

Univ. di Padova

Maggio 2005

Fisica del neutrino: stato e prospettive



Eligio Lisi
INFN, Sezione di Bari



Schema:

- Un po' di storia
- Le oscillazioni di neutrino
- Problemi ancora aperti
- Conclusioni

Il neutrino (ν) "nasce" nel 1930 come "rimedio disperato" di Wolfgang Pauli per spiegare lo spettro continuo dei raggi β

Original. Photocopy of 1930 0393
Abschrift/15.12.56 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Oliverstrasse

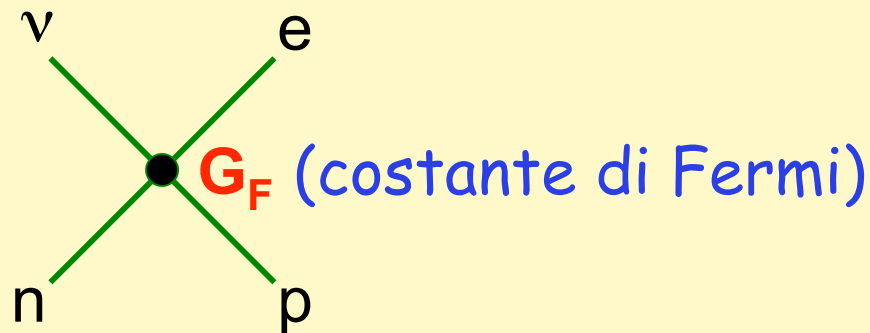
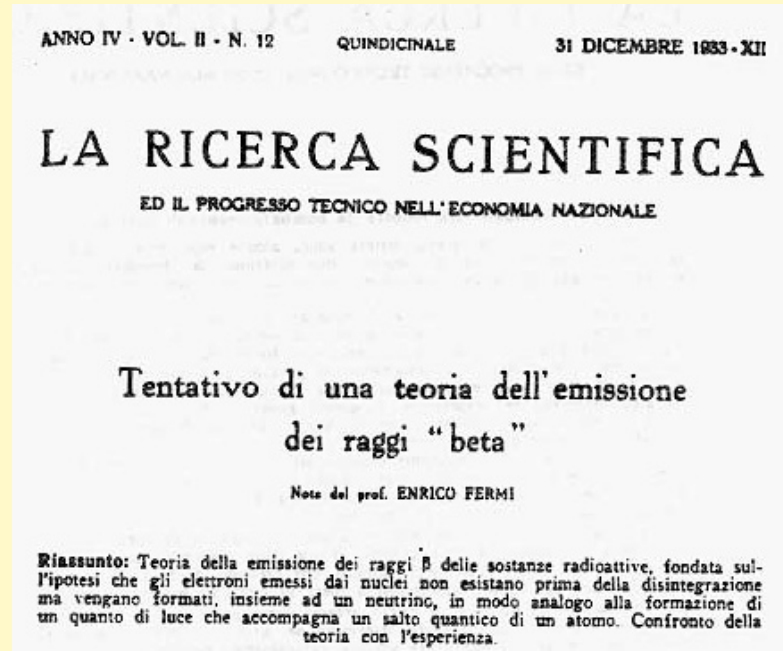
Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich kuldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der β - und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselwitz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse.- Das kontinuierliche β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.



Prime proprietà cinematiche: **spin $1/2$** , **massa piccola**, **carica nulla**

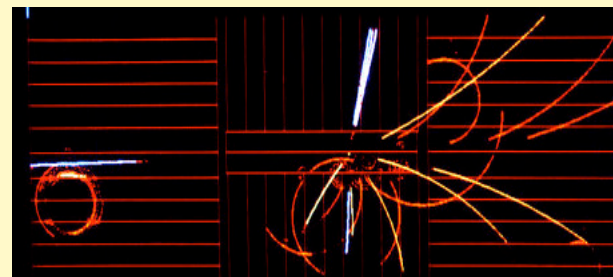
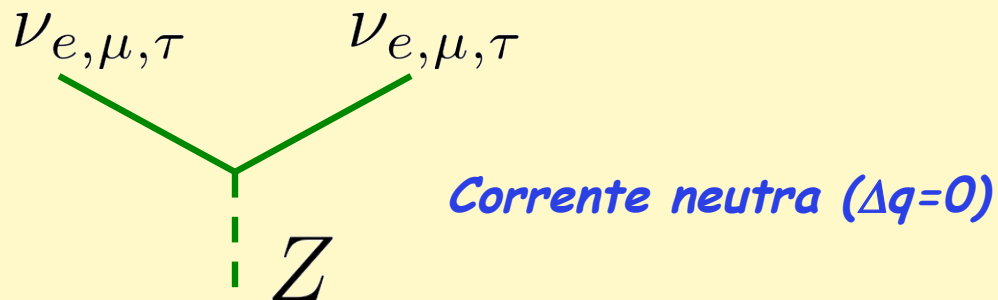
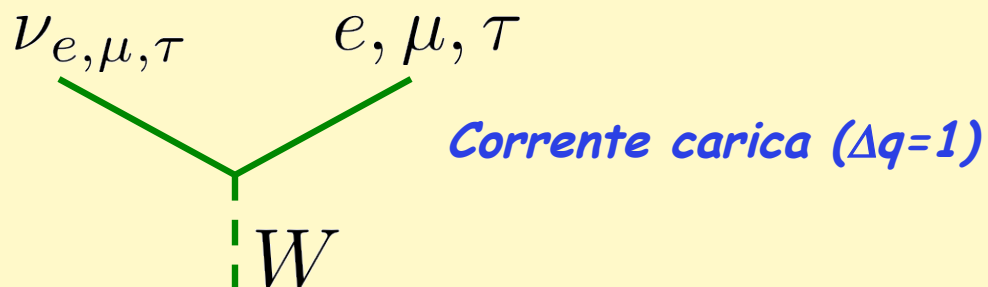
Viene "battezzato" nel 1933-34 da Enrico Fermi, che ne caratterizza le prime proprietà dinamiche (interazioni deboli)



Oltre 70 anni di ricerche hanno permesso di scoprire molte altre proprietà del **neutrino**. Per esempio, che **si manifesta in tre "sapori"**

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} \leftarrow q = 0 \\ \leftarrow q = -1 \end{matrix} \quad (\Delta q = 1)$$

e che l'interazione di Fermi è mediata da un **bosone vettoriale W**, con una controparte neutra, il **bosone Z**



Nonostante i molti progressi, solo recentemente si è cominciato a dare (o intravedere) una risposta ad alcune domande fondamentali poste nel secolo scorso:

Quanto è piccola la massa del neutrino ?

(Pauli, Fermi, anni '30)

Può un neutrino trasformarsi nella sua antiparticella?

(Majorana, anni '30)

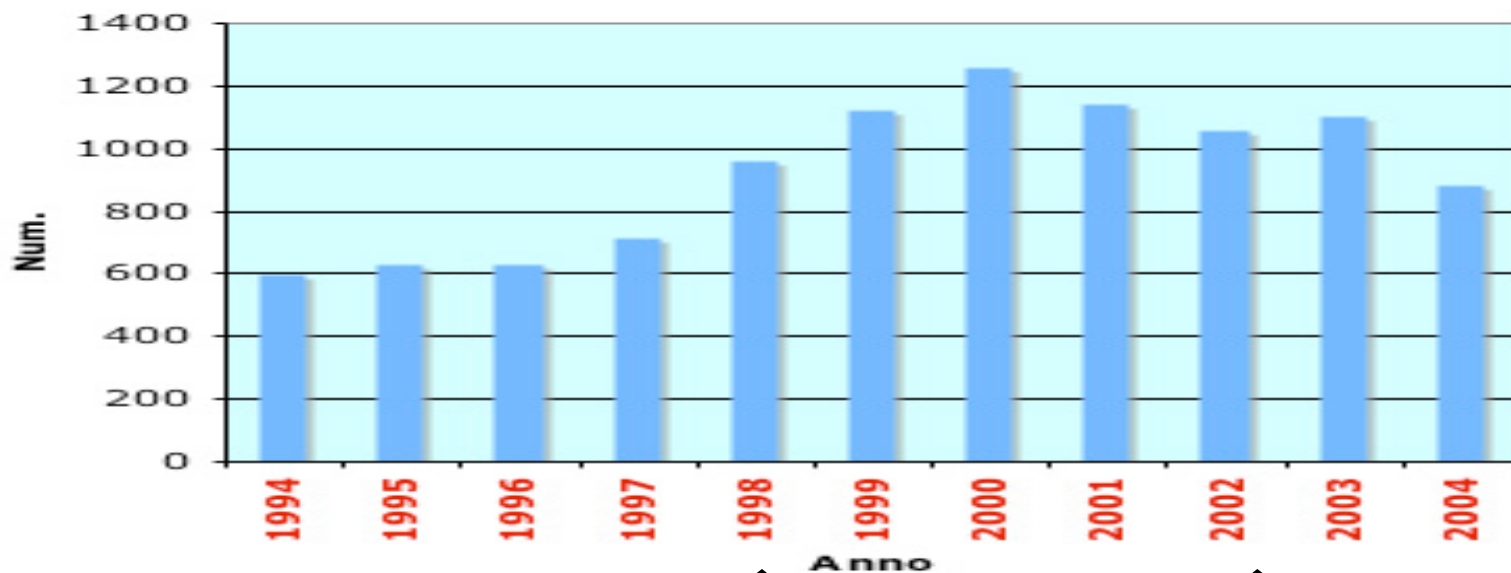
Neutrini di sapore diverso si trasformano ("oscillano") l'uno nell'altro?

(Pontecorvo, Maki-Nakagawa-Sakata, anni '60)

In particolare, come vedremo, possiamo dare una risposta positiva e molto articolata alla terza domanda.

Nell' ultimo decennio, l' **interesse** per queste (ed altre) domande è stato **enorme**, sia dal punto di vista teorico-fenomenologico che sperimentale (ν solari, atmosferici, da acceleratore, reattore, supernova, ...)

... oltre 10^4 articoli con "neutrino(s)" nel titolo* (database: SLAC-SPIRES)



Chiara evidenza di oscillazioni di neutrini atmosferici

Chiara evidenza di oscillazioni di neutrini solari (e da reattore).
Nobel: Davis e Koshiba

* L' 1% dei quali prodotto dal gruppo di teoria e fenomenologia del neutrino a Bari

Le oscillazioni di sapore dei neutrini

Nel centenario dell' *annus mirabilis*, non possiamo non partire dalla celebre equazione ...

Die Ruhe - Energie ändert sich also (additiv) wie die Masse. Da erstere ihrem Begriffe nach nur bis auf eine additive Konstante bestimmt ist, so kann man festsetzen, dass \mathcal{E}_0 ^{massen} mit m verschwindet.
Dann ist einfach

$$\mathcal{E}_0 = m,$$

was dem Äquivalenz - Satz von ~~trögen~~ Masse und Ruhe - Energie ausspricht.
~~Hätten wir oben nicht die Massenkonzstante des Impulses gleich~~
~~dort \mathcal{E}~~

... ovvero, per $p \neq 0$:

$$E = \sqrt{m^2 + p^2}$$

La nostra esperienza quotidiana
si svolge nel limite $p \ll m$

$$E \simeq m + \frac{p^2}{2m}$$

...mentre per il neutrino il limite
appropriato è $p \gg m$

$$E \simeq p + \frac{m^2}{2p}$$

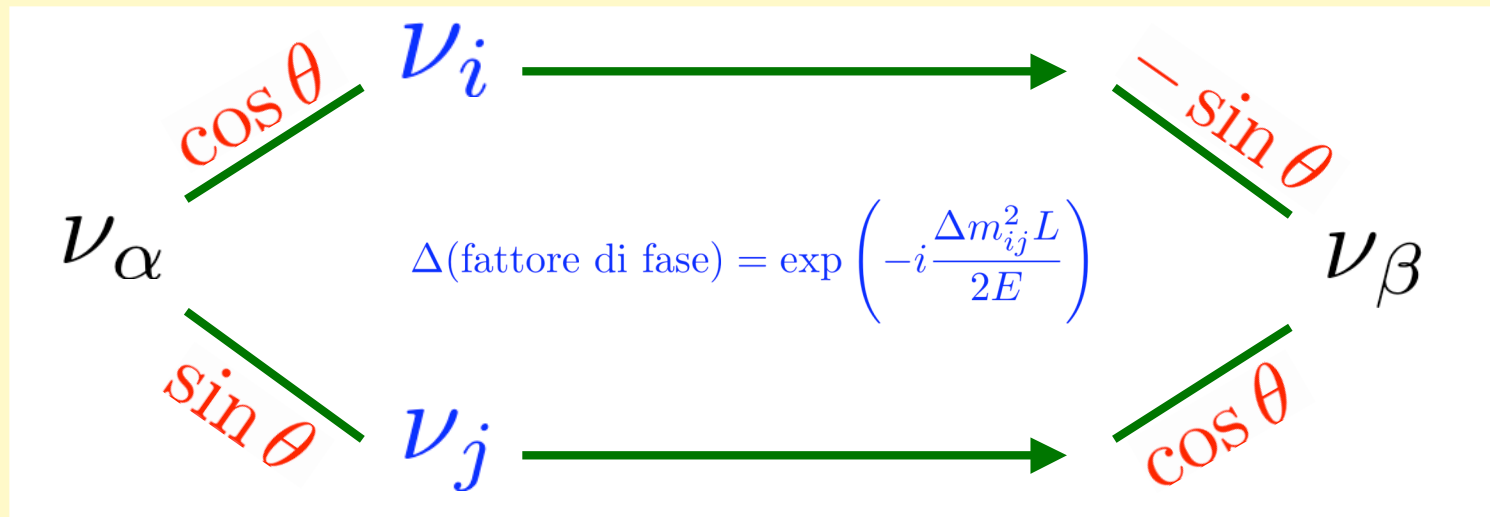
Differenza di energia fra due
neutrini ν_i e ν_j di masse m_i e m_j
in uno stesso fascio ($p_i = p_j \simeq E$)

$$\Delta E \simeq \frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}$$

Pontecorvo: neutrini con
masse definite (ν_i e ν_j)
possono non avere sapori
definiti (ν_α e ν_β), p. es.

