

Bari, IFAE 2009

17 Aprile 2009

La fisica del neutrino

Eligio Lisi
INFN, Sezione di Bari

La fisica del neutrino è un esercizio di pazienza...
Tre domande poste nel secolo scorso:

1. Quanto è piccola la massa del neutrino ?

(Pauli, Fermi, anni '30)

2. Può un neutrino trasformarsi nella sua antiparticella?

(Majorana, anni '30)

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

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

Alla terza si è risposto solo in anni recenti, e si lavora ancora sodo per rispondere alle prime due (con un significativo contributo dell'INFN)

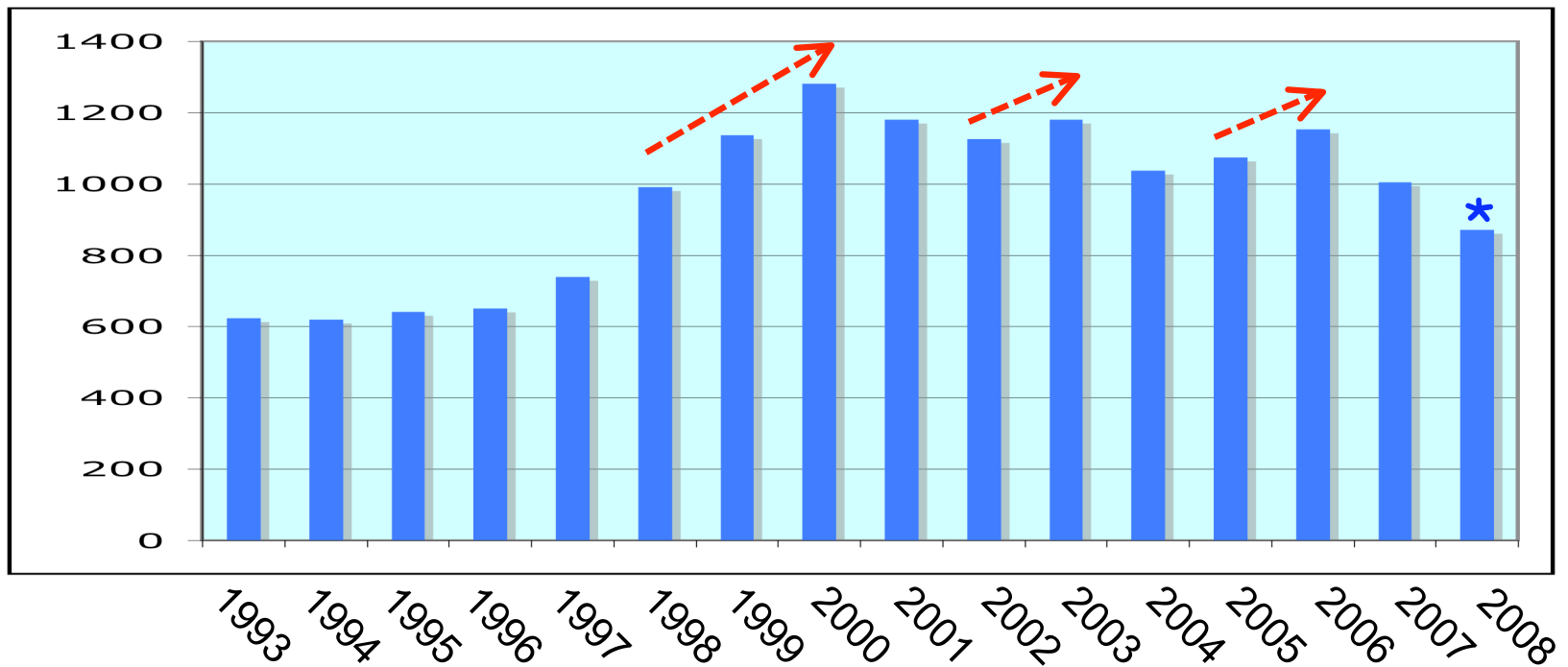
La scoperta delle oscillazioni ha innalzato il livello di interesse, con $\sim 10^3$ articoli/anno sui neutrini (SPIRES)

Picchi di interesse:

Oscillazioni ν atmosferici,
Limite di CHOOZ

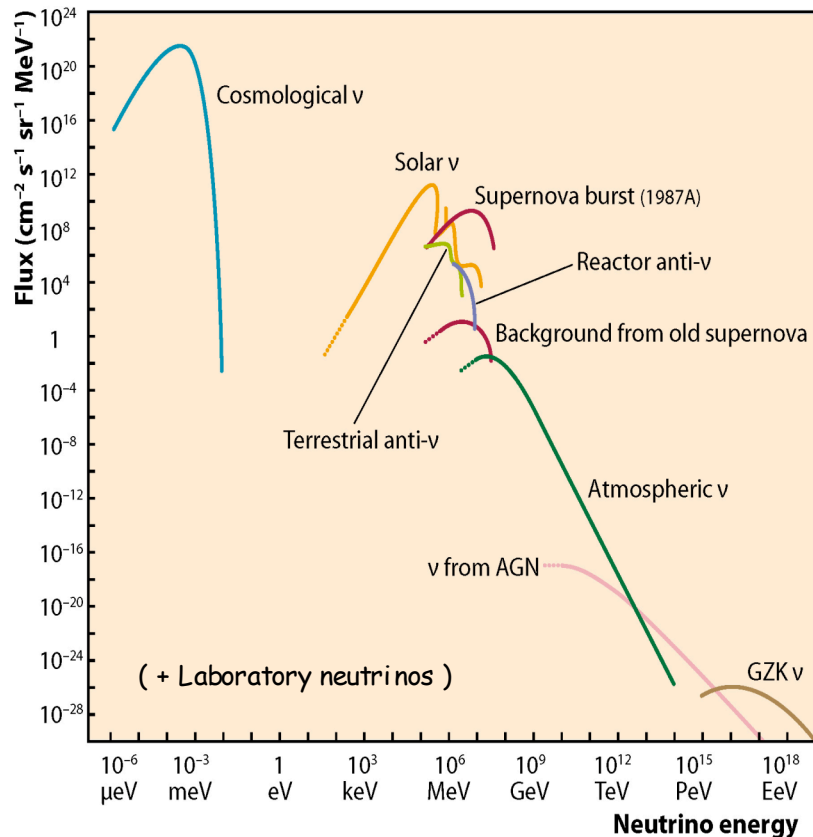
Oscillazioni ν solari & reattori,
Nobel 2002 a Davis & Koshiba

Oscillazioni ν da acceleratori,
limiti cosmologici su masse assolute



* L'apparente flessione del 2008 non è un segno di declino (SPIRES satura solo dopo >1 anno)

Importanti traguardi sono stati raggiunti, ma lo spettro è vasto, e molti sono gli aspetti ancora da esplorare.



A synoptic view of neutrino fluxes. (from ASPERA roadmap)

Probabili/possibili “picchi di interesse” nel futuro:

- Apparizione di sapore ($\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$, $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$)
- **Mescolamento fra famiglie 1-3**
- Gerarchia delle masse
- **Masse assolute**
- Natura spinoriale (Majorana/Dirac)
- **Violazione di CP leptonica**
- Sorgenti astrofisiche/cosmiche
- **Possibili nuovi stati/interazioni**
- “Illuminazioni” teoriche
- ...

Importante traguardo: mescolamento fra 3ν

3 autostati di massa e sapore: $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)^T = U (\nu_1, \nu_2, \nu_3)^T$

Matrice U_{PMNS} unitaria: 3 angoli di rotazione di Eulero + 1 fase CP

Convenzionalmente (e utile), rotazioni nello stesso ordine di U_{CKM} :

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

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

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

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

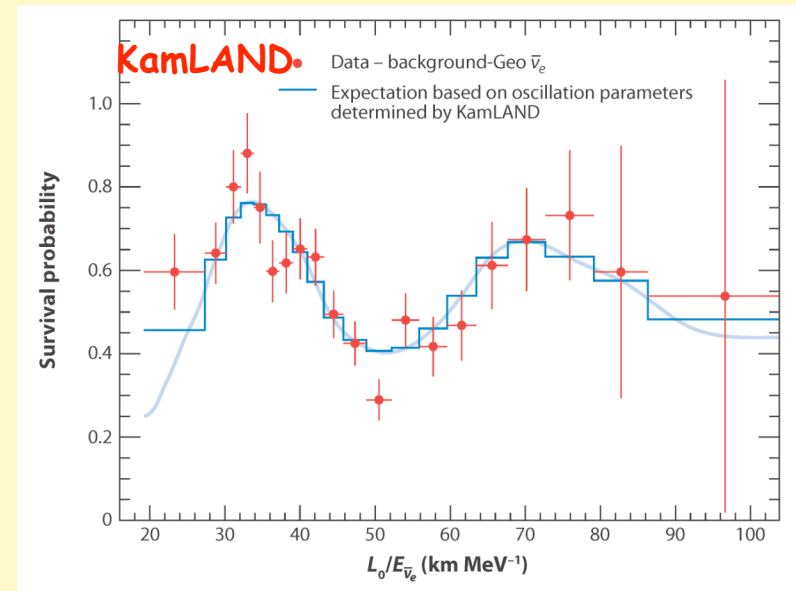
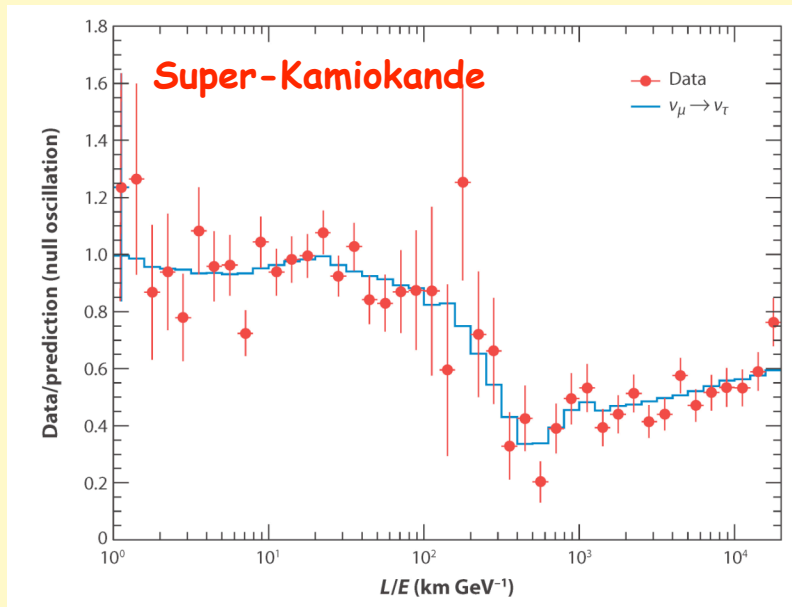
Misurato da esperimenti
con ν atmosferici
e da acceleratore

