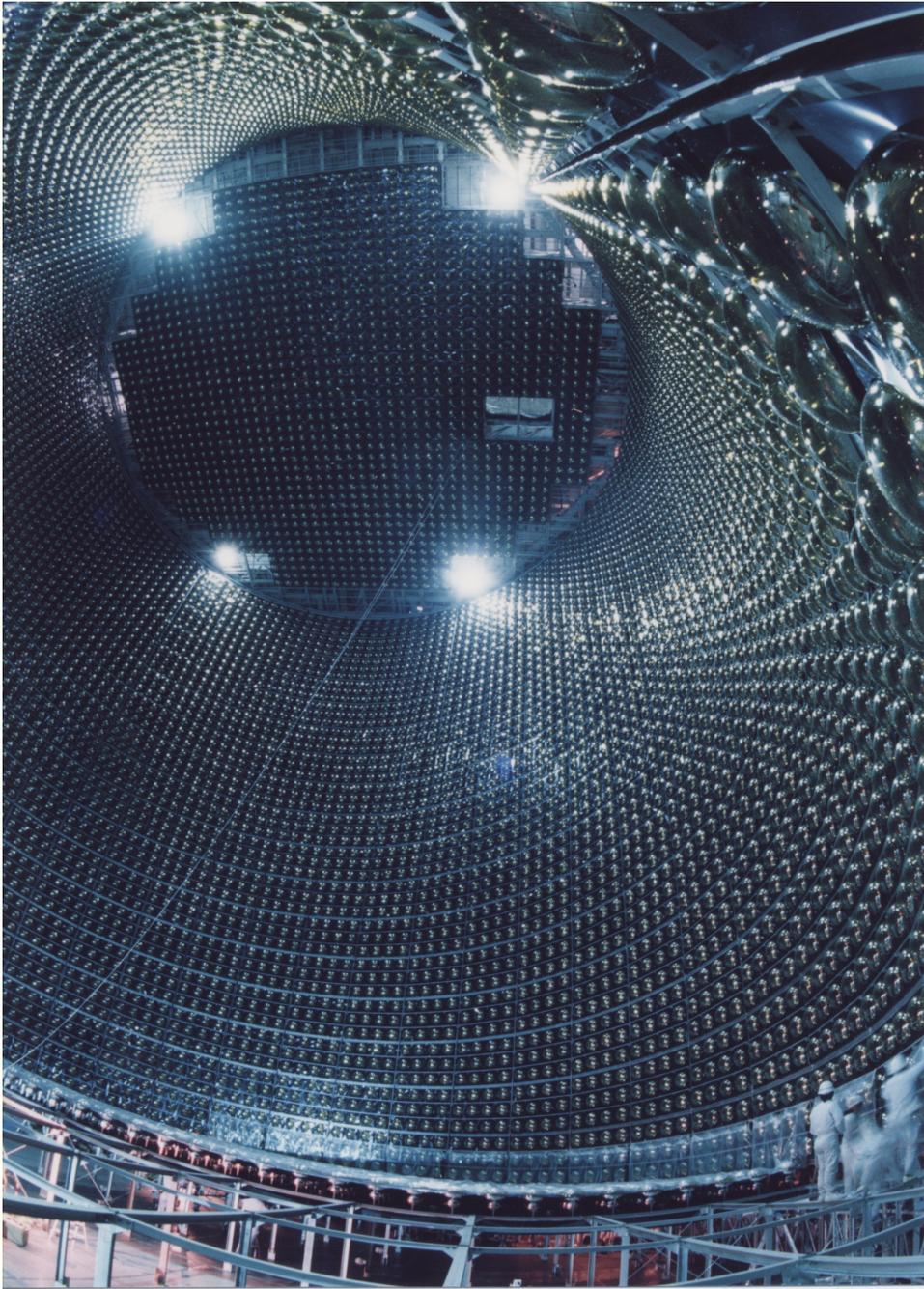
propagation

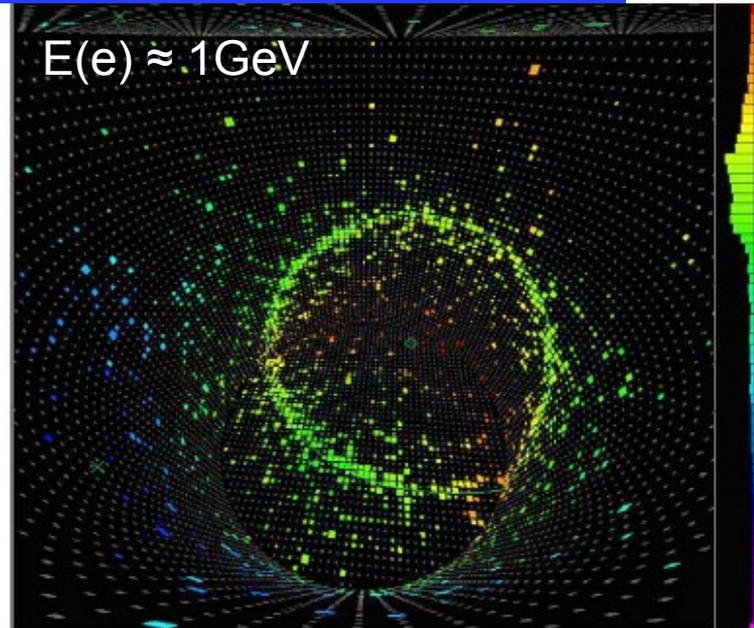
