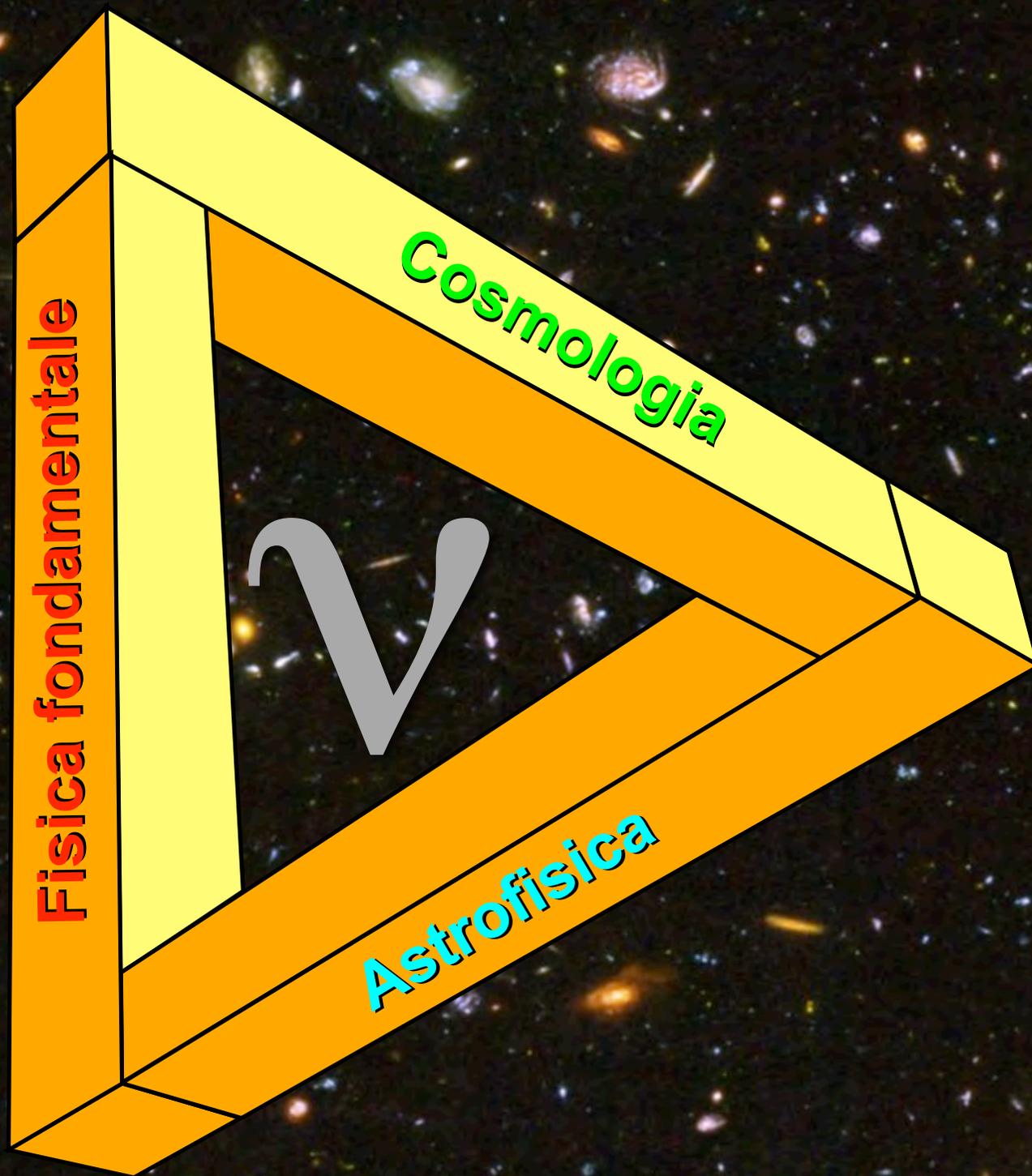


I neutrini: una (non completa) rassegna teorica



Daniele Montanino





La fisica teorica del neutrino: qualche esempio...