Vincolato principalmente
da esperimenti ai reattori
(CHOOZ, PaloVerde)

Misurato da
esperimenti con ν
Solari & KamLAND

Due frequenze di oscillazione indipendenti:

Fase nel "vuoto" $\sim (m_i^2 - m_j^2) \text{Lunghezza} / \text{Energia}$



$$\Delta m^2 = m_3^2 - m_1^2 \quad \gg$$

(ν atmosferici, da acceleratori a base lunga, da reattori a base corta)

$$\delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$

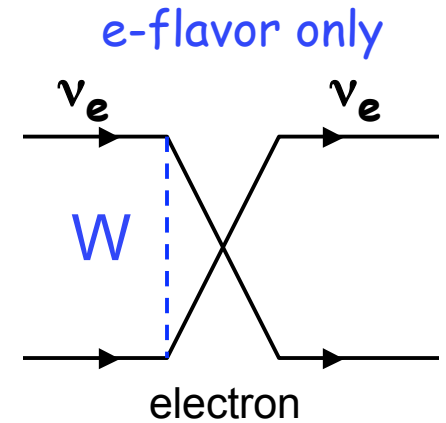
(ν da reattori a base lunga, ν solari con correzioni)

Neutrini solari (elettronici):

Ulteriore contributo alla fase (effetto MSW):

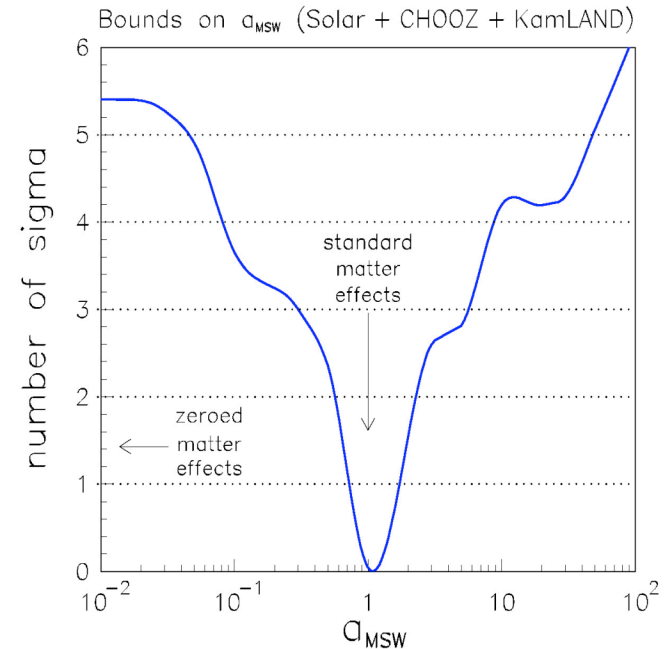
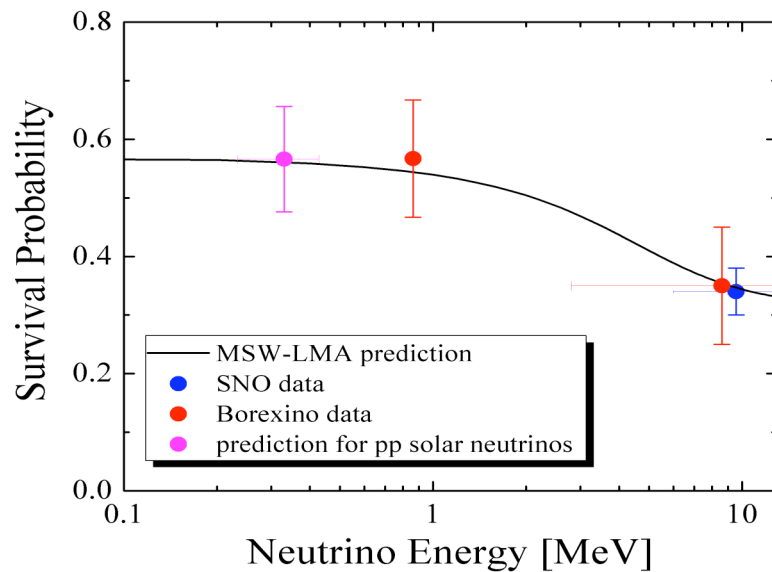
$\sim G_F \times$ Densità elettronica solare

(il tutto, mediato su molti cicli di oscillazione)



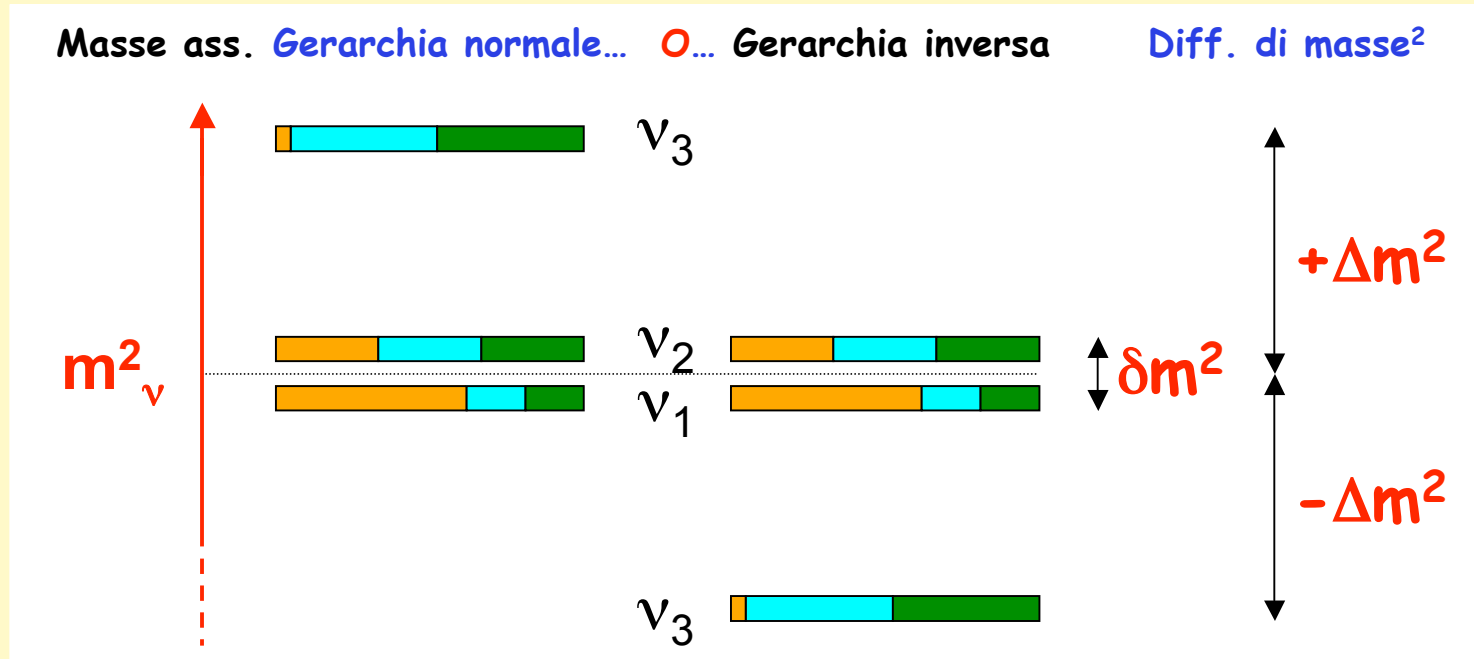
Effetto visto direttamente in **Borexino**...

...in accordo con precedenti evidenze



Risposta alla domanda di Pontecorvo con una sola cifra significativa:

(Utile per avere un'idea d'insieme. Sapori = $e \mu \tau$)



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

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

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

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

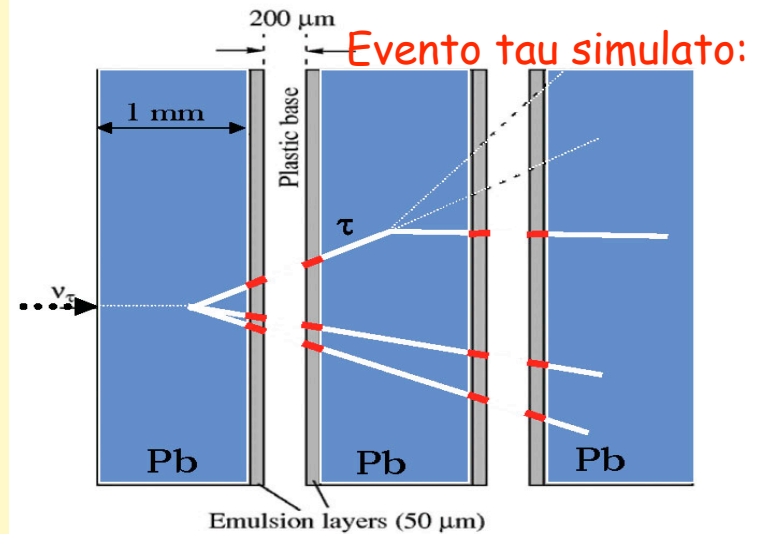
Ulteriori cifre significative ("fisica di precisione"):

opportune in sé (si tratta di parametri fondamentali)
e necessarie per ragioni sia sperimentali che teoriche.

Un esempio sperimentale: accuratezza di Δm^2 per CNGS



Un vero evento di tau potrebbe già celarsi nella statistica raccolta finora da OPERA...



Fascio CNGS di energia relativamente alta; compromesso fra necessità di produrre leptoni tau (ad alta E), senza sopprimere troppo oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (fase L/E) -> Tasso atteso di produzione di tau dipende da $(\Delta m^2)^2$.

Attualmente: errore da Δm^2 inferiore a quello della statistica prevista

Un esempio teorico: accuratezza di θ_{ij} per i modelli

Gli angoli di mescolamento sembrano avere valori "speciali":

$$\sin^2\theta_{23} \approx 1/2$$

$$\sin^2\theta_{12} \approx 1/3$$

"mescolamento tri-bimassimale"

$$\sin^2\theta_{13} \approx 0$$

Un segno di simmetrie discrete nel settore dei neutrini?

$$\theta_{12} + \theta_c \approx \pi/4$$

"complementarietà quark-leptoni"

Un possibile legame fra mescolamenti di neutrini e quark?