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_j \end{pmatrix}$$

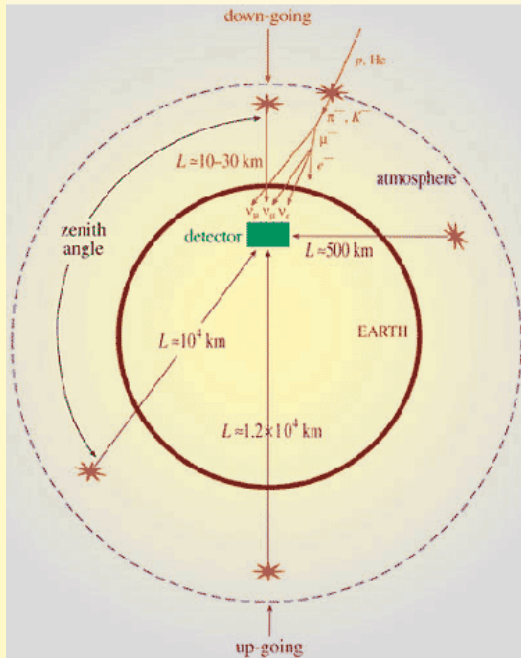
Analogia con esperimento di interferenza con due fenditure



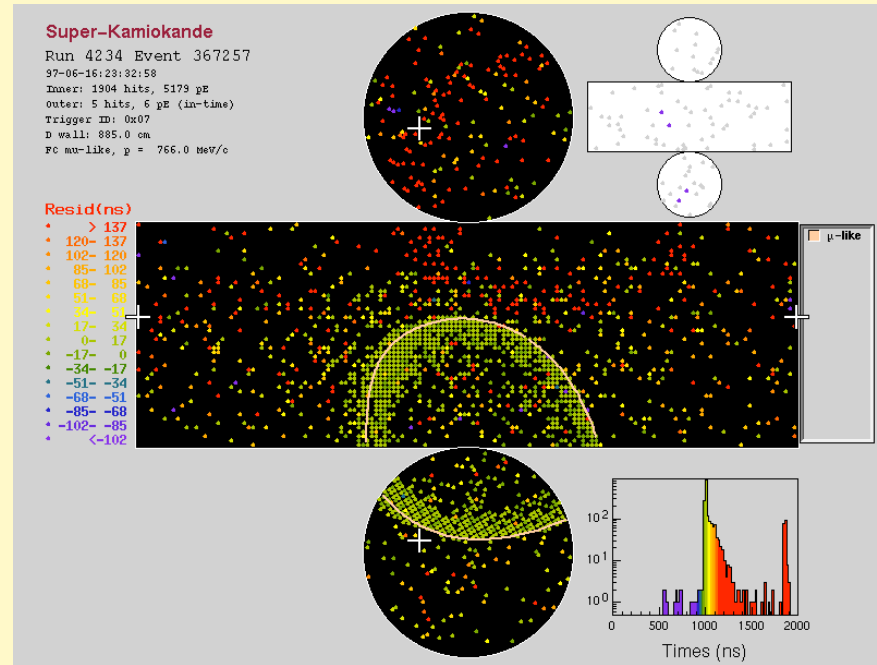
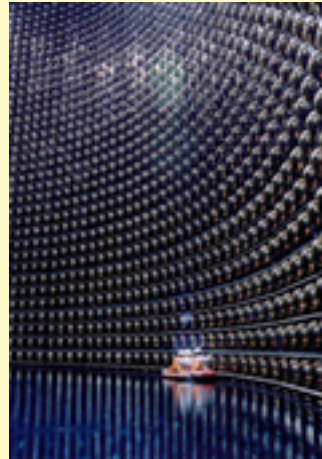
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \quad (\text{Oscillazione periodica di sapore})$$

Questo è il caso più semplice possibile (due neutrini coinvolti su tre, effetti di interazione trascurabili). E' sorprendente che proprio questo caso si realizzi in natura - con buona approssimazione - nella fenomenologia dei neutrini atmosferici, ove **la semplice formula per P spiega i dati su ~7 ordini di grandezza in L/E nell' esperimento Super-Kamiokande (come pure in MACRO e Soudan2).**

Figure 4



Super-Kamiokande



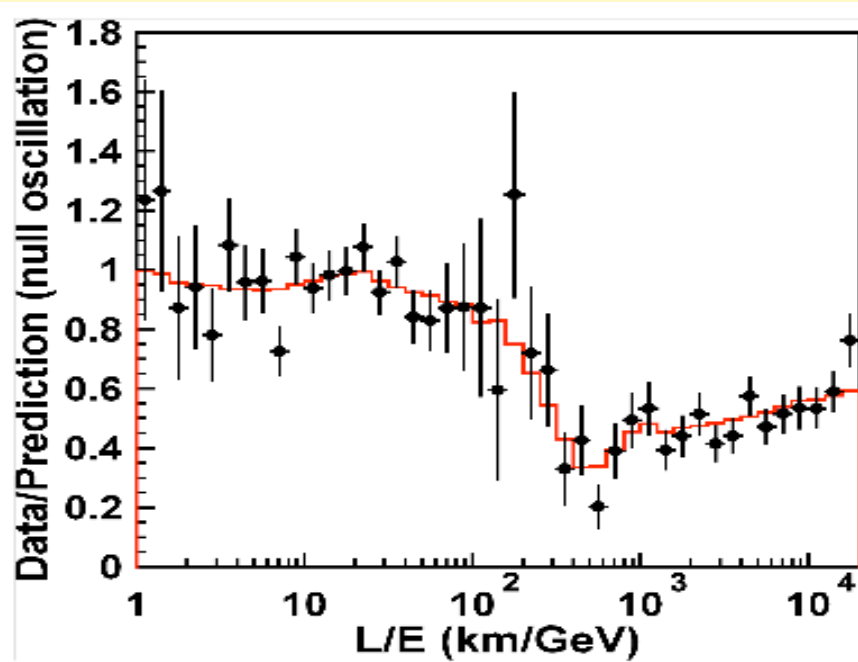
Eventi indotti da ν_e : ~ come previsto

Eventi indotti da ν_μ : deficit dal basso

Oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$? No (o secondarie)

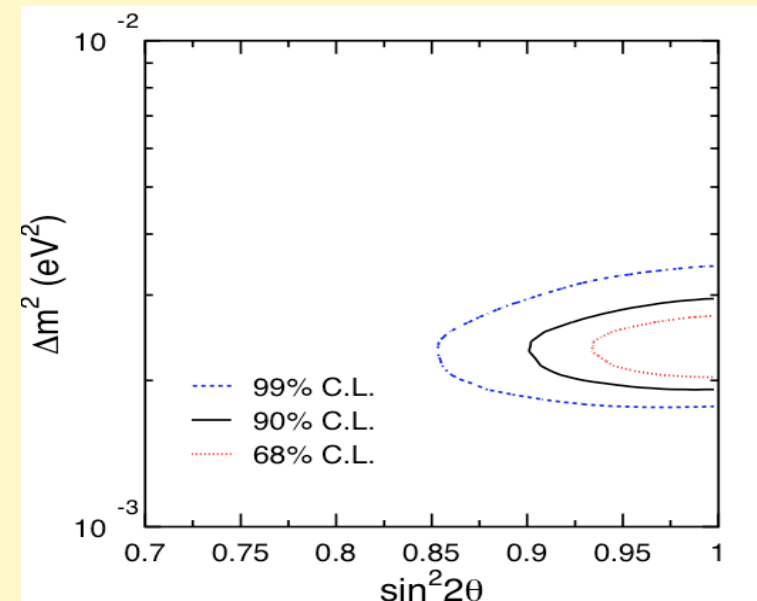
Oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$? Si (dominanti)

Nessuna... ← Oscillazione → ...Mediata

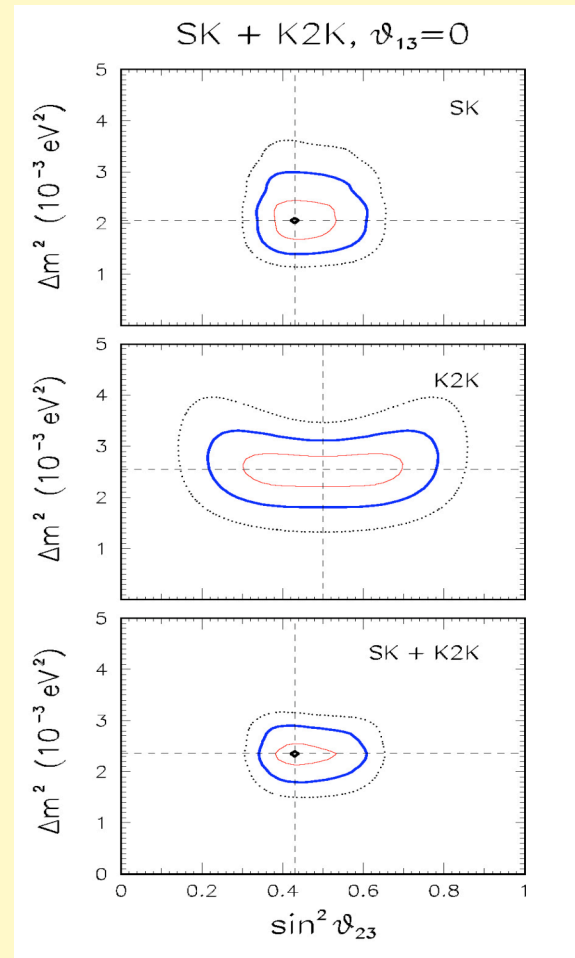
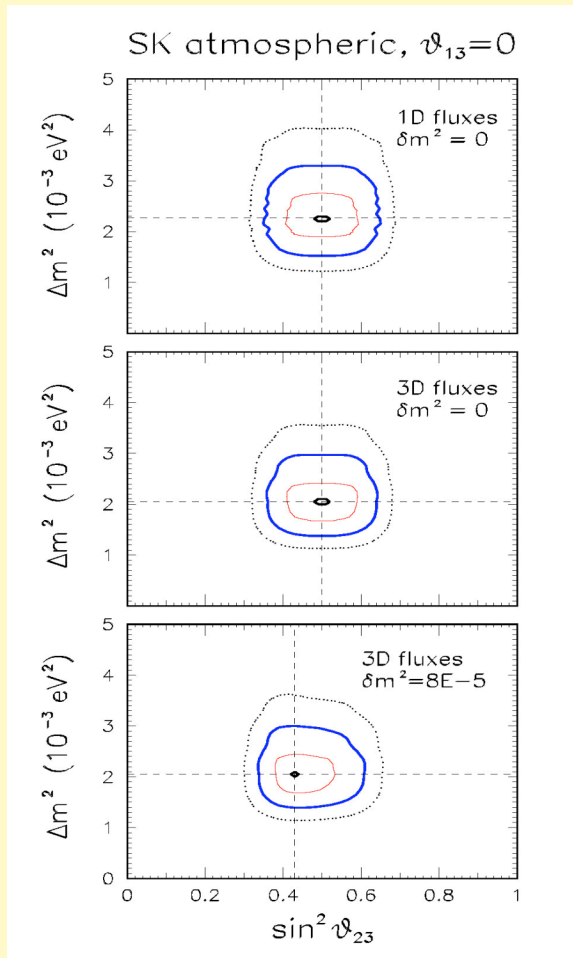