➤ Fisica fondamentale

- Fenomenologia delle oscillazioni
- Ricerche dirette di massa
- Modelli di massa e mixing
- Origine e numero delle famiglie
- Interazioni non-standard e fisica oltre il modello standard, ulteriori stati sterili
- Lepton flavor violations
- Propagazione non hamiltoniana (decoerenza) e test della meccanica quantistica e delle teorie di campo (CPT)
- Neutrini e extra- dimensioni
- Fisica nucleare, scattering coerente

➤ Cosmologia

- Ruolo dei neutrini nell'evoluzione dell'universo (formazione di strutture)
- Misure "cosmologiche" della massa dei neutrini
- Nucleosintesi primordiale
- Lepto-bariogenesi
- Rivelazione diretta e indiretta dei neutrini del fondo cosmico
- Neutrini sterili come materia oscura
- Neutrini e energia oscura (MaVaNs)
- Rivelazione indiretta della materia oscura (annichilazione, decadimenti in neutrini...)

➤ Applicazioni "tecnologiche"

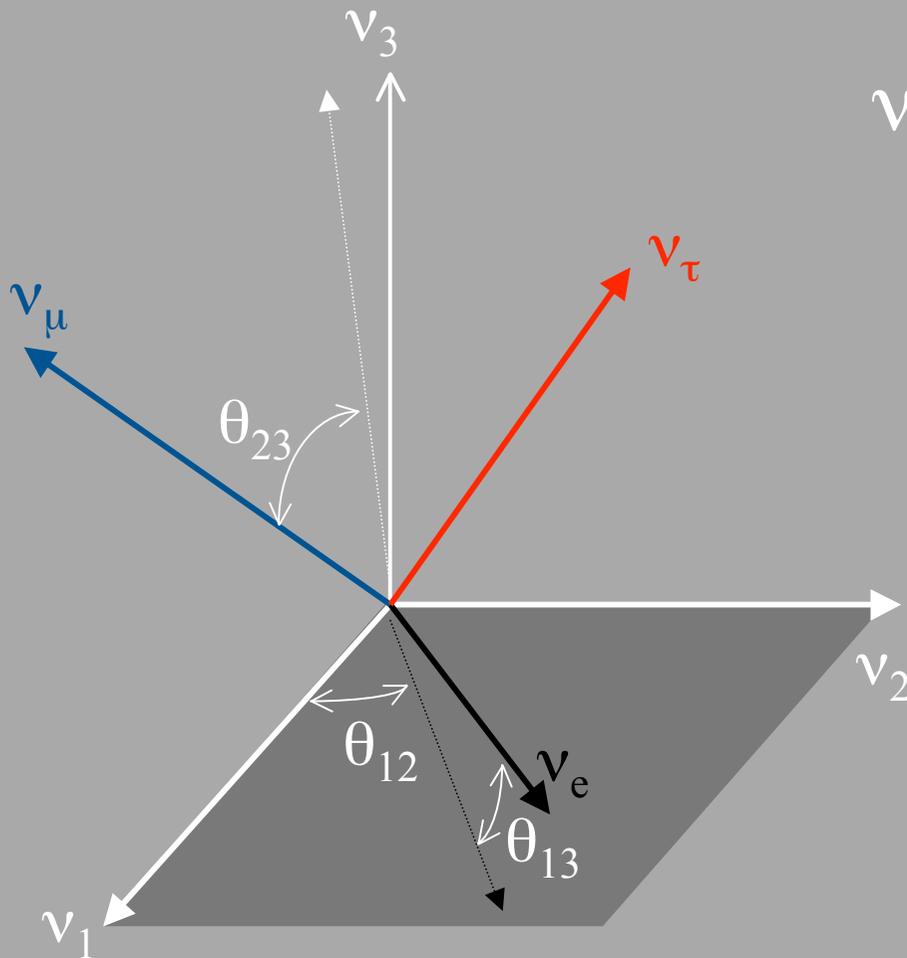
- Monitoraggio di centrali nucleari e controllo della proliferazione nucleare
- Prospezioni geologiche
- Tele comunicazioni (p.e. con i sottomarini)
- Comunicazioni con civiltà extraterrestri...

