
Fisica del neutrino (con massa)

Eligio Lisi
INFN, Sezione di Bari

Schema:

- Un po' di storia
- Le oscillazioni di neutrino
- Le masse assolute
- Conclusioni

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

Original. Photostatische Kopie
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
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifalten Ausweg
verfallen um den "Wechselzatz" (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
sich mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
kannste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-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**

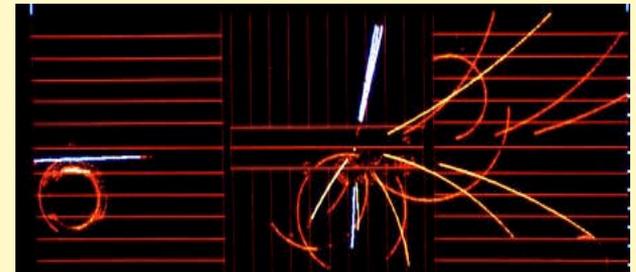
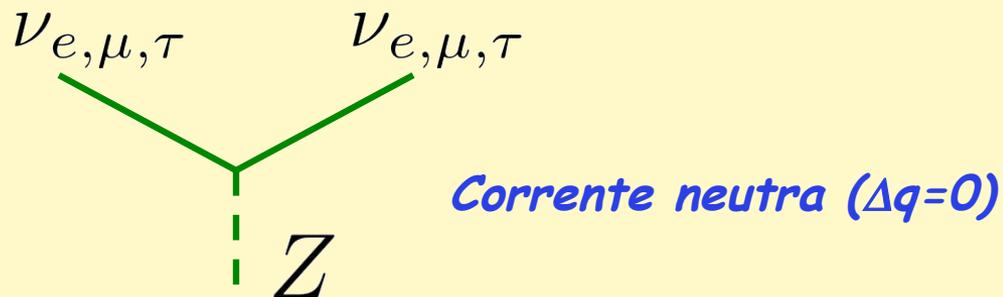
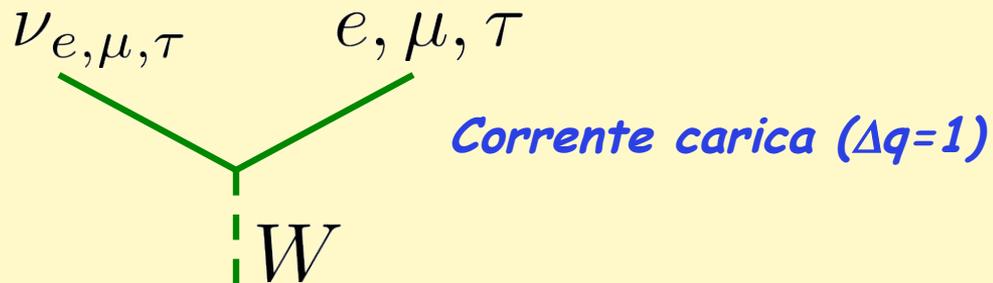
Viene "battezzato" nel 1933-34 da Enrico Fermi, che ne caratterizza le prime proprietà dinamiche (interazioni deboli)



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)

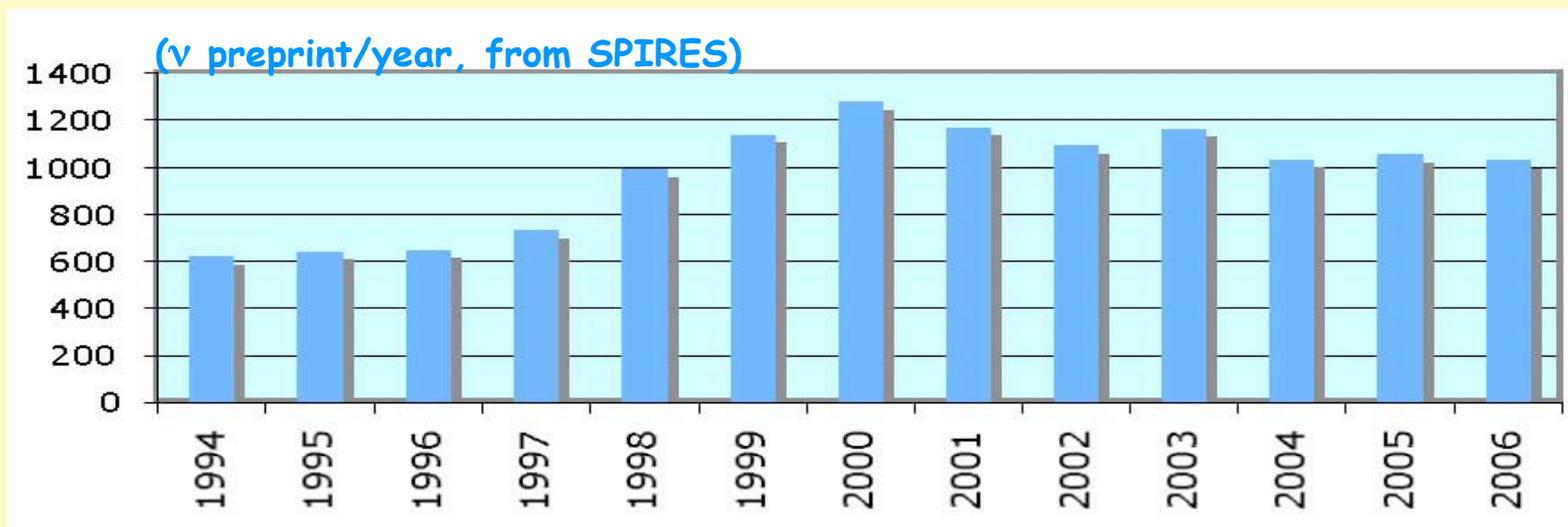
Neutrini di sapore diverso si trasformano ("oscillano") l'uno nell'altro?

(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, ...)

... $O(10^4)$ 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



N.B.: questa vasta letteratura è ben organizzata nel sito "Neutrino Unbound", www.nu.to.infn.it

Le oscillazioni di sapore dei neutrini

A due anni dal centenario dell'*annus mirabilis* (1905-2005), non possiamo che partire da una celebre equazione ...

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

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

was dem Äquivalenz - Satz von ~~der~~ trögen Masse und Ruhe - Energie ausspricht.
~~Hätten wir oben nicht die Massenkonzstante des Impulses gleich~~
~~dort \mathcal{E}_0~~

... 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 $p \gg m$

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

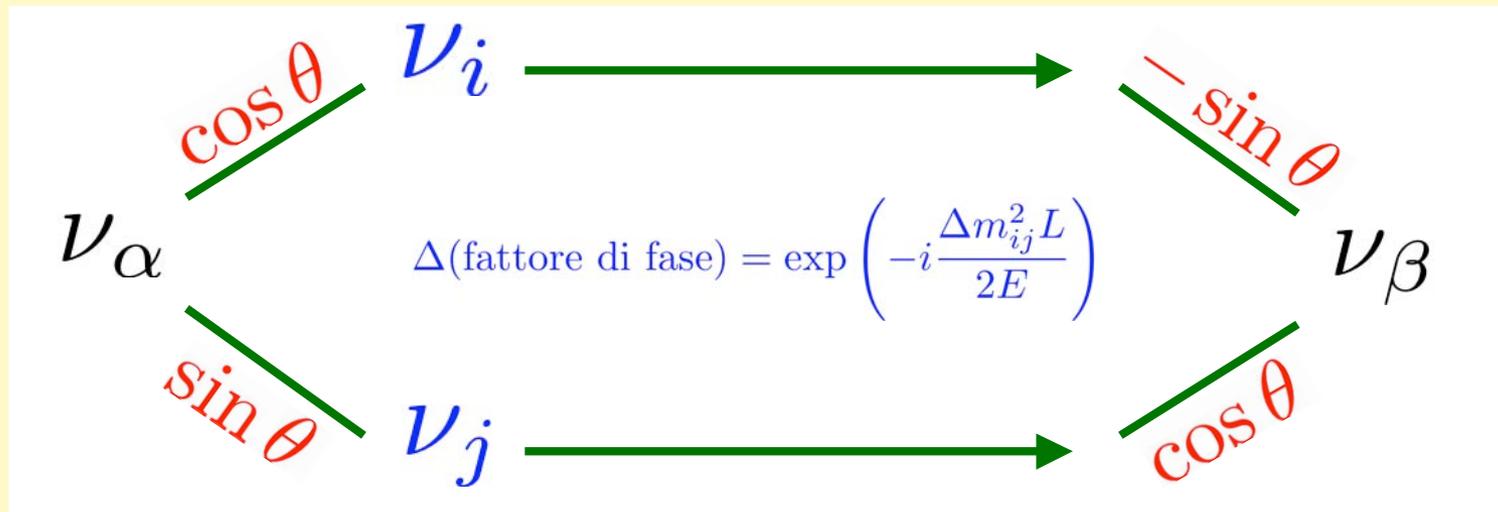
Differenza di energia fra due neutrini ν_i e ν_j di masse m_i e m_j in uno stesso fascio ($p_i = p_j \simeq E$)

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

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

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

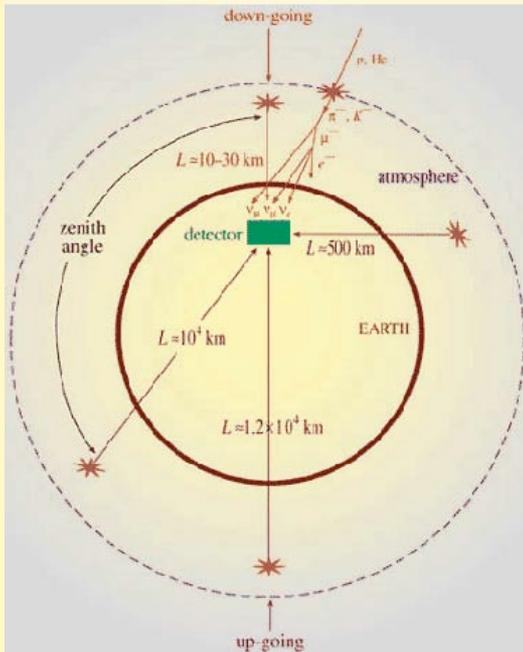
Analogia con esperimento di interferenza con due fenditure



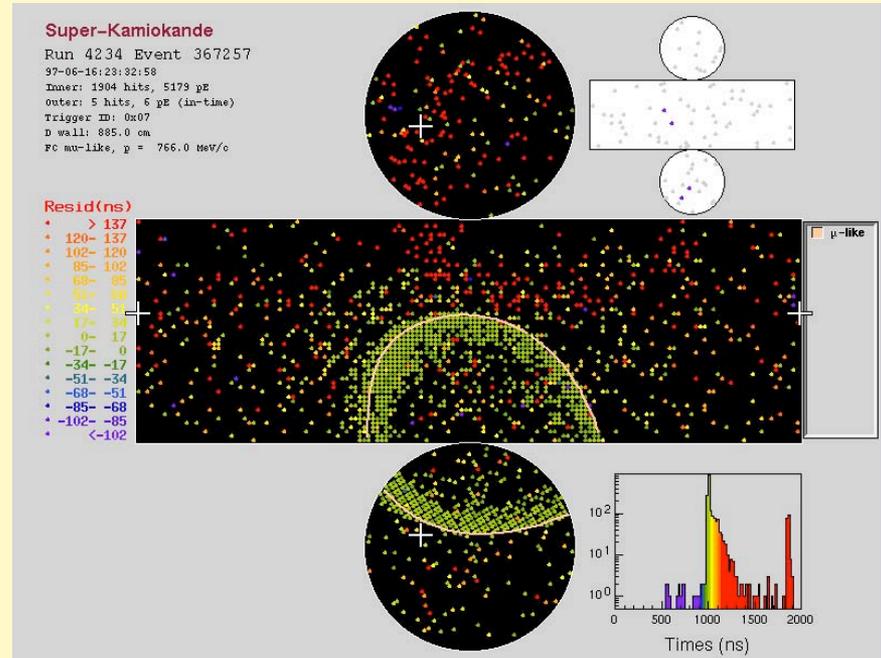
$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = 4 \sin^2 \theta \cos^2 \theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right) \quad (\text{Oscillazione periodica di sapore})$$

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

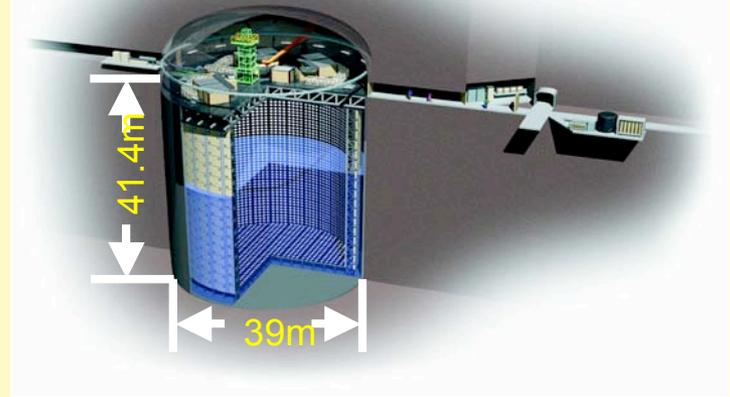
Eventi indotti da ν_μ : deficit dal basso