Il primo semiperiodo di oscillazione comincia ad essere visibile con alta statistica. La scarsa risoluzione in L/E impedisce di vederne il seguito (oscillazioni mediate)

Si ottengono forti limiti sui parametri di massa e mescolamento (Δm^2 , θ).
 I limiti sono simmetrici nei due ottanti di θ solo nel limite di pure oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$. Valore preferito $\theta \sim \pi/4$: molto maggiore che nel caso dei quark

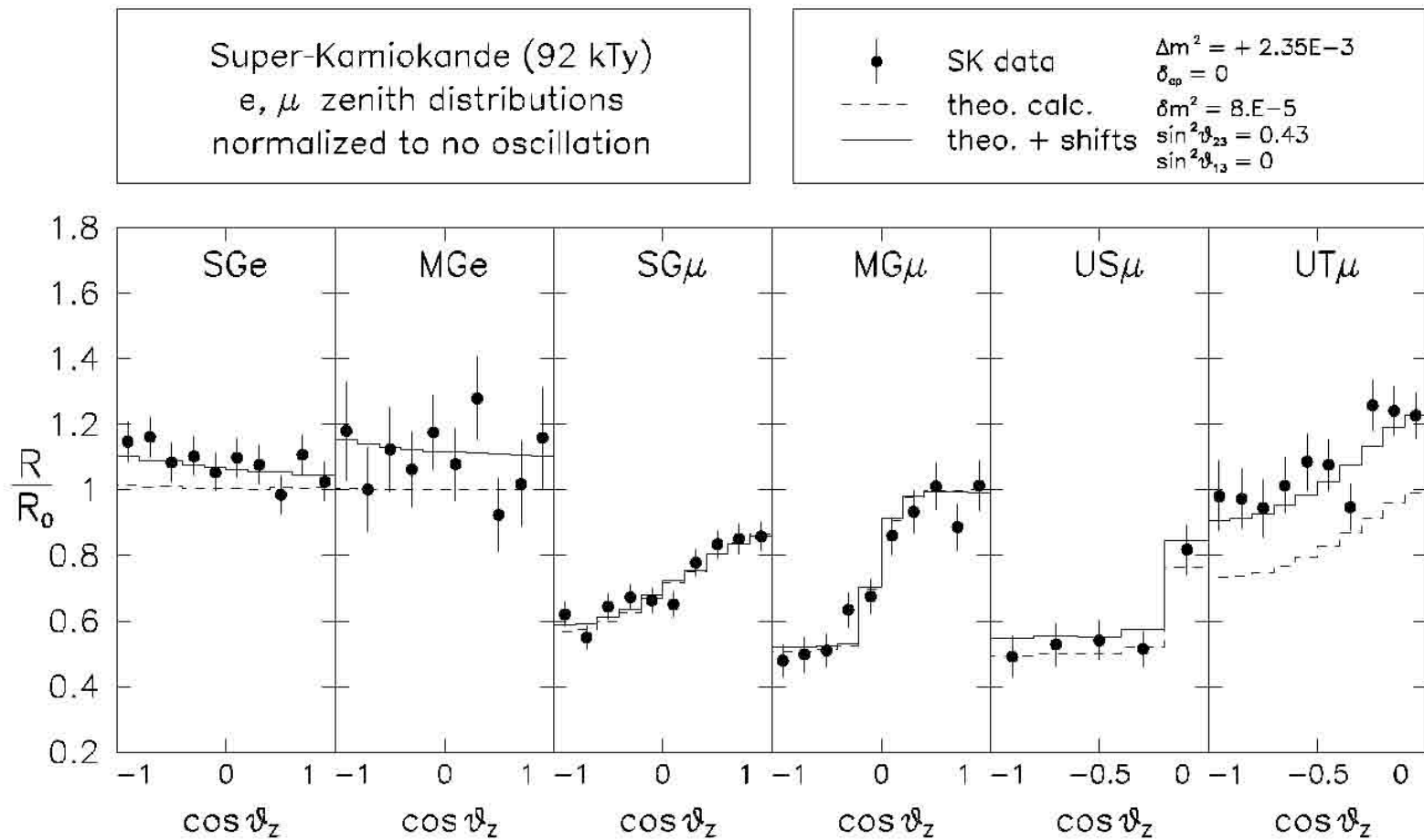


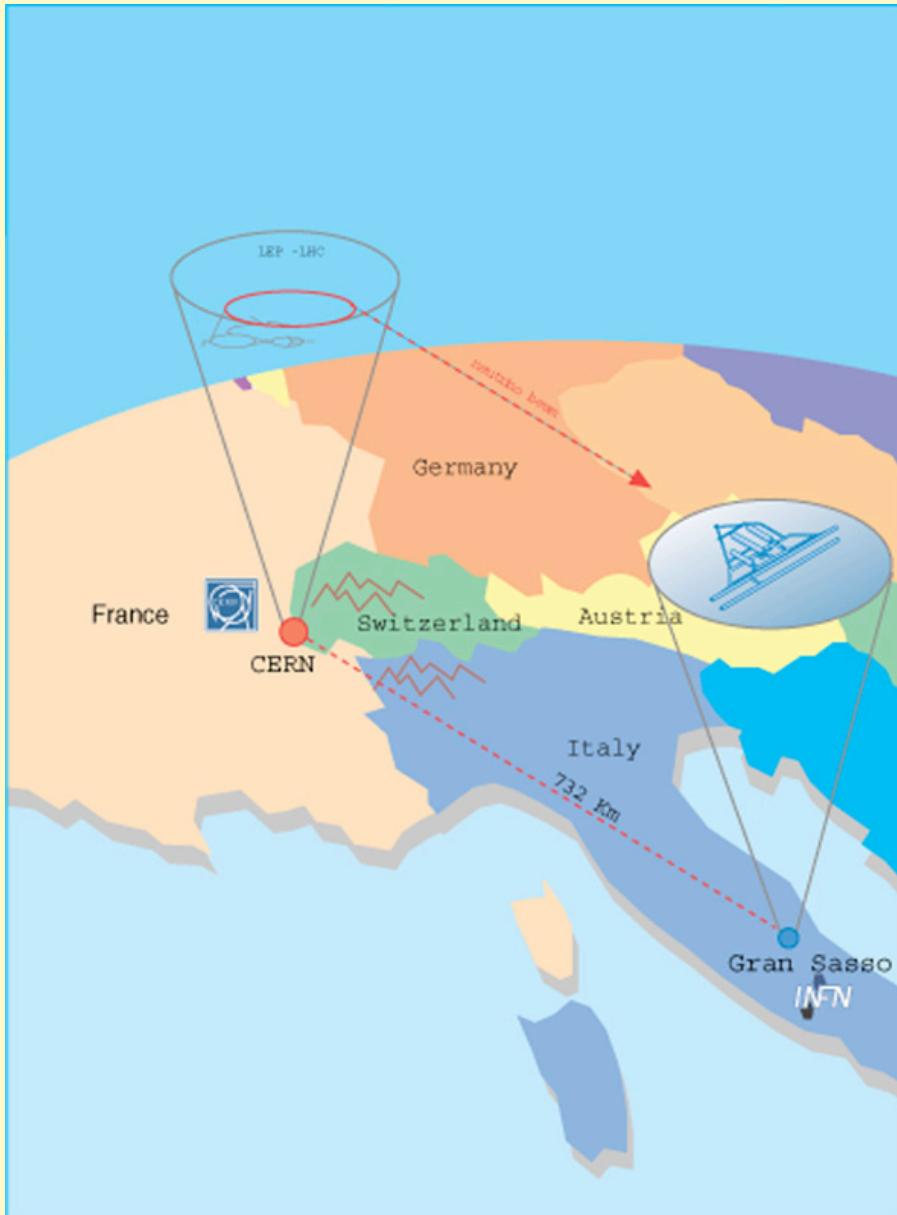
Alcuni grafici per i più esperti. Si comincia ad avere qualche sensibilità ad effetti secondari. Parametri confermati con ν da acceleratore (K2K)



Livelli a 1, 2, 3 σ (1 dof). Notare la scala lineare in Δm^2 e $\sin^2 \theta_{23}$, e l'asimmetria degli ottanti di θ_{23}

... ancora sugli effetti secondari (indotti dai parametri di oscillazione dei ν solari - esaminati più avanti) e sulle sistematiche nelle distribuzioni in angolo di zenit a Super-Kamiokande

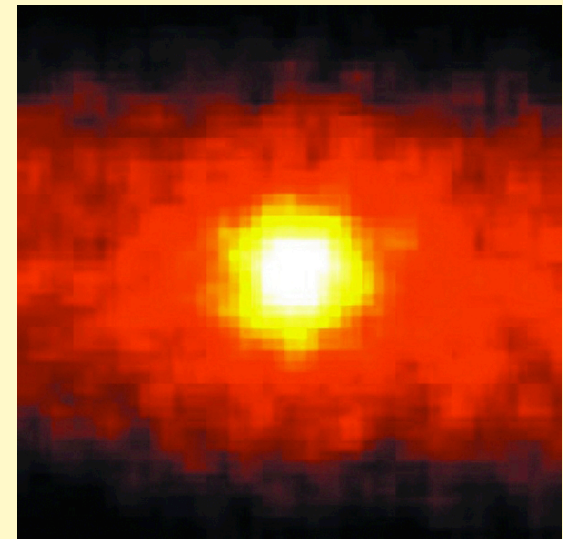
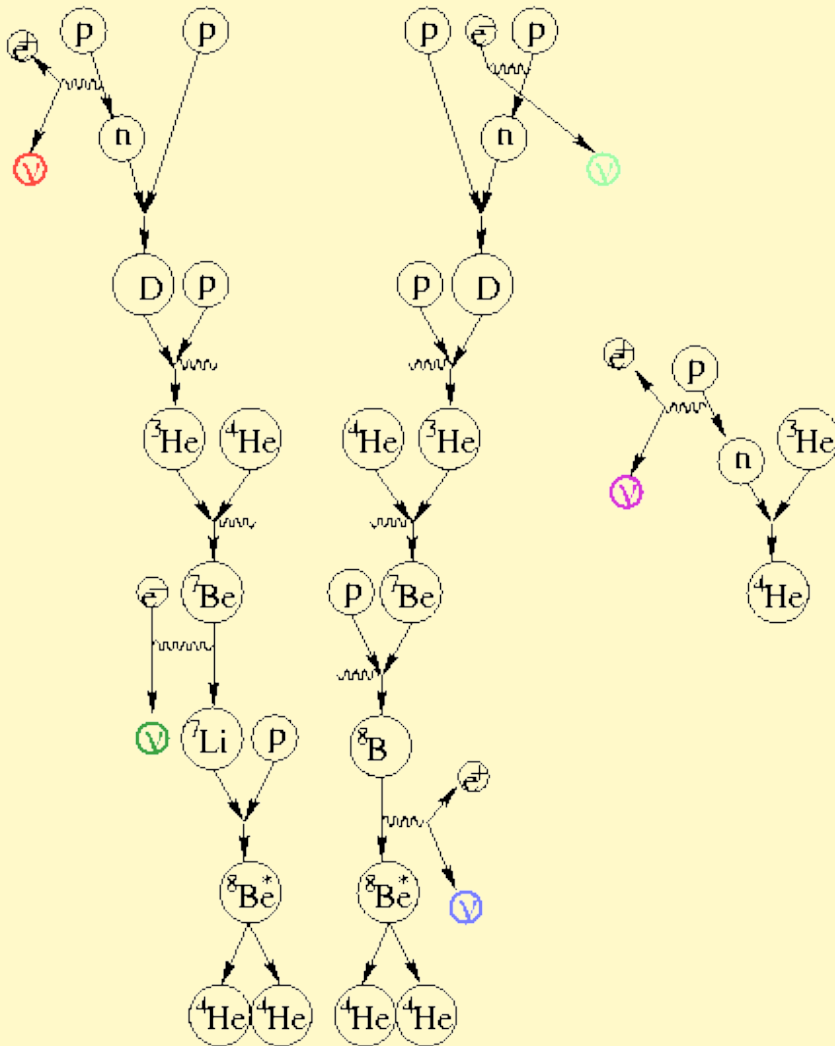