➤ Fisica e geofisica

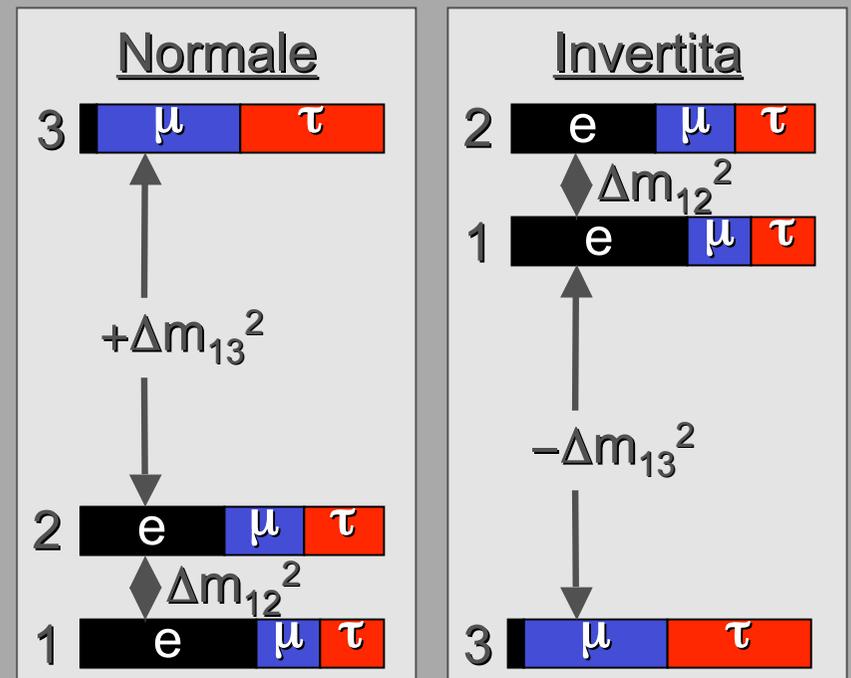
- Neutrini solari e stellari
- Ruolo dei neutrini nelle esplosioni di supernovae e rivelazione dei neutrini dalle supernove
- Sorgenti "secondarie" (neutrini atmosferici, da solar flares etc.)
- Sorgenti di neutrini di alta energia
- Geo-neutrini

Spettro di massa e mixing dei neutrini

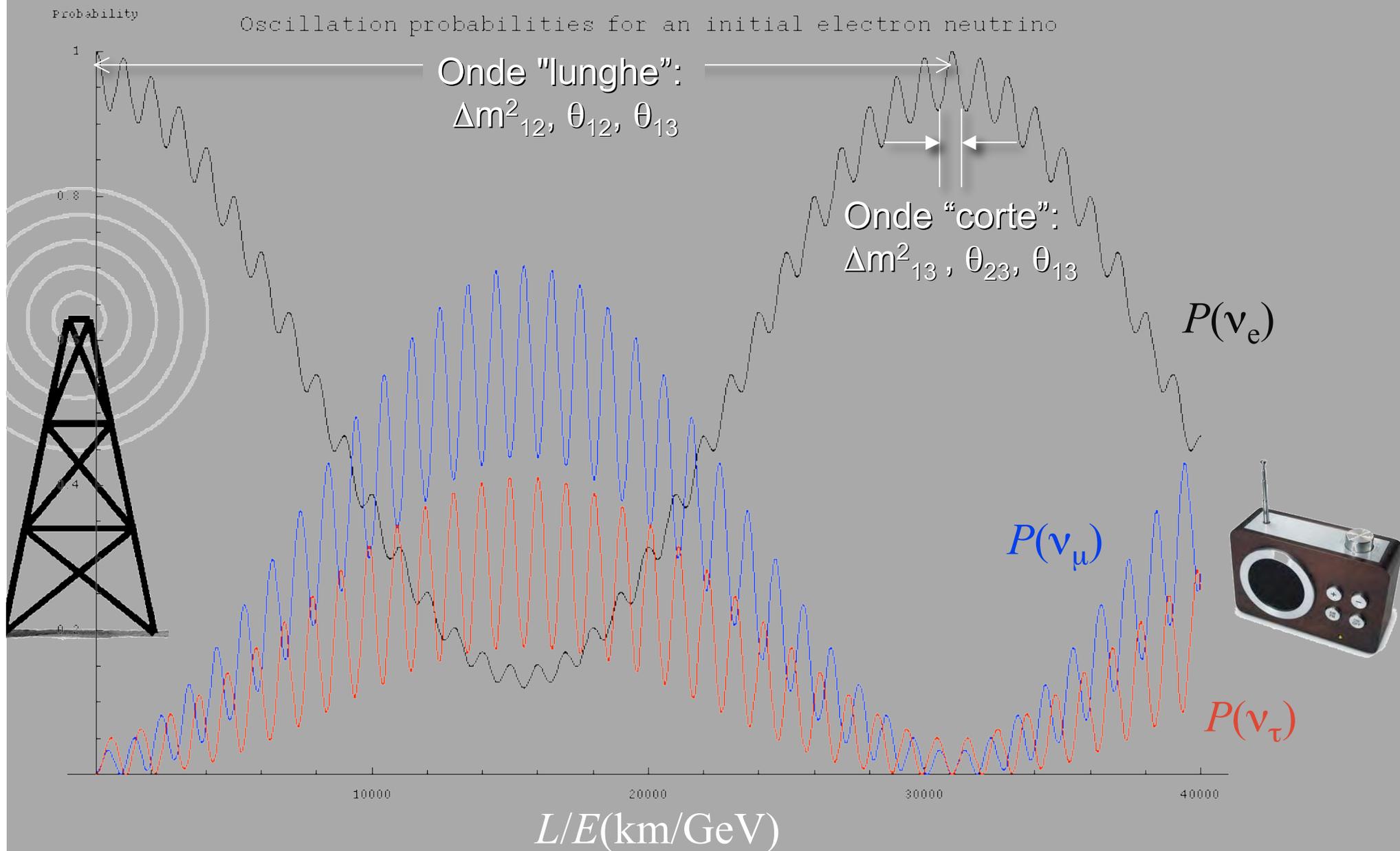
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \cos \theta_{23} & -\sin \theta_{23} \\ & \sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{13} & -e^{i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ & 1 & \\ e^{i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & & \cos \theta_{13} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{12} & -\sin \theta_{12} \\ \sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} \\ & & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e^{i\varphi_1} & & \\ & e^{i\varphi_2} & \\ & & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