Diagnostica dei modelli: dipendente da quel " \approx "

Parametri di oscillazione: stato dell'arte

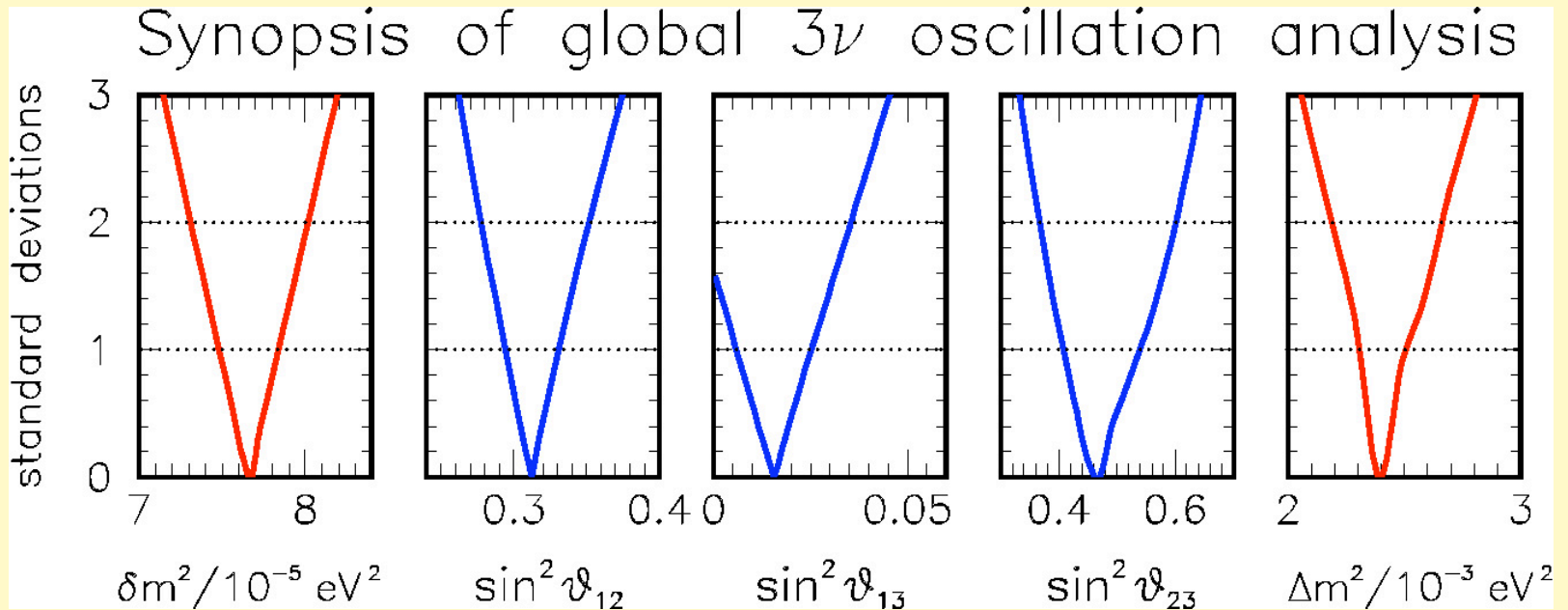


TABLE I: Global 3ν oscillation analysis (2008): best-fit values and allowed n_σ ranges for the mass-mixing parameters.

Parameter	$\delta m^2/10^{-5} \text{ eV}^2$	$\sin^2 \theta_{12}$	$\sin^2 \theta_{13}$	$\sin^2 \theta_{23}$	$\Delta m^2/10^{-3} \text{ eV}^2$
Best fit	7.67	0.312	0.016	0.466	2.39
1σ range	7.48 – 7.83	0.294 – 0.331	0.006 – 0.026	0.408 – 0.539	2.31 – 2.50
2σ range	7.31 – 8.01	0.278 – 0.352	< 0.036	0.366 – 0.602	2.19 – 2.66
3σ range	7.14 – 8.19	0.263 – 0.375	< 0.046	0.331 – 0.644	2.06 – 2.81

Parametri di oscillazione: stato dell'arte, settore (1,2)

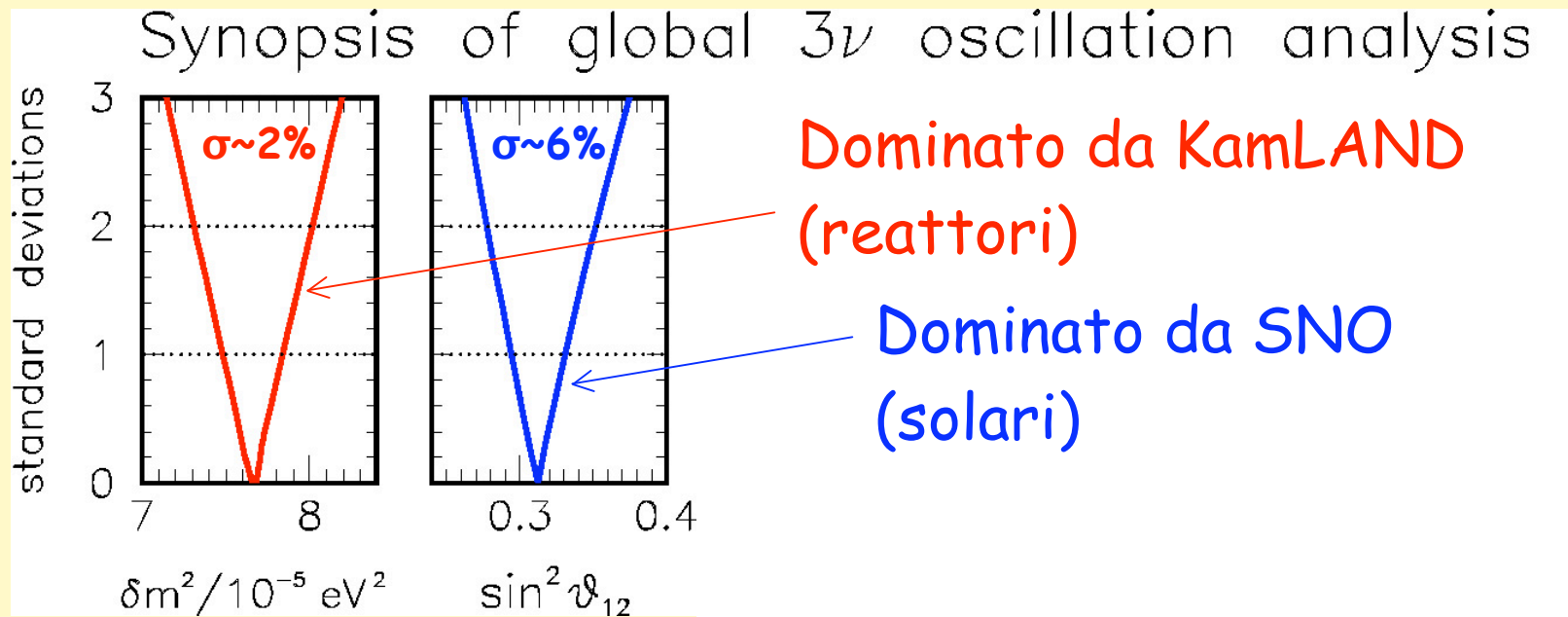


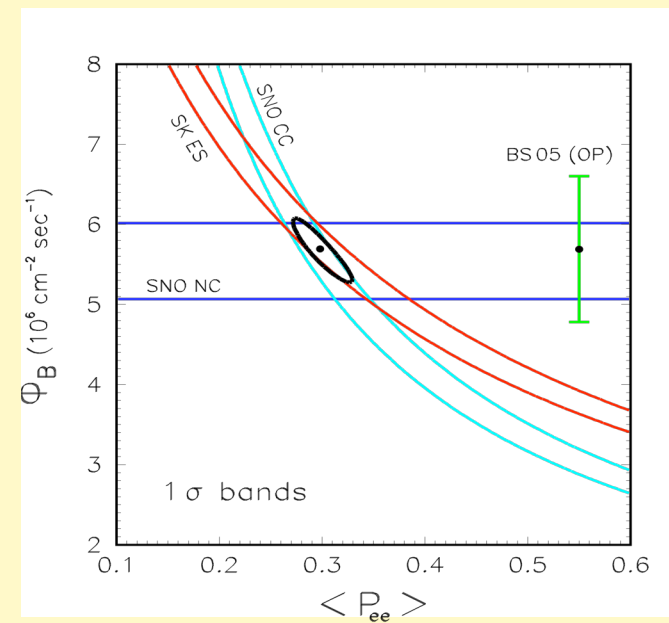
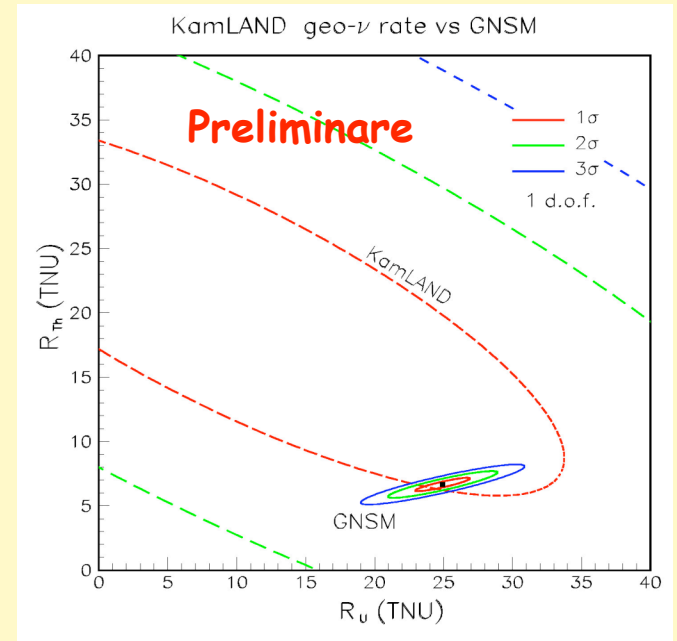
TABLE I: Global 3ν oscillation analysis (2008): best-fit values and allowed n_σ ranges for the mass-mixing parameters.