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

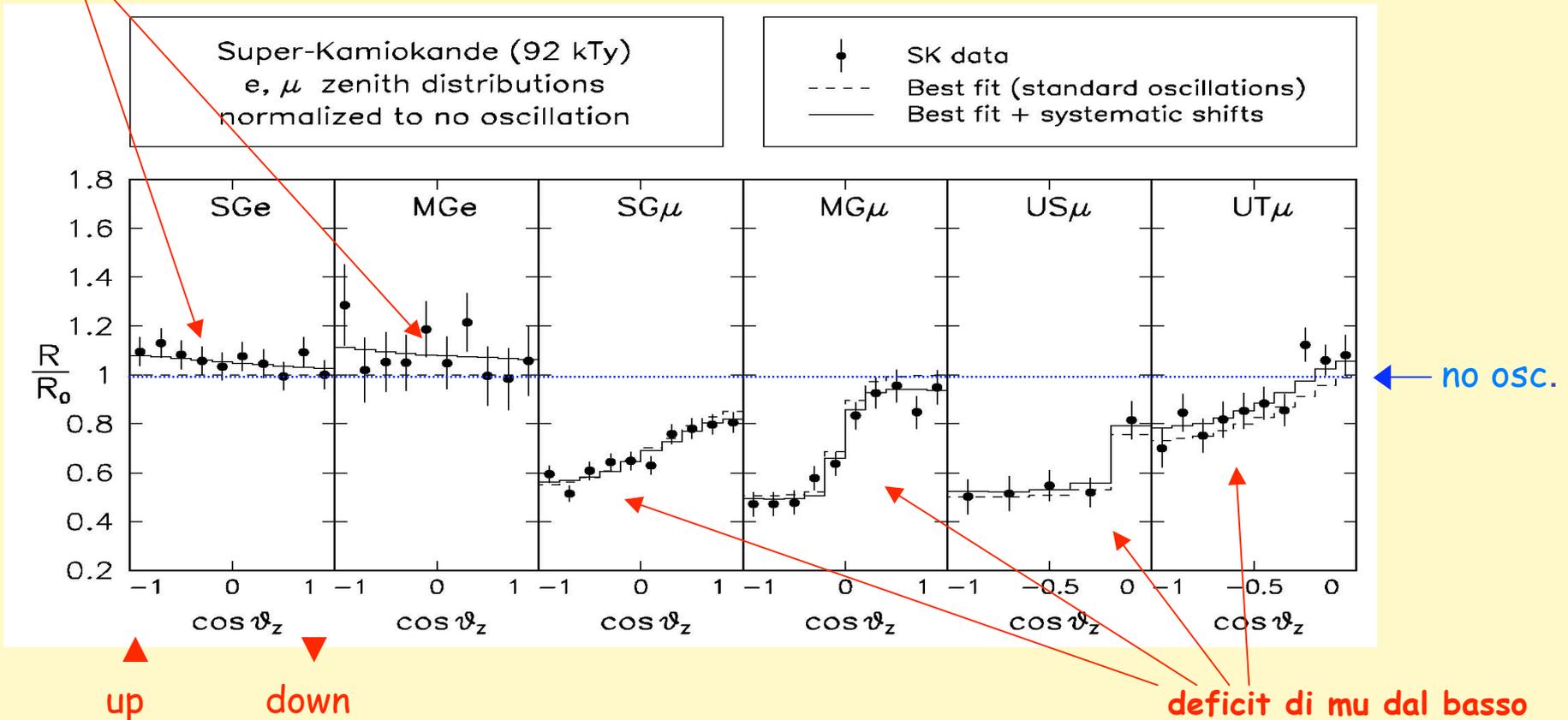
Oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$? Si (dominanti)

Dettaglio: Super-Kamiokande

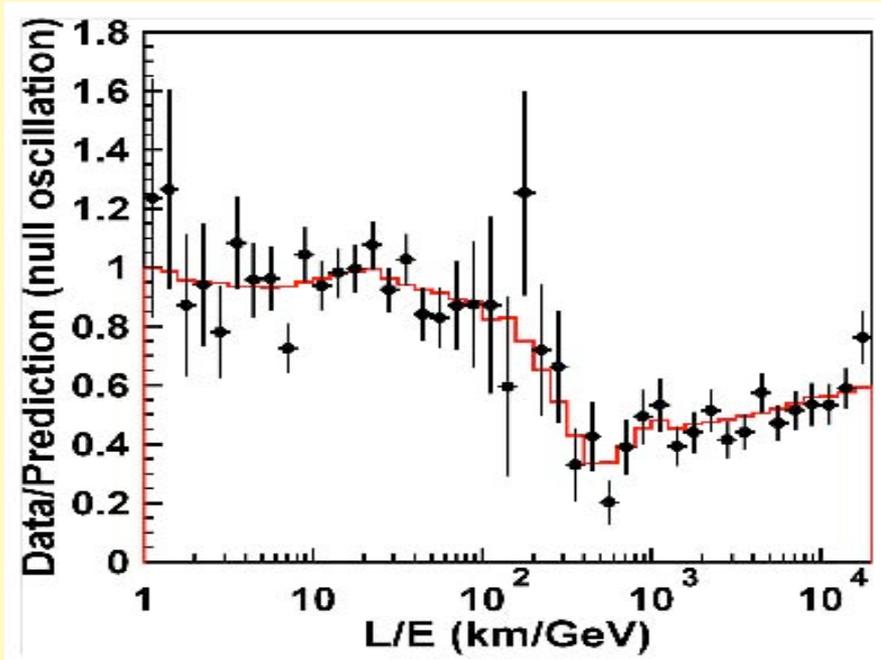
- S_{Ge}** Sub-GeV electrons
- M_{Ge}** Multi-GeV electrons
- S_{Gμ}** Sub-GeV muons
- M_{Gμ}** Multi-GeV muons
- U_{Sμ}** Upward Stopping muons
- U_{Tμ}** Upward Through-going muons



elettroni ~OK

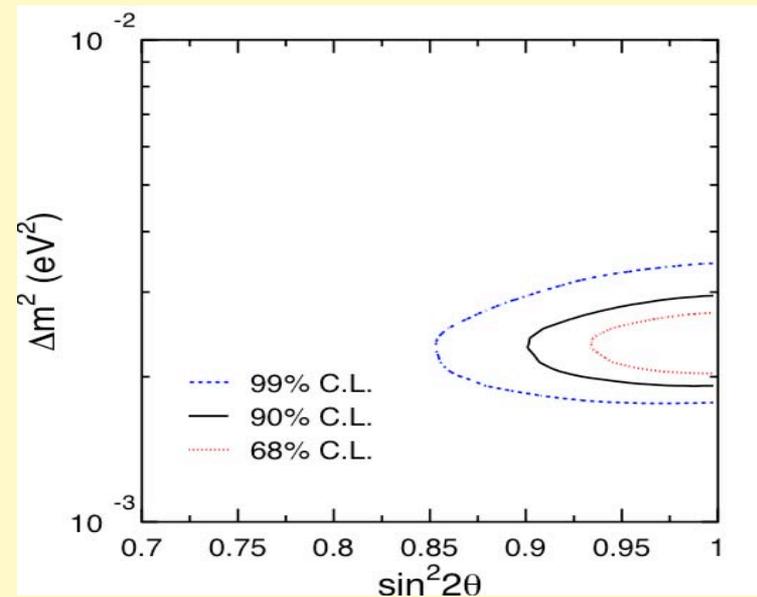


Nessuna... ← Oscillazione → ...Mediata

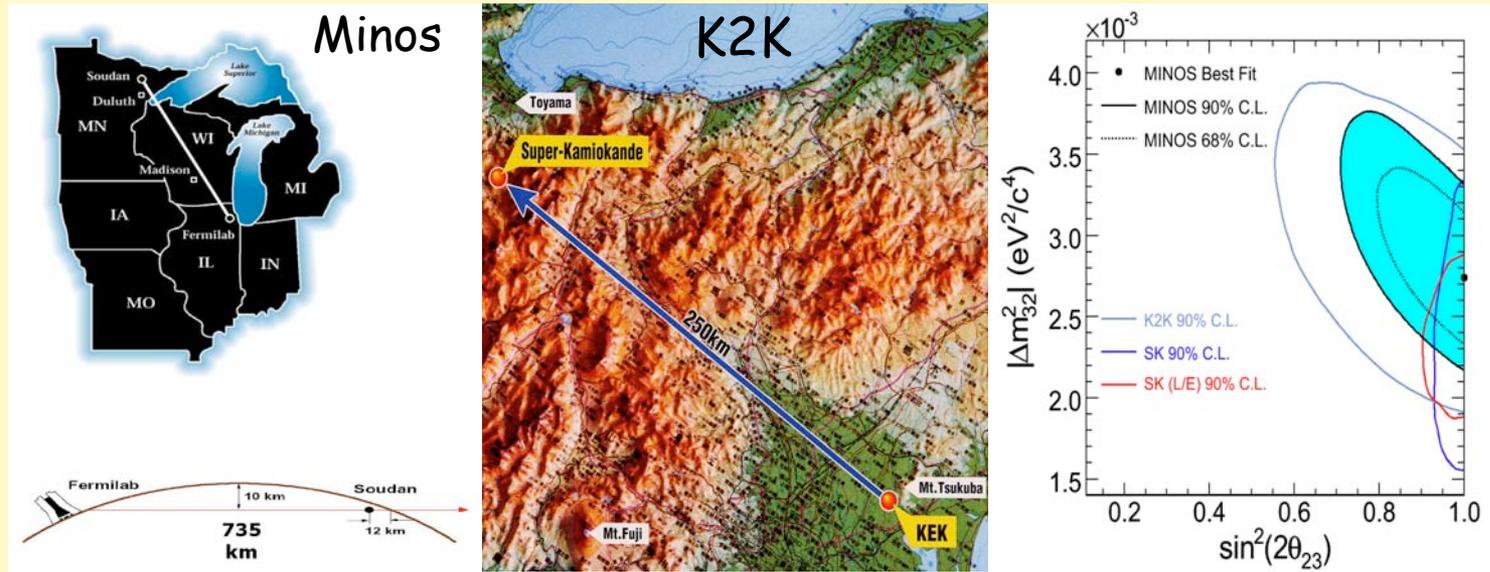


Il primo semiperiodo di oscillazione risulta visibile con alta statistica in una analisi dedicata (Super-Kamiokande). La scarsa risoluzione in L/E non permette di vederne il seguito (oscillazioni mediate)

Si ottengono forti limiti sui parametri di massa e mescolamento (Δm^2 , θ).
 Valore di mixing preferito $\theta \sim \pi/4$:
 molto maggiore che nel caso dei quark



Test di laboratorio con ν_μ da acceleratori: esperimenti a lunga base (1)

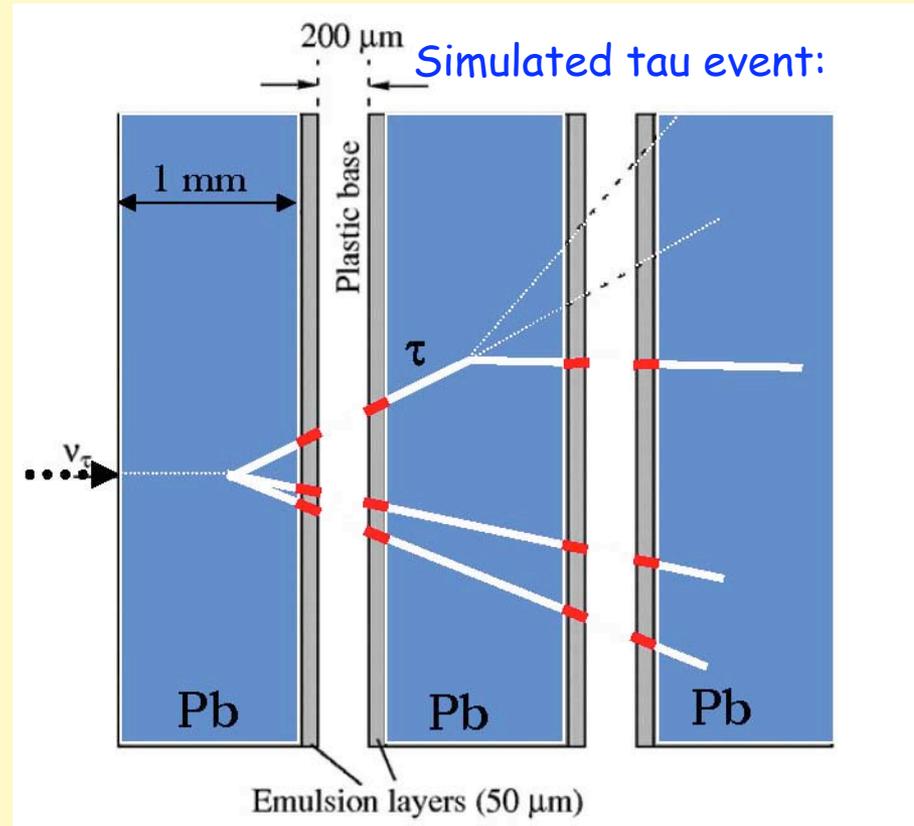
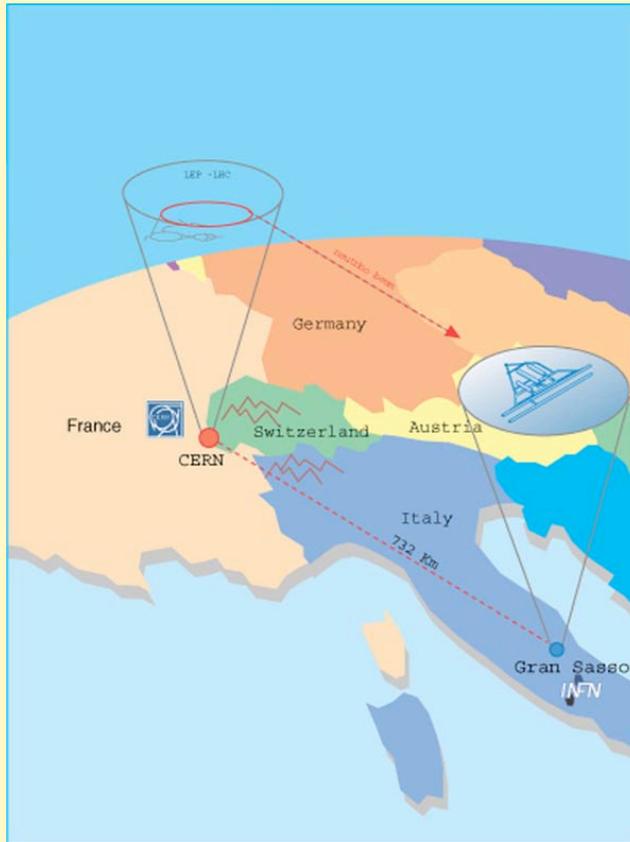


Questi risultati convergono verso: sparizione del sapore muonico e non-apparizione del sapore elettronico, cioè **oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$**

Ma manca ancora un tassello del puzzle...