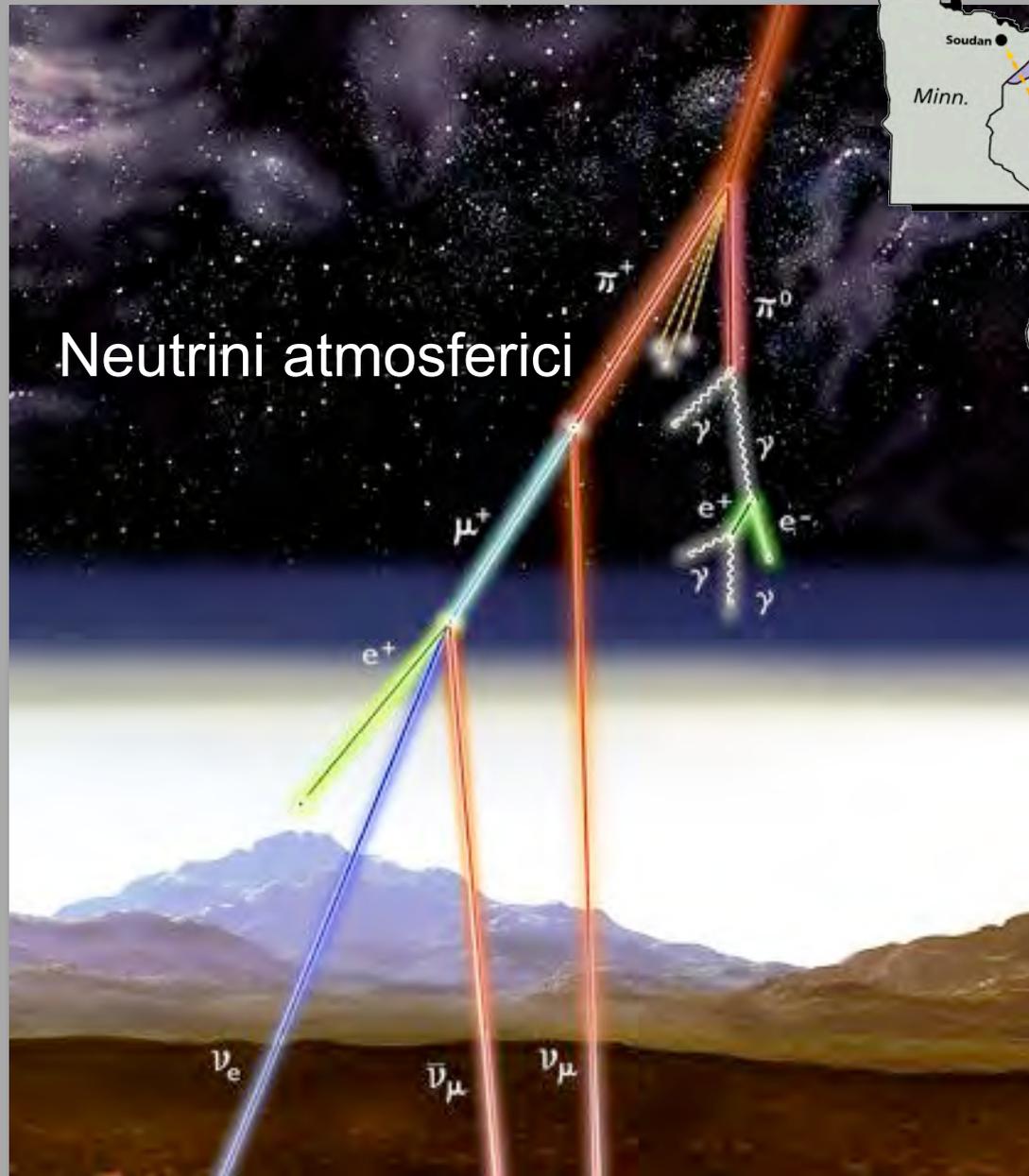
Le fasi $\varphi_{1,2}$ sono fisiche solo se i neutrini sono particelle di Majorana



