

Neutrini

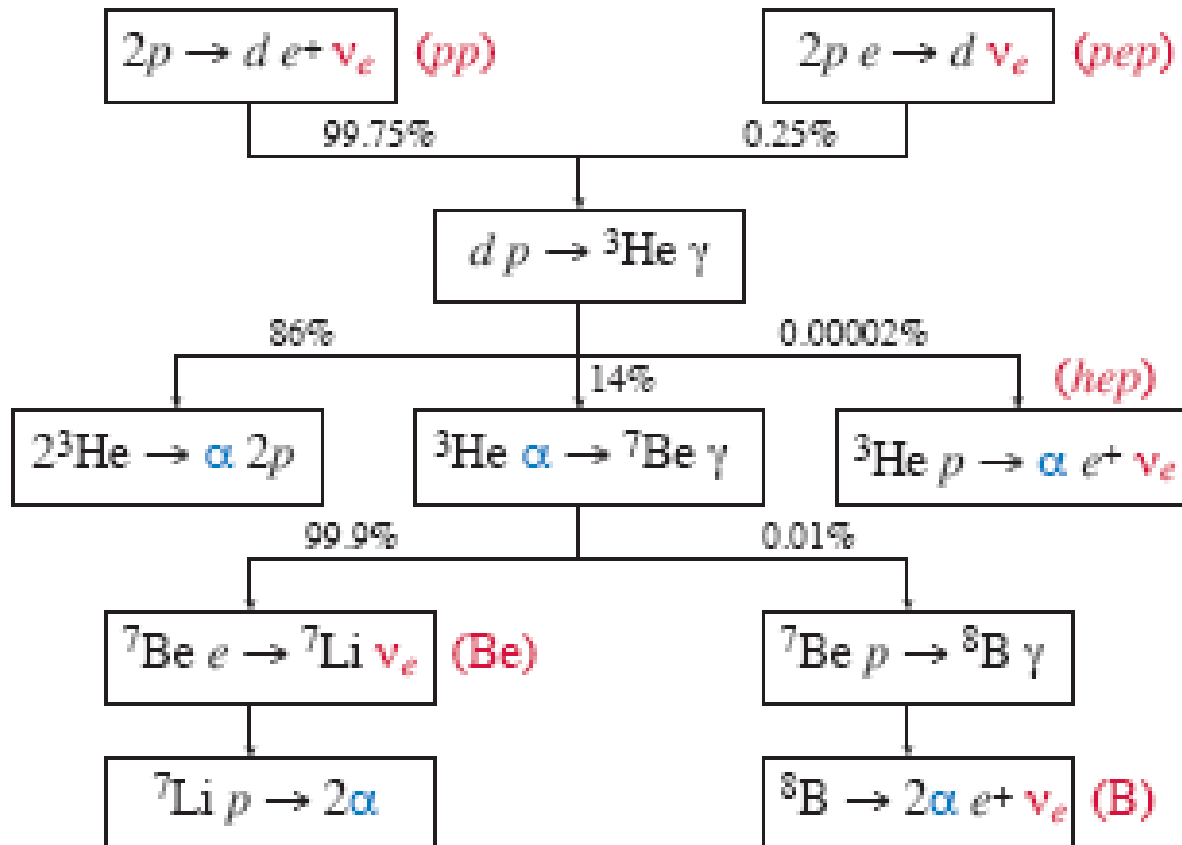
- Problema dei neutrini solari
- Neutrini atmosferici
- Oscillazione dei neutrini
-

Che cosa “brucia” il sole?

- Antichi Egizi: il sole è una palla di fuoco
- Anassagora: il sole è fatto da ferro incandescente
- 1850: J. Waterstone mostra che “energia chimica” (combustione) poteva alimentare il Sole soltanto per 10 mila anni (età della pietra).
Occorre un altro combustibile: forza di gravità, ma non ci sono abbastanza meteore.
- 1860: Lord Kelvin. Sole che si contrae sotto l’azione della forza di gravità.
Età del sole al massimo 100 milioni di anni.
- **Discredidata la teoria di Darwin che ha bisogno di più tempo.**
- 1897: viene scoperta la radioattività. Questa potrebbe fornire energia sufficiente, ma nel Sole non ci sono elementi pesanti, che è fatto soprattutto da idrogeno e elio.
- 1920. Eddington: viene bruciato idrogeno per produrre elio.
- 1938: Bethe. Teoria quantitativa dei processi di fusione nucleare del Sole.
- 1960: John Bahcall. Standard Solar Model.