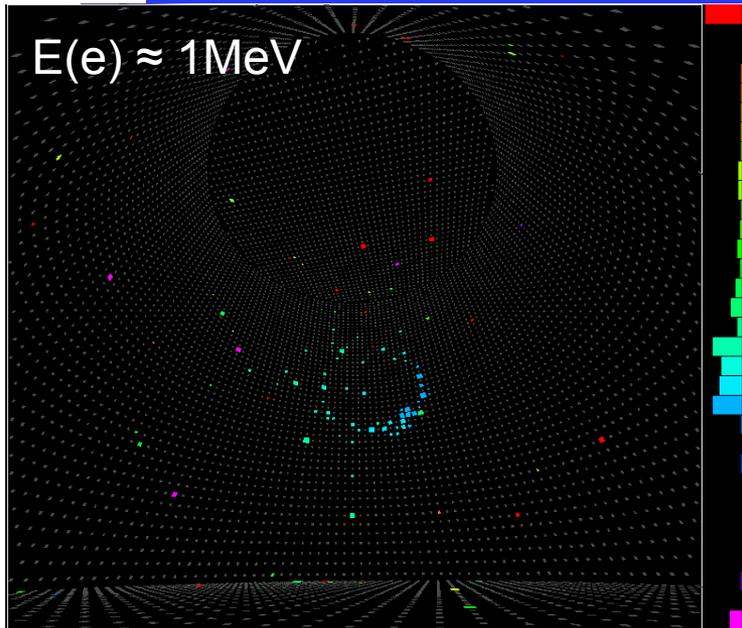
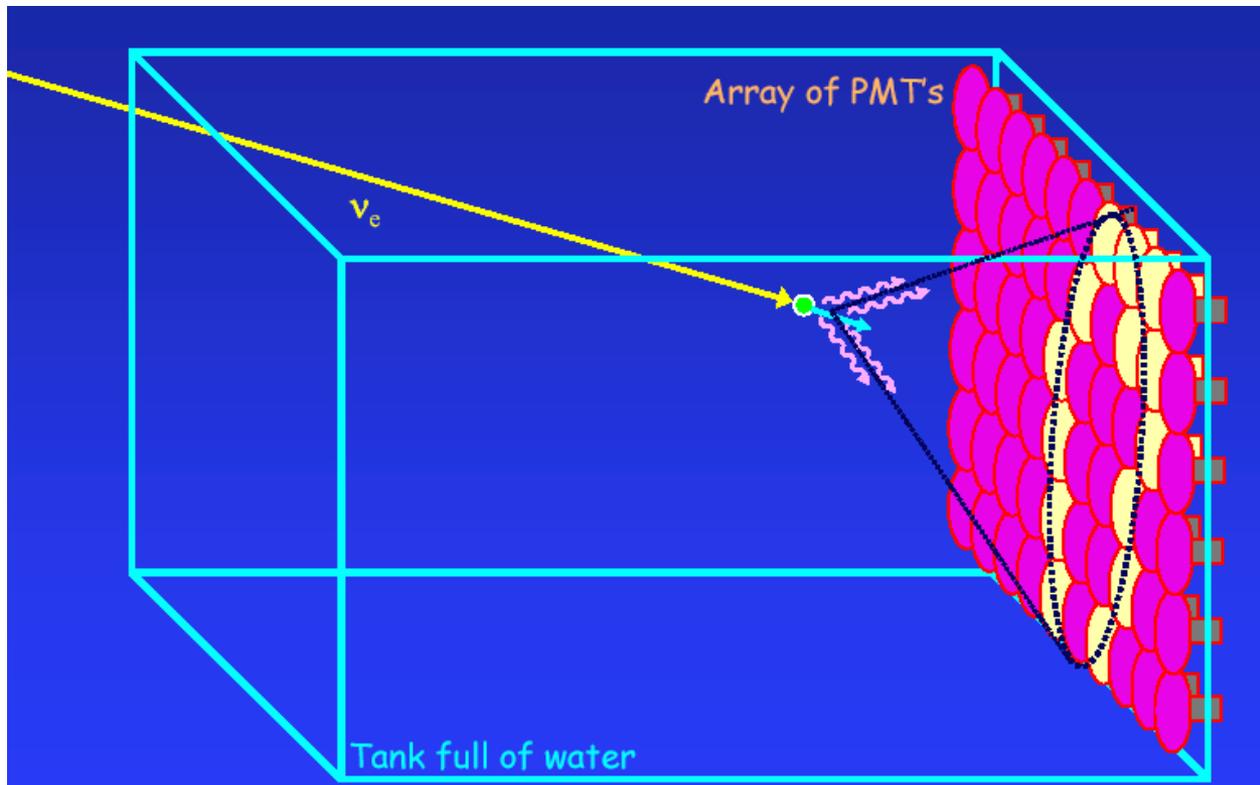
L