Le oscillazioni di sapore

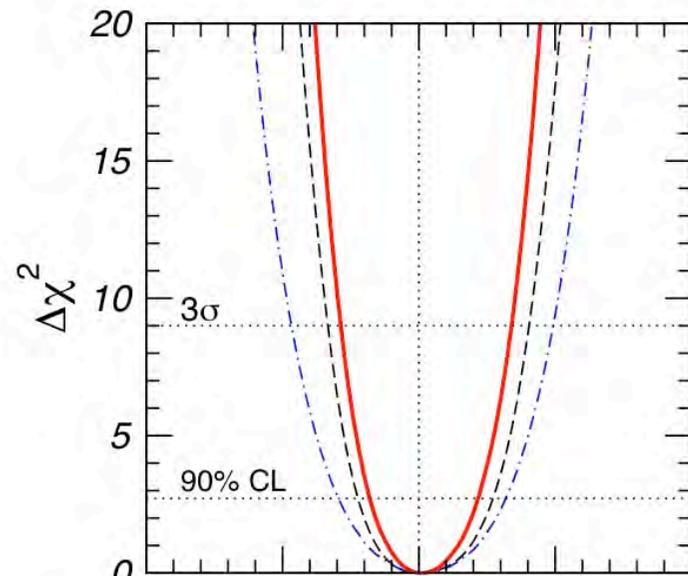


Sintonizzazione sulle onde corte ($E \sim \text{GeV}$)...

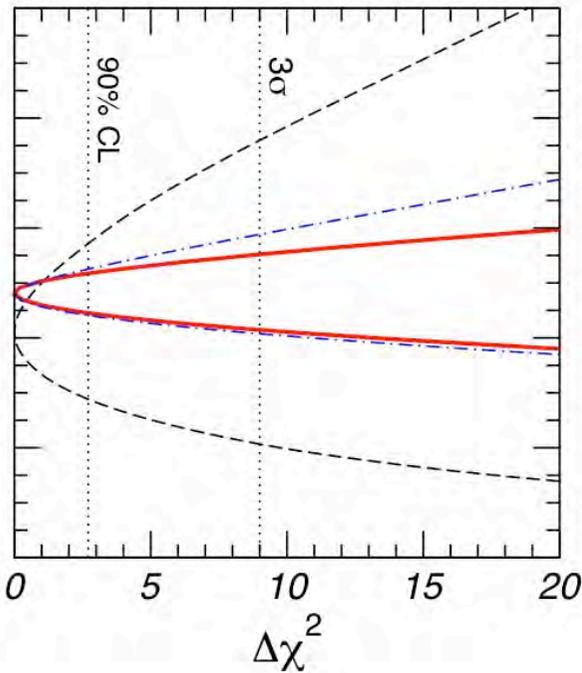
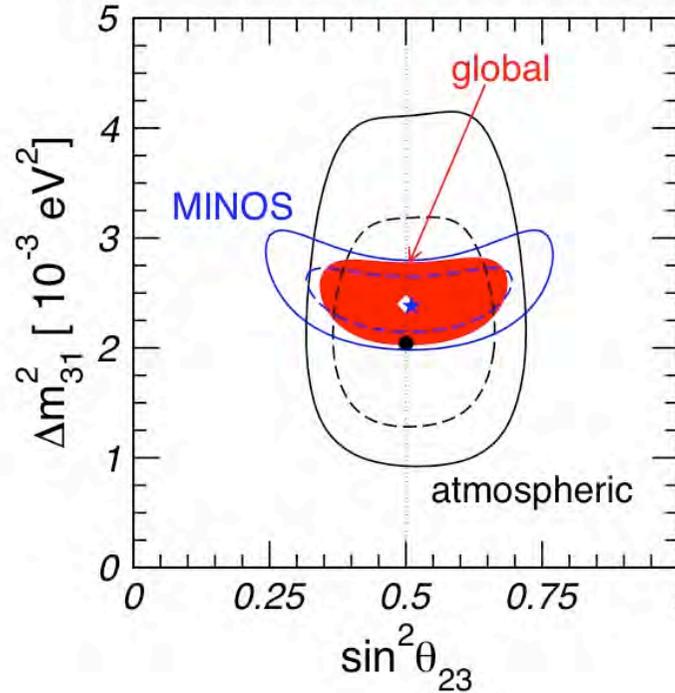
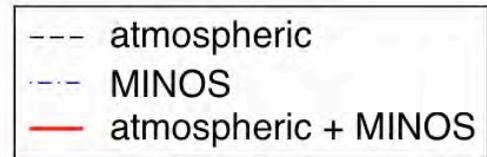