Bethe: il Sole “brucia” idrogeno

Ciclo pp



In the center of the sun



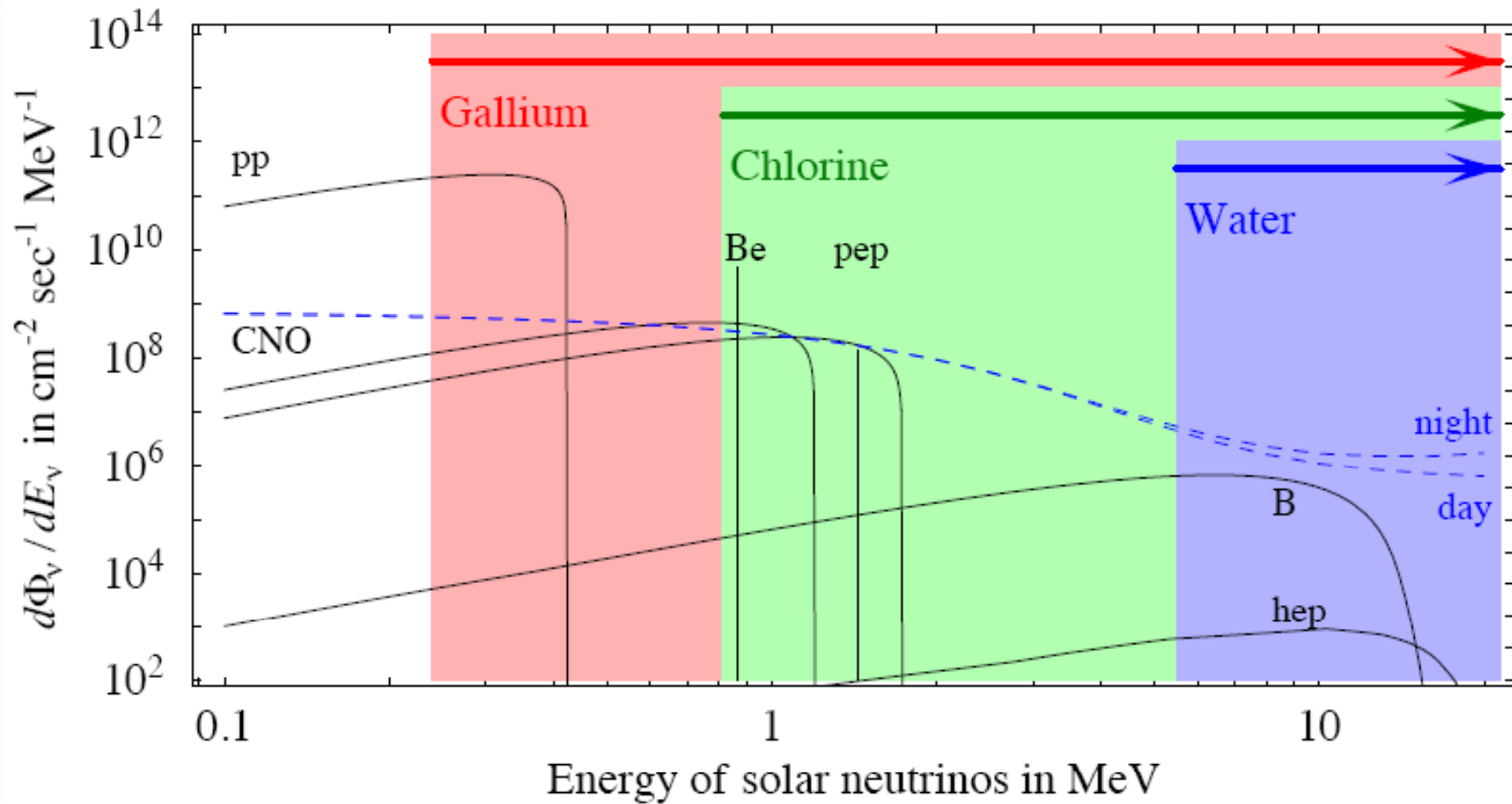
$$Q = 26.73 \text{ MeV}$$

$$\langle E_\nu \rangle \approx 0.3 \text{ MeV}$$

$$\text{Solar } \Phi(\nu) \approx 6 \cdot 10^{10} \nu/\text{cm}^2\text{s}$$

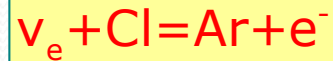
Il ciclo CNO è importante nelle stelle più vecchie

Spettro dei neutrini solari



Come rivelare i neutrini?

- Idea di Bruno Pontecorvo del 1946. Utilizzare la reazione:



Soglia della reazione: 860 KeV

↑
Radioattivo con tempo di dimezzamento di 35 giorni

- Ray Davis nel 1955 cercò questa reazione nel reattore di Savannah River nel South Carolina, senza vedere NULLA (perché?).
- Nel 1956 Reines e Cowan scoprono l'antineutrino nello stesso reattore.
- Nel 1959 Davis iniziò a cercare i neutrini solari prodotti dal Be^7 e John Bahcall inizia i suoi calcoli sul flusso atteso dei neutrini.
- 1965: iniziano i lavori nella miniera di Homestake per installare 400 m³ di cloro (liquido detergente).
- 1966: inizio presa dati.
- 1968: si vedono meno neutrini di quelli aspettati. Sbagliato il calcolo?

Quanti neutrini?

- J. Bahcall : $\Phi(\nu_e) = 6.6 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- Neutrini da Be^7 : flusso ridotto di un fattore 10^4 .
- Solar Neutrino Unit: 1 cattura di ν_e al secondo per 10^{36} atomi bersaglio

$$\text{SNU} = 10^{-36} \text{ catture/atomo/secondo}$$

- Calcolo di Bahcall: 7.5 SNU
- Misura di Davis (1968): 3 SNU
- Good News: Davis aveva visto per la prima volta i neutrini solari
- Bad News: la rate misurata era circa la metà di quella aspettata.
- 1968. Pontecorvo: idea delle oscillazioni dei neutrini.



Davis & Bahcall

Altri esperimenti radiochimici

Low threshold radio-chemical counting experiments

$\nu_e + (A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^-$ with $(A, Z+1)$ unstable, lifetime of some weeks

largest possible target mass : tens of tons to 100 tons (GNO)

event rate \approx 1 event/day

buried under mountains or in deep mines : reduce cosmic muons to some tens / day

extract 10-20 atoms of $(A, Z+1)$ every some weeks and count the decays

extraction efficiency $>$ 99% calibrated with ν source (^{51}Cr , 1.8 MCi !!!)

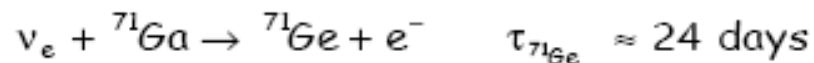
The glorious Homestake exp^t (1968-99) 31 years of data taking, 2000 int.^{ions}



$$E_{\nu\text{Be}} = 0.861 \text{ MeV} > E_{\text{thresh}} = 0.813 \text{ MeV} > E_{\text{vpp}}^{\text{max}} = 0.423 \text{ MeV}$$

Prime importance given the $\nu_{\text{Be}} - \nu_{\text{B}}$ strong correlation

Gallium experiments : GALLEX, GNO (under Gran Sasso) , SAGE (Baksan mine)
1992-97 1998- 1991-



$$E_{\text{thresh}} = 0.233 \text{ MeV} < E_{\text{vpp}}^{\text{max}} = 0.423 \text{ MeV}$$

Prime importance to measure the bulk of the flux

1986: Kamiokande Detector

A fine 1986 inizia a prendere dati l'esperimento Kamiokande (Kamioka Neutron Decay Experiment), sito nella miniera di Kamioka, in Giappone.

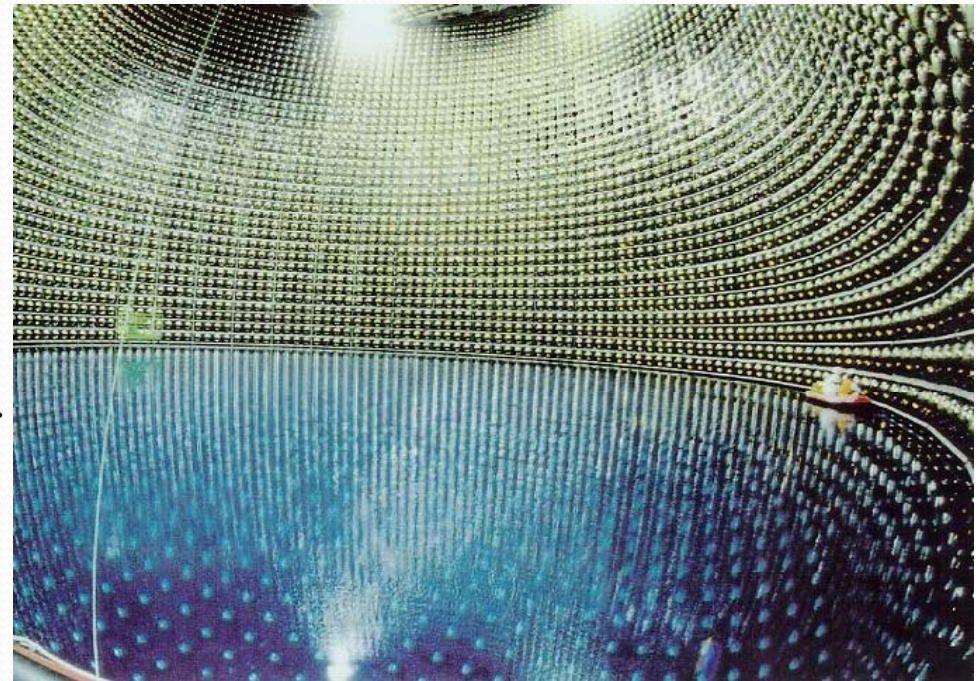
Negli Stati Uniti entra in funzione l'esperimento IMB.