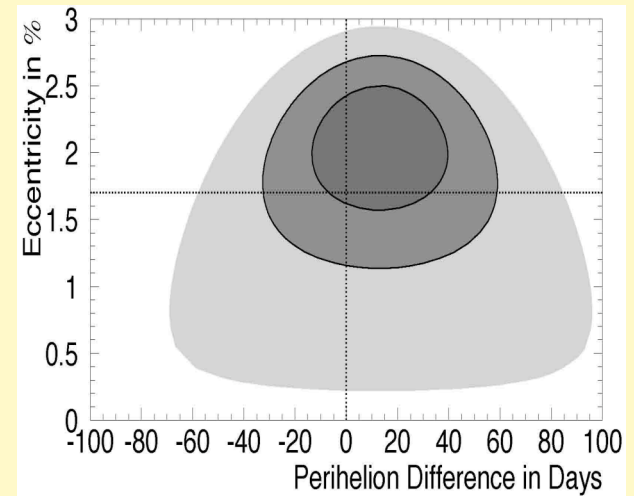
Un tassello mancante:
apparizione di ν_τ

Verrà studiata in
due esperimenti in
costruzione ai
Laboratori Nazionali
del Gran Sasso
(OPERA, ICARUS)
con un fascio di
neutrini dal CERN

Neutrini (ν_e) solari



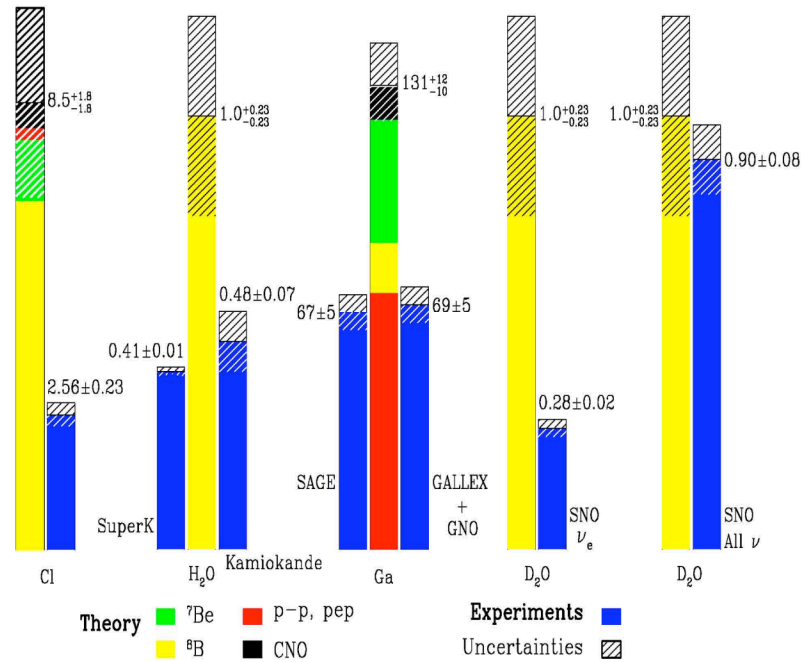
Il sole visto coi neutrini (SK)



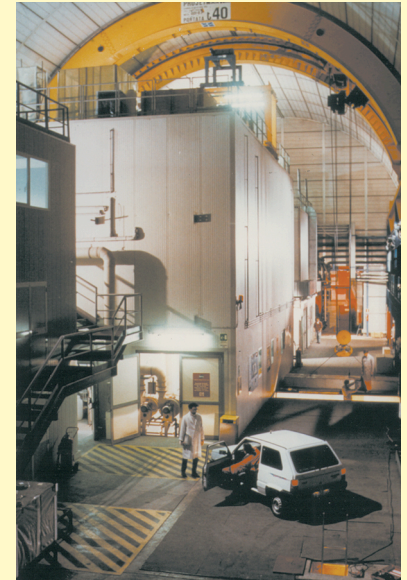
Orbita terrestre da ν solari (SK)

Il deficit di neutrini solari: 50 anni di ricerche

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2004

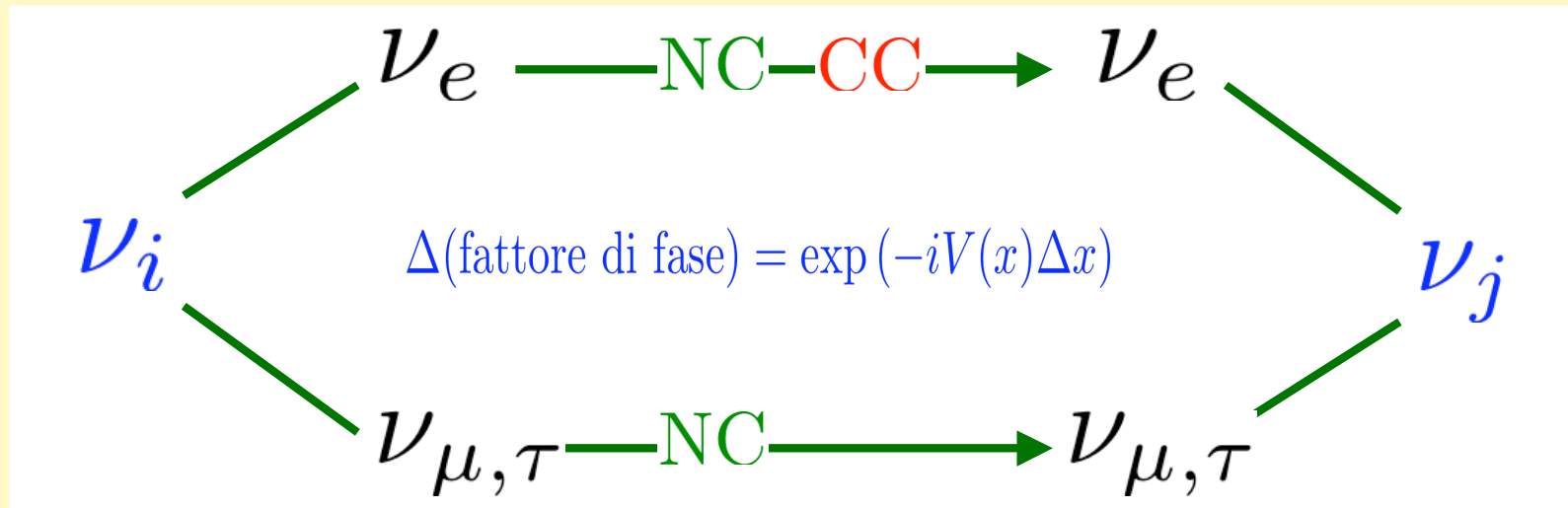


Davis & Bahcall



Gallex/GNO

Importante differenza fra oscillazioni di neutrini solari ($\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$) ed atmosferici ($\sim \nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$): i ν_e hanno anche interazioni di CC con la materia che attraversano, la quale contiene e^- ma non μ^- e τ^-

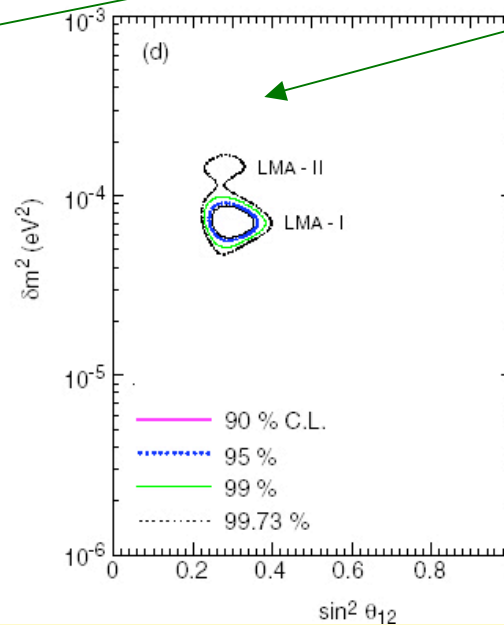
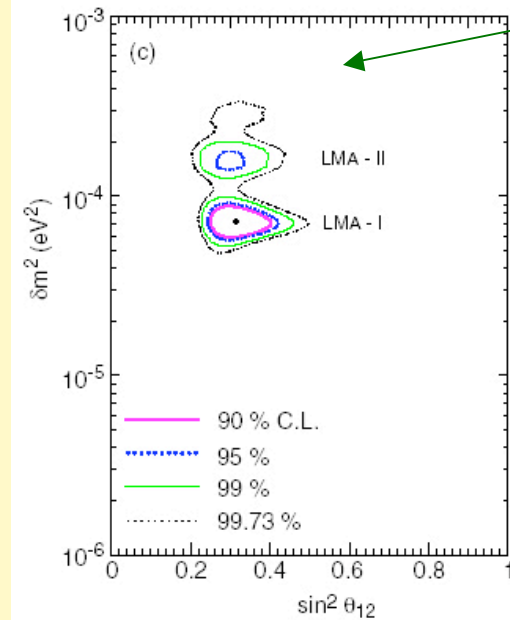
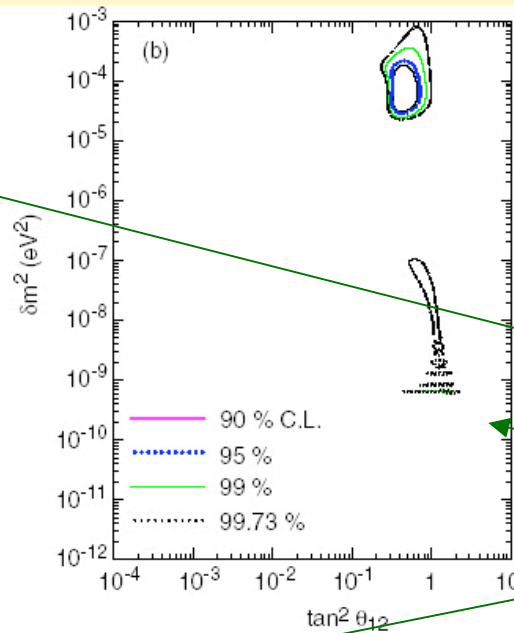
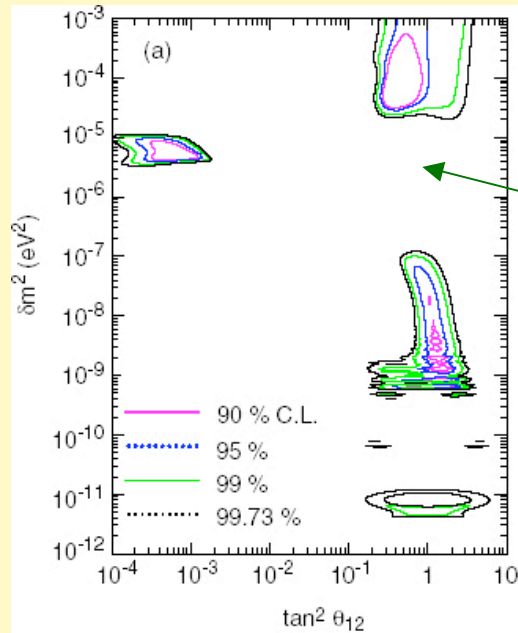


Differenza di energie di interazione:

$$V(x) = V_e - V_{\mu,\tau} = \sqrt{2} G_F N_e(x) \quad [N_e = \text{electron density}]$$

[Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (MSW), anni '70-'80]

Inoltre (ovviamente): diversi parametri di oscillazione per neutrini solari e atmosferici



Straordinaria riduzione dello spazio dei parametri ($\delta m^2, \theta_{12}$) negli anni **2001-2003** (notare le riduzioni di scala)

Cl+Ga+SK (2001)

+SNO-I (2001-2002)

+KamLAND-I (2002)

+SNO-II (2003)

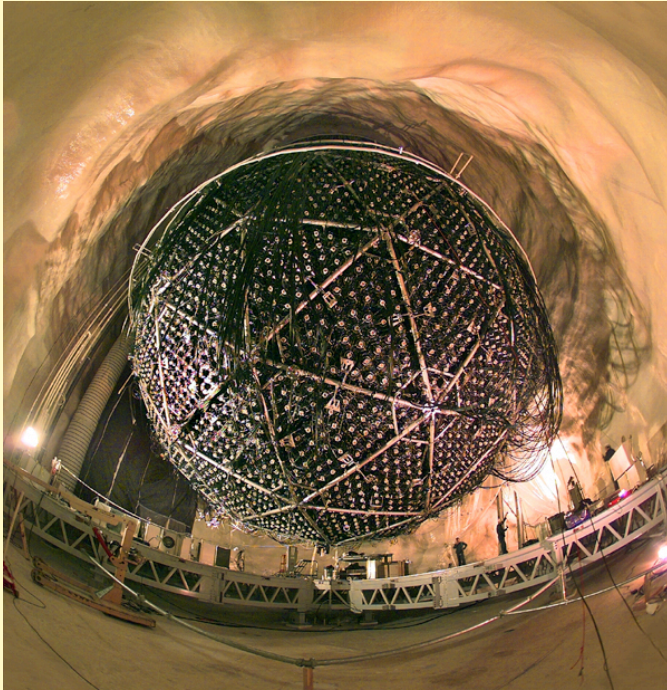
(+ conferma del modello solare)