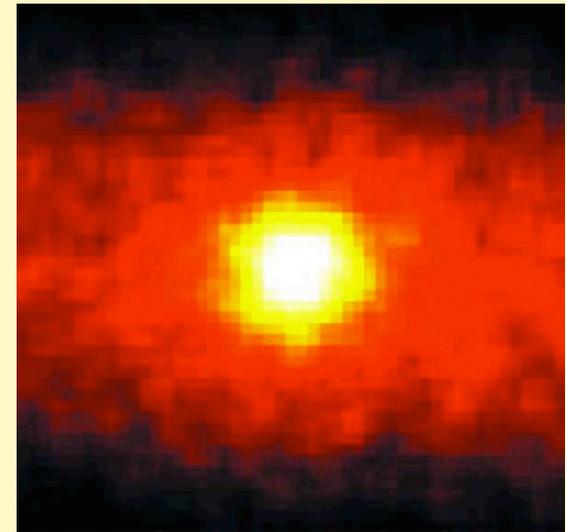
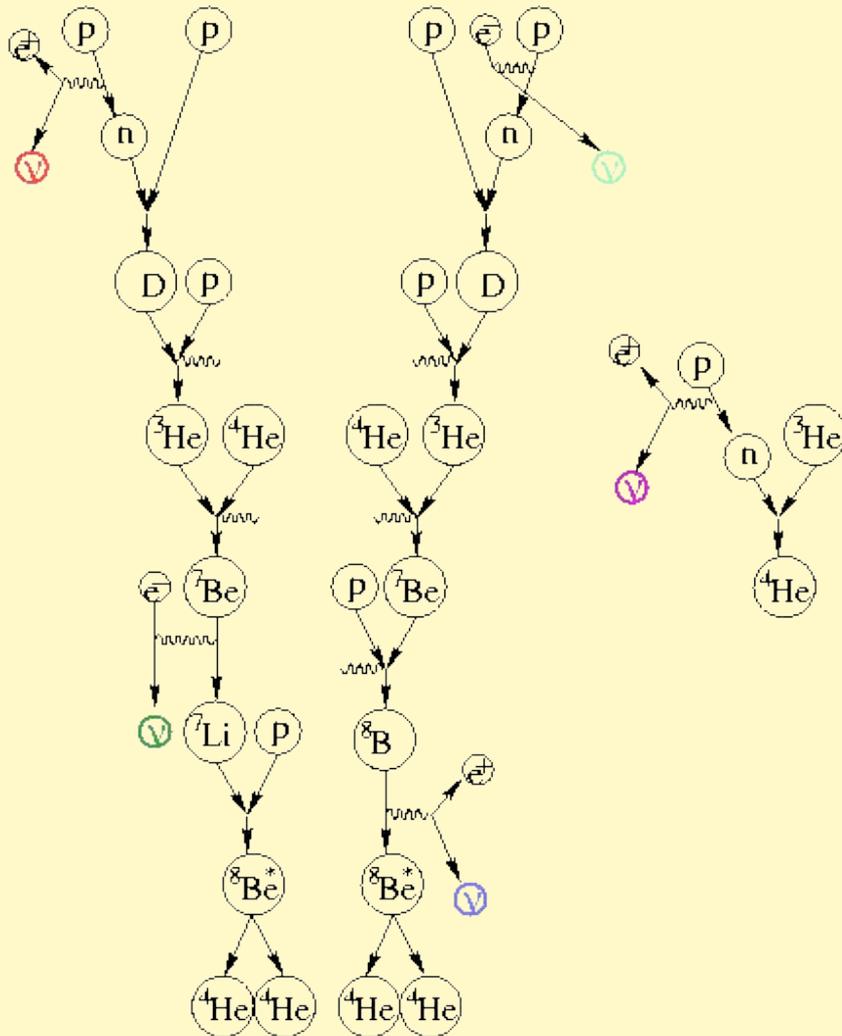
... osservazione diretta di apparizione di ν_τ in un fascio di ν_μ !

Test di laboratorio con ν_μ da acceleratori: esperimenti a lunga base (2)

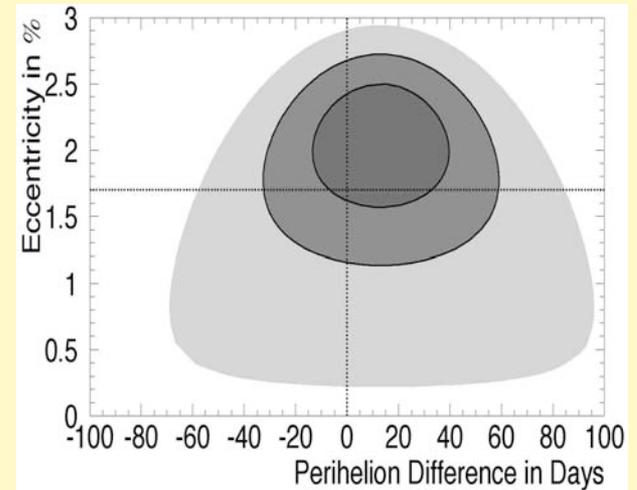


Esperimento OPERA su fascio CERN-Gran Sasso (CNGS): dedicato alla rivelazione diretta di **tau**. Risultati attesi nei prossimi ~5 anni.

Neutrini (ν_e) solari



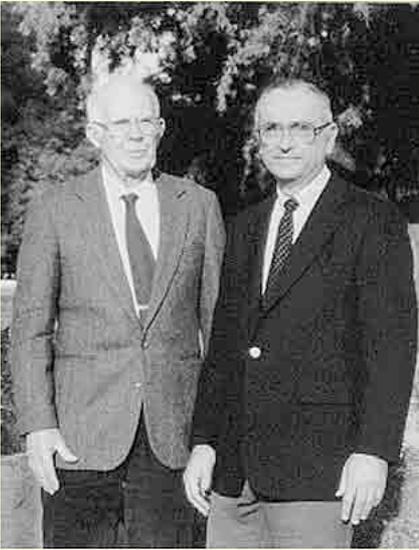
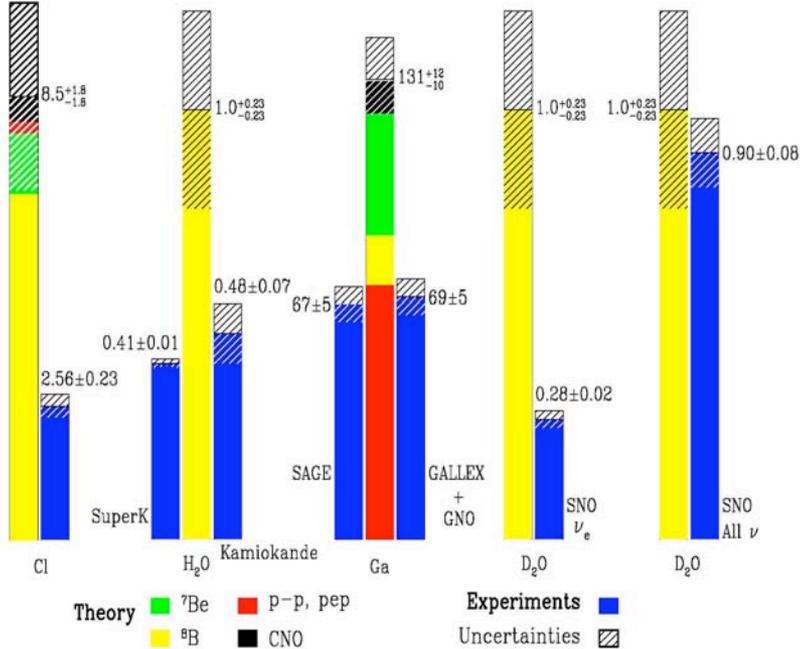
Il sole visto coi neutrini (SK)



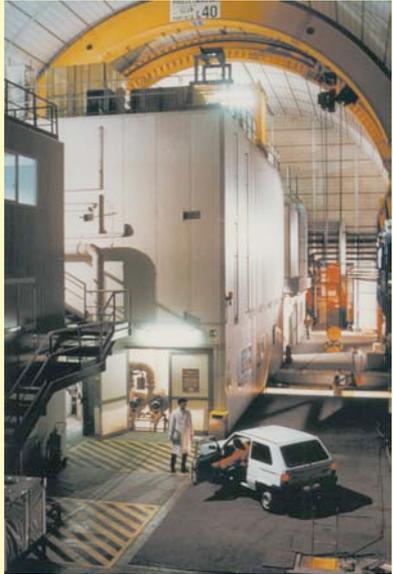
Orbita terrestre da ν solari (SK)

Il deficit di neutrini solari: 50 anni di ricerche

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

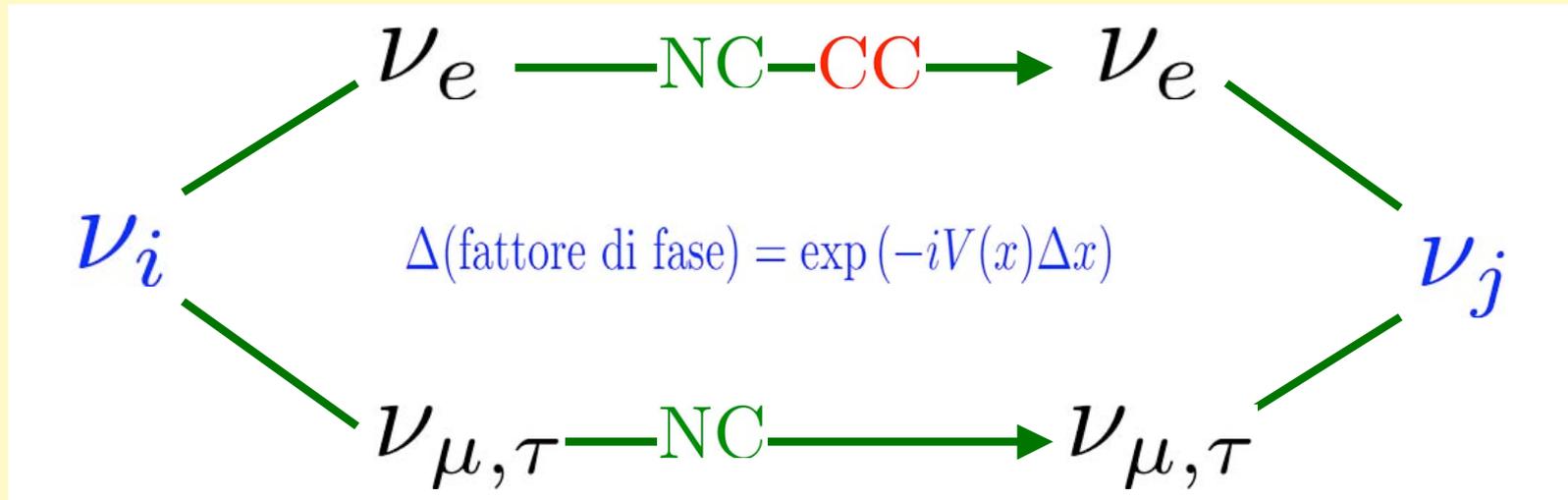


Davis & Bahcall



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^-

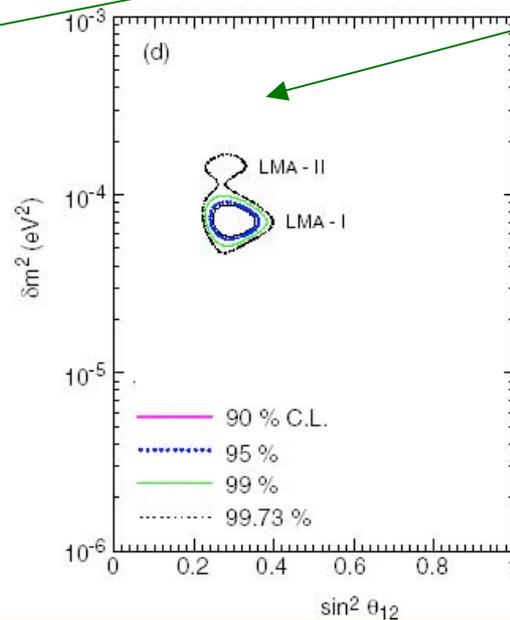
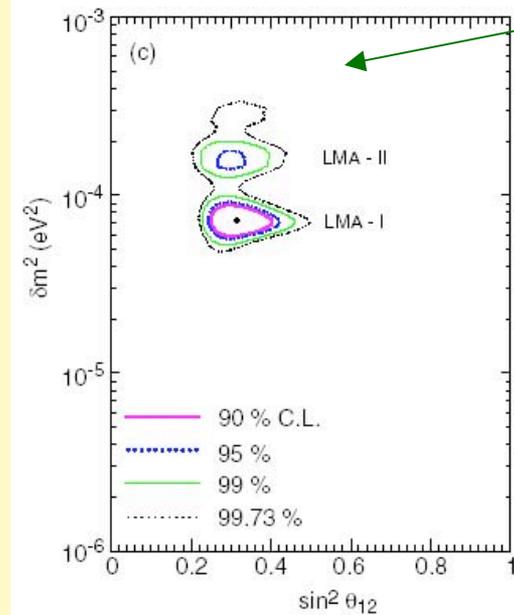
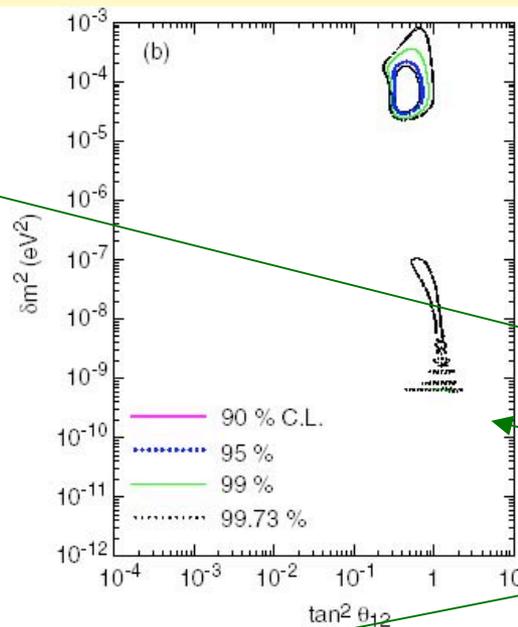
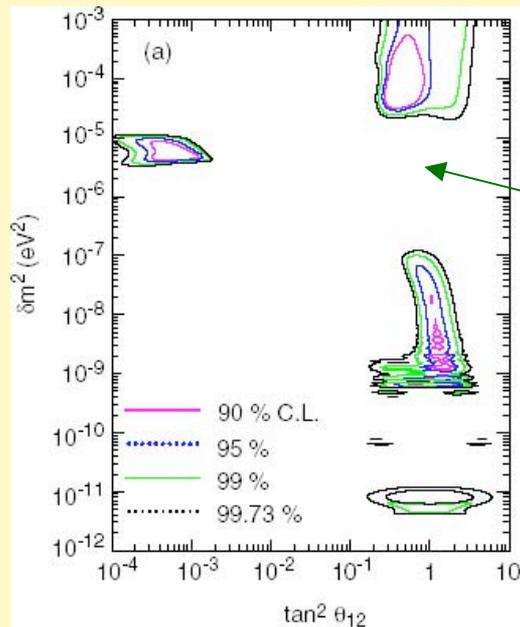