Il segnale e' dato dalla luce Cherenkov prodotta dagli elettroni o muoni, letta da fotomoltiplicatori.

Kamiokande riuscì a vedere i neutrini prodotti dall'esplosione della supernova nella Large Magellanic Cloud il 23/2/1987.

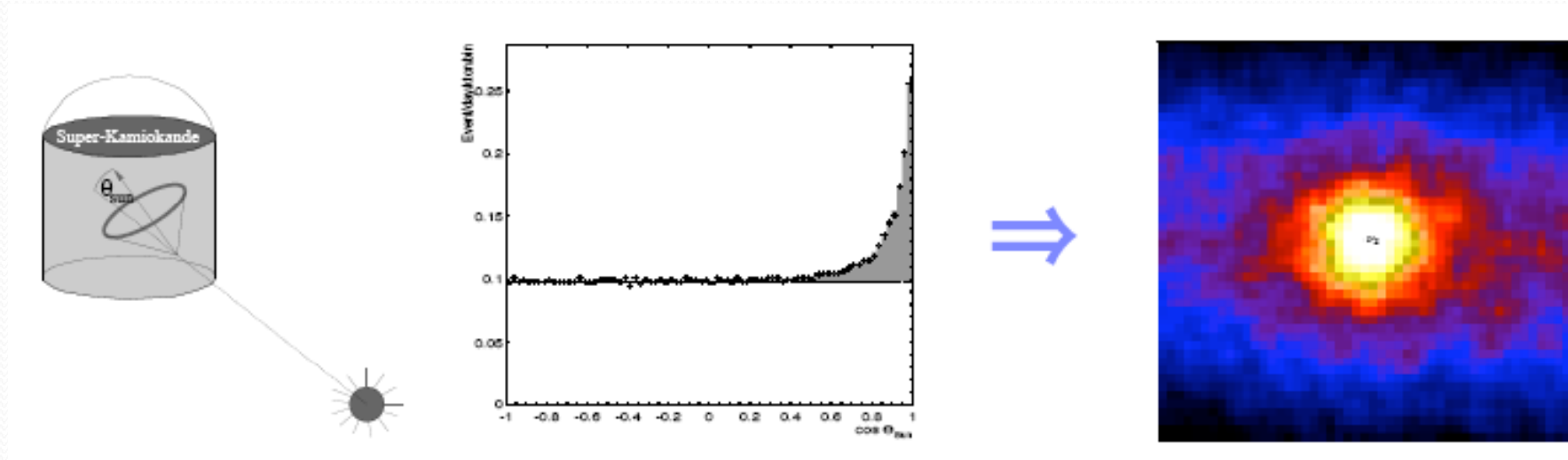
Kamiokande e' in grado di registrare l'interazione dei neutrini in tempo reale e di registrarne la direzione e l'energia.

ANOMALIA nei neutrini atmosferici.

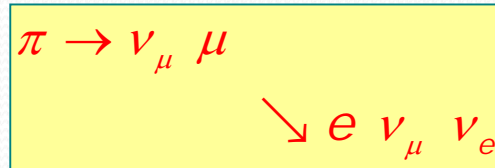


“Neutrinografia del Sole”

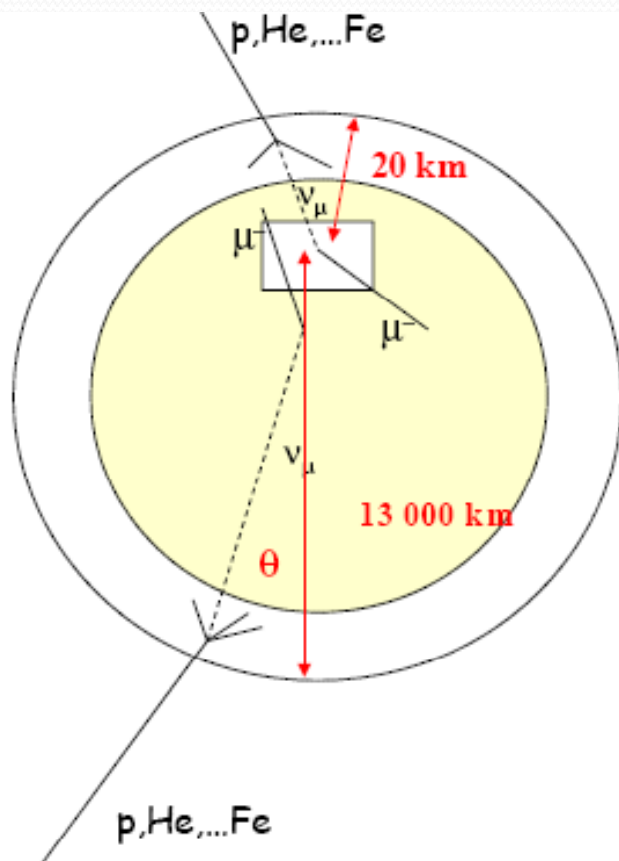
- I fotoni prodotti all'interno del Sole impiegano circa un milione di anni per arrivare in superficie. Il Sole adesso potrebbe anche essere spento!
- Con i neutrini si osserva il centro del Sole “istantaneamente”.