Parameter	$\delta m^2 / 10^{-5} \text{ eV}^2$	$\sin^2 \theta_{12}$
Best fit	7.67	0.312
1σ range	7.48 – 7.83	0.294 – 0.331
2σ range	7.31 – 8.01	0.278 – 0.352
3σ range	7.14 – 8.19	0.263 – 0.375

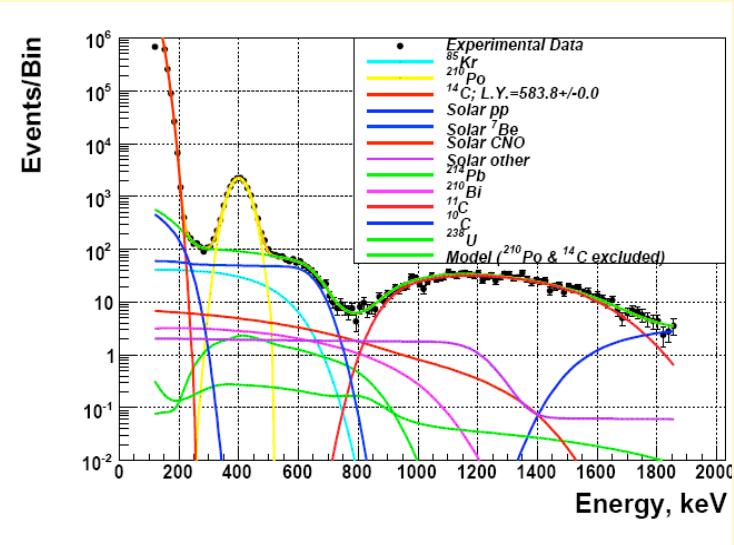
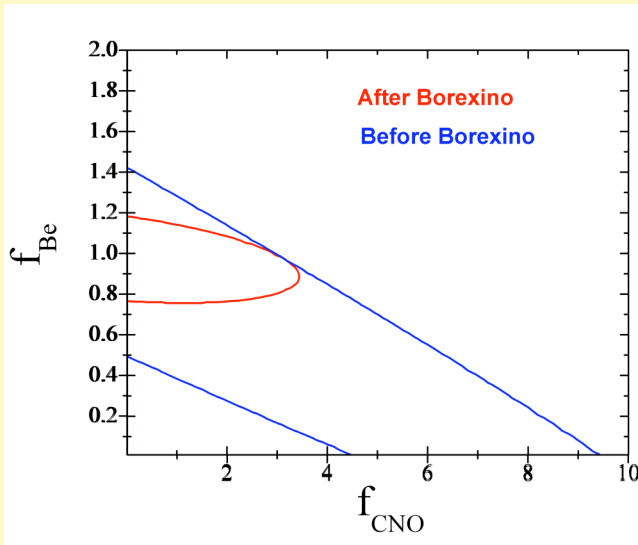
Inoltre, i risultati di KamLAND sui geoneutrini sono in accordo con i modelli geochimici e geofisici per la produzione di calore radiogenico nella Terra da decadimenti di U, Th (entro larghi errori)...

... e i risultati di SNO sono in accordo con il modello solare standard per la produzione di neutrini da decadimento di Boro-8 (entro errori confrontabili)

Misure di precisione nel settore (1,2) dei neutrini potranno portare, in futuro, a vincoli significativi sui modelli della Terra e del Sole.



Borexino può effettuare una misura indipendente del flusso dei geoneutrini entro pochi anni. Un obiettivo più ambizioso è quello di misurare il flusso dei neutrini solari della catena CNO, rilevante anche ai fini del problema della metallicità solare (discrepanza fra inferenze fotosferiche ed eliosismologiche).



Allo stesso tempo, **LUNA** potrebbe ridurre ulteriormente le incertezze legate a reazioni nucleari di interesse per l'astrofisica solare.

Nuove conferme (o sorprese) potrebbero dunque emergere riguardo a modelli terrestri, solari (o alla fisica dei neutrini)

Parametri di oscillazione: stato dell'arte, settore (2,3)

Synopsis of global 3ν oscillation analysis

standard deviations

Dominato da MINOS
(acceleratore)

Dominato da SuperK
(atmosferici)

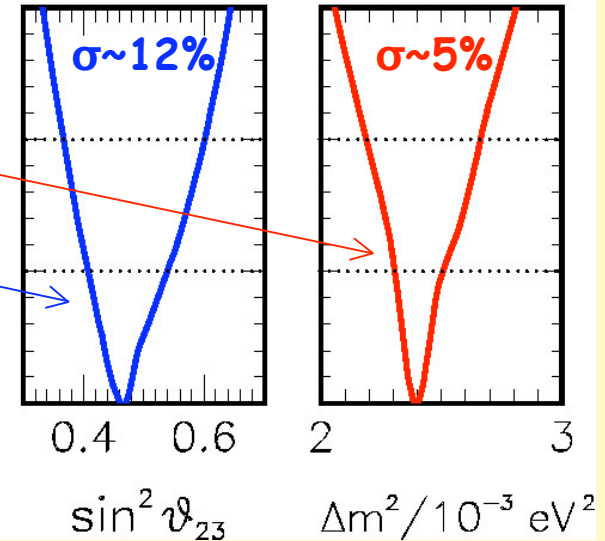


TABLE I: Global 3ν oscillation analysis (2008): best-fit values and allowed n_σ ranges for the mass-mixing parameters.

Parameter	$\sin^2 \theta_{23}$	$\Delta m^2 / 10^{-3} \text{ eV}^2$
Best fit	0.466	2.39
1σ range	0.408 – 0.539	2.31 – 2.50
2σ range	0.366 – 0.602	2.19 – 2.66
3σ range	0.331 – 0.644	2.06 – 2.81

MINOS e **SK** potranno apportare miglioramenti frazionari alle stime dei parametri di oscillazione nel canale di sparizione $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$.

Per arrivare ad errori del percento (o inferiori): **T2K** (partenza prevista nel 2009). Partecipazione italiana al rivelatore vicino.



Da T2K in poi: Potranno esserci soluzioni multiple nello spazio dei parametri (θ_{23} , θ_{13} , $\text{sign}(\Delta m^2)$, δ) o in un suo sottospazio

-> problema della degenerazione o dei "cloni",
particolarmente studiato in contesto R&D (BENE)

Soluzione: misure accurate, a diverse E , L , e in diversi canali

- Digressione -

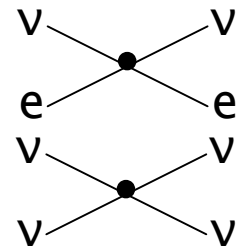
L'ambiguità legata alla gerarchia, cioè $\text{sign}(\pm\Delta m^2)$, può essere risolta, almeno in principio, facendo interferire oscillazioni generate da Δm^2 con oscillazioni generate da un'altra quantità Q di segno noto.

Escludendo nuovi stati/interazioni, si hanno le seguenti possibilità:

$Q =$ Densità di elettroni (effetto MSW nella Terra)

$Q =$ Densità di neutrini (effetti collettivi in SNovae)

$Q = \delta m^2$ ("Fourier transform" ad alta risoluz.)



La prima possibilità appare più realistica (p.es., in NOvA o T2KK), purchè θ_{13} non sia troppo piccolo; ma anche le altre due vengono attivamente studiate come opportunità a lungo termine.

Parametri di oscillazione: stato dell'arte, angolo (1,3)

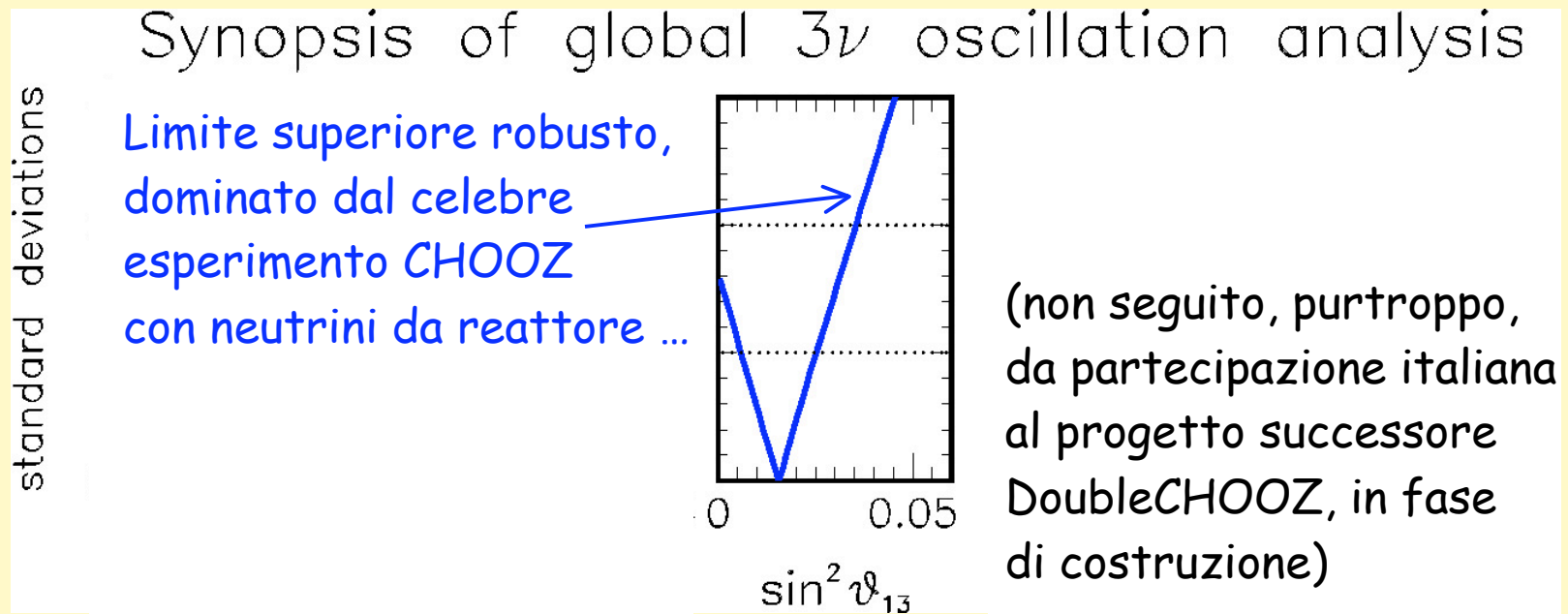
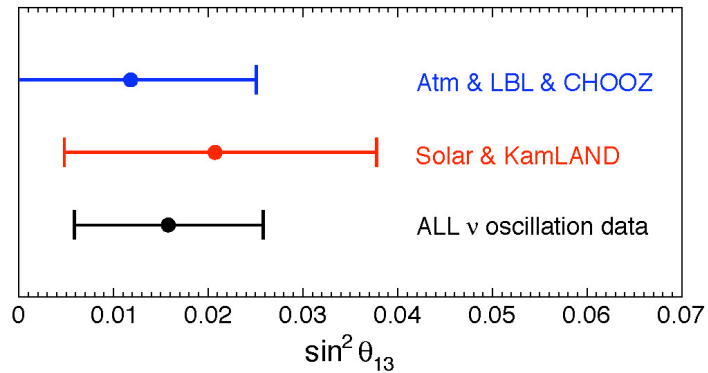


TABLE I: Global 3ν oscillation analysis (2008): best-fit values and allowed n_σ ranges for the mass-mixing parameters.