Differenza di energie di interazione:

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

[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 scale da log a lineari)

Cl+Ga+SK (2001)

+SNO-I (2001-2002)

+KamLAND-I (2002)

+SNO-II (2003)

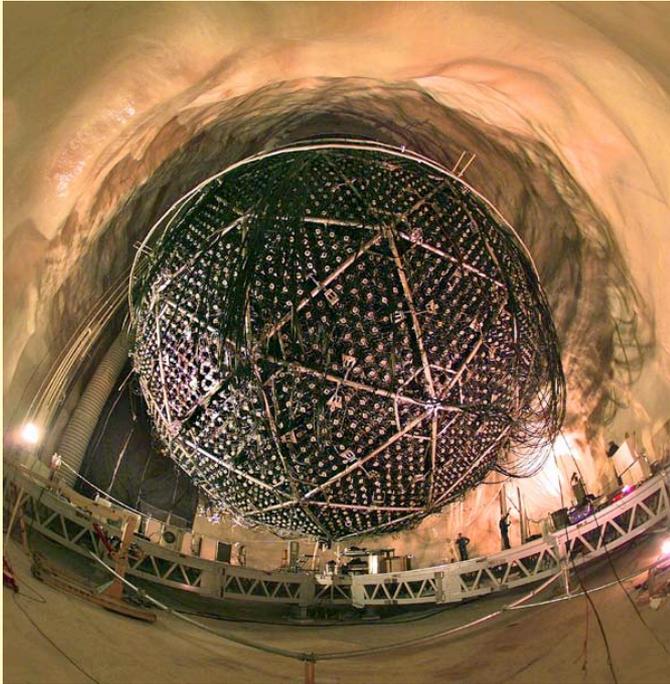
(+ conferma del modello solare)

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)

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

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

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

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

quindi:

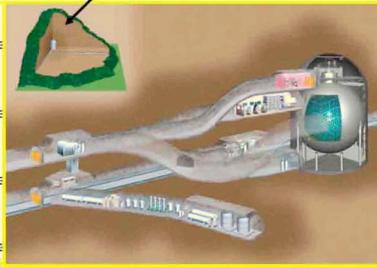
$$\frac{\text{CC}}{\text{NC}} < 1 \Rightarrow \phi(\nu_{\mu,\tau}) > 0 \Rightarrow \nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$$

SNO, 2002: CC/NC ~ 1/3

Evidenza di cambiamento di sapore indipendente da modelli

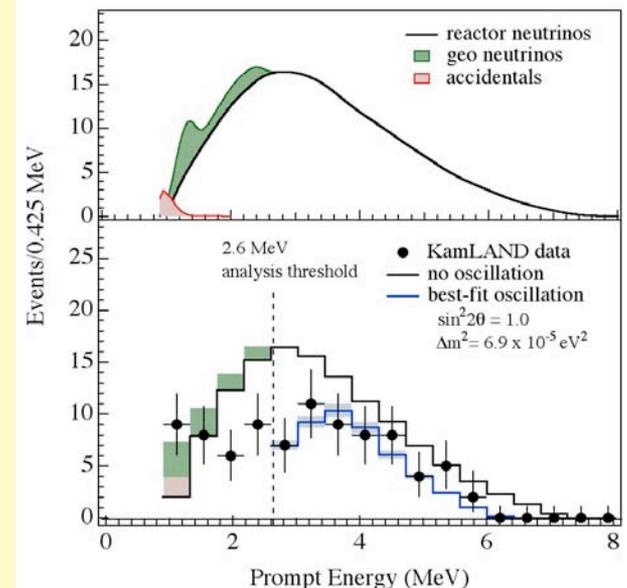
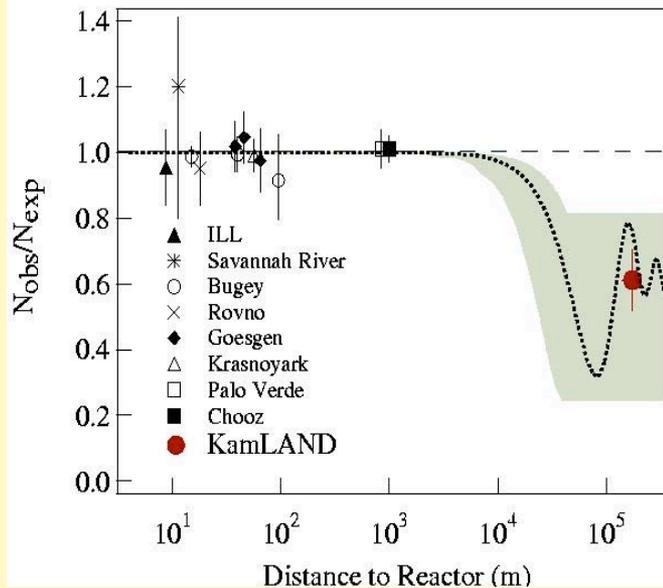


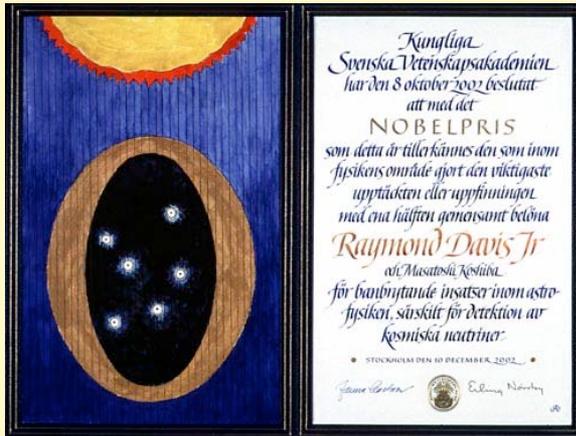
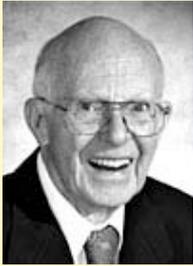
KamLAND: 1000 tonnellate di olio minerale, "circondato" da reattori nucleari ($L \sim 100\text{-}200$ km, $E_\nu \sim$ alcuni MeV)



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**

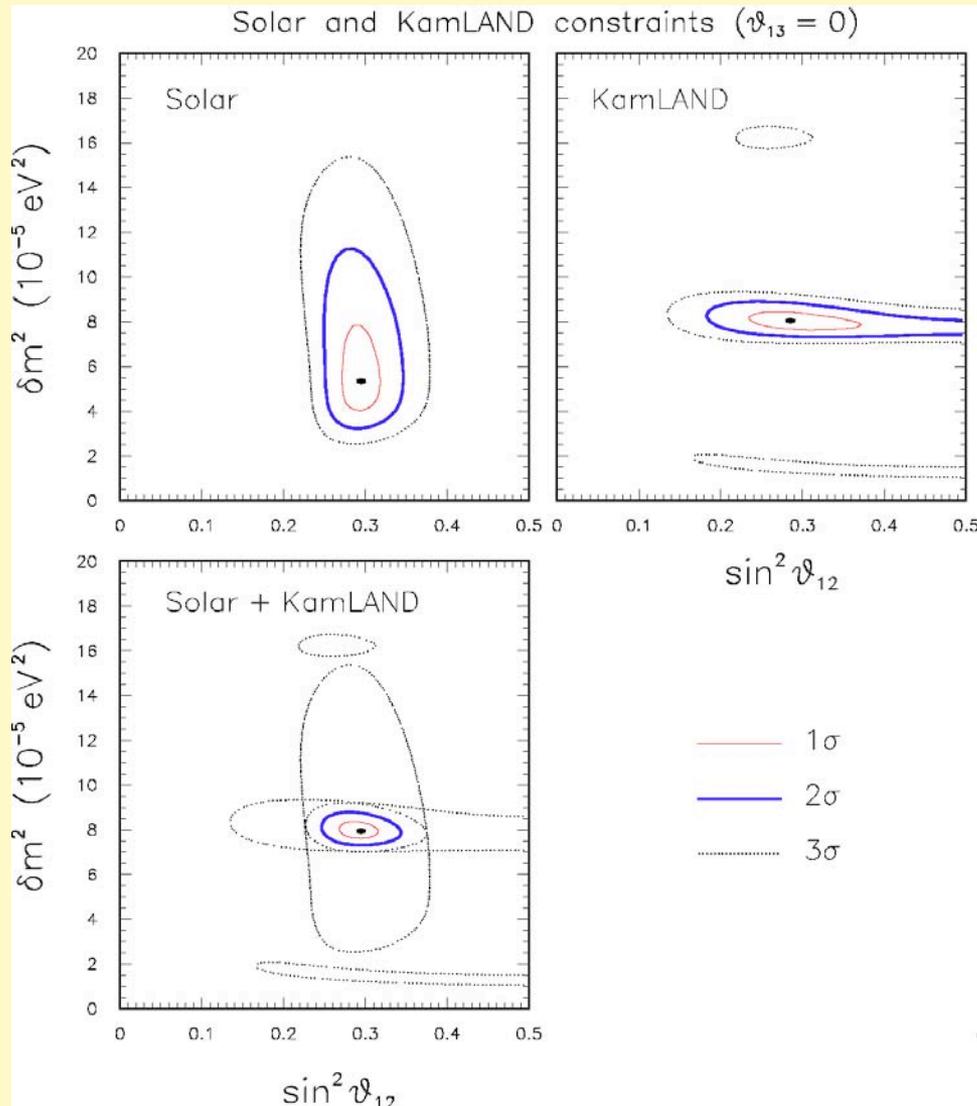


1905: annus mirabilis per la fisica in generale

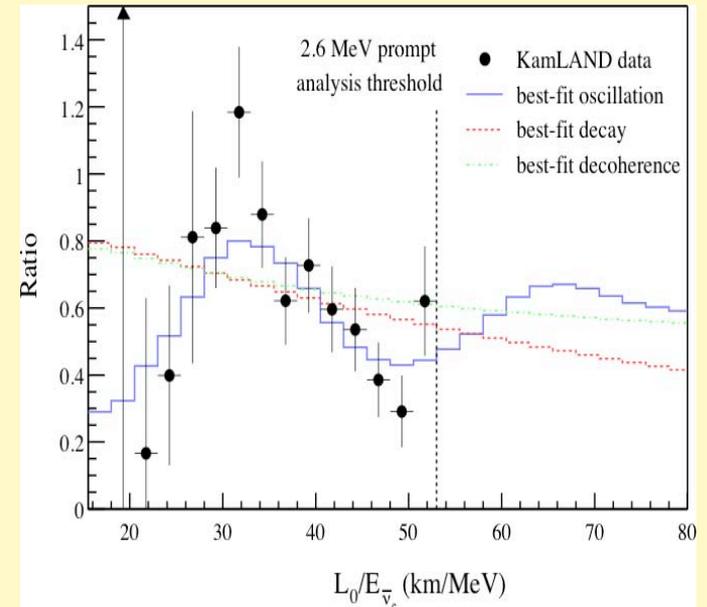
2002: annus mirabilis per la fisica dei neutrini solari

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.

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



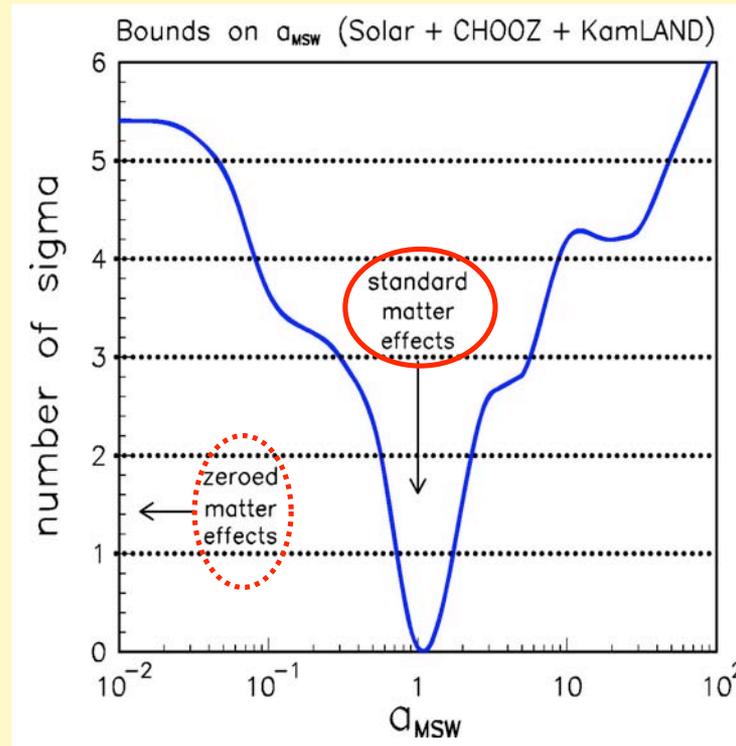
+ evidenza per un semiperiodo di oscillazione in KamLAND



**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 e controlliamo se $a_{MSW} \sim 1$



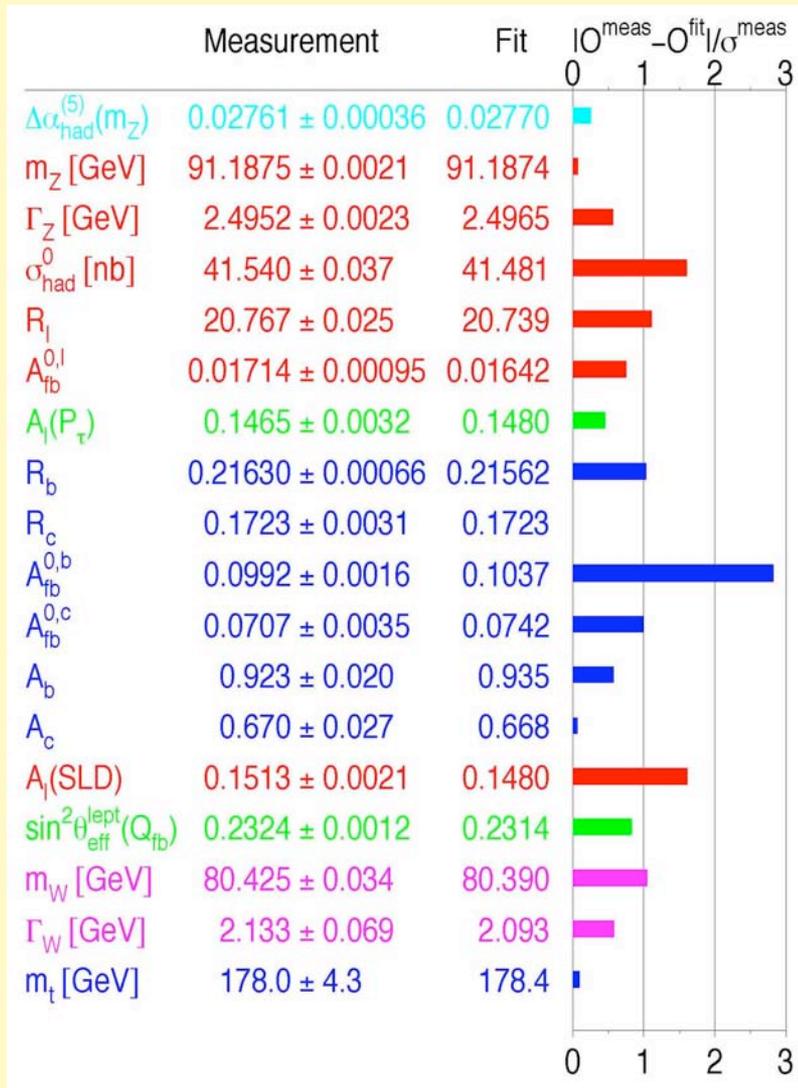
(... un modo di "misurare"
 G_F attraverso oscillazioni
 di neutrini solari ...)