Produzione di neutrini atmosferici

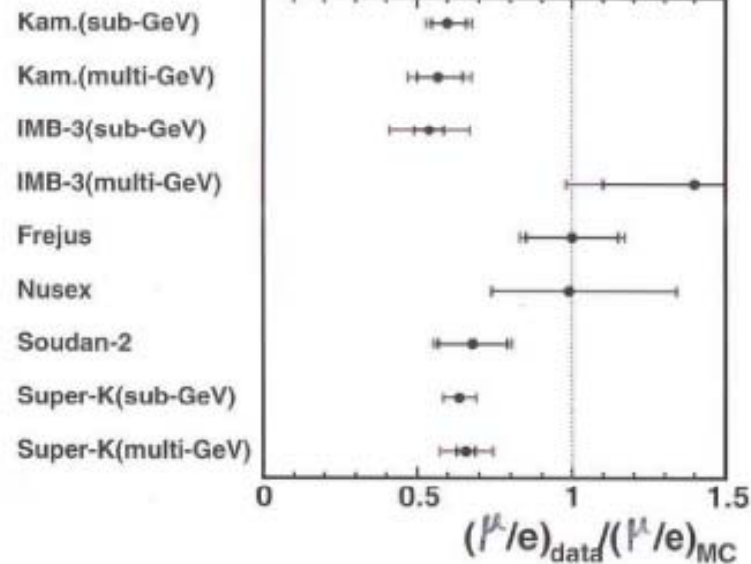


$$R = \frac{\Phi(\nu_\mu)}{\Phi(\nu_e)} \approx 2$$



μ/e ratio

Y. Fukuda et al., Phys. Lett. B 335 (1994) 237.
M. Shiozawa, for the SK collab., talk at Neutrino 2002, Munich, May 2002



Mancano dei neutrini mu

Il deficit e' maggiore per quelli che attraversano la Terra

Dove vanno a finire i neutrini?

Ipotesi: oscillano in un altro tipo che non produce segnale nel rivelatore.
Occorre una “smoking gun” per confermare l’ipotesi: l’esperimento SNO

Real-time **heavy-water** Cerenkov experiment : Sudbury Neutrino Observatory (SNO) (2001-2003)

1 kton of highly purified heavy water seen by ~ 9 500 PM tubes

7 kton light water shielding and veto

deeply buried at - 1300 m in Creighton mine, Sudbury : 70 cosmic μ / day

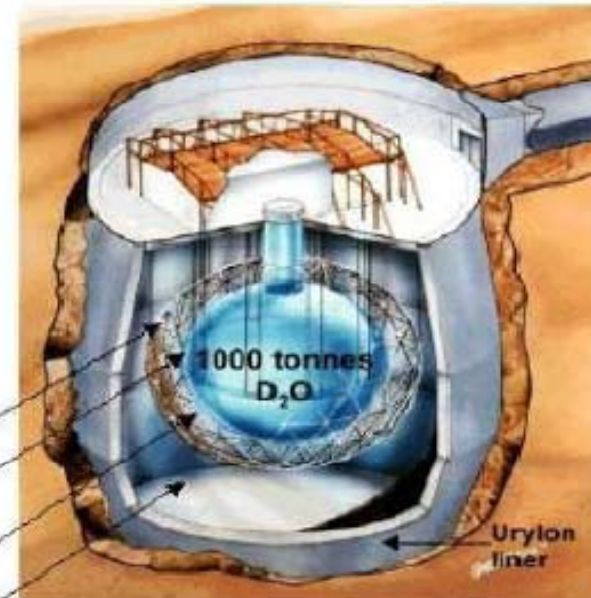


17.8m dia. PMT Support Structure
9456 PMTs, 56% coverage

12.01m dia. acrylic vessel

1700 tonnes of inner shielding H_2O

5300 tonnes of outer shielding H_2O



Host: INCO Ltd., Creighton #9 mine
Coordinates: 46° 28' 30" N 81° 12' 04" W
Depth: 2092 m (-6010 m.w.e., -70 μ day⁻¹)

Nucl. Inst. and Meth. A449, p172 (2000)

SNO

??? Why heavy water ???

Elastic scattering (ES) $\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$
like light water

directional sensitivity

CC & NC : $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ 86%

NC : $\nu_{\mu\tau} + e^- \rightarrow \nu_{\mu\tau} + e^-$ 14% some sensitivity

Charged current (CC) $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$

$E_{\text{thesh}} = 1.4 \text{ MeV}$

$E_\nu ; E_e \quad \sigma_E \approx 10 - 15\%$

Neutral current (NC) $\nu + d \rightarrow p + n + \nu$

measures ν_B total flux

Neutron detection : $\varepsilon \sim 14\%$

- capture $n + d \rightarrow t + 6.5 \text{ MeV } \gamma\text{-ray}$

- $\gamma\text{-ray conversion to } e^+ - e^- \text{ pairs: Cerenkovsignal}$

SNO: Risultati

- SNO(D₂O Cerenkov detector) measure **both charged and total ν flux**:

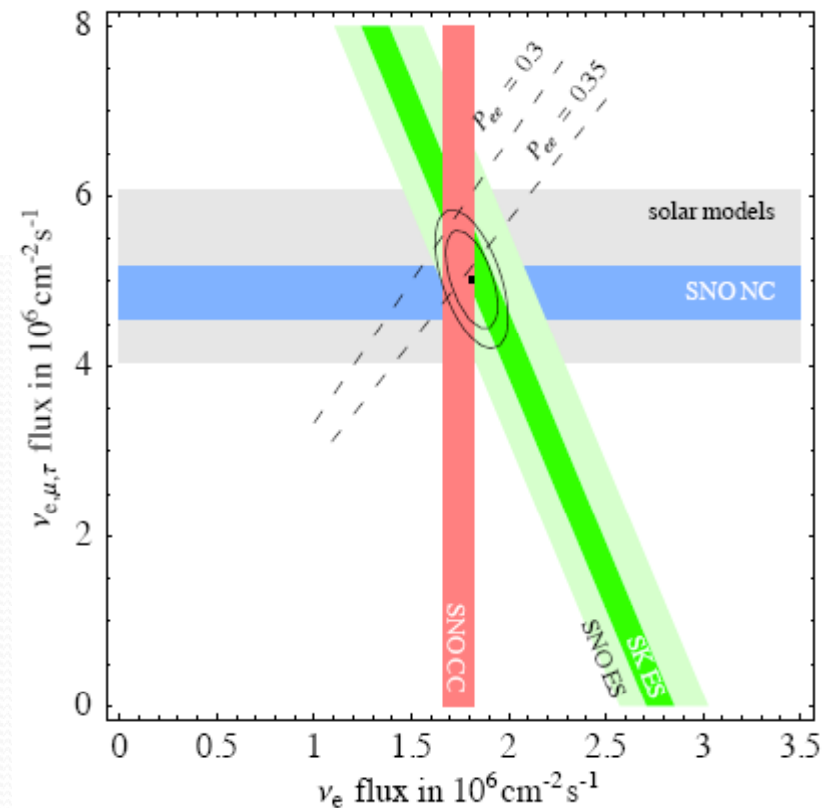
- ES: $\nu_{e,\mu,\tau}e \rightarrow \nu_{e,\mu,\tau}e \Rightarrow \Phi(\nu_e) + 0.155 \Phi(\nu_{\mu,\tau})$

- CC: $\nu_e D \rightarrow e^- pp \Rightarrow \Phi(\nu_e)$

- NC: $\nu D \rightarrow \nu pn \Rightarrow \Phi(\nu_{e,\mu,\tau})$

- NC rate as expected from Solar Model

- **CC/NC ratio:**
$$\frac{\phi(\nu_e)}{\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})} = 0.357 \pm 0.030$$