Prova diretta di $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$ in SNO dal confronto di

$$\text{CC} : \quad \nu_e + d \rightarrow p + p + e$$

$$\text{NC} : \quad \nu_{e,\mu,\tau} + d \rightarrow p + n + \nu_{e,\mu,\tau}$$

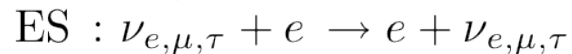
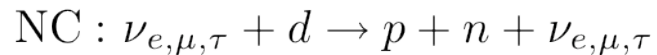
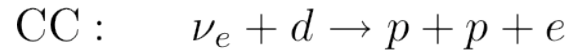
$$\text{ES} : \quad \nu_{e,\mu,\tau} + e \rightarrow e + \nu_{e,\mu,\tau}$$



Sudbury Neutrino Observatory:

1000 tonnellate di acqua pesante

(disponibili solo in Canada, per una serie di eventi e circostanze fortunate che hanno origine nelle ricerche nucleari francesi durante la II guerra mondiale)



$$\frac{\text{CC}}{\text{NC}} \sim \frac{\phi(\nu_e)}{\phi(\nu_e) + \phi(\nu_{\mu,\tau})}$$

quindi:

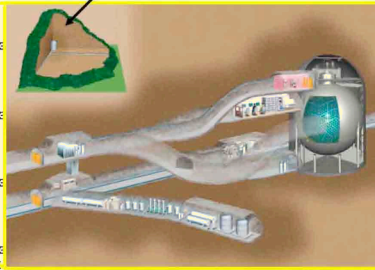
$$\frac{\text{CC}}{\text{NC}} < 1 \Rightarrow \phi(\nu_{\mu,\tau}) > 0 \Rightarrow \nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$$

SNO, 2002: CC/NC ~ 1/3

Evidenza di cambiamento di sapore indipendente da modelli

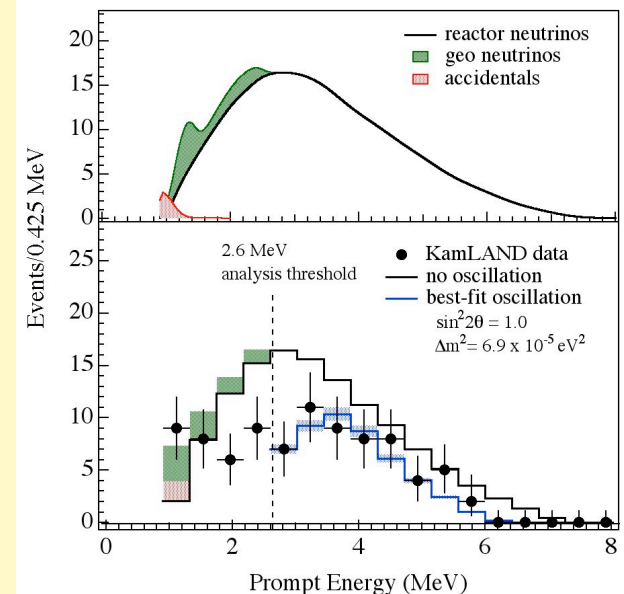
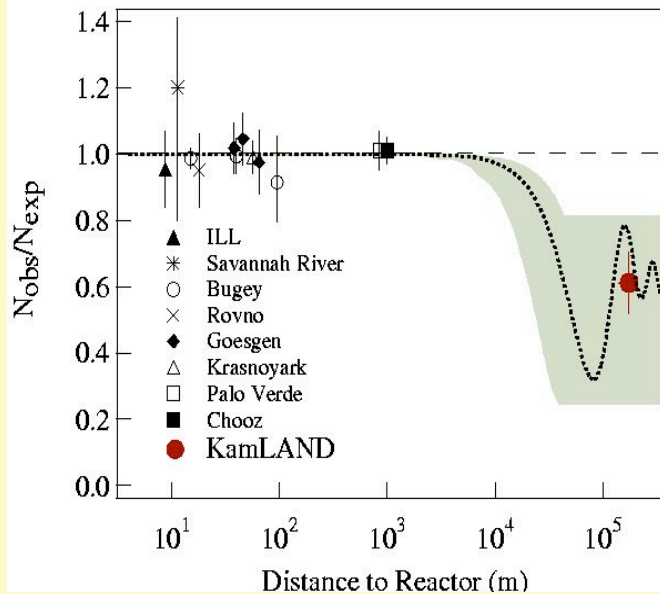


KamLAND: 1000 tonnellate di olio minerale, "circondato" da reattori nucleari ($L \sim 100\text{-}200$ km, $E_\nu \sim$ alcuni MeV)



fase di oscillazione: $\frac{\delta m^2 L}{4E} \sim O(1)$
 se $\delta m^2 \simeq 10^{-4} - 10^{-5} \text{ eV}^2$

2002:





**Nobel
2002**



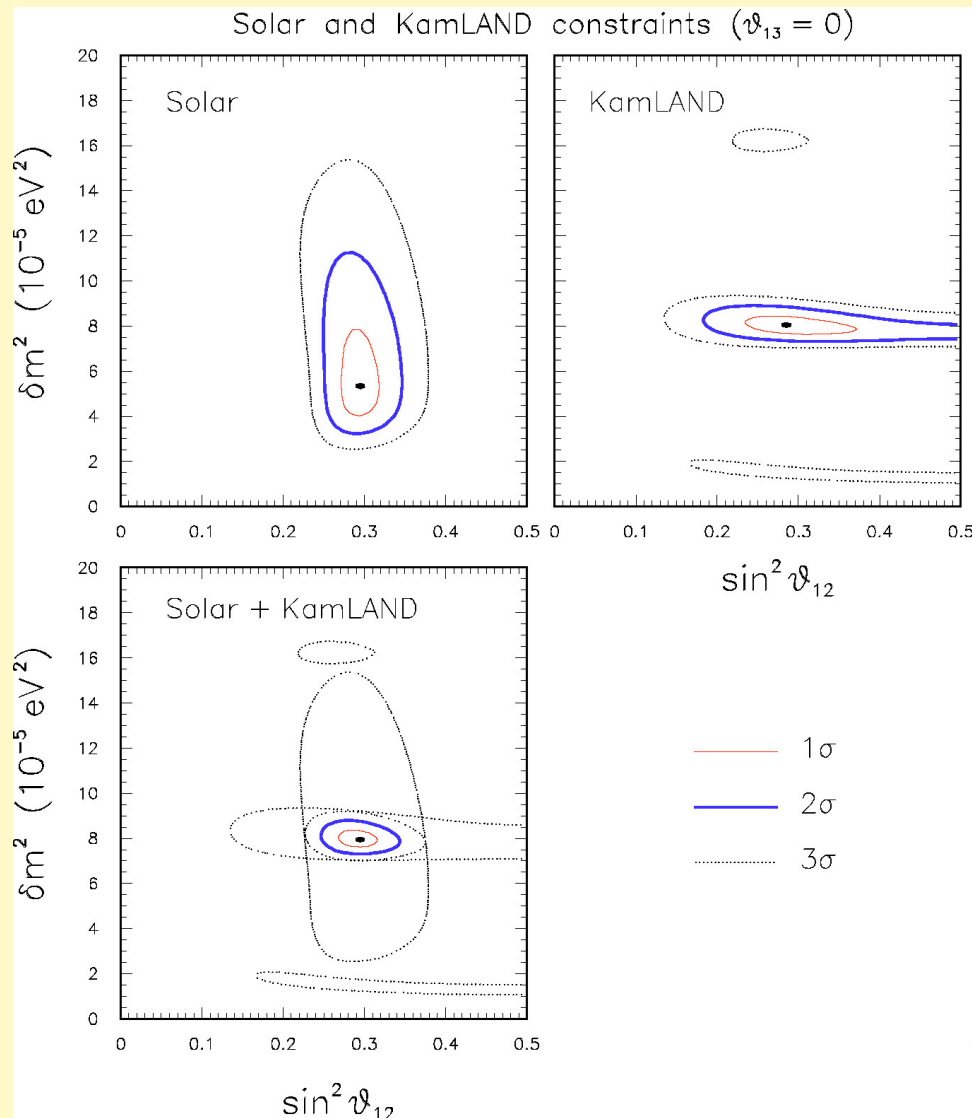
1905: annus mirabilis per la fisica in generale

2002: annus mirabilis per la fisica dei neutrini solari

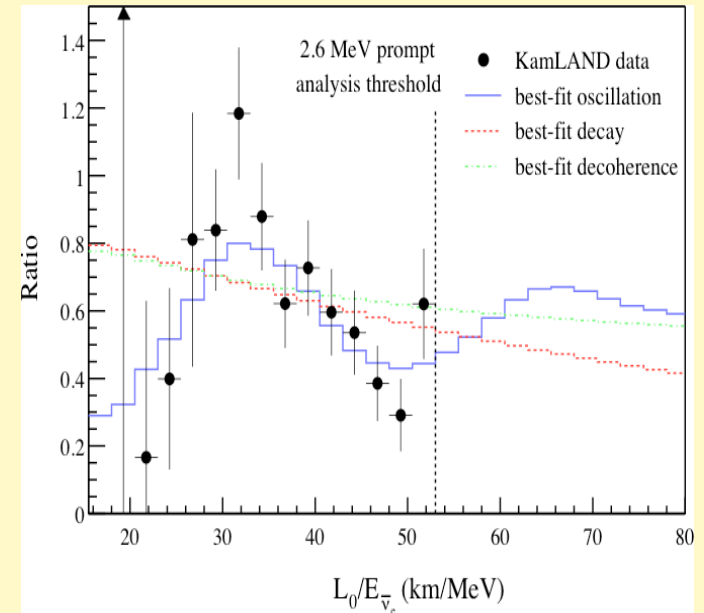
The year 2002 is likely to be remembered as the annus mirabilis of solar neutrino physics. On April 20, direct and highly significant evidence for ν_e flavor change into active states was announced by the Sudbury Neutrino Observatory (SNO) experiment [1], crowning a four-decade long [2] series of beautiful observations [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11] of the solar ν_e flux deficit [12, 13]. On October 8, the role of solar neutrino physics in shaping modern science was recognized through the Nobel Prize jointly awarded to Raymond Davis, Jr., and Masatoshi Koshihara, for their pioneering contributions to the detection of cosmic neutrinos [14]. Finally, on December 6, clear “terrestrial” evidence for the oscillation solution to the solar neutrino deficit was reported by the Kamioka Liquid scintillator AntiNeutrino Detector (KamLAND), through the observation of long-baseline reactor $\bar{\nu}_e$ disappearance [15]. The seminal idea of studying lepton physics by detecting solar [16, 17] and reactor [16, 17, 18] neutrinos keeps thus bearing fruits after more than 50 years.