Risultato: $a_{MSW} \sim 1$ confermato entro un fattore ~ 2 , mentre $a_{MSW} \sim 0$ escluso

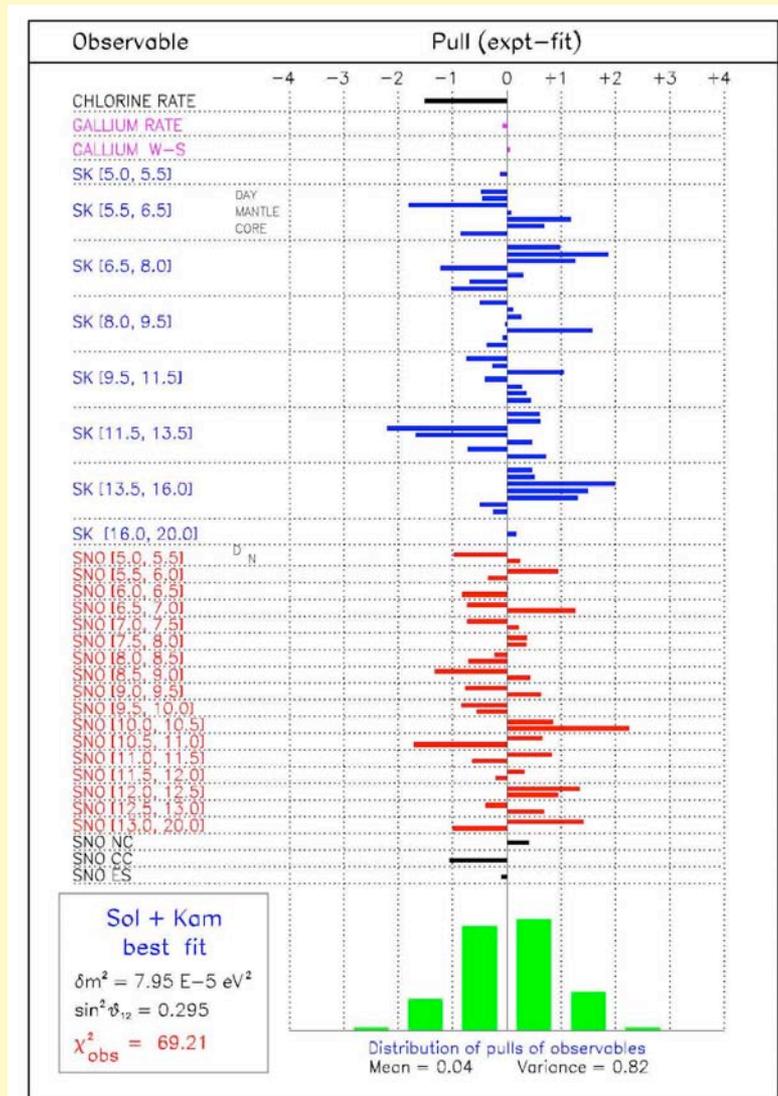
→ Evidenza per effetto MSW nella materia solare

Verso una fisica dei neutrini di precisione ...

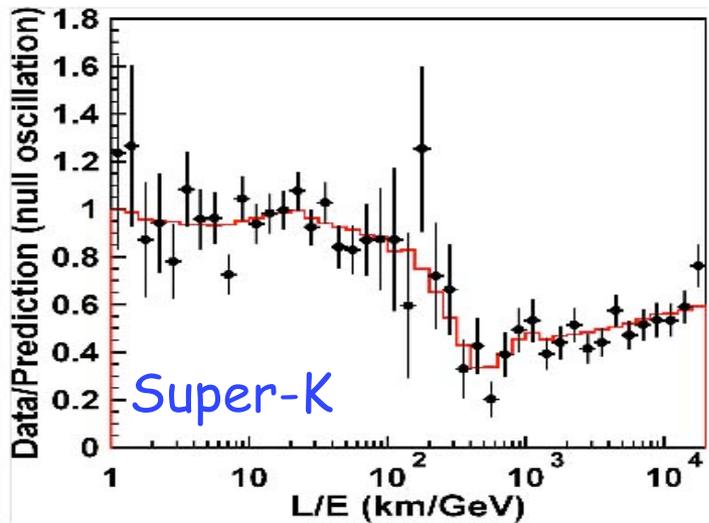
LEP EWWG analysis...



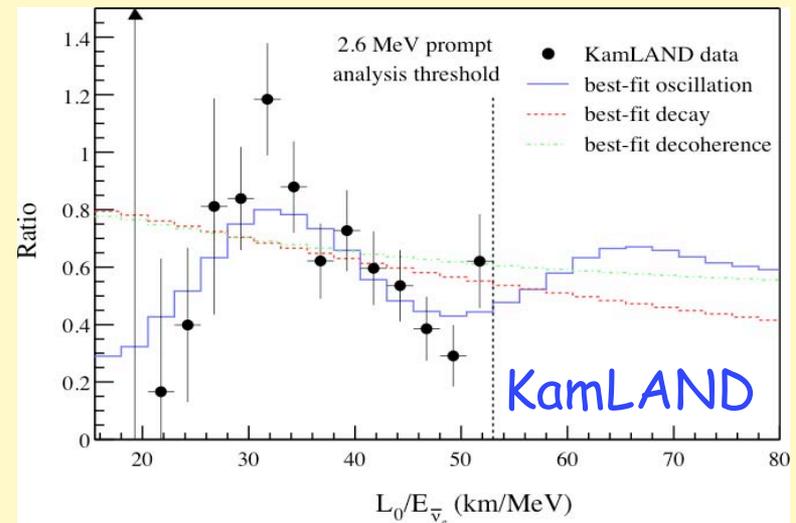
Solar neutrino analysis ...



Ricapitolando: i neutrini si mescolano ... e oscillano, con (almeno) due diverse frequenze. "Textbook" plots:



Δm^2 -driven oscillations
 ($\sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$)



δm^2 -driven oscillations
 ($\sim 8.0 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$)

Questi risultati implicano (almeno) 3 differenti masse di neutrini

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:

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

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

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

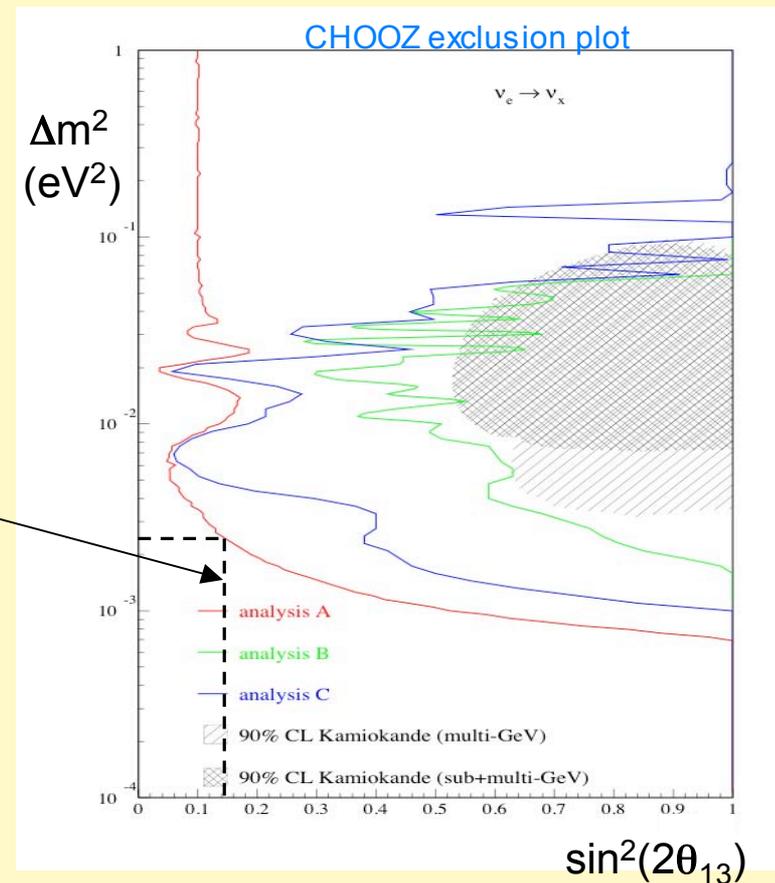
- Solo se $s_{13}^2 \neq 0$ si puo' sperare di scoprire una fase δ di violaz.CP)
("sacro graal" di futuri esperimenti di oscillazione, come le ν -factory)

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...

CHOOZ:

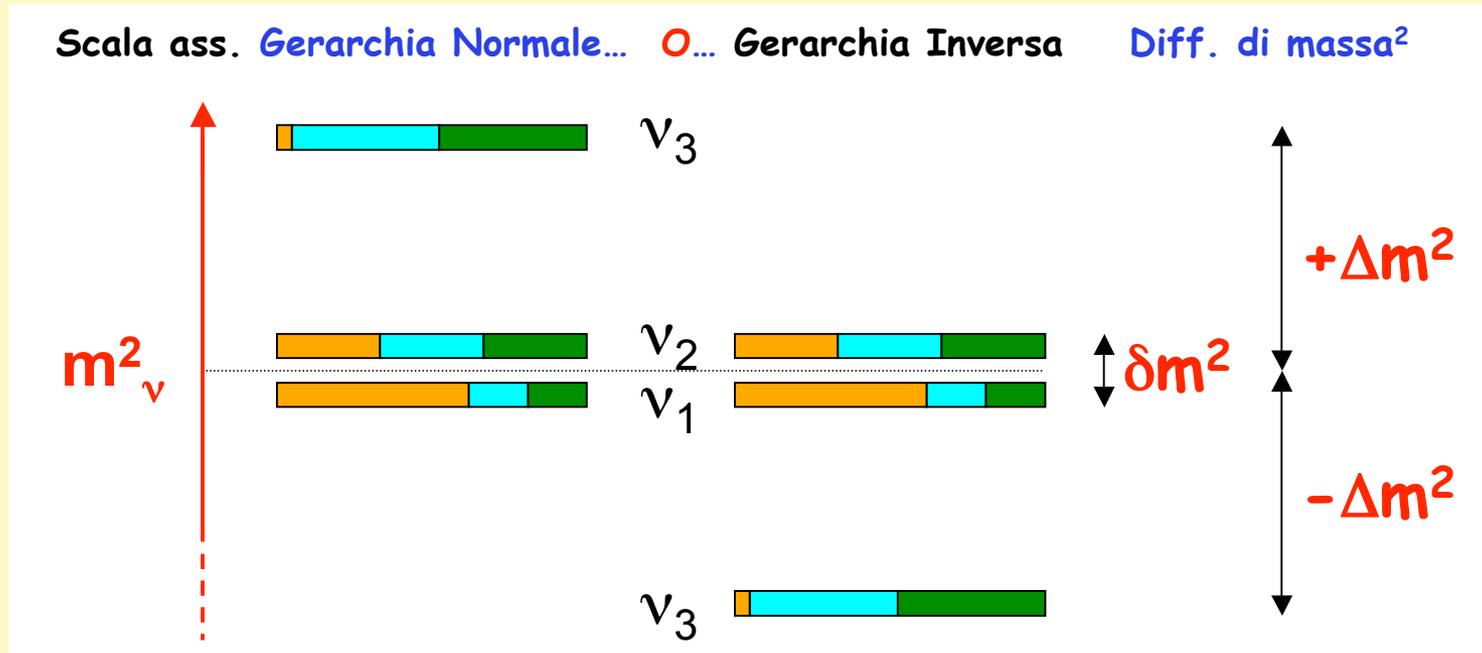
Per Δm^2 circa $2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$,
 pone limiti superiori su θ_{13}

(corroborati da dipendenza
 subdominante da θ_{13} in altri
 esperimenti)



Sommario 3ν , con una figura e una cifra significativa

...sufficiente per molti scopi! (sapori = e μ τ):



$$\delta m^2 \sim 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

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

$$m_\nu < O(1) \text{ eV}$$

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

$$\sin^2 \theta_{12} \sim 0.3$$

$$\sin^2 \theta_{23} \sim 0.5$$

$$\sin^2 \theta_{13} < \text{few}\%$$

δ (CP) unknown

Ulteriori cifre significative...