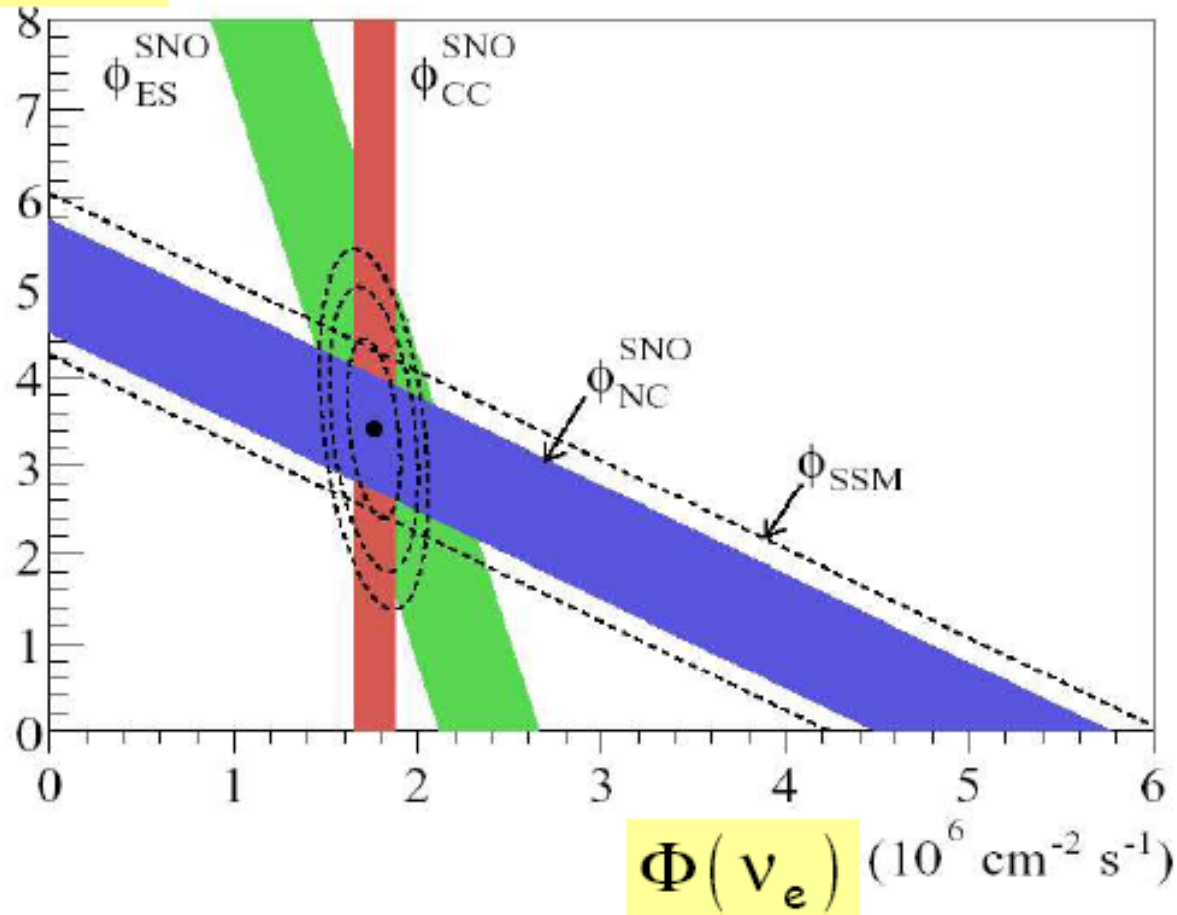
SNO 2002 : evidence for FLAVOR CHANGE

$$\Phi(\nu_{\mu} + \nu_{\tau})$$

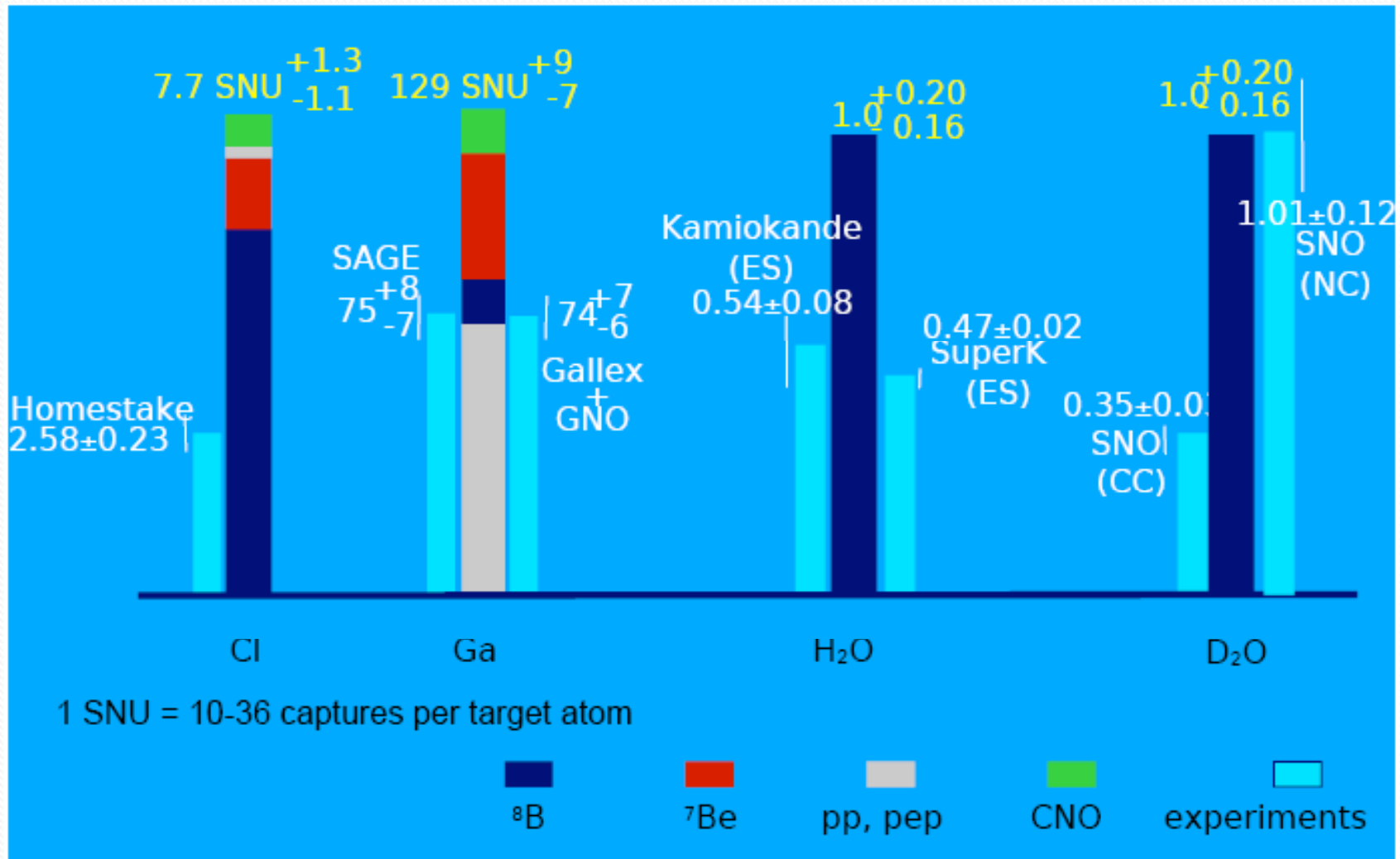
Standard Solar Model :

$5.05^{+1.01}_{-0.81}$ Bahcall et al.