Parameter	$\sin^2 \theta_{13}$
Best fit	0.016
1σ range	0.006 – 0.026
2σ range	< 0.036
3σ range	< 0.046

Ma alcuni dati sembrano anche suggerire un (seppur debole) limite inferiore...

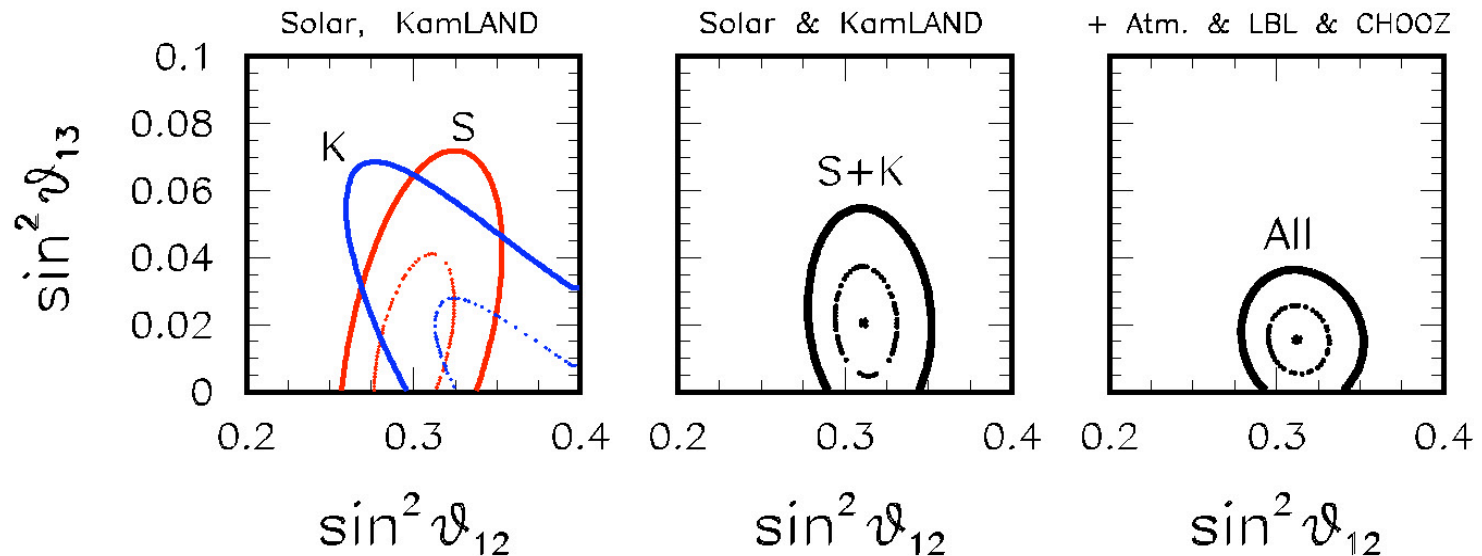


$\sim 1\sigma$ da settore (2,3)

$\sim 1\sigma$ da settore (1,2)

$\sim 90\%$ CL totale:

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.016 \pm 0.010$$



La **differente correlazione** fra i due angoli di mescolamento in **KamLAND vs solari** nasce dal **differente segno** relativo in P_{ee} (**prob. di sopravvivenza**)

Solari, bassa energia (~vuoto): GNO

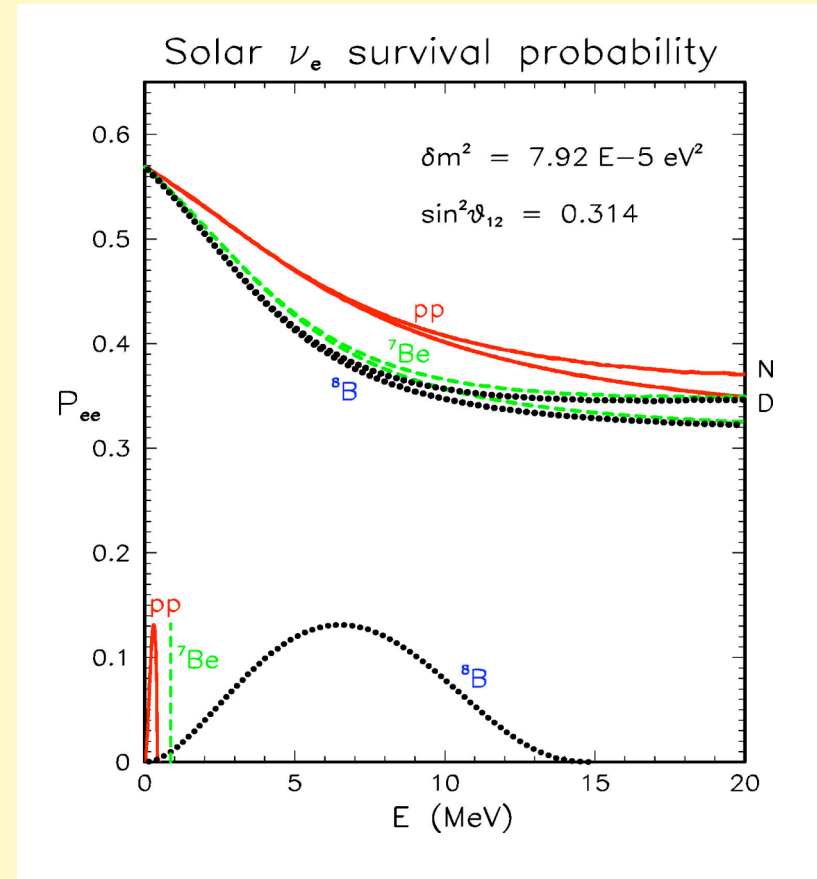
$$P_{ee} \simeq (1 - 2s_{13}^2)(1 - 2s_{12}^2 c_{12}^2)$$

Solari, alta energia (~MSW): SNO

$$P_{ee} \simeq (1 - 2s_{13}^2)(+s_{12}^2)$$

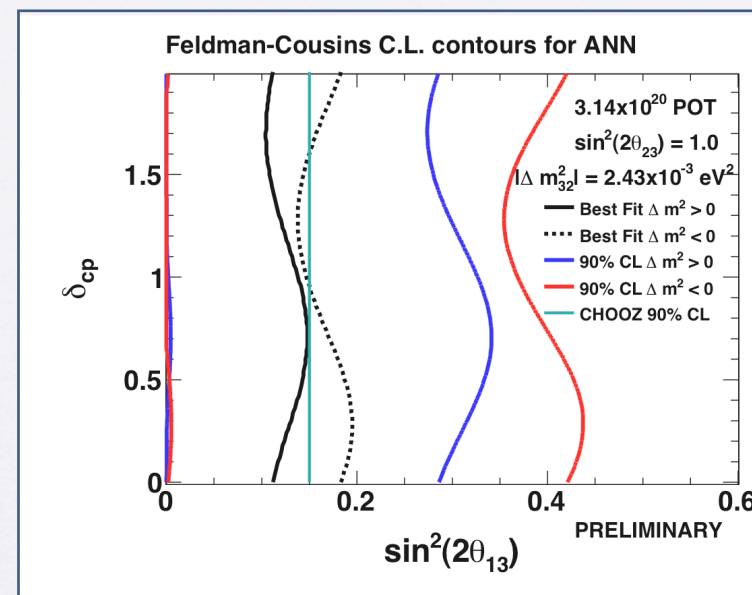
Reattori (~vuoto): KamLAND

$$P_{ee} \simeq (1 - 2s_{13}^2)(1 - 4s_{12}^2 c_{12}^2 \sin^2(\delta m^2 L/4E))$$



(L'analisi della possibile indicazione per $\theta_{13} > 0$ proveniente dai neutrini atmosferici è più complessa)

Un'indicazione indipendente a favore di $\theta_{13} > 0$ (al 90% C.L.) sembra venire anche dai risultati preliminari di MINOS nel canale $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$



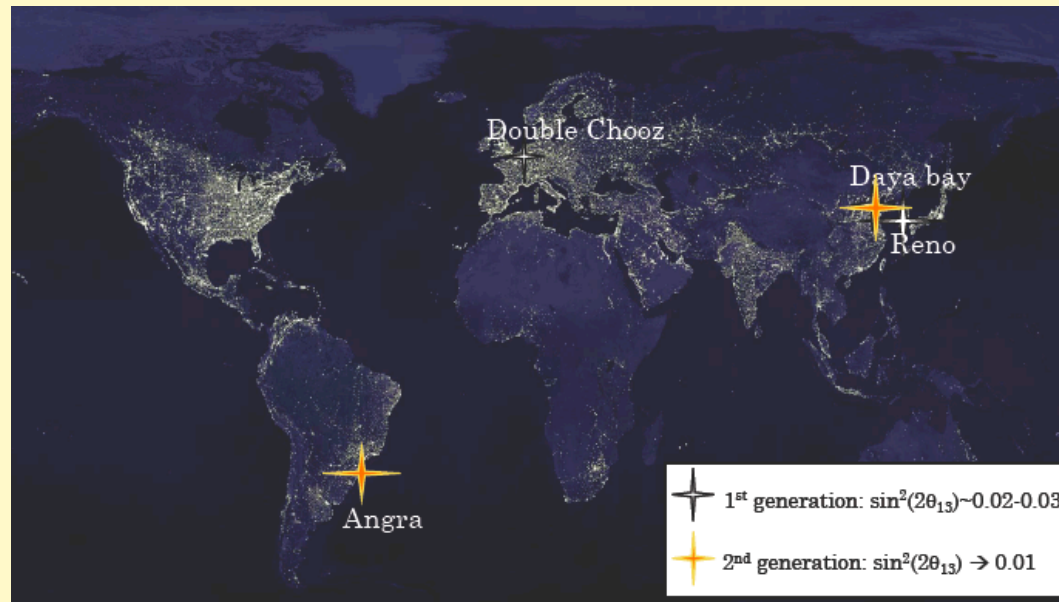
Combinando tutto (con un pò di ottimismo), il gran totale fornisce:

$$\sin^2\theta_{13} \approx 0.02 \pm 0.01 \text{ (tutti i dati al 2009)}$$

che è un incoraggiante indizio a 2σ , verificabile entro pochi anni.