detection



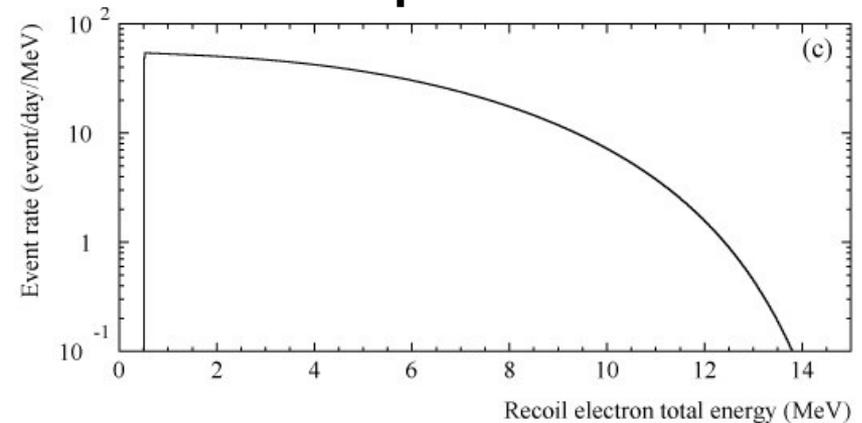
Tank	Dimensioni	$\Phi = 39,3\text{m}$ $h = 41,4\text{m}$
	Volume	50KT
Rivelatore esterno	Spessore	2,6m ( $7,2X_0$ e $4,3\lambda$ )
	Volume	18KT
	# di PM	302(sopra), 308(soto), 1275("barile")
Rivelatore interno	Dimensioni	$\Phi = 33,8\text{m}$ $h = 36,2\text{m}$
	Volume	32KT
	# di PM	1748(basi), 7650(lati), 40,4% copertura
Fiduciale	Spessore	2m dal muro interno ( $5,5X_0$ e $3,3\lambda$ )
	Volume	22KT