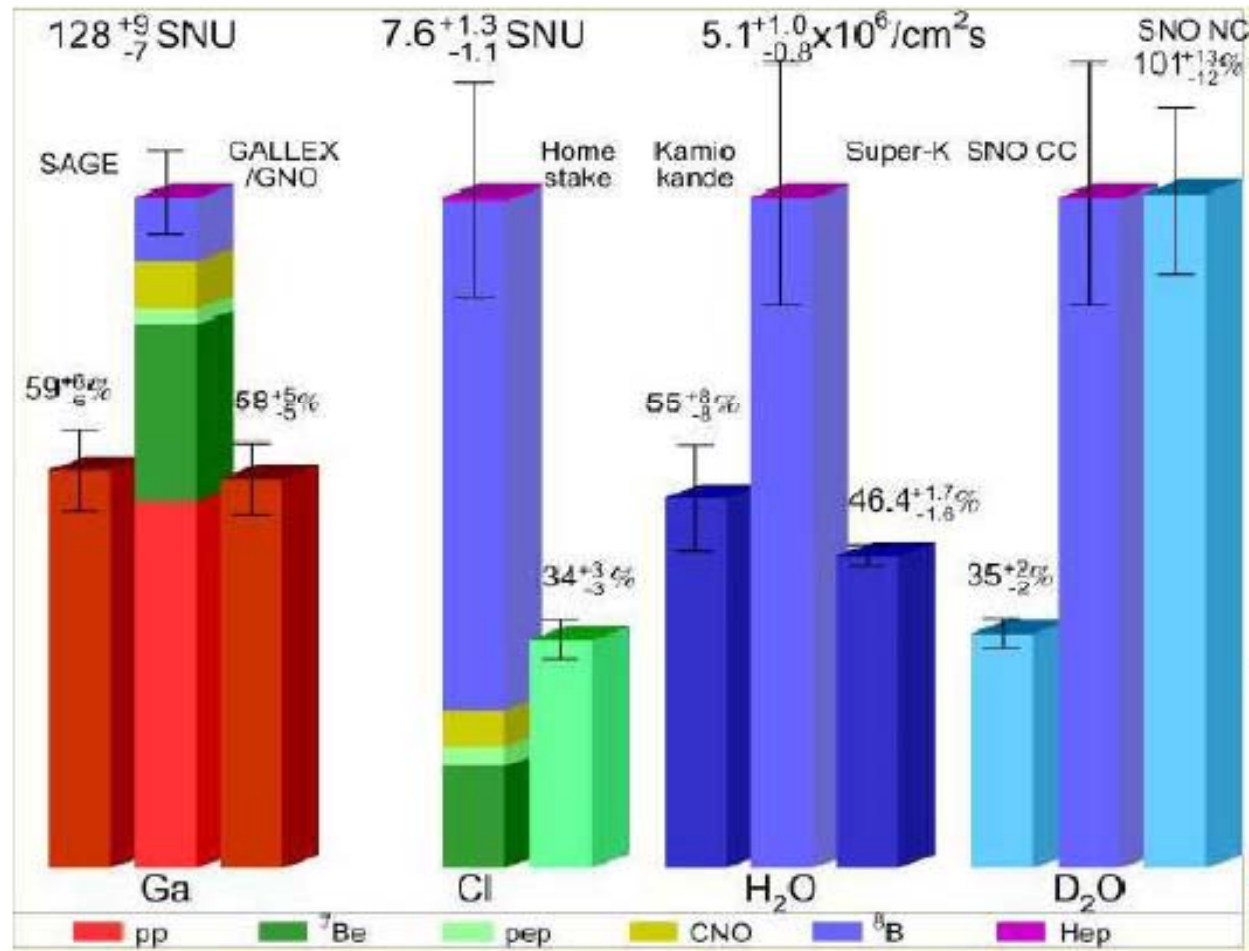
4.95 ± 0.72 Turck-Chieze



Neutrini solari: riassunto



Measured event rates v.z.SSM predictions (Bahcall et al.)



Overall flux deficit :

$$0.3 \leq \Phi^{\text{meas}} / \Phi^{\text{pred}} \leq 0.6$$

No astrophysical or instrumental explanation

→ ν_e disappearance

2002 Nobel Prize



Raymond Davis Jr.

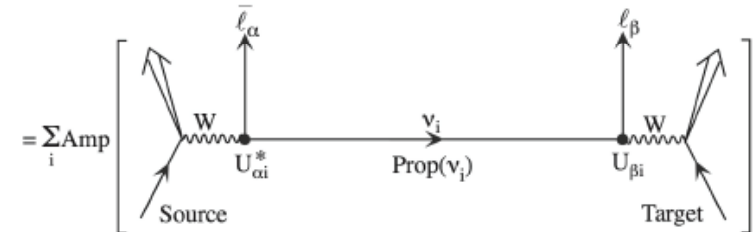
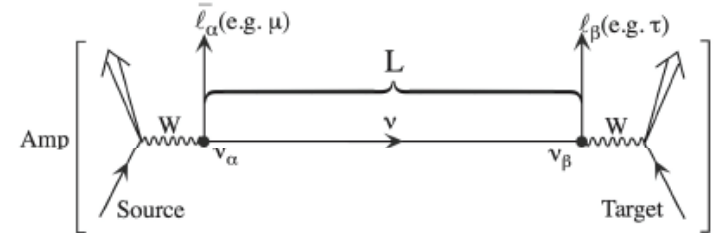


Masatoshi Koshihara

to Raymond Davis Jr. and Masatoshi Koshihara "for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"

SPECIAL CASE: 2 NEUTRINOS

- Similar to $K^0-\bar{K}^0$ mixing: **weak eigenstates \neq strong eigenstates**
 - but **neutrinos don't decay** (no exponential term)
 - **always relativistic and tiny mass difference**
 - ▶ **Flavour change in vacuum oscillates with L/E :**
(macroscopic quantum coherence interference)