Stato dell'arte: Risultati dell'analisi globale di oscillazioni con neutrini solari, atmosferici, da acceleratore, reattore, aggiornati al 2007*, in termini di intervalli permessi a $\pm 2\sigma$ (=95% C.L.):

$$\delta m^2 = 7.92 (1 \pm 0.09) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m^2 = 2.6 (1_{-0.15}^{+0.14}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2 \theta_{12} = 0.314 (1_{-0.15}^{+0.18})$$

$$\sin^2 \theta_{23} = 0.45 (1_{-0.20}^{+0.35})$$

$$\sin^2 \theta_{13} < 3.1 \times 10^{-2} \quad (\text{only upper bound})$$

CP violating phase δ : unknown

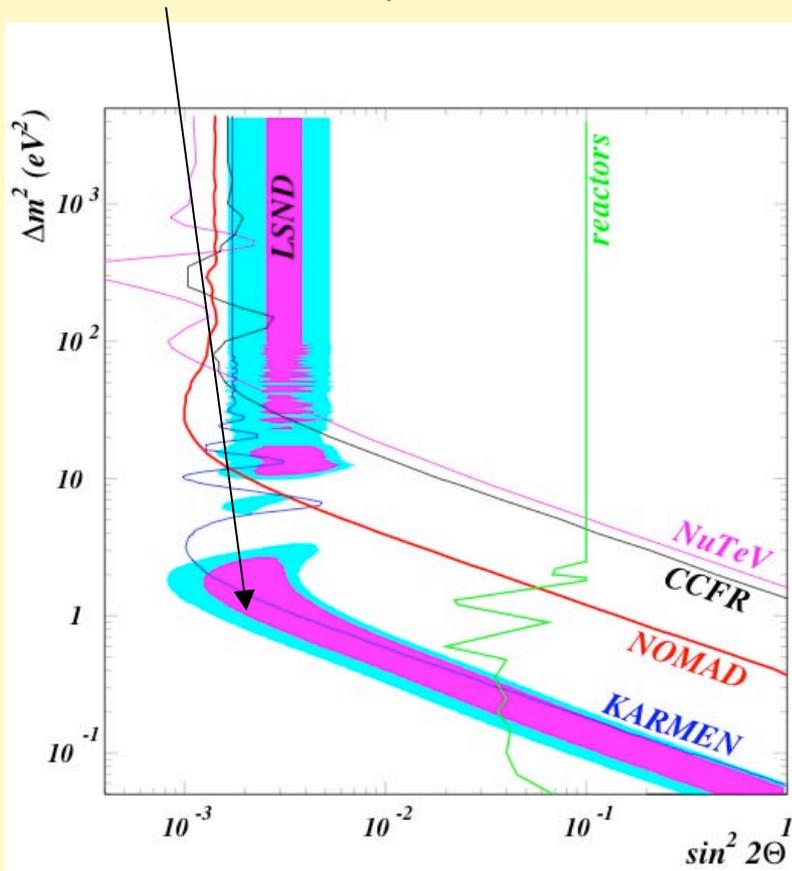
mass spectrum hierarchy : unknown

La determinazione di $\sin^2 \theta_{13} = |\langle \nu_e | \nu_3 \rangle|^2$ è forse il problema più urgente, con implicazioni per le determinazioni di CP e gerarchia.

*[hep-ph/0608060](https://arxiv.org/abstr/0608060), to appear in PRD (2007)

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

Abbiamo finora "nascosto" una osservazione incompatibile con 3ν :
 Il controverso segnale in LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector)
 $\Delta M^2 \sim O(eV^2)$ con piccolo mescolamento?



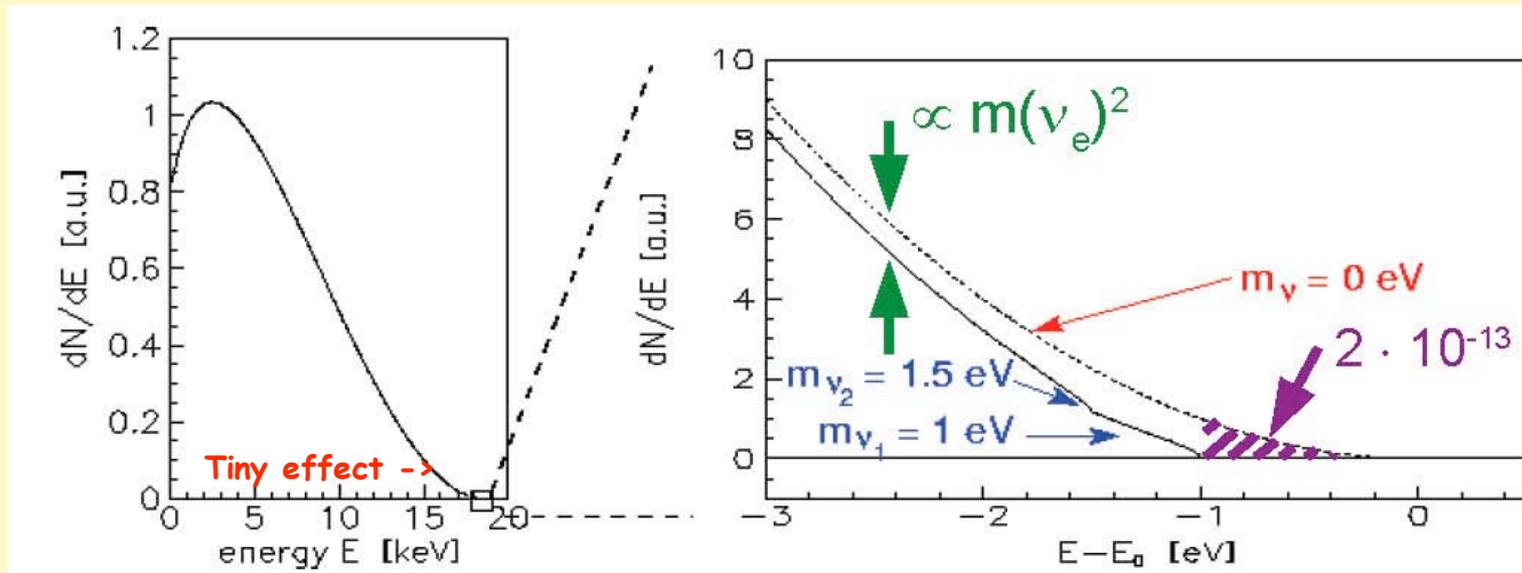
Le soluzioni inventate finora (nuovi neutrini "sterili", nuove interazioni o proprietà), oltre ad essere piuttosto "ad hoc", sono in scarso accordo con gli altri risultati acquisiti

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

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

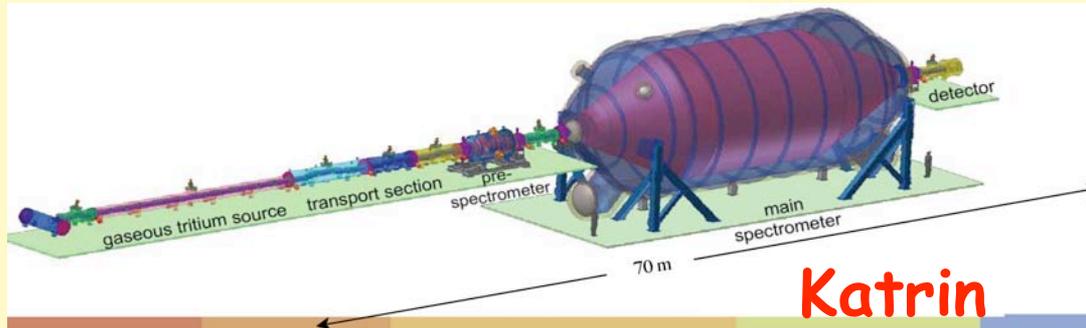
Masse assolute dei neutrini: 3 strumenti

(1) Decadimento beta ("classico" test cinematico):
Massima energia beta dipende dalla massa del neutrino



Evoluzione: da esperimenti "table top" ...

... ad enormi spettrometri magnetici



Con buona approssimazione, la parte finale dello spettro di decadimento beta è sensibile ad una combinazione di masse al quadrato (pesate dal contenuto di "sapore elettronico") detta "massa effettiva del neutrino elettronico" m_β :

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

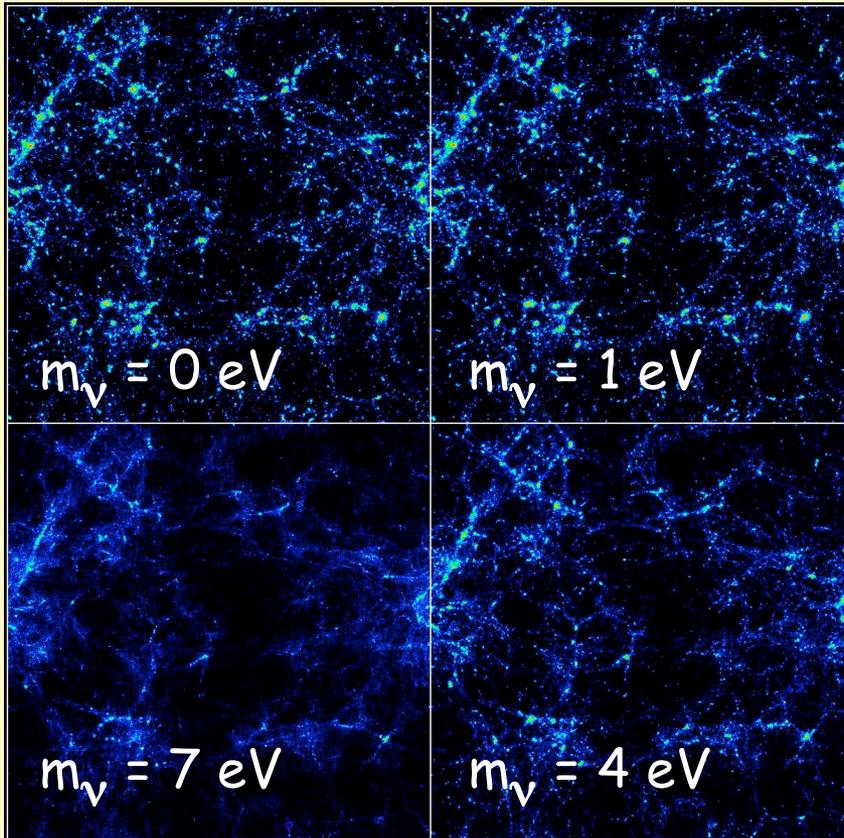
Limiti attuali (Mainz+Troitsk): $m_\beta < \sim 2 \text{ eV}$

N.B.: Essendo piccole le differenze di massa, ogni massa deve essere $< 2 \text{ eV}$ (e questa è l'unica vera certezza attuale sulle masse assolute dei neutrini)

Sensibilità futura (Katrin): $m_\beta \sim 0.3 \text{ eV}$

Masse assolute dei neutrini: 3 strumenti

(2) Cosmologia di precisione (uno strumento "moderno") :



Neutrini relitti: relativistici al disaccoppiamento ($T_D > m$) sono ora nonrelativistici ($T_0 < m$). A seconda della loro massa, essi influenzano la distribuzione delle disomogeneità (strutture a larga scala, LSS) nell'universo.

Dati LSS + CMB di precisione sono essenzialmente sensibili a:

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

Cosmologia: Limiti sulla somma delle masse dei neutrini da diversi insiemi di dati (assumendo il "modello piatto Λ CDM):

TABLE II: Input cosmological data sets for seven representative cases considered in this work, together with their 2σ (95% C.L.) constraints on the sum of neutrino masses Σ .

Case	Cosmological data set	Σ bound (2σ)
1	WMAP	< 2.3 eV
2	WMAP + SDSS	< 1.2 eV
3	WMAP + SDSS + SN _{Riess} + HST + BBN	< 0.78 eV
4	CMB + LSS + SN _{Astier}	< 0.75 eV
5	CMB + LSS + SN _{Astier} + BAO	< 0.58 eV
6	CMB + LSS + SN _{Astier} + Ly- α	< 0.21 eV
7	CMB + LSS + SN _{Astier} + BAO + Ly- α	< 0.17 eV

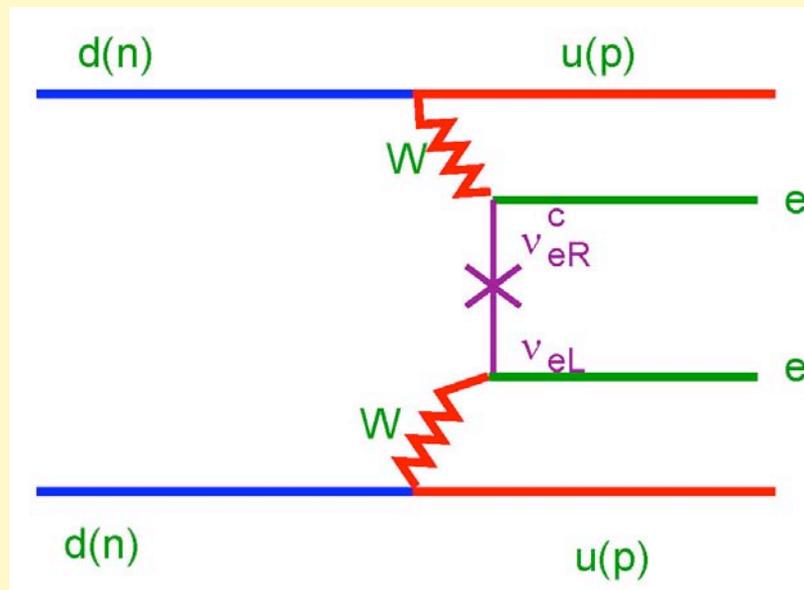
Caso 1: "prudente" (assume solo dati da WMAP 3y)

Caso 7: "aggressivo" (assume tutti i dati disponibili)

Limiti superiori: vanno da ~ 2 a ~ 0.2 eV (95% C.L.), ma non esiste ancora un "limite condiviso" in questo campo.