# S-K: principio di funzionamento

- Se  $E(e_{\text{rinculo}}) > 5\text{MeV}$ , l'elettrone si muove  $\approx$  nella stessa direzione del neutrino e produce una traccia di qualche cm (soglia  $0,768\text{ MeV}$  energy loss  $\approx 3\text{MeV/cm}$ )



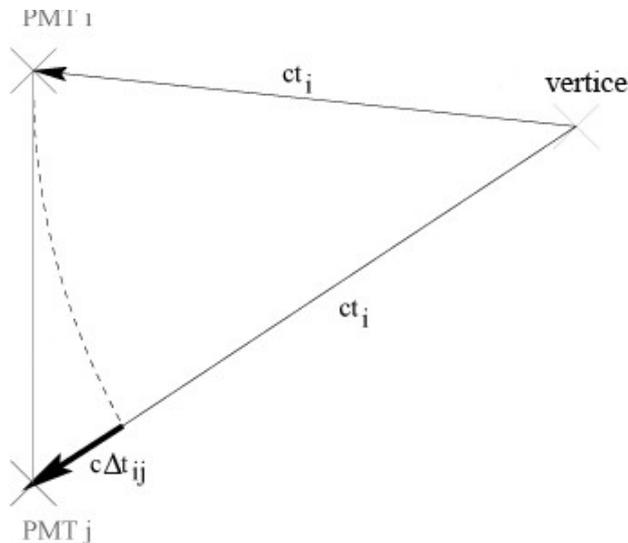
- Elettrone produce un cono di luce Cherenkov ( $7\gamma/\text{MeV}$ )
- Ricostruzione del vertice (traccia elettrone considerata puntiforme), della provenienza del neutrino e della sua energia

# S-K: principio di funzionamento

## •RICOSTRUZIONE DEL VERTICE:

l'altezza dell'impulso nei PM è di tipo singolo  $e/\gamma$   
=> no info su intensità della luce, distanza della sorgente e impossibilità di separare  $\gamma$  scatterati dal rumore della strumentazione.

La ricostruzione si effettua considerando che un fotone non diffuso segue una linea dritta fino al PM:



tempo di hit

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

# S-K: principio di funzionamento

## • RICOSTRUZIONE ELETTRONE:

- Ricostruzione del cono Cherenkov e del vertice (anche per controllare se è all'interno del fiduciale) dai PM colpiti, da cui:

- $\theta_e$  da asse del cono

- $E(e)$  da  $N_{\text{hit}}$  ( $E(e)$  proporzionale a # di  $\gamma$  prodotti, pochi  $\gamma$  prodotti  $\Rightarrow E(e)$  proporzionale a # di PM colpiti).

## • RICOSTRUZIONE NEUTRINO:

- La relazione

$$\cos\theta = \frac{1 + m_e/E_\nu}{\sqrt{1 + 2m_e/T_e}}$$

conferma che  $\theta_e \approx \theta_\nu$  e da  $E(e)$  si ricostruisce  $E(\nu)$ .

# S-K: principio di funzionamento

- FONDO:

- $E < 6,5\text{MeV}$

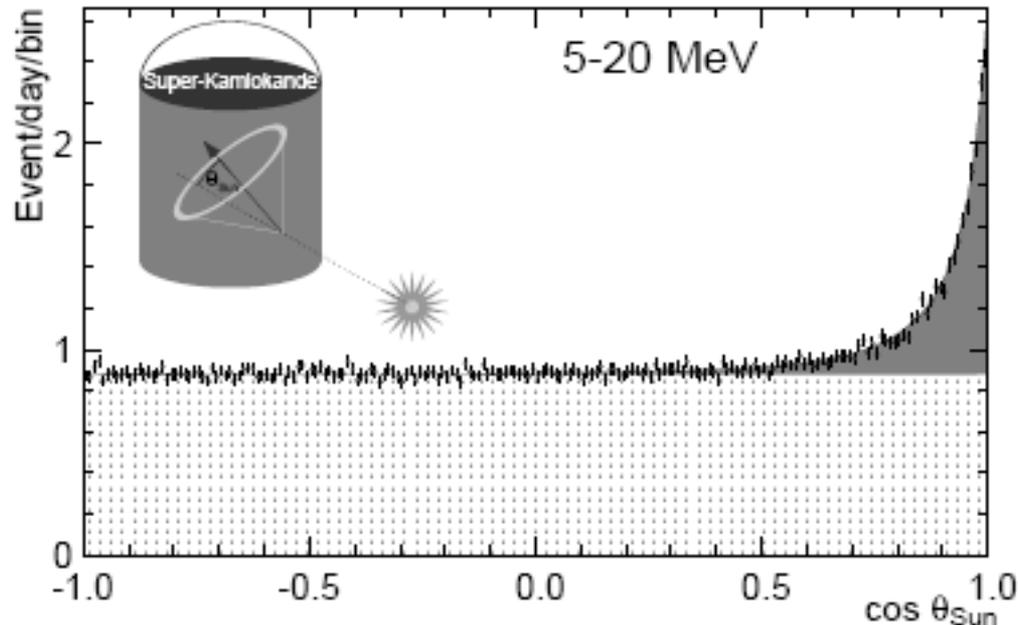
- Eventi fuori dal fiduciale

- $^{222}\text{Rn}$

- $E > 6,5\text{MeV}$

- Isotopi radioattivi prodotti per spallation da  $\mu$  cosmici

# S-K: provenienza dei neutrini



Distribuzione angolare degli eventi candidati ad essere neutrini solari.

La zona punteggiata rappresenta il fondo, mentre il picco conferma la provenienza solare dei neutrini.

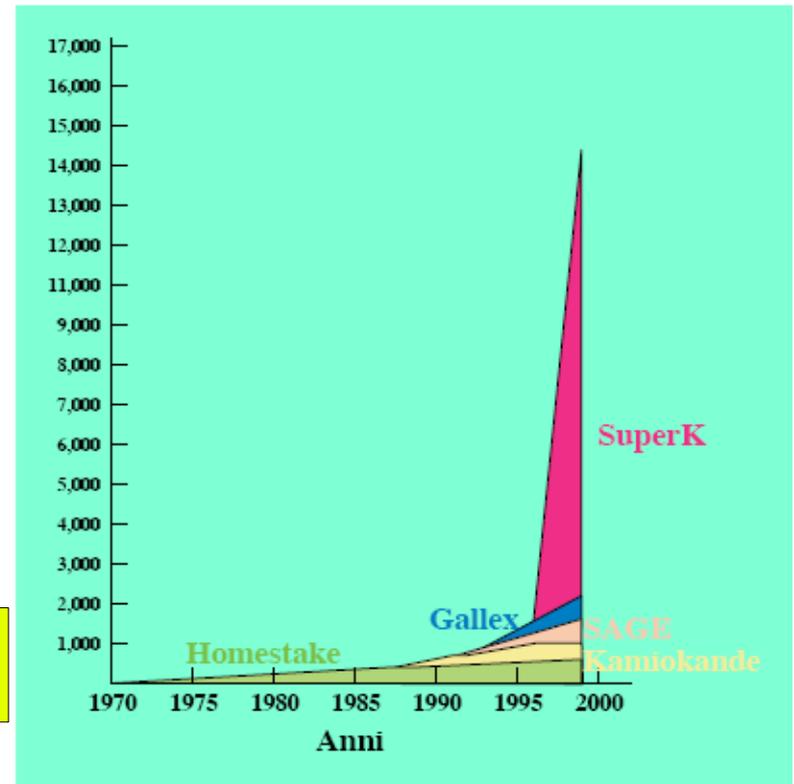
# Risultati S-K

Numero di neutrini solari:

$$22400 \pm 230 \text{ (stat. + sist.)}$$

( $\approx 13$  eventi al giorno)

$$\text{Flusso} = 2.35 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{syst.}) \times 10^6 / \text{cm}^2 \text{s}$$



$$\Phi^{meas} / \Phi^{theory}_{tot} = 0,465^{+0,016}_{-0,015} (stat.)^{+0,19}_{-0,17} (sist.)$$