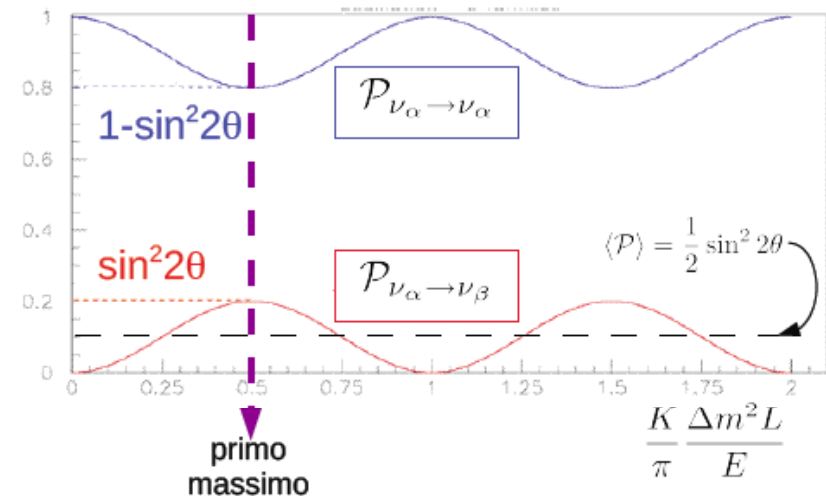
- Why quarks and charged leptons don't oscillate?

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

$$P[\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta] = \sin^2(2\theta) \sin^2(\Delta m^2 L / 4E)$$

no distinction
 $\theta \Leftrightarrow \pi/2 - \theta, \Delta m^2 \Leftrightarrow -\Delta m^2$

if Δm or $\theta = 0$ $P(\nu_\alpha \Rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta}$



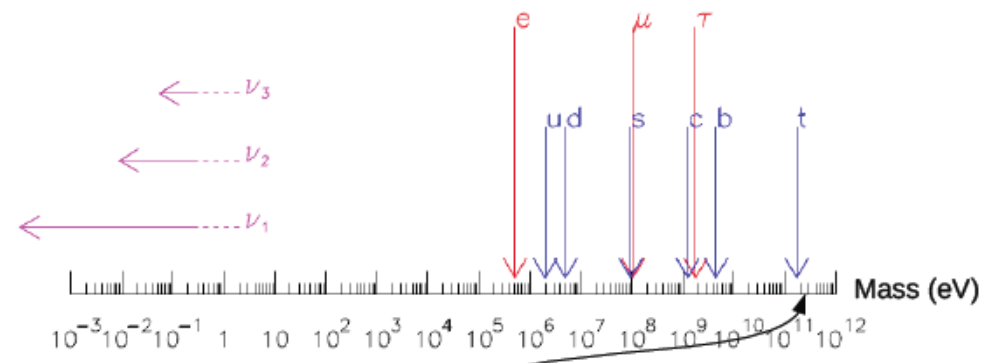
WHAT WE KNOW FROM EXPERIMENTS

- **Neutrino mixing matrix:**

$$U_{PMNS} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.84 & 0.54 & 0.14 \\ 0.38 & 0.60 & 0.70 \\ 0.38 & 0.60 & 0.70 \end{bmatrix}$$

CKM		
0.97	0.22	0.003
0.22	0.97	0.04
0.009	0.04	0.99

- **Neutrino mass spectrum**



- Quarks and charged leptons produced as mass eigenstates
- Neutrinos as flavour eigenstates
- Unitary triangles, useful when measure sides and angles, **have no practical use in lepton flavour mixing**
 - ▶ **neutrino oscillation theory**

Il caso generale: 3ν

- Mescolamento dei sapori:

$$(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)^T = U (\nu_1, \nu_2, \nu_3)^T$$

- Convenzione sulle rotazioni di Eulero (di cui una complessa):

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

... analoga al caso dei quark, ma con angoli molto diversi:

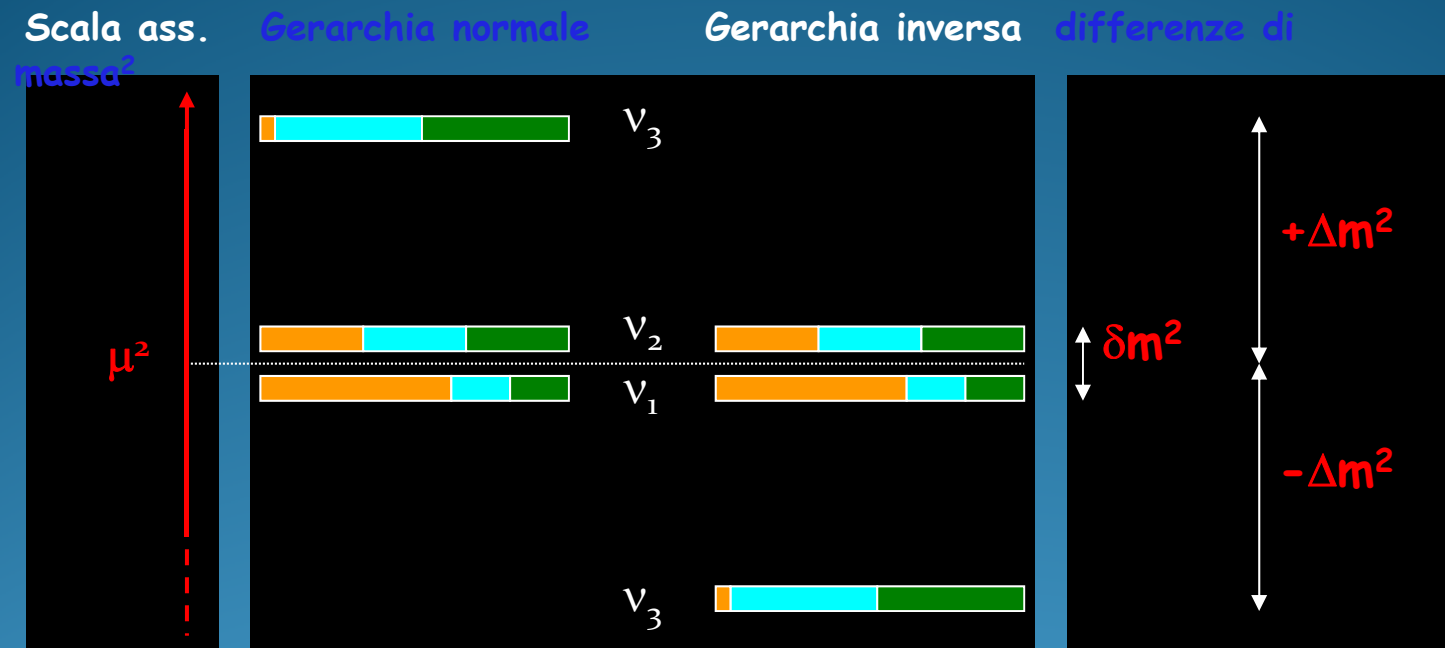
$$s_{23}^2 \sim 0.5$$

$$s_{13}^2 < \text{few } \%$$

$$s_{12}^2 \sim 0.3$$

- Solo se $s_{13}^2 \neq 0$ si puo' sperare di scoprire una fase δ di violaz. CP)
("sacro graal" di futuri esperimenti di oscillazione di ν)