(da: G.L. Fogli, E.L., A. Marrone, D. Montanino, A. Palazzo, A.M. Rotunno, hep-ph/0212127)

... nel **2004**: un'unica soluzione nettamente identificata (Large Mixing Angle)

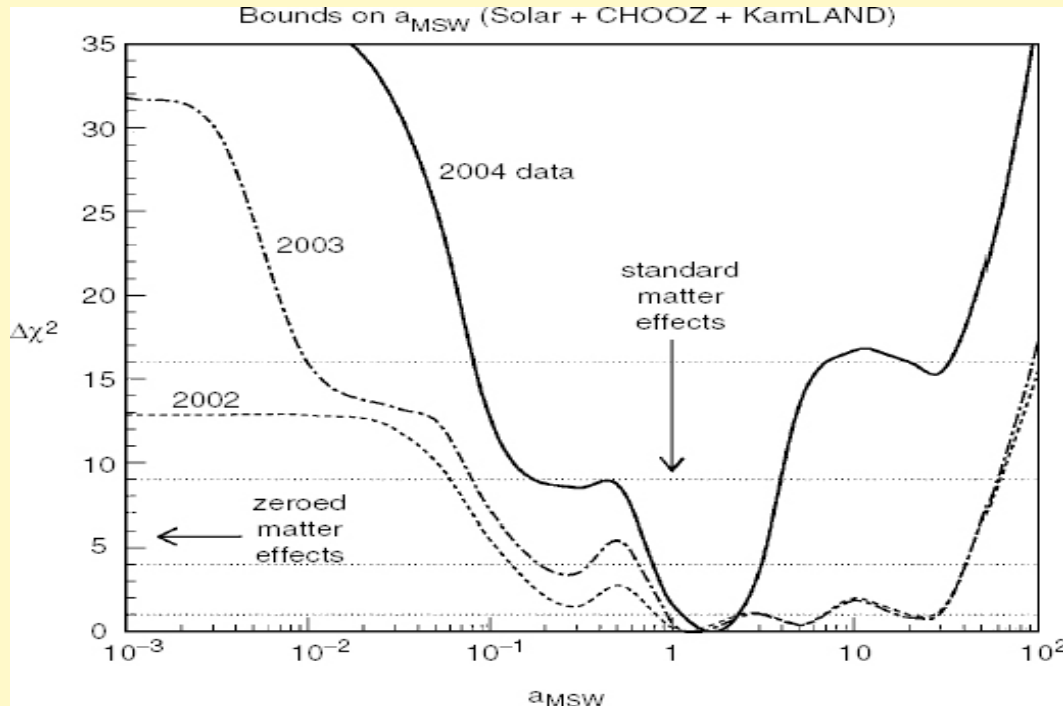


+ evidenza per un semiperiodo di oscillazione in KamLAND



**Cosa possiamo dire
sull'effetto MSW?**

- Esercizio:** (1) Variamo il potenziale MSW "a mano", $V(x) \rightarrow a_{MSW} V(x)$
 (2) Analizziamo tutti i dati data con $(\delta m^2, \theta_{12}, a_{MSW})$ liberi
 (3) Marginalizziamo $(\delta m^2, \theta_{12})$ e controlliamo che $a_{MSW} \sim 1$

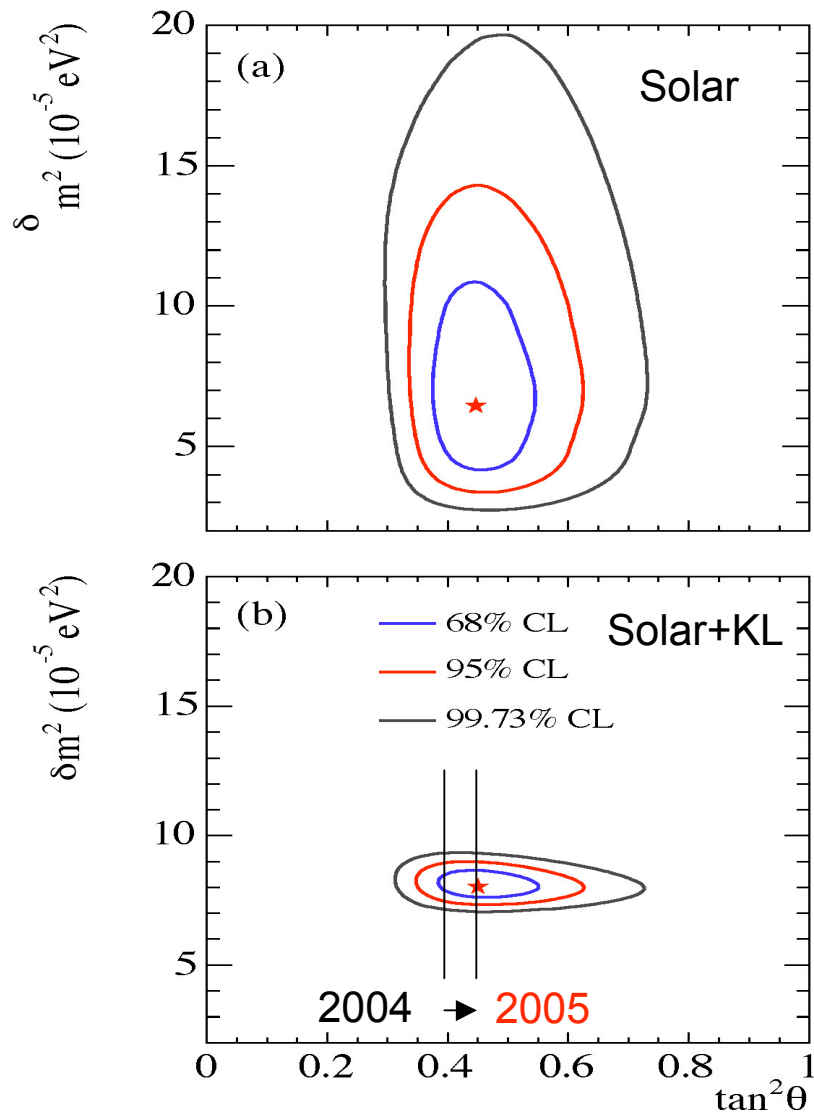


*(... un modo di "misurare"
 G_F attraverso oscillazioni
 di neutrini solari ...)*

Risultato: con i dati del **2004**, $a_{MSW} \sim 1$ confermato entro un fattore ~ 2
 mentre $a_{MSW} \sim 0$ escluso \rightarrow **Evidenza per effetto MSW nella materia solare**

*Ma: effetti MSW secondari attesi nell'attraversamento della Terra
 (differenza giorno-notte) ancora troppo piccoli rispetto alle incertezze sperimentali.*

2005 (due mesi fa): nuovi importanti risultati da SNO



Risultati precedenti
confermati

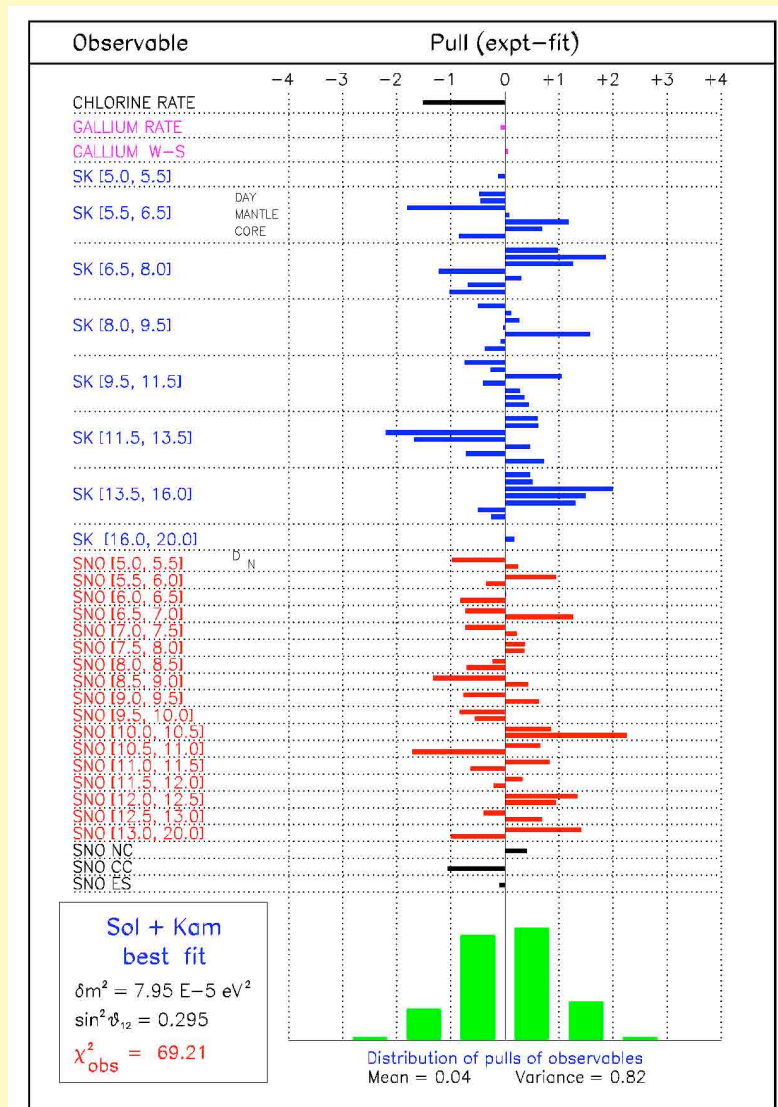
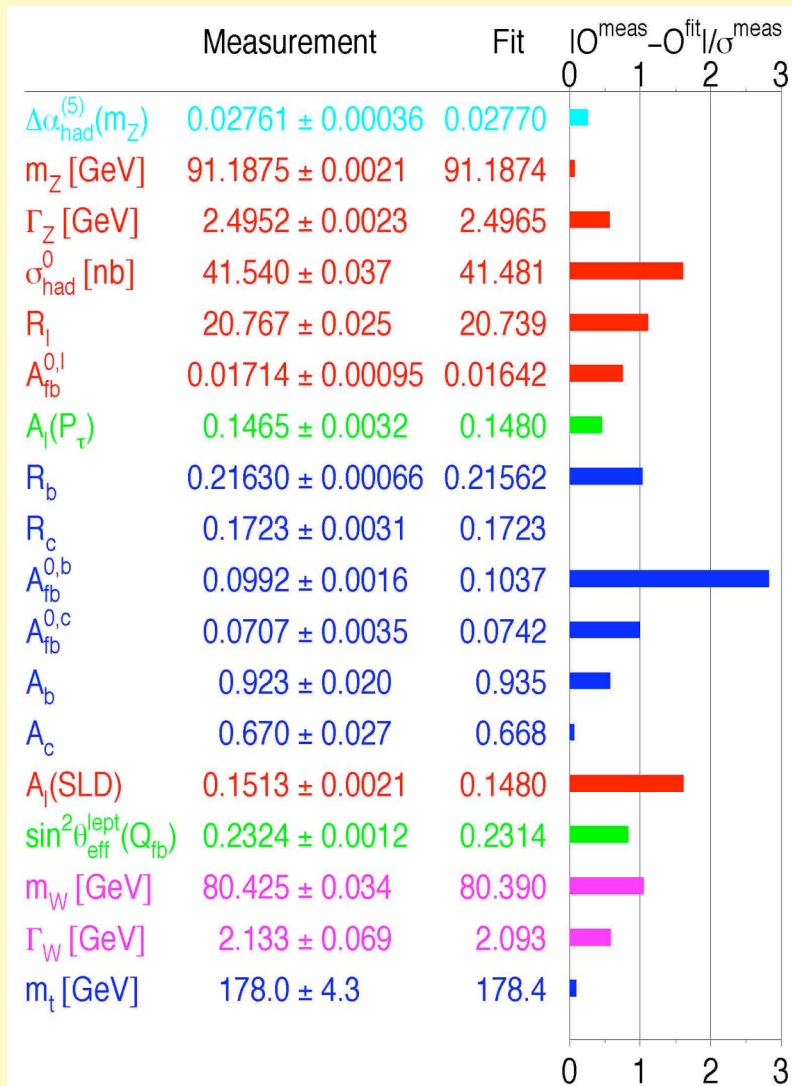
Rapporto
 $CC/NC \sim P(\nu_e \rightarrow \nu_e)$
leggermente aumentato

Piccolo spostamento ($<1\sigma$)
di θ_{12} verso valori maggiori

Verso una fisica dei neutrini di precisione ...

LEP EW Working Group, 2004

Neutrini solari (Bari group), 2004



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:

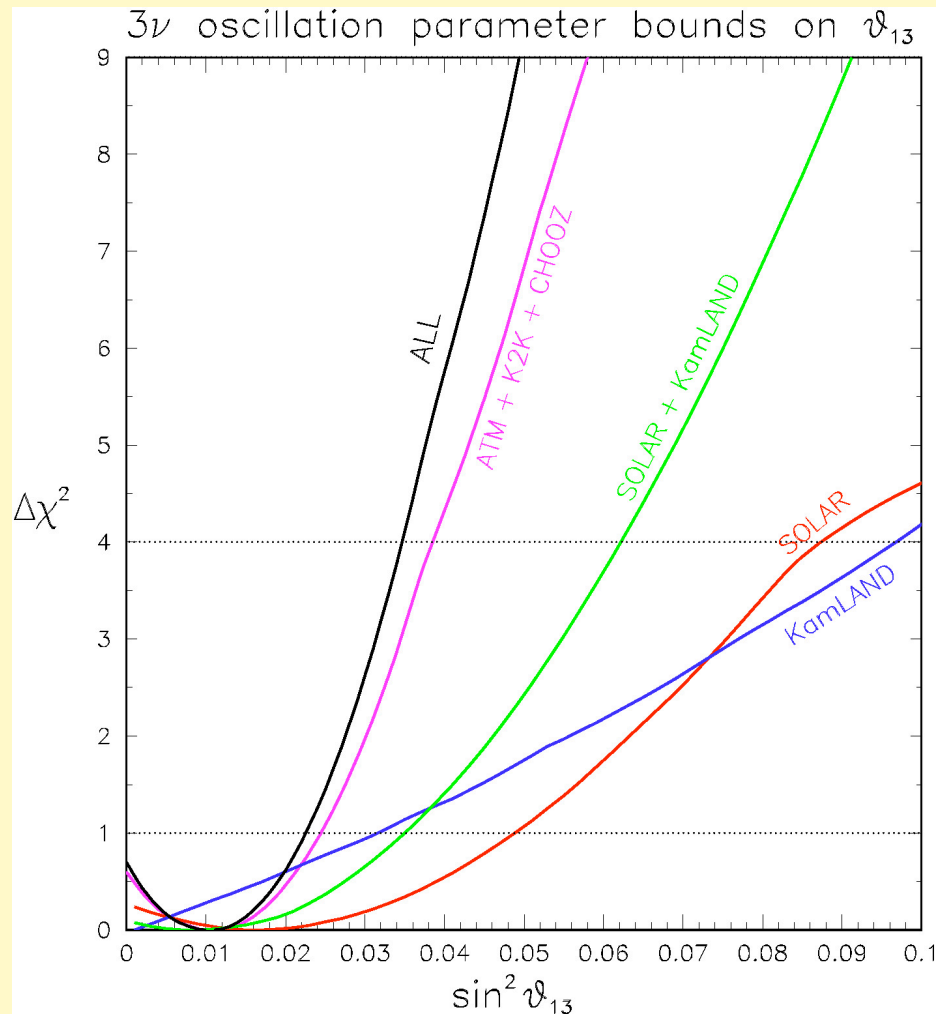
$$s_{23}^2 \sim 0.5$$

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

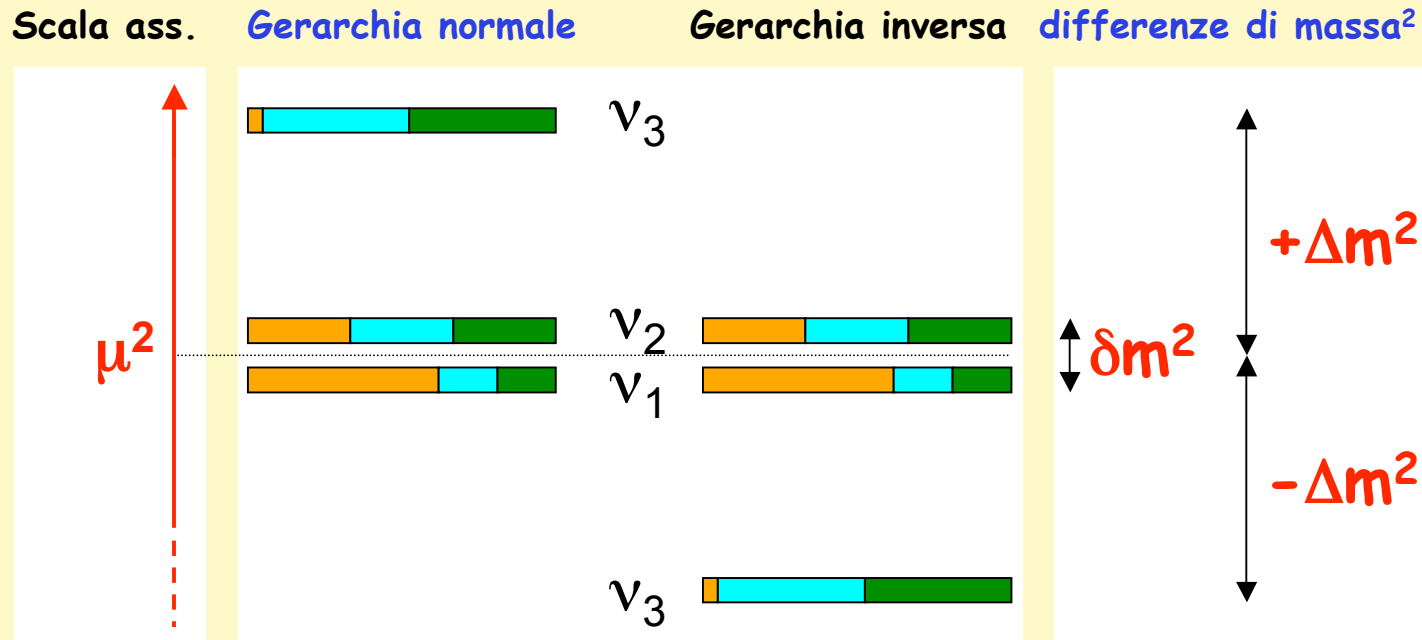
$$s_{12}^2 \sim 0.3$$

- 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)

Tutti gli esperimenti preferiscono θ_{13} piccolo o nullo
 (specialmente l'esperimento CHOOZ con neutrini da reattore)
 → consistenza non banale in 3ν , ma rende difficile future ricerche...._



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 [$m_a < \text{alcuni } \%$]

$$\delta m^2 \simeq 8.0 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \quad (\text{gap di massa "solare"})$$

$$\Delta m^2 \simeq 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (\text{gap di massa "atmosferico"})$$

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

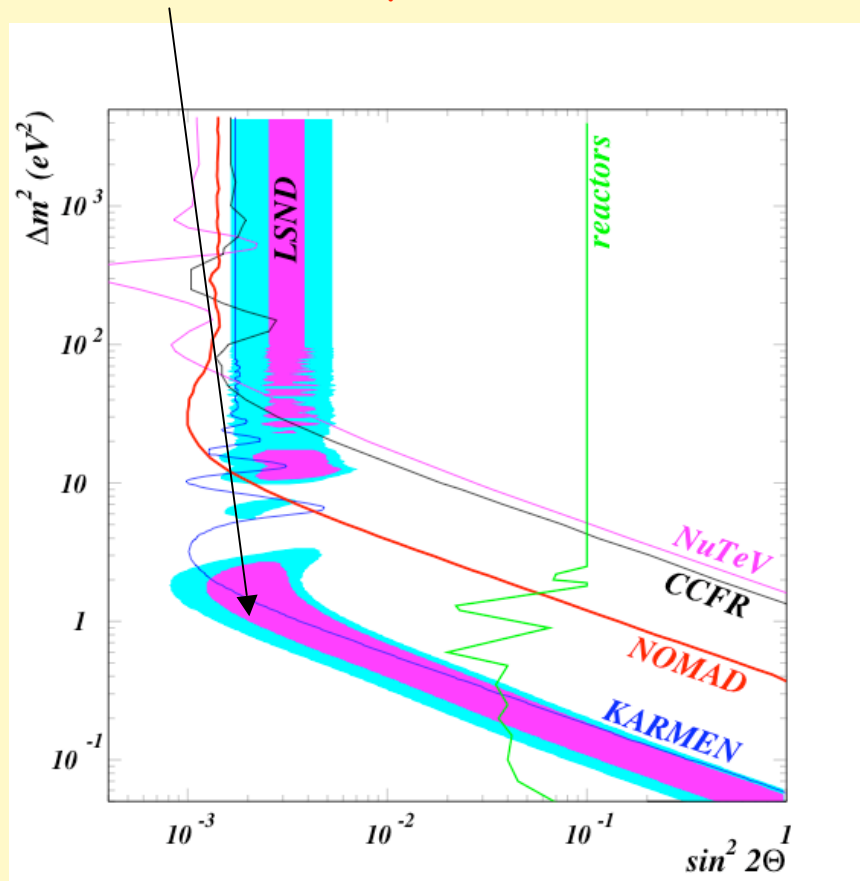
CP phase δ : unknown

La "spada di Damocle" dello scenario a 3ν : LSND

Ci sono motivazioni teoriche per fisica oltre lo scenario standard a 3ν

Un motivo puramente sperimentale: il controverso segnale in LSND

$\Delta M^2 \sim O(eV^2)$ con piccolo mescolamento?



Le soluzioni inventate finora (nuovi neutrini "sterili", nuove interazioni o proprietà), oltre ad essere piuttosto "ad hoc", sono in scarso accordo con gli altri risultati acquisiti

Ma se l'esperim. **MiniBoone** confermasse LSND (dati attesi entro il 2005 !), molte delle cose dette finora andrebbero profondamente riesaminate ...
Sarebbe molto divertente!

**Altri problemi aperti: masse
assolute e neutrini di Majorana**

Tre osservabili principali: (m_β , $m_{\beta\beta}$, Σ)

- 1) **Decadimento β** : $m_i \neq 0$ influenza la coda dello spettro. Sensibile alla "massa efficace del neutrino elettronico": (*Fermi, 1934*)

$$m_\beta = \left[c_{13}^2 c_{12}^2 m_1^2 + c_{13}^2 s_{12}^2 m_2^2 + s_{13}^2 m_3^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

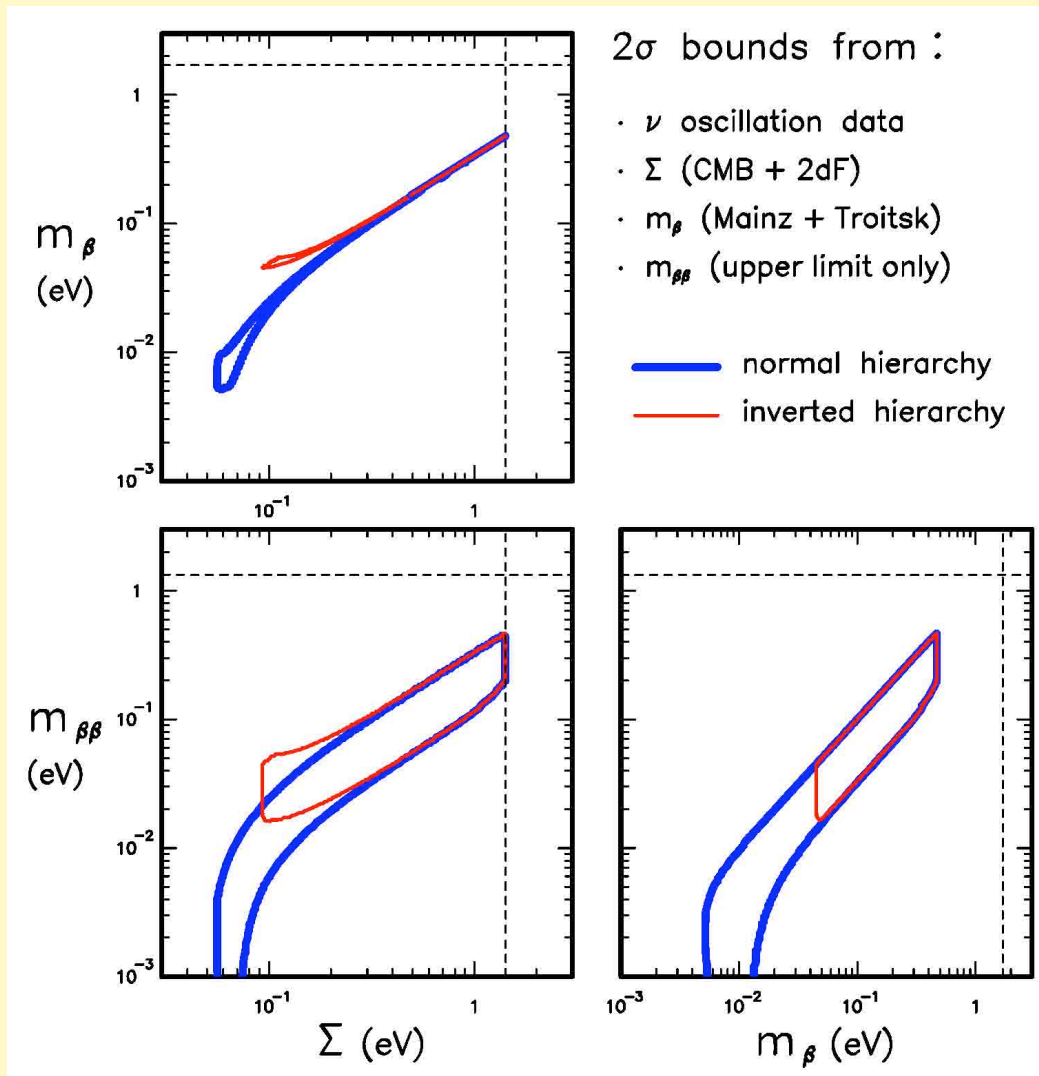
- 2) **Decadimento $0\nu 2\beta$** : Possibile solo se $m_i \neq 0$ and $\nu = \text{anti-}\nu$. Sensibile alla "massa effettiva di Majorana": (*e alle "fasi di Majorana"*)

$$m_{\beta\beta} = \left| c_{13}^2 c_{12}^2 m_1 + c_{13}^2 s_{12}^2 m_2 e^{i\phi_2} + s_{13}^2 m_3 e^{i\phi_3} \right|$$

- 3) **Cosmologia**: $m_i \neq 0$ influenza la formazione di strutture su grande scala in (nella cosmologia standard vincolata da CMB+altri dati):

$$\Sigma = m_1 + m_2 + m_3$$

Anche se non avessimo dati non-oscillatori, lo spazio dei parametri $(m_\beta, m_{\beta\beta}, \Sigma)$ sarebbe comunque vincolato dalle ricerche di oscillazione