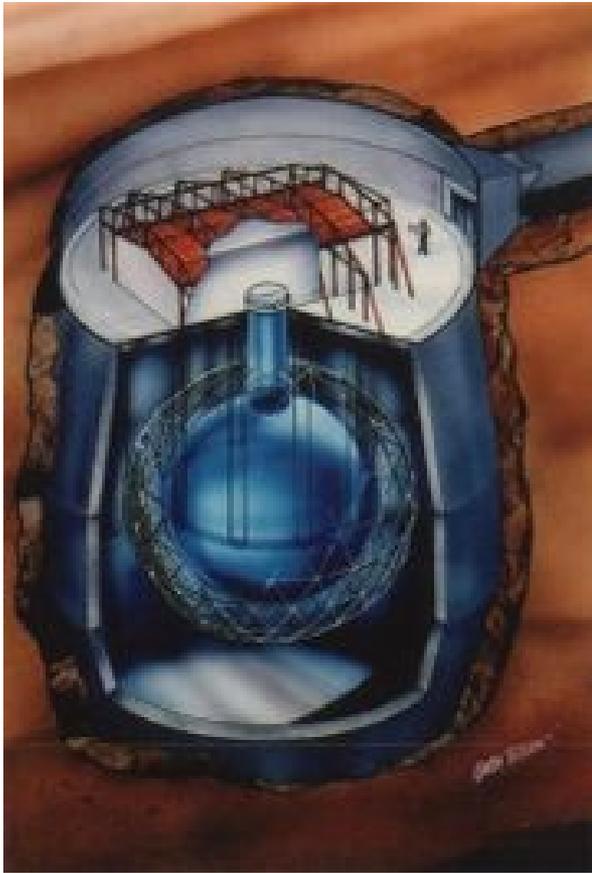
In accordo con la teoria dell'oscillazione dei neutrini e del SSM, con  $\Delta m_{12}^2 = 7 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2$ ,  $\theta_{12} \simeq 30^\circ$

# Esperimento SNO

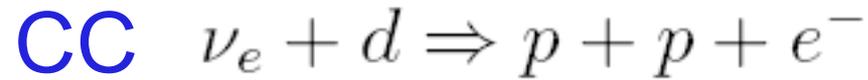
E' un esperimento in tempo reale costruito dentro una miniera.

Il detector interno contiene 1KT di  $D_2O$  ed è circondato da 10000 fototubi.

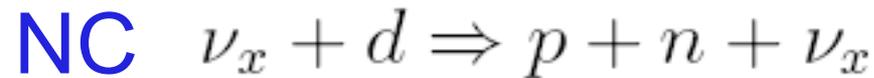
Quello esterno, a forma di barile ( $\phi = 22m$ ,  $h = 34m$ ), è riempito con  $H_2O$  pura che funge da sostegno e schermo dalle particelle diverse dai neutrini.