3ν : spettro di massa² e miscela dei sapori (e μ τ)



Scala di massa assoluta μ ignota [$m_a < O(\text{eV})$]

Gerarchia [$\text{sign}(\Delta m^2)$] ignota

Contenuto di ν_e in ν_3 ignoto [$m_a < \text{alcuni } \%$]

$$\delta m^2 \simeq 8.0 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

(gap di massa "solare")

$$\Delta m^2 \simeq 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

(gap di massa "atmosferico")

Stato dell'arte al 2004, con errori a $\pm 2\sigma$ (95% CL per 1dof)

$$\delta m^2 \simeq 8.0_{-0.7}^{+0.8} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m^2 \simeq 2.4_{-0.6}^{+0.5} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} \simeq 0.29_{-0.04}^{+0.05} \quad (\text{SNO '05 : } 0.29 \rightarrow 0.31)$$

$$\sin^2 \theta_{23} \simeq 0.45_{-0.11}^{+0.18}$$

$$\sin^2 \theta_{13} < \sim 0.035$$

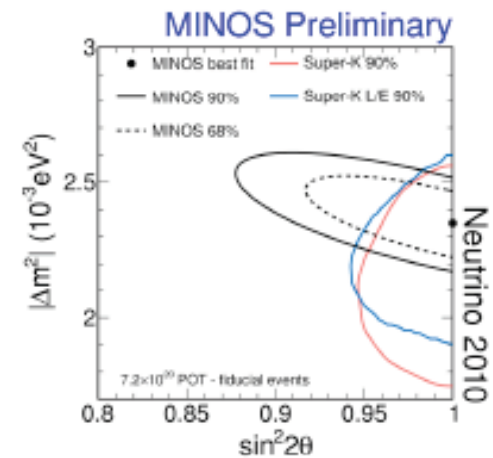
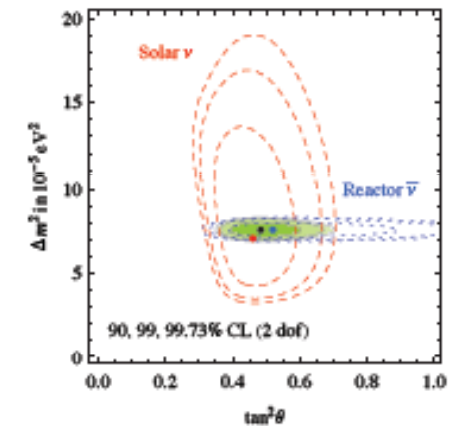
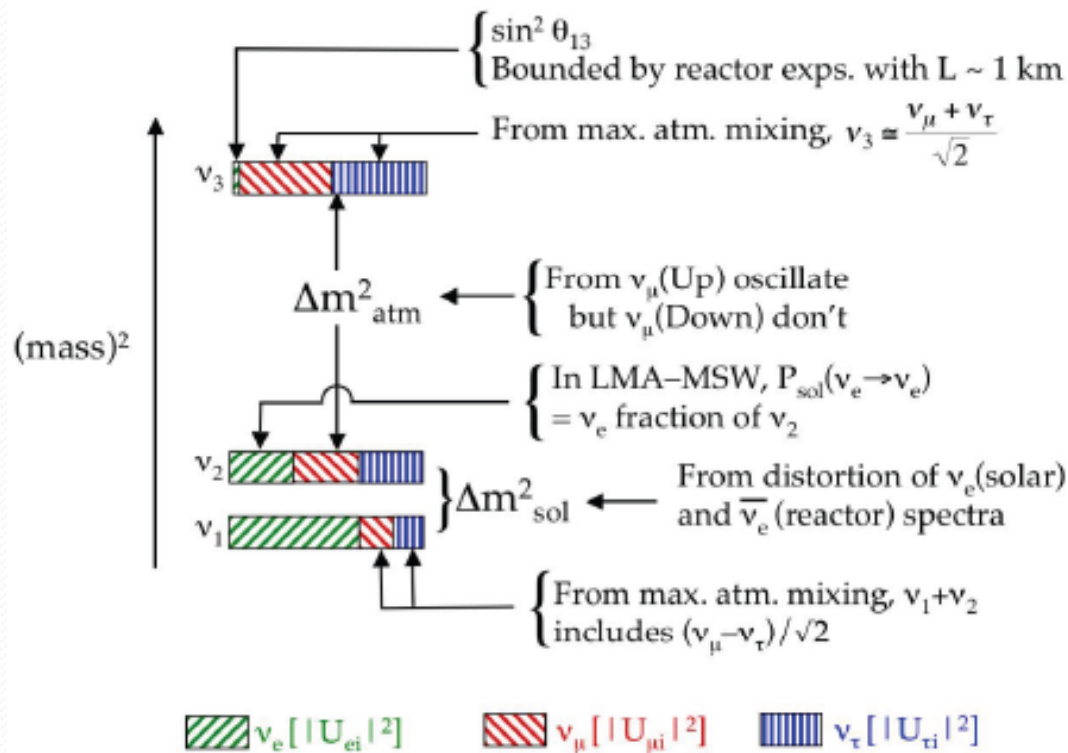
sign($\pm \Delta m^2$) : unknown

CP phase δ : unknown

THE WHOLE PICTURE

$$\theta_{\text{atm}} \approx \theta_{13} \approx 45^\circ, \theta_{\text{sun}} \approx \theta_{12} \approx 30^\circ, \theta_{13} \leq 10^\circ$$

$$|\Delta m^2_{13}| \approx |\Delta m^2_{23}| \approx |\Delta m^2_{\text{atm}}| \approx (2.40 \pm 0.15) \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad \Delta m^2_{12} \approx \Delta m^2_{\text{sol}} \approx (7.58 \pm 0.21) \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$



MASS SPECTRUM

- From oscillation experiments we know that neutrinos are massive:

$$|\Delta m^2_{13}| \approx |\Delta m^2_{23}| \approx |\Delta m^2_{\text{atm}}| \approx (2.40 \pm 0.15) \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad \Delta m^2_{12} \approx \Delta m^2_{\text{sol}} \approx (7.58 \pm 0.21) \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

- Oscillation experiments are not sensitive to the absolute neutrino mass

- Which is the absolute mass scale?

- Cosmology
- Beta Decay
- Neutrinoless Double Beta Decay