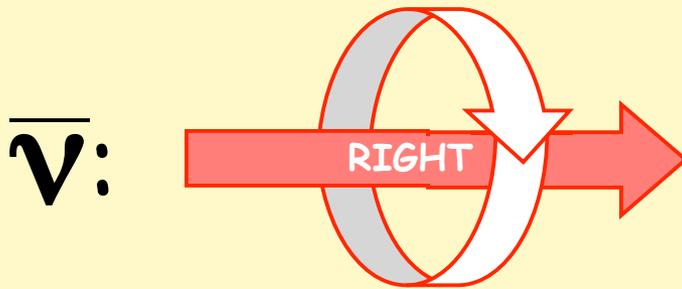
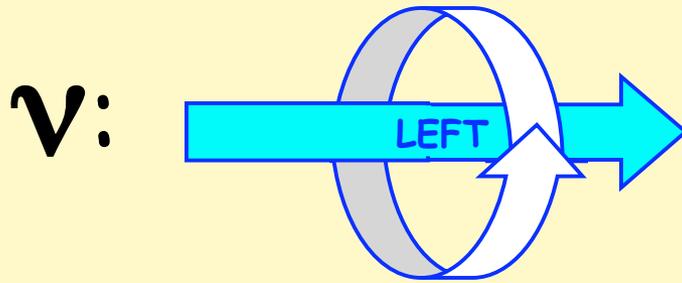
Masse assolute dei neutrini: 3 strumenti

(3) Doppio decadimento beta senza neutrini: $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e$



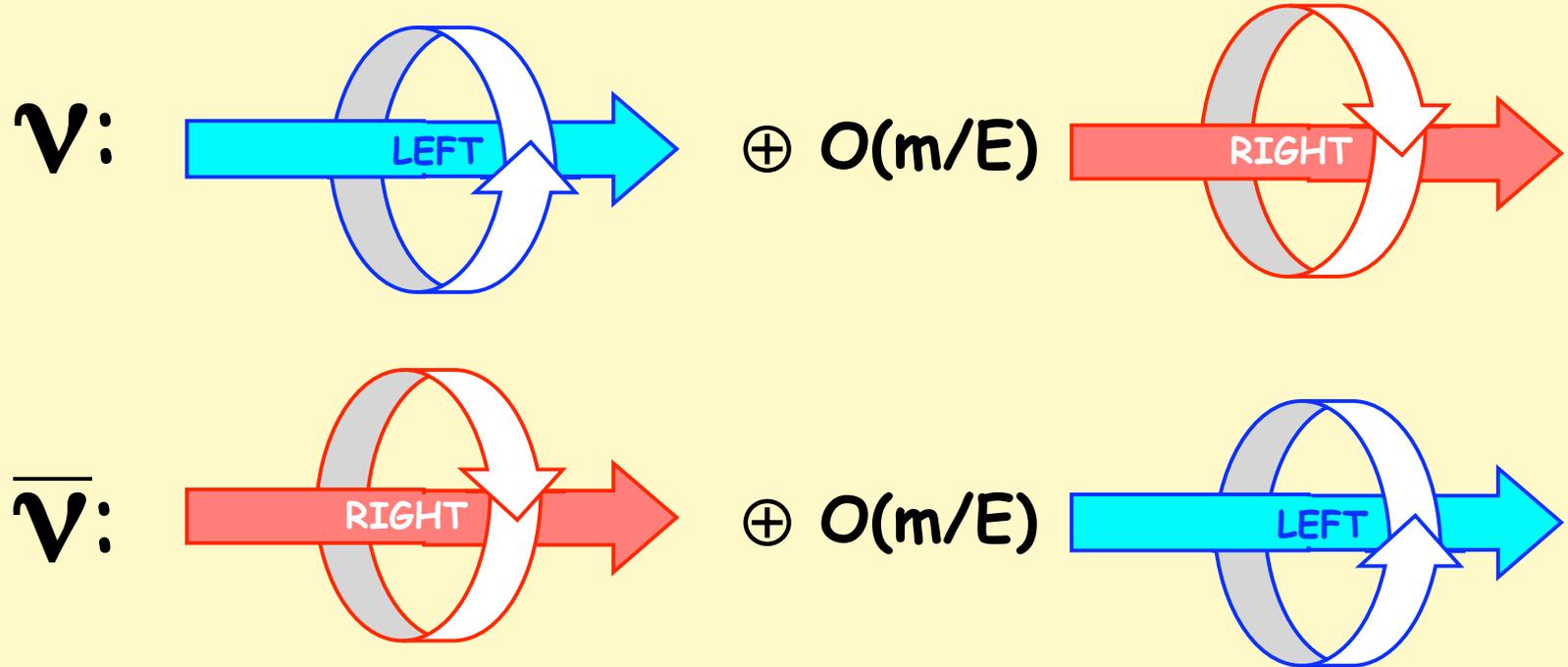
Può aver luogo solo con un neutrino massivo e identico al suo antineutrino (neutrino "di Majorana"). Rappresentazione intuitiva:

Neutrini a massa nulla hanno elicità ben definita



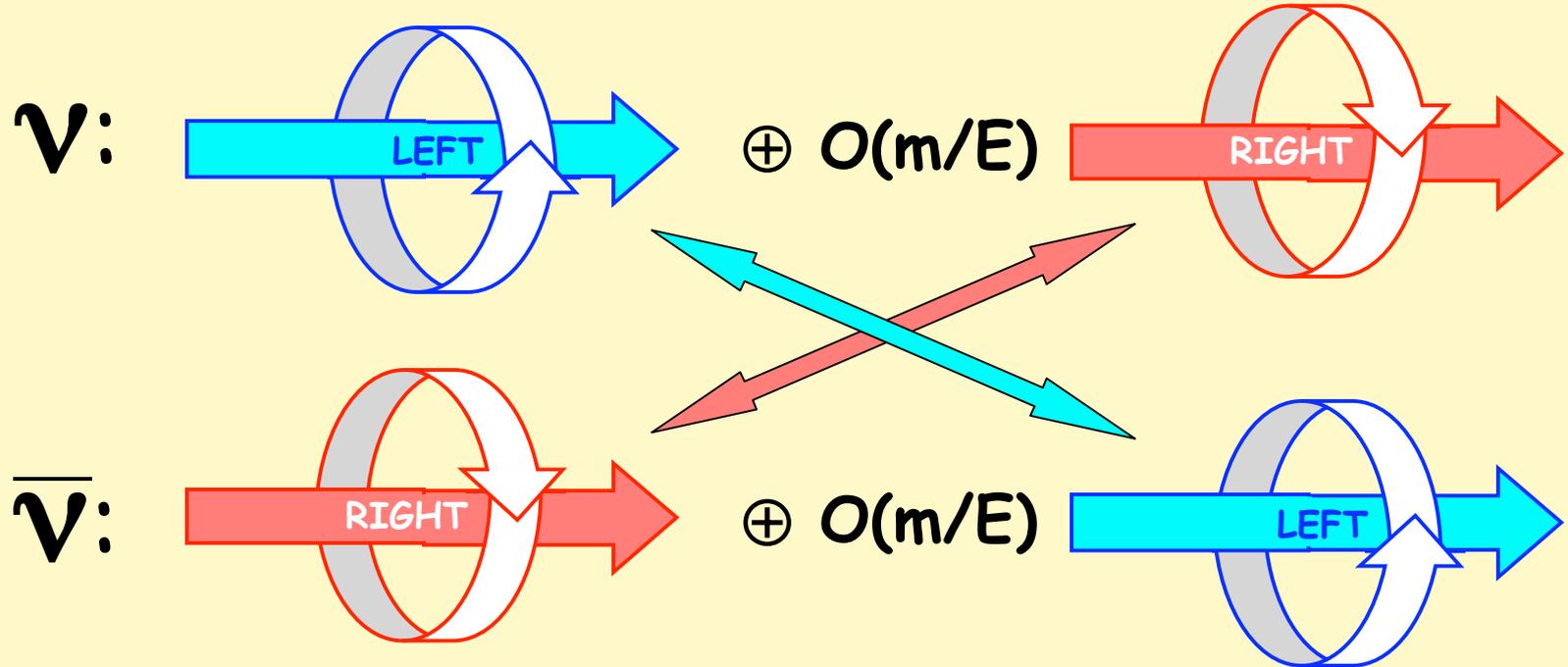
2 d.o.f. indipendenti: Bi-spinori a massa nulla (Weyl)

Per massa non nulla, può svilupparsi l'elicità opposta :



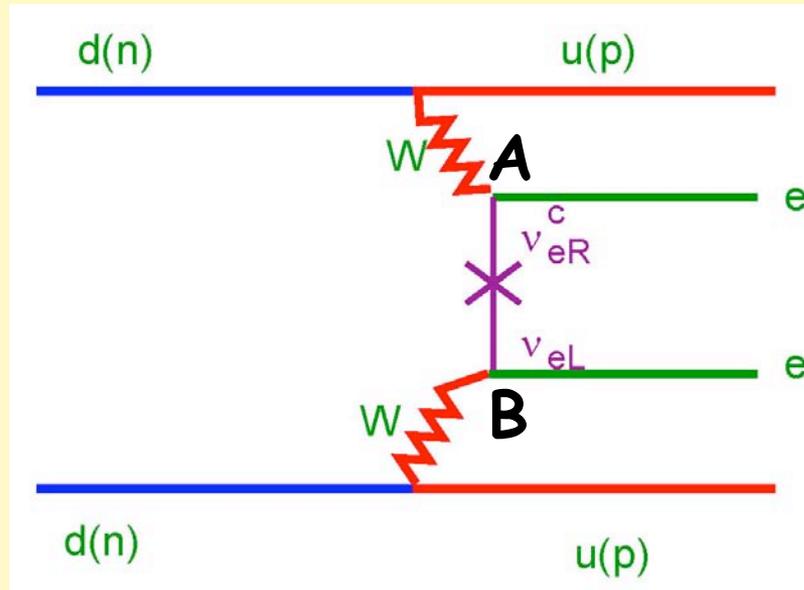
Se 4 d.o.f. indipendenti: Quadri-spinori massivi (Dirac)

Ma per fermioni neutri, 2 componenti potrebbero identificarsi !



In questo caso, nessuna differenza fra neutrini e antineutrini (a meno di una fase): **Quadri-spinori massivi di Majorana con 2 soli d.o.f. indipendenti.**

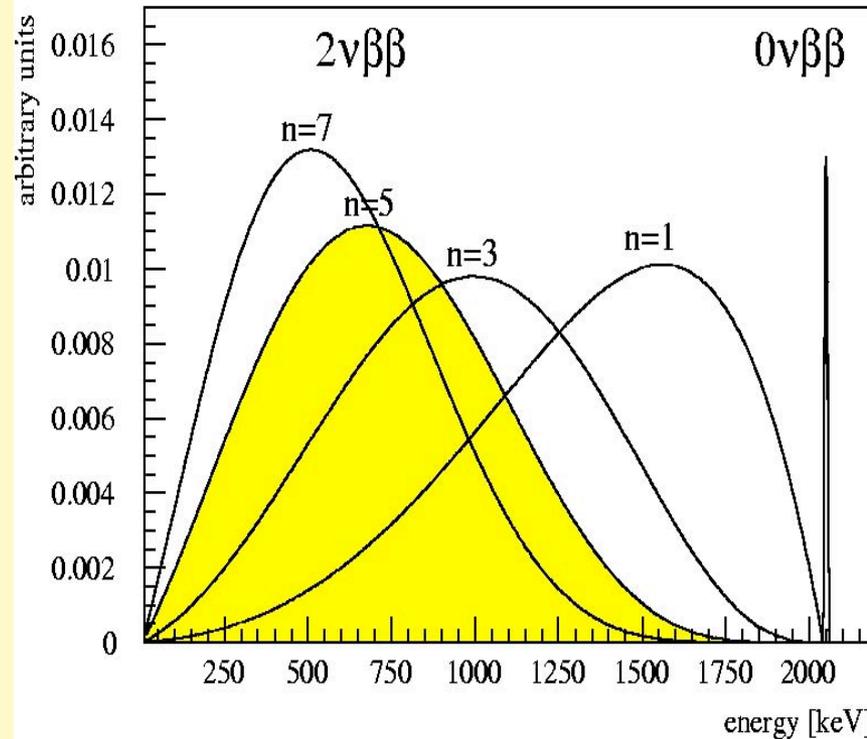
Torniamo al decadimento $0\nu 2\beta$. Intuitivamente:



- 1) Un antineutrino RH è emesso in "A" assieme ad un elettrone
- 2) Se è massivo, sviluppa una componente LH di $O(m/E)$ (impossibile se di Weyl)
- 3) Se $\nu = \text{antinu}$, tale componente è un neutrino LH (impossibile se di Dirac)
- 4) Il neutrino LH (di Majorana) è assorbito in "B" dove un altro elettrone è emesso

N.B.: Il processo - se esiste - è molto raro, essendo doppiamente debole ed anche soppresso dalle piccole masse dei neutrini.

Decadimento $0\nu 2\beta$ - osservabile:

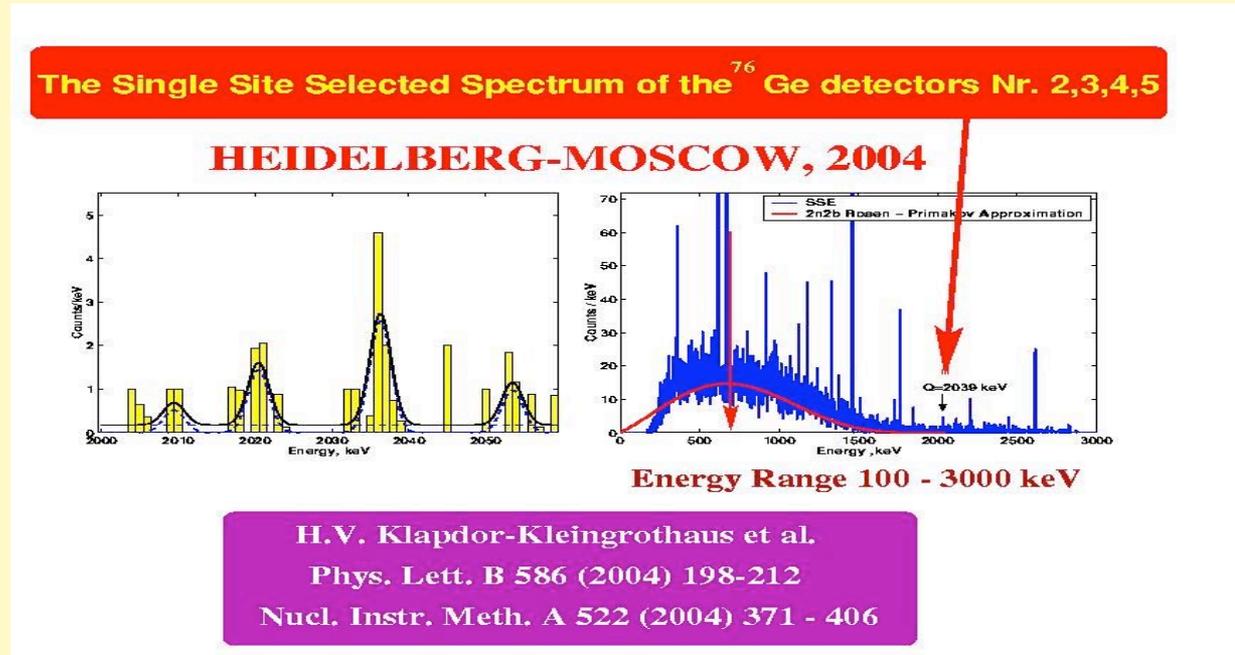


Sensibile alla "massa effettiva di Majorana" (e fasi relative):

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

[Combinazione lineare di tre canali neutrinici con ampiezze complesse]

$0\nu 2\beta$ status: Nessun segnale osservato, eccetto nell'esperimento Heidelberg-Moscow, in cui parte della collaborazione reclama un segnale a 6σ . Risultato vivacemente dibattuto nel settore.