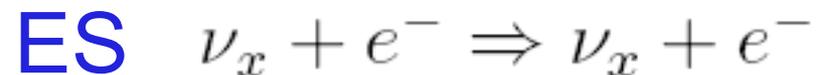
# Reazioni sotto studio in SNO



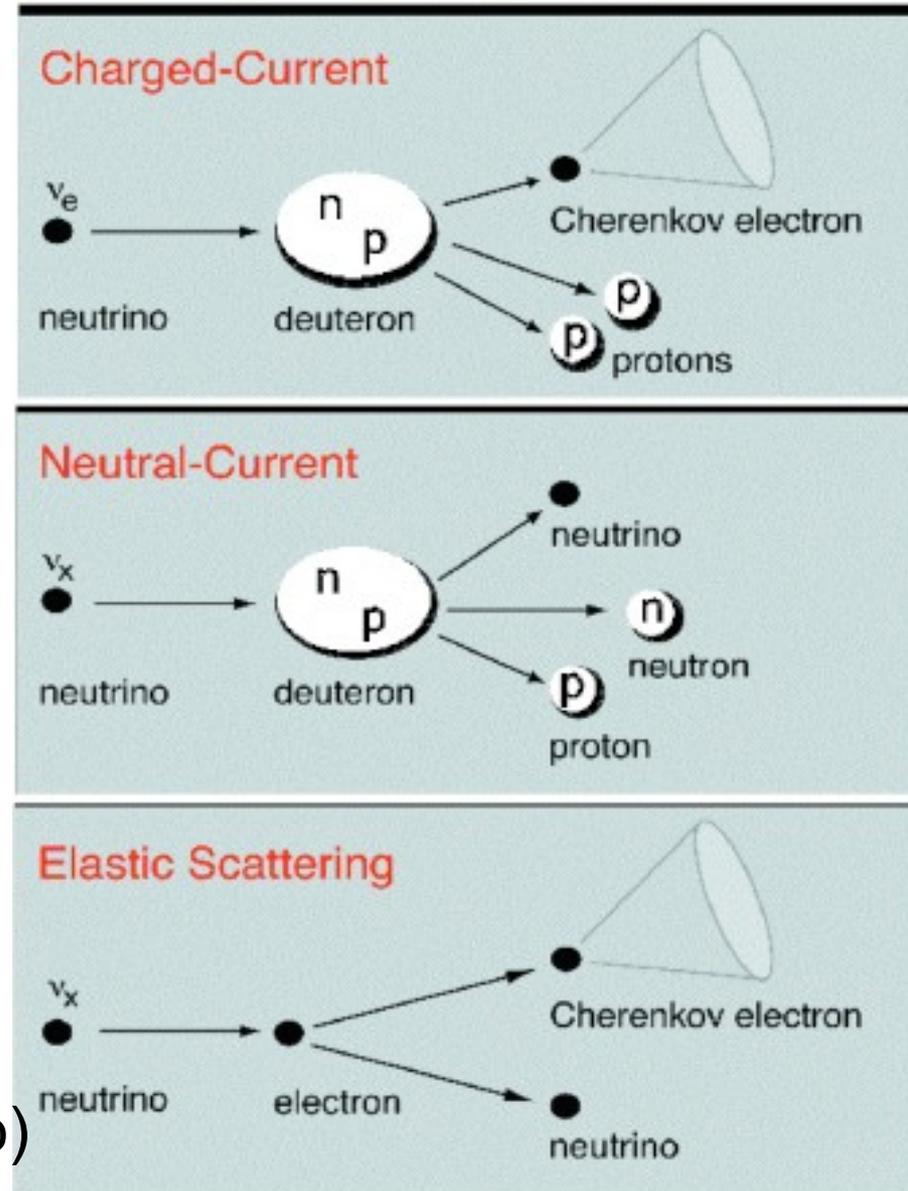
- Spettro preciso di  $\nu_e$
- Poca sensibilità alla direzione
- Solo  $\nu_e$



- Misura del flusso tot di  $\nu$  del ciclo  $^8\text{B}$  del Sole
- Sez. d'urto uguale per tutti i  $\nu$



- Poca statistica
- Molta sensibilità alla direzione
- Sensibile a  $\nu_e$  (molto)  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$  (poco)



# Bibliografia

Appunti del prof. P. F. Loverre, **Fisica del neutrino**

The Super-Kamiokande Collaboration, **Solar neutrino measurement in Super-Kamiokande – I**, 2 Aprile 2007

M. Mezzetto, **Lezioni di Dottorato di Ricerca**, Aprile 2006

J. N. Bahacall, **Solving the Mystery of the Missing Neutrinos**, [www.nobel.se](http://www.nobel.se)

The T2K Collaboration (ND280 group), **Conceptual Design Report**, 18 Settembre 2005

J. J. Gòmez-Cadenas, **An introductory course on neutrino physics (III – IV)**, Luglio 2006