(N.B.: MINOS, SK, SNO, KamLAND hanno ulteriori margini di miglioramento)

In particolare, si tratta di un intervallo accessibile non solo a T2K nel canale di apparizione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, ma anche ai prossimi esperimenti con neutrini da reattore nel canale di sparizione $\nu_e \rightarrow \nu_e$



In ogni caso, una qualsiasi misura di $\theta_{13} > 0$ (anche piccolo)...

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

... aprirebbe le porte alla ricerca di **CPV leptonica**

(oltre a re-indirizzare varie idee teoriche e progetti sperimentali)

Per esempio:

Evidenze di $\sin^2\theta_{13} > \text{few} \times 10^{-3}$ renderebbero plausibile la ricerca di CPV con fasci "convenzionali" anche se più intensi. Altrimenti, bisognerebbe valutare opzioni oggetto di R&D (Nufact, beta-beams)

Evidenze di **CP violation + neutrini di Majorana** renderebbero più plausibile (via see-saw) l'idea di neutrini pesanti ad una scala $\sim GUT$, con decadimenti asimmetrici in leptoni/antileptoni (Leptogenesi)

Come rispondere alle domande di Fermi e Majorana?

Triplice strategia d'attacco: $(m_\beta, m_{\beta\beta}, \Sigma)$

- 1) **Decadimento β** : $m^2_i \neq 0$ altera la coda dello spettro. Misura la cosiddetta "massa effettiva del neutrino elettronico":

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

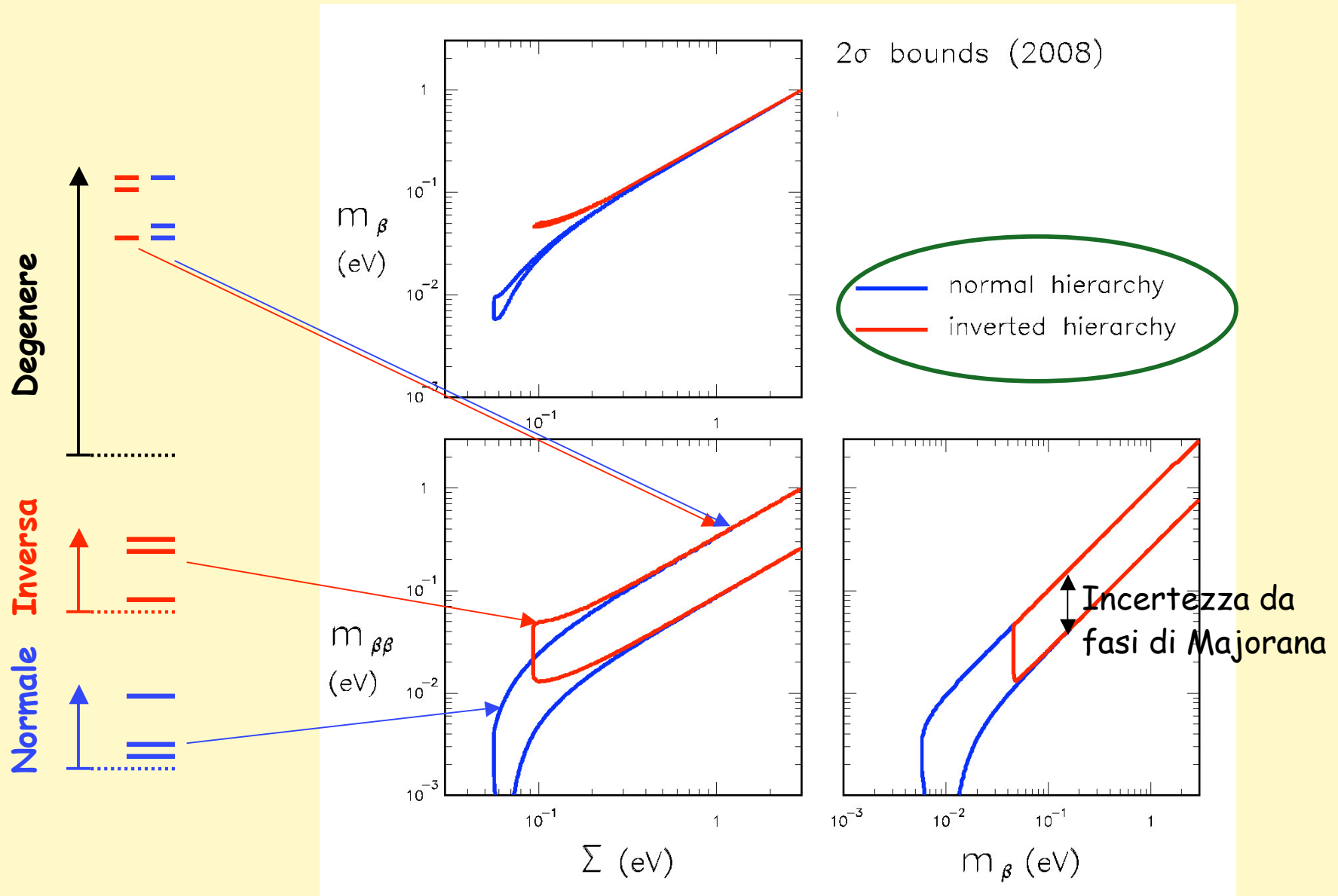
- 2) **Decadimento $0\nu\beta\beta$** : Se e solo se $m^2_i \neq 0$ e $\nu = \text{anti-}\nu$ (Majorana). Sensibile alla "massa effettiva di Majorana" (e fasi relative):

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

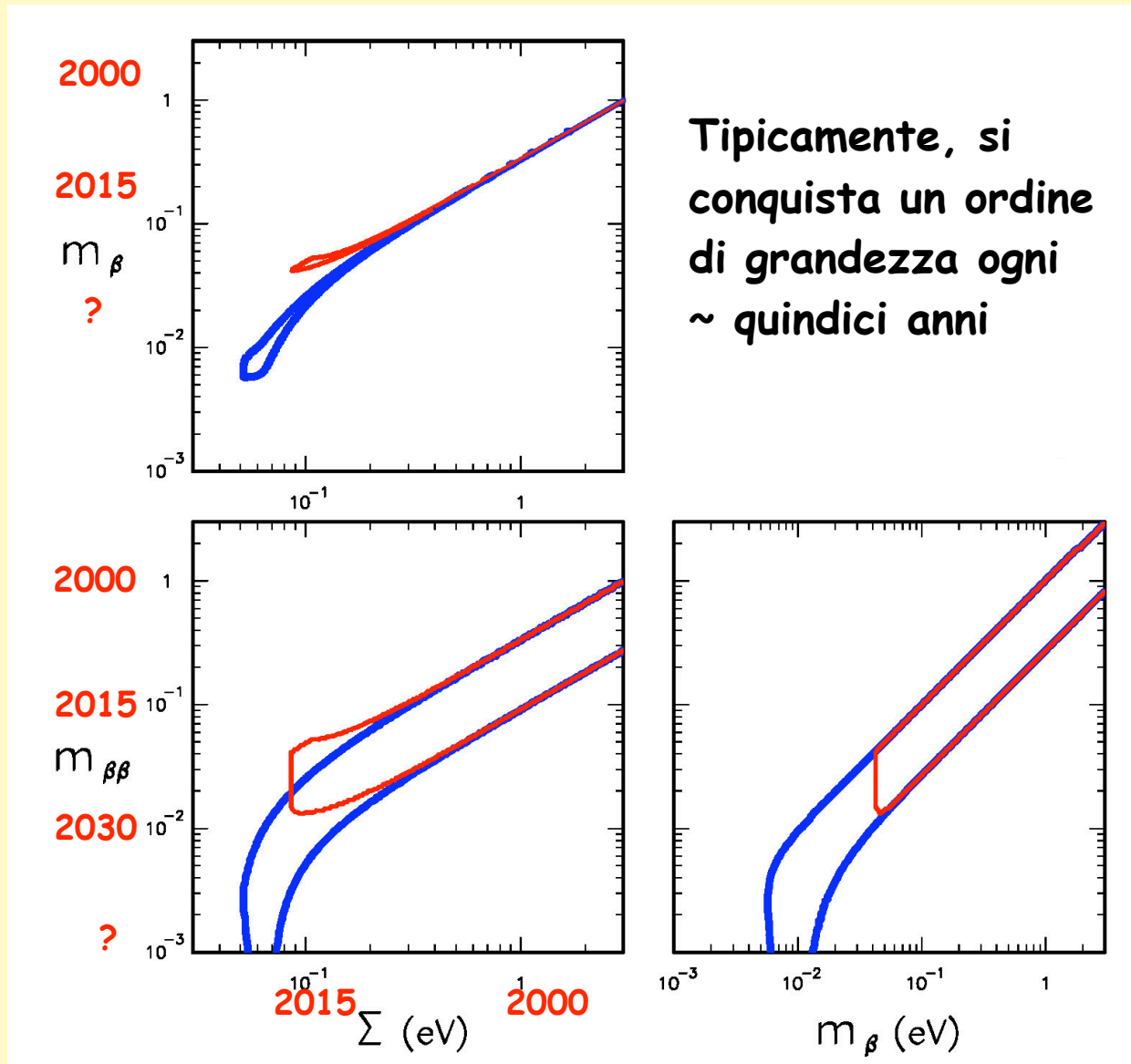
- 3) **Cosmologia**: $m^2_i \neq 0$ altera la formazione di strutture a grande scala nel modello cosmologico standard vincolato da CMB + altri dati. Misura:

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

I risultati di oscillazione, da soli, delimitano regioni permesse nello spazio $(m_\beta, m_{\beta\beta}, \Sigma)$ per le due gerarchie (indistinguibili per "grandi" masse)



... ma ovviamente abbiamo bisogno delle misure vere e proprie di $(m_\beta, m_{\beta\beta}, \Sigma)$, che rappresentano un altro esercizio di pazienza...