Correlazioni significative

Parziale sovrapposizione
fra le due gerarchie

Grande incertezza su $m_{\beta\beta}$
dovuta a fasi di Majorana

Ma abbiamo anche informazioni da ricerche non-oscillatorie:

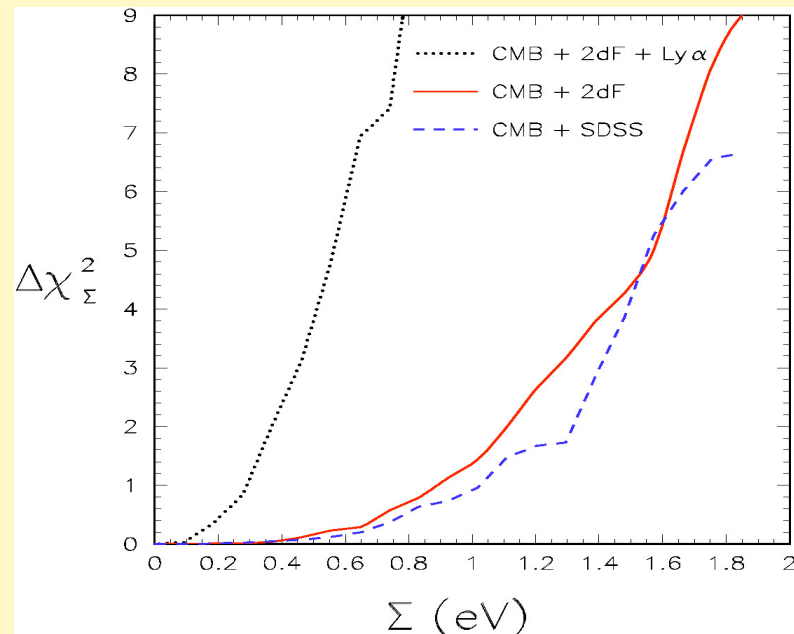
- 1) Decadimento β : Nessun segnale finora. Mainz & Troitsk: $m_\beta < O(\text{eV})$
- 2) Decadimento $0\nu 2\beta$: Nessun segnale, fatta eccezione per l'esperimento piú sensibile (*Heidelberg-Moscow*). Segnale controverso e dibattuto.
 Segnale accettato: $m_{\beta\beta}$ ha valori sub-eV (con grandi incertezze)
 Segnale respinto: $m_{\beta\beta} < O(\text{eV})$.

- 3) Cosmologia. Limiti sup.:

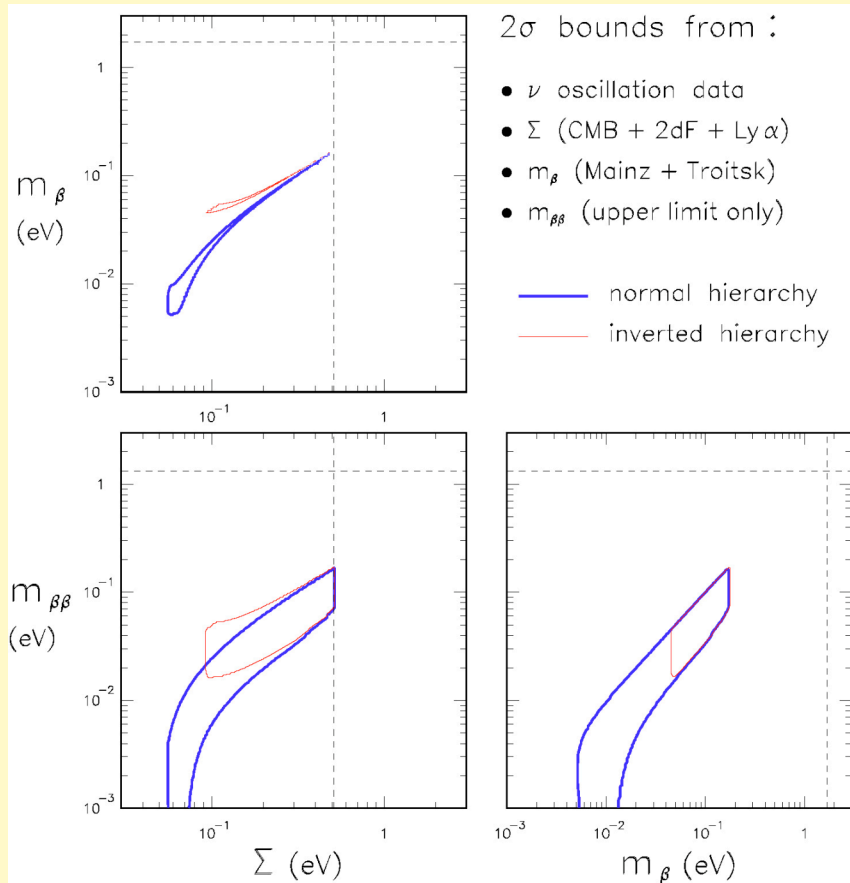
$$\Sigma < \text{eV/sub-eV} ,$$

a seconda degli input e delle assunzioni. P.es.

(Vari progetti futuri nei tre campi)

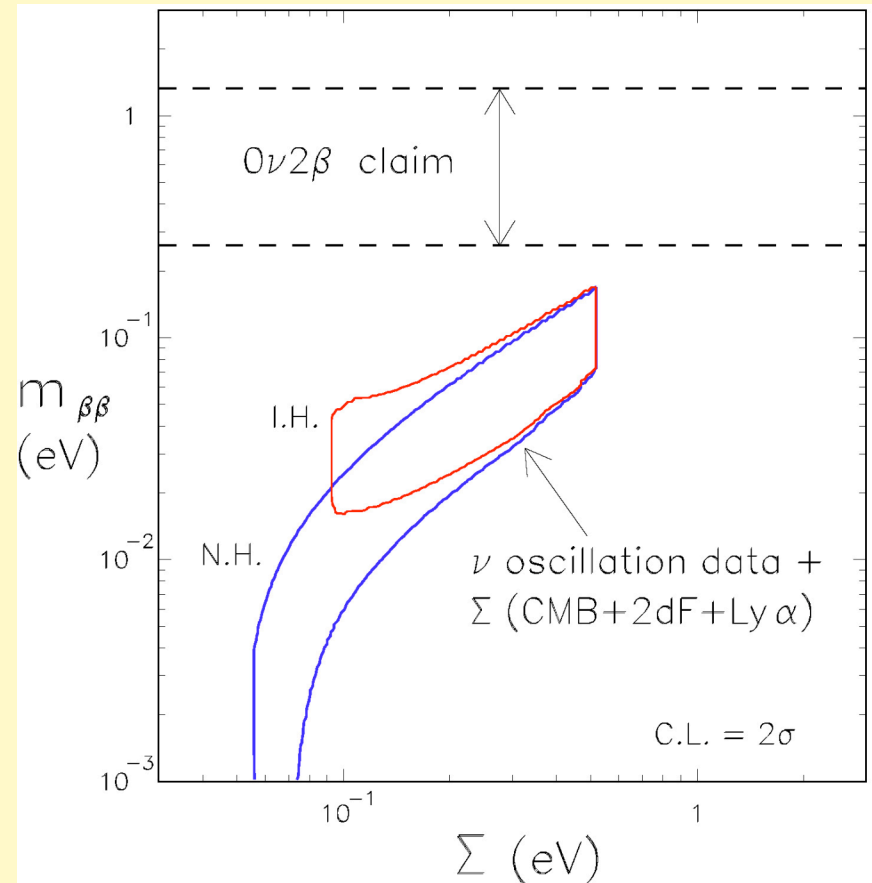


Segnale $0\nu 2\beta$ respinto



Limite cosmologico dominante, ma non ancora sensibile alla gerarchia di massa

Segnale $0\nu 2\beta$ accettato



Tensione col limite cosmologico
Ma: Necessari ulteriori studi e verifiche

Conclusioni

Grandi
progressi
in anni
recenti ...

Masse e mescolamenti non nulli dei neutrini
Determinazione di $(\delta m^2, \theta_{12})$ e $(\Delta m^2, \theta_{23})$
Limiti superiori su θ_{13}
Distorsioni spettrali indotte da oscillazioni
Evidenza diretta per oscillazioni di ν solari
Evidenza per effetto MSW nel Sole
Limiti superiori su m_ν di ordine (sub)eV

.....

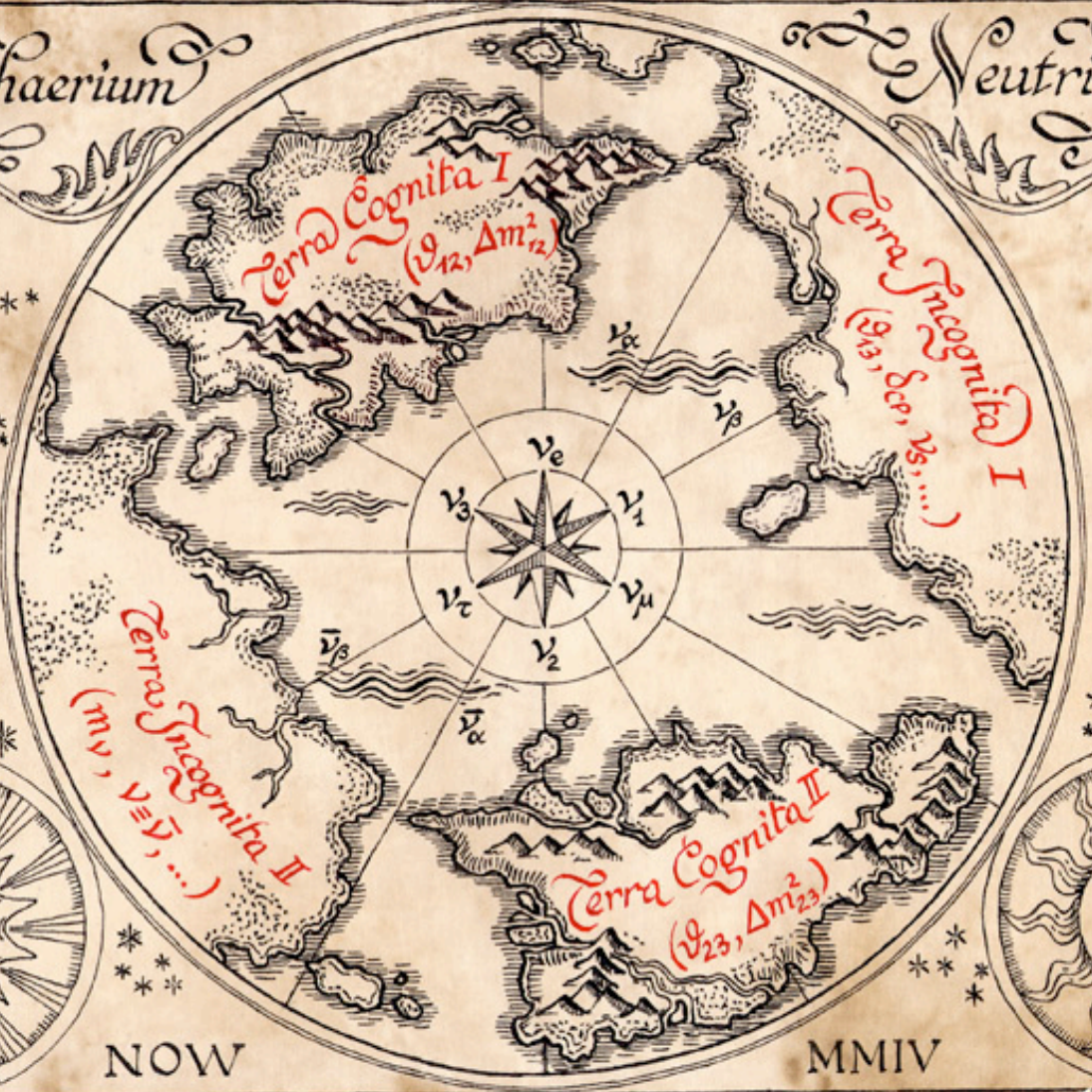
Determinazione di θ_{13}
Violazione di CP leptonica
Masse assolute da β -decay e cosmologia
Test di segnali controversi ($0\nu 2\beta$, LSND)
Effetto MSW nella materia terrestre
Gerarchia normale vs inversa
Oltre lo scenario standard a 3ν
Piu' profonda comprensione teorica

.....

... e grandi
sfide
per il
futuro

Planisphaerium

Neutrinorum



Atlas

Coelestis



NOW

MMIV

ELIGIO LISI