Se vero, allora (a 95% C.L.): $\log_{10}(m_{\beta\beta}/\text{eV}) = -0.23 \pm 0.14$

Ma: Difficile da riconciliare con i più stringenti limiti cosmologici

Cosmo-dati "prudenti":

P.es., restringiamo i dati al solo WMAP, ma accettiamo il segnale $0\nu 2\beta$

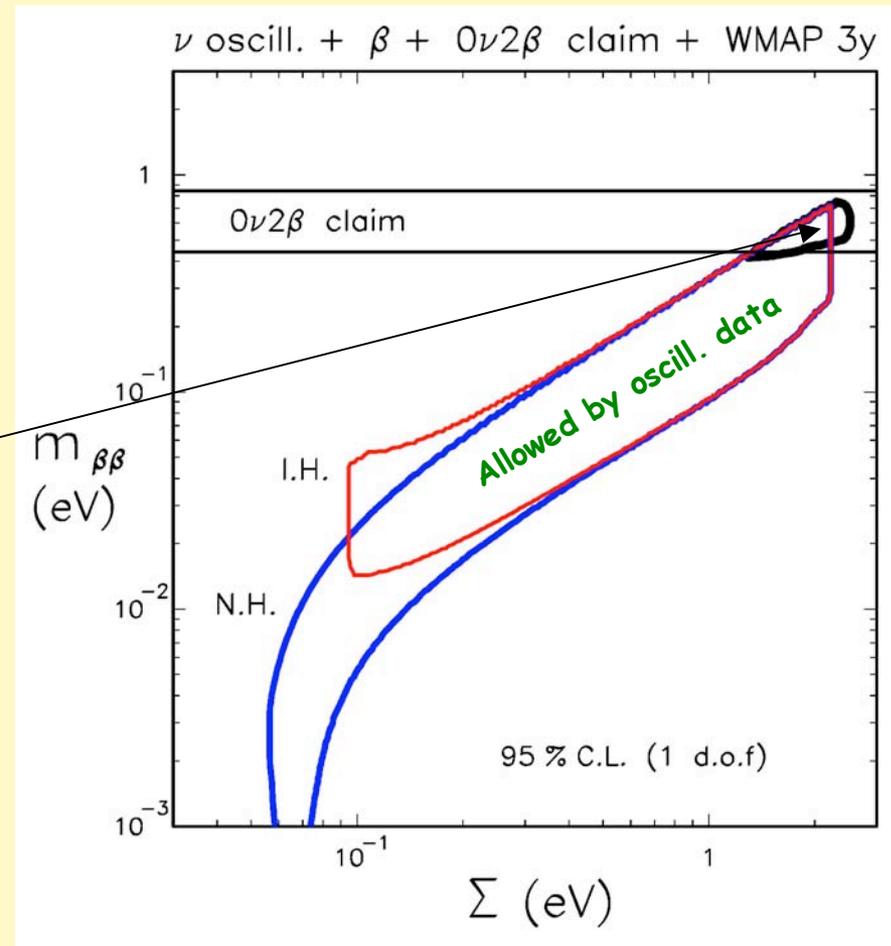
Allora, una combinazione globale è ammessa (a forma di "cuneo" nella parte superiore della fig.)

Implicazioni (a 95% C.L.):

$$\Sigma \approx 1.8 \pm 0.6 \text{ eV}$$

$$m_{\beta\beta} \approx 0.6 \pm 0.2 \text{ eV}$$

$$m_{\beta} \approx 0.6 \pm 0.2 \text{ eV}$$



Spettro degenerare, con $m \approx 0.6 \pm 0.2 \text{ eV}$ (2σ) per ogni neutrino

Cosmo-dati "aggressivi"
(tutti i dati insieme)

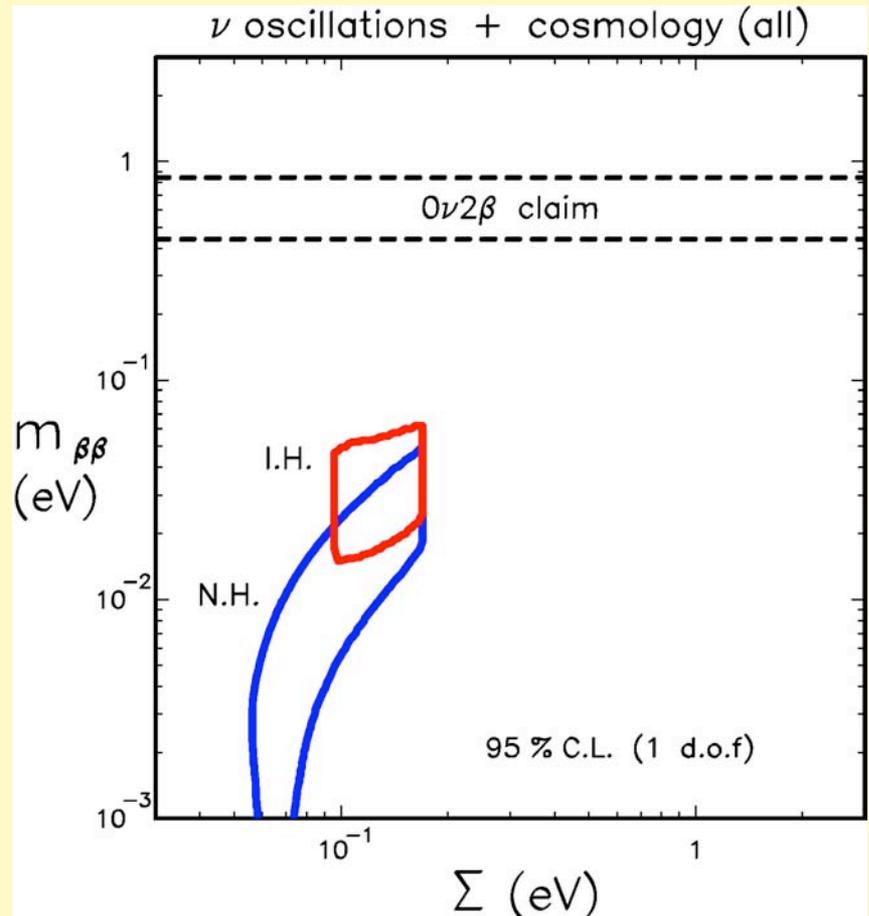
In questo caso, una combinazione globale con il "claim" del segnale doppio beta non è possibile

Implicazioni (al 95% C.L.):

$$\Sigma < 0.17 \text{ eV}$$

$$m_{\beta\beta} < 0.06 \text{ eV}$$

$$m_{\beta} < 0.06 \text{ eV}$$



Masse assolute piccole (purtroppo), specie in gerarchia normale

La situazione relativa alle masse assolute non è affatto chiara, sebbene i valori siano probabilmente nel range sub-eV. Ulteriori ricerche sono necessarie.

Ignorando il claim $0\nu 2\beta$, assumendo che la somma delle masse sia <0.4 eV, e osservando che i limiti inferiori alle masse sono dati da zero e dalle radici quadrate delle differenze di masse quadre, si ottengono gli intervalli "tentativi" mostrati nella edizione 2006 del poster del modello standard su "ParticleAdventure.org":

FERMIONS				matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...		
Leptons spin = 1/2				Quarks spin = 1/2		
Flavor		Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
 ν_L lightest neutrino*		$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron		0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
 ν_M middle neutrino*		$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon		0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
 ν_H heaviest neutrino*		$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau		1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e lightest neutrino*	$(0-0.13) \times 10^{-9}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ middle neutrino*	$(0.009-0.13) \times 10^{-9}$	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ heaviest neutrino*	$(0.04-0.14) \times 10^{-9}$	0
τ tau	1.777	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	-1/3

*See the neutrino paragraph below.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s = 1.05×10^{-34} J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. Masses are given in GeV/c² (remember $E = mc^2$) where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10}$ joule. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

Neutrinos

Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states ν_e , ν_μ , or ν_τ , labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite mass neutrinos ν_1 , ν_2 , and ν_3 for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

Matter and Antimatter

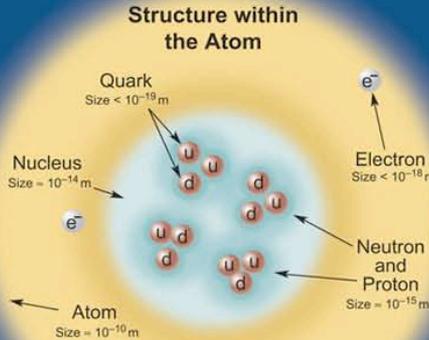
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$ but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Blue-green shaded areas represent the cloud of gluons.

A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β (beta) decay.

An electron and positron (antilepton) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and B^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41} 10^{-41}	0.8 10^{-4}	1 1	25 60

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.39	-1
W^+	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge

Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

Quarks and gluons cannot be isolated - they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs. The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge.

Two types of hadrons have been observed in nature mesons $q\bar{q}$ and baryons qqq . Among the many types of baryons observed are the proton (uud), antiproton ($\bar{u}\bar{d}\bar{d}$), neutron (udd), lambda Λ (uds), and omega Ω^- (sss). Quark charges add in such a way as to make the proton have charge 1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion π^+ (u \bar{d}), kaon K^- (s \bar{u}), B^0 (d \bar{s}), and η_c (c \bar{c}). Their charges are +1, -1, 0, 0 respectively.

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at

ParticleAdventure.org

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory

©2008 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. For more information see

CPEPweb.org

Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, mini-black holes, and/or evidence of string theory.

Universe Accelerating?

The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

Why No Antimatter?

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

Dark Matter?

Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

Origin of Mass?

In the Standard Model, for fundamental particles to have masses, there must exist a particle called the Higgs boson. Will it be discovered soon? Is supersymmetry theory correct in predicting more than one type of Higgs?

Conclusioni

Grandi
progressi
in anni
recenti ...

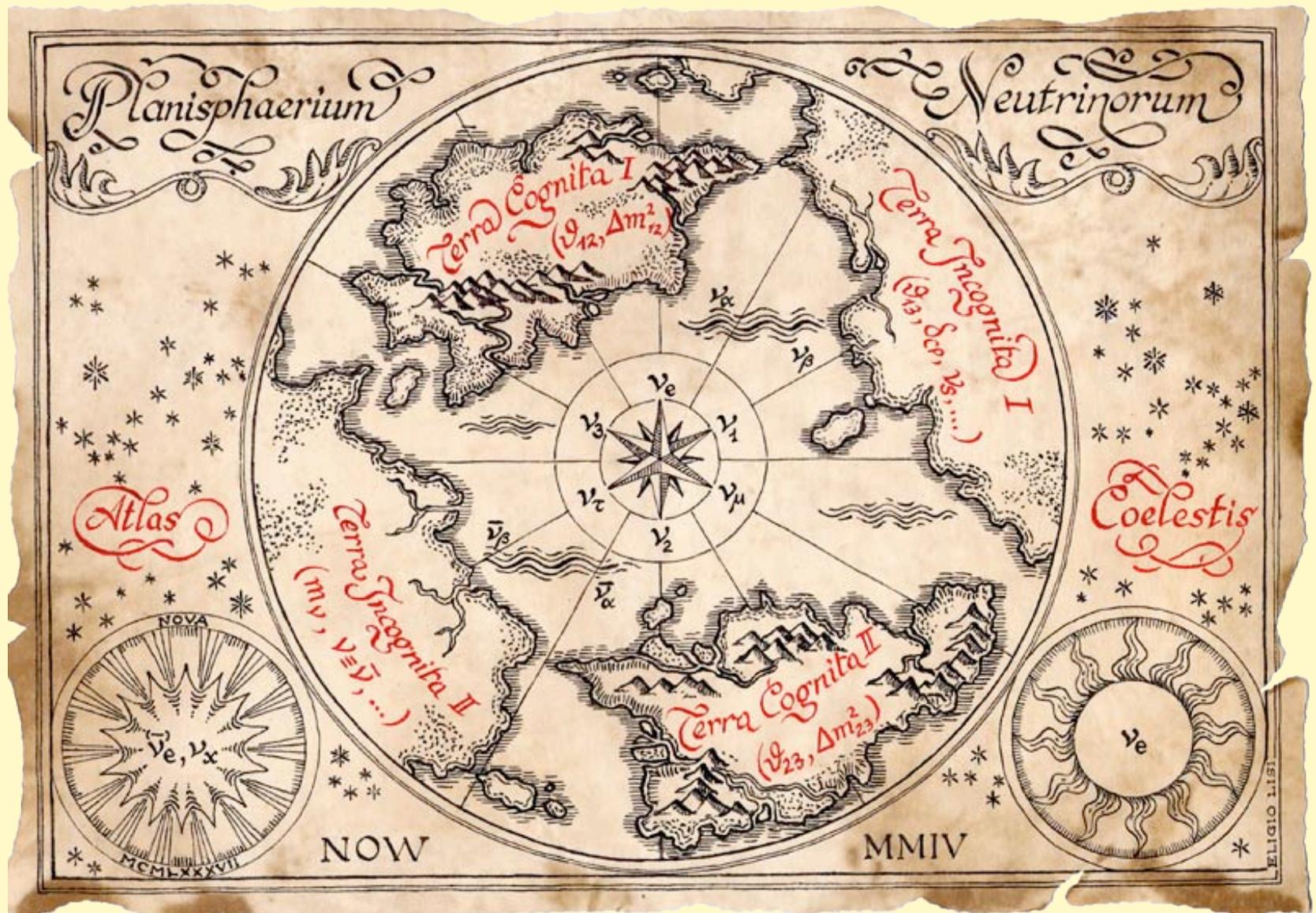
Masse e mescolamenti non nulli dei neutrini
Determinazione di $(\delta m^2, \theta_{12})$ e $(\Delta m^2, \theta_{23})$
Limiti superiori su θ_{13}
Distorsioni spettrali indotte da oscillazioni
Evidenza diretta per oscillazioni di ν solari
Evidenza per effetto MSW nel Sole
Limiti superiori su m_ν di ordine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

.....

Determinazione di θ_{13}
Violazione di CP leptonica
Masse assolute da β -decay e cosmologia
Neutrini di Majorana e $0\nu 2\beta$
Gerarchia normale vs inversa
Test del segnale di LSND
Oltre lo scenario standard a 3ν
Piu' profonda comprensione teorica

.....

... e grandi
sfide
per il
futuro



Poster of the Neutrino Oscillation Workshop 2004 (NOW 2004, Otranto, Italy)