Decadimento β

Esperimenti con Trizio:

Mainz + Troitsk: $m_\beta < 2 \text{ eV}$

KATRIN: miglioramento $O(10)$

Esempi di possibili risultati futuri di KATRIN ($\pm 1\sigma$, [eV]):

$$m_\beta = 0.35 \pm 0.07 \quad (5\sigma, \text{scoperta})$$

$$m_\beta = 0.30 \pm 0.10 \quad (3\sigma, \text{evidenza})$$

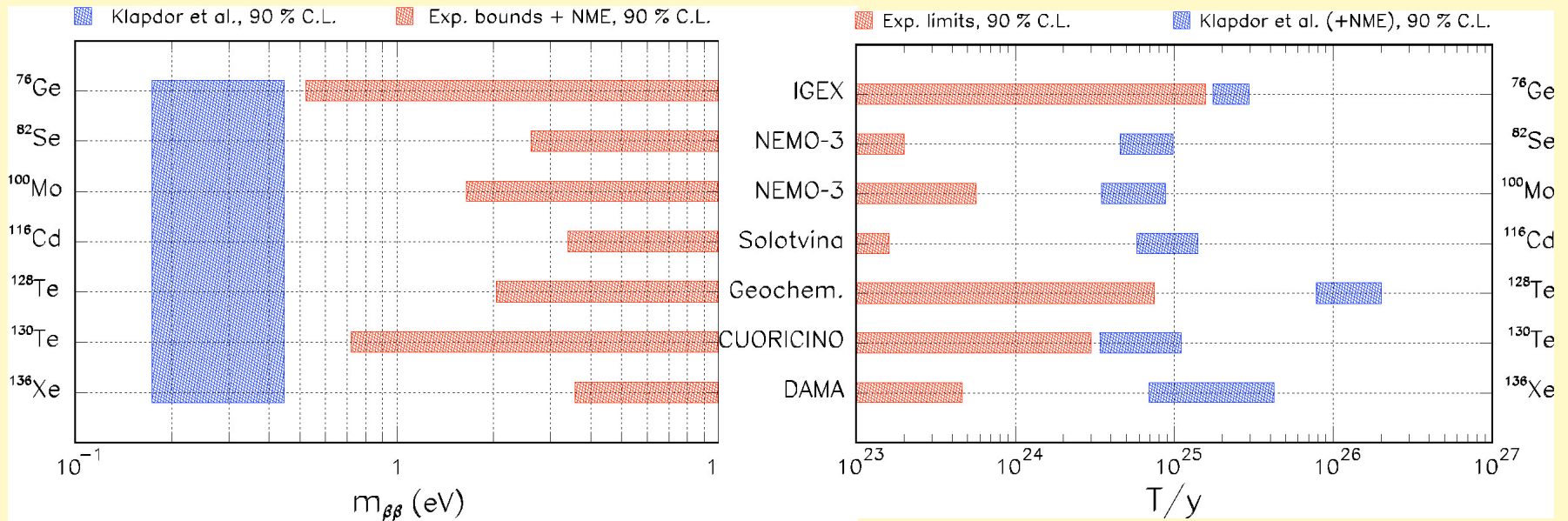
$$m_\beta = 0 \pm 0.12 \quad (<0.2 \text{ al } 90\% \text{ CL})$$



Chiaramente, c'è bisogno di nuove idee per andare sotto $\sim 0.2 \text{ eV}$. **MARE ?**

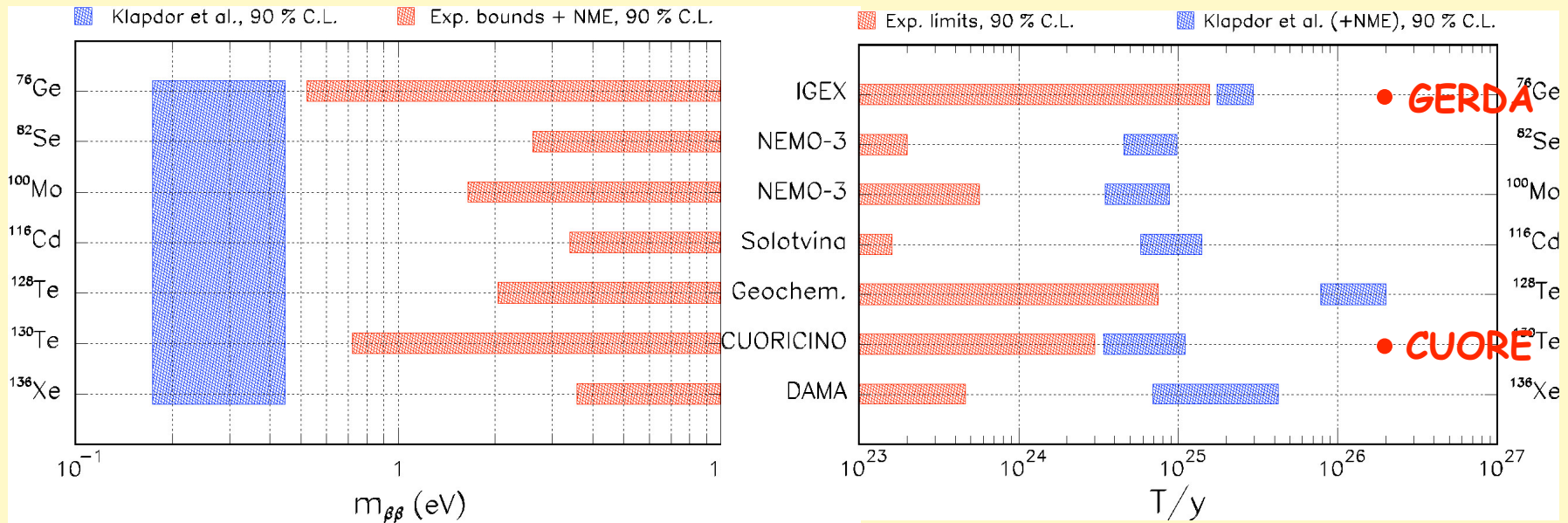
Doppio decadimento β senza neutrini

Solo limiti superiori, tranne un segnale controverso nell'esperimento di maggiore sensibilità (Klapdor et al.). Usando recenti stime degli elementi di matrice nucleare e delle loro incertezze:



Doppio decadimento β senza neutrini

Solo limiti superiori, tranne un segnale controverso nell'esperimento di maggiore sensibilità (Klapdor et al.). Usando recenti stime degli elementi di matrice nucleare e delle loro incertezze:



Ottime prospettive per CUORE, GERDA a LNGS
[con i migliori auspici per tutti gli amici e colleghi al GS e L'Aquila]

Cosmologia: Limiti aggiornati (2008) sulla somma delle masse dei ν da vari insiemi di dati (assumendo "flat Λ CDM model"):

TABLE II: Representative cosmological data sets and corresponding 2σ (95% C.L.) constraints on the sum of ν masses Σ .

Case	Cosmological data set	Σ (at 2σ)
1	CMB	< 1.19 eV
2	CMB + LSS	< 0.71 eV
3	CMB + HST + SN-Ia	< 0.75 eV
4	CMB + HST + SN-Ia + BAO	< 0.60 eV
5	CMB + HST + SN-Ia + BAO + $\text{Ly}\alpha$	< 0.19 eV

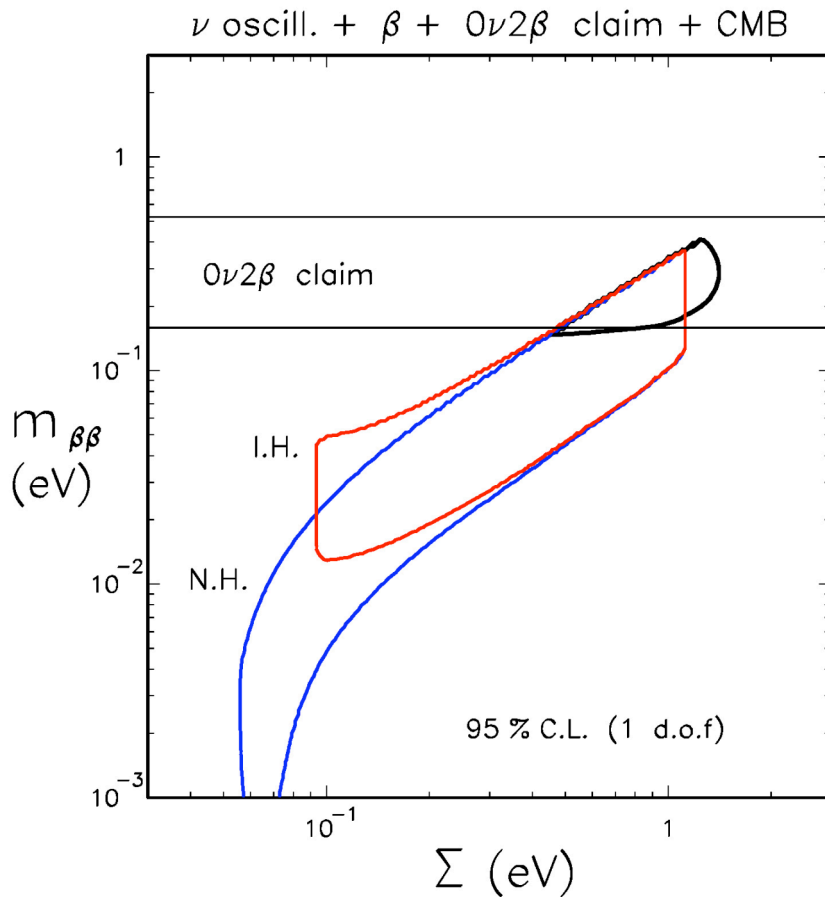
Caso 1: "prudente" (dati da CMB, dominati by WMAP 5y)

Caso 5: "aggressivo" (tutti i dati cosmologici)

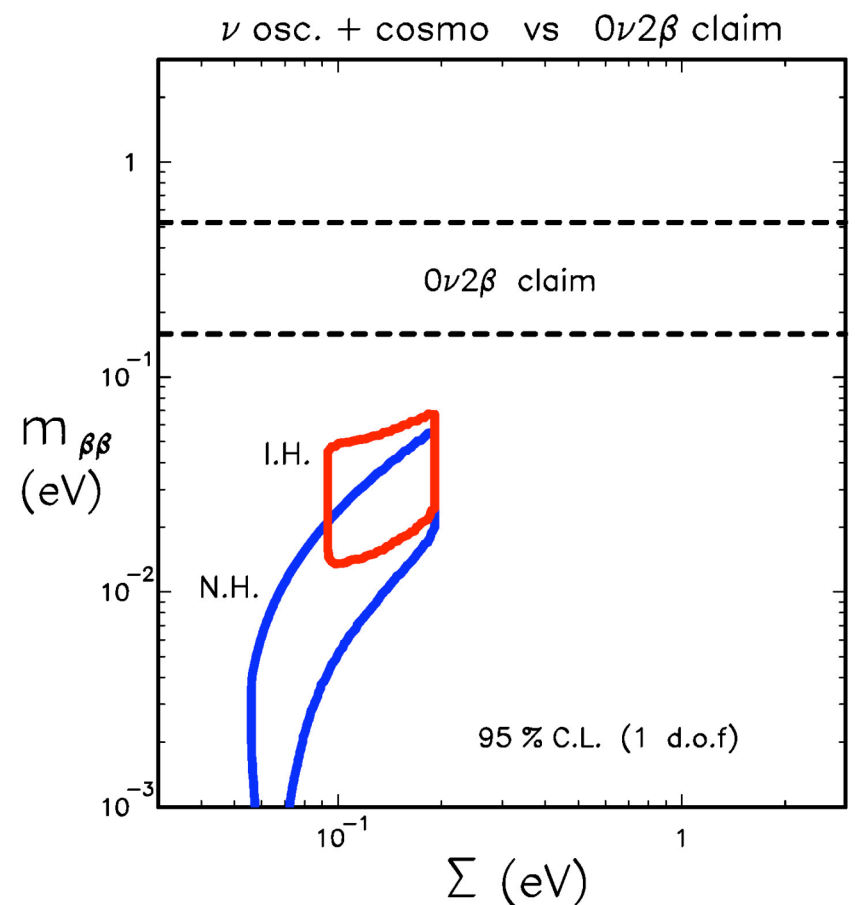
Limiti superiori nell'intervallo $\Sigma < 0.6-1.2$ eV raccolgono maggior consenso.

[I cosmologi ci promettono un futuro roseo, con sensibilità a livello di ~ 0.1 eV e, forse, alla gerarchia. Ma saremo pronti ad accettare un segnale $\Sigma > 0$?]

Cosmologia "prudente"



Cosmologia "aggressiva"



Due risposte diverse alle domande di Fermi e Majorana...

Supponiamo ora che la risposta "vera" sia dietro l'angolo...
 Per esempio, che lo spettro di massa sia ~degenerare, con

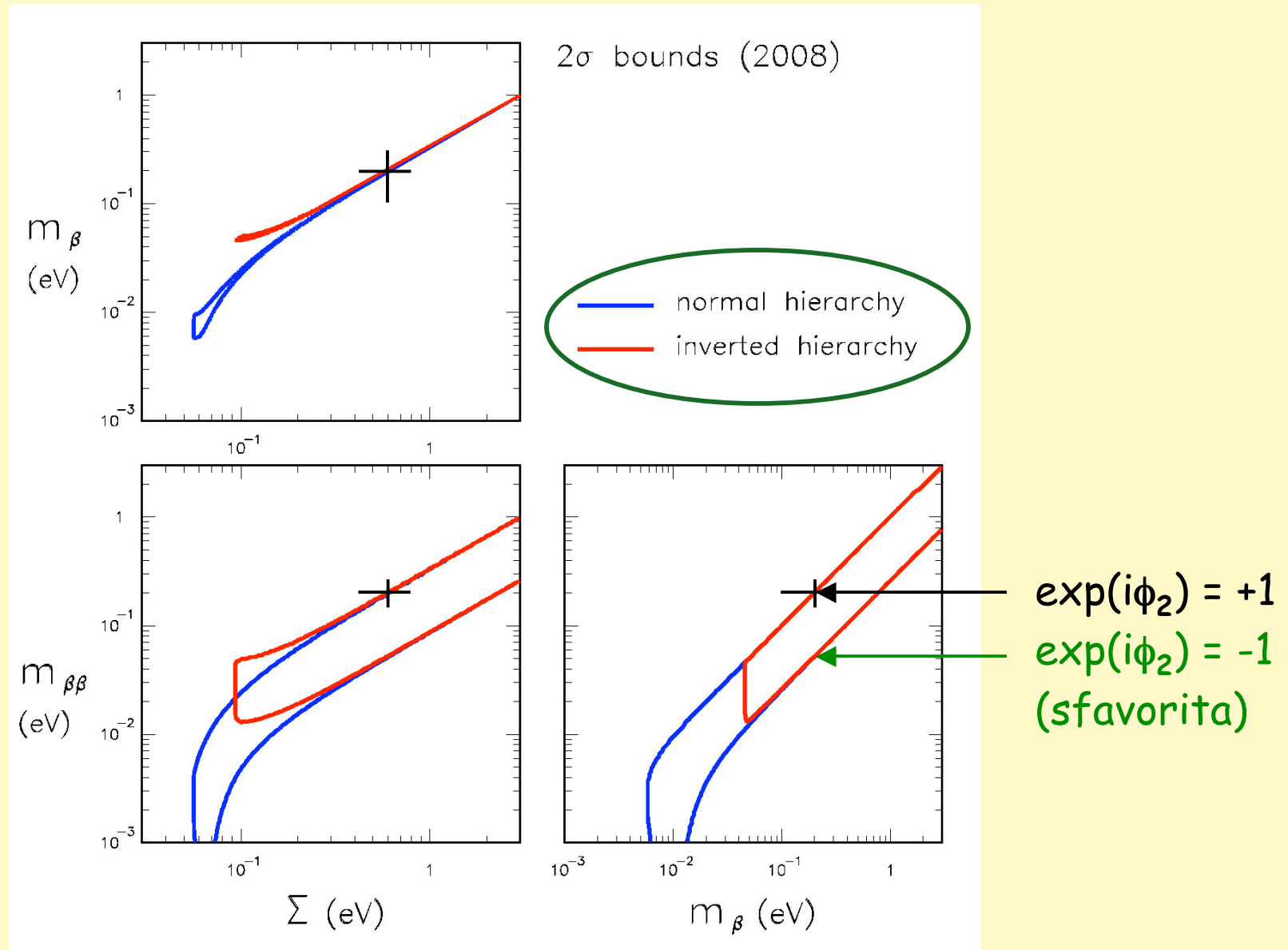
$$m_1 \sim m_2 \sim m_3 \sim 0.2 \text{ eV} .$$

Potremmo allora sperare di osservare segnali del tipo

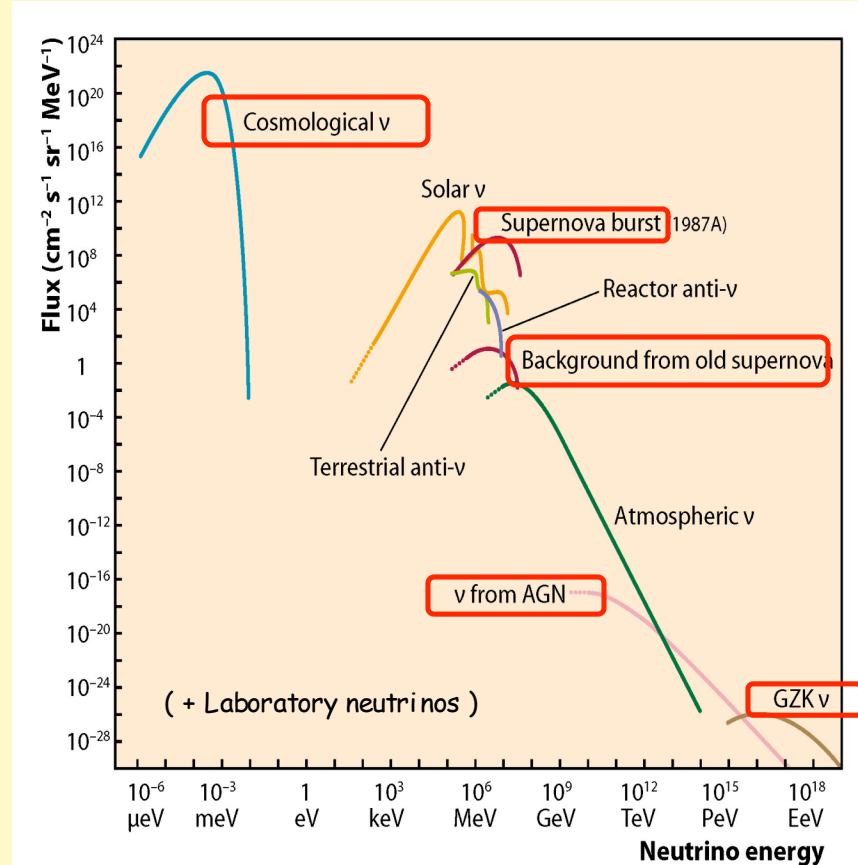
$$\begin{array}{lcl} m_{\beta\beta} & \simeq & 0.2(1 \pm 0.3) \text{ eV} \\ \Sigma & \simeq & 0.6(1 \pm 0.3) \text{ eV} \\ m_{\beta} & \simeq & 0.2(1 \pm 0.5) \text{ eV} \end{array}$$

nel qual caso...

...la massa assoluta dei neutrini sarebbe ricostruita con un errore del 25%, e si avrebbe qualche indizio su una fase di Majorana (ϕ_2)...



Un sogno? Forse. Ma solo un sano ottimismo consente di affrontare le sfide poste dalla fisica del neutrino, incluse quelle relative alla rilevazione di sorgenti cosmiche e astrofisiche ...



A synoptic view of neutrino fluxes. (from ASPERA roadmap)

... in cui il contributo teorico/sperimentale italiano è notevole, ma la cui discussione richiederebbe un altro seminario.

Grazie per l'attenzione.

Per approfondimenti:

- G.L. Fogli et al., arXiv:0805.2517, 0806.2649, 0808.0807, 0810.5733
- Talks sessione parallela "Neutrini e Fisica Astroparticellare" IFAE'09
- CSN2 (Apr. 2009) <http://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=1094>