FERMILAB #98-1321D

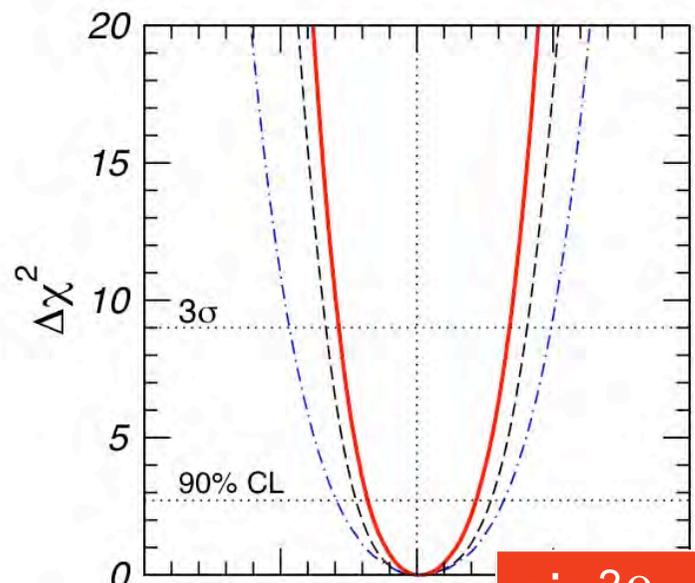
Sintonizzazione sulle onde corte ($E \sim \text{GeV}$)... ..



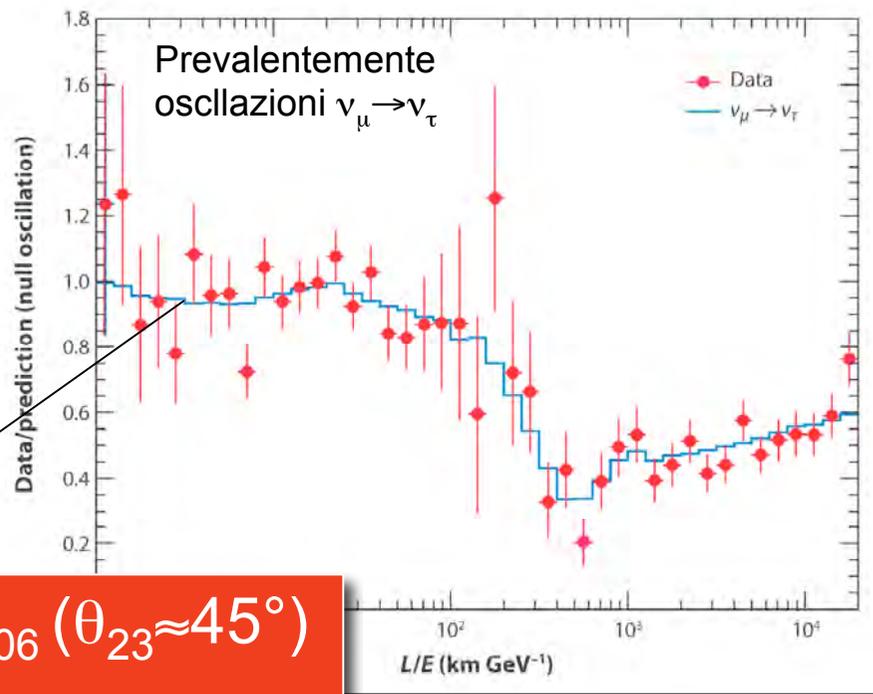
T. Schwetz, M. Tortola,
J. W. F. Valle
arXiv:0808.2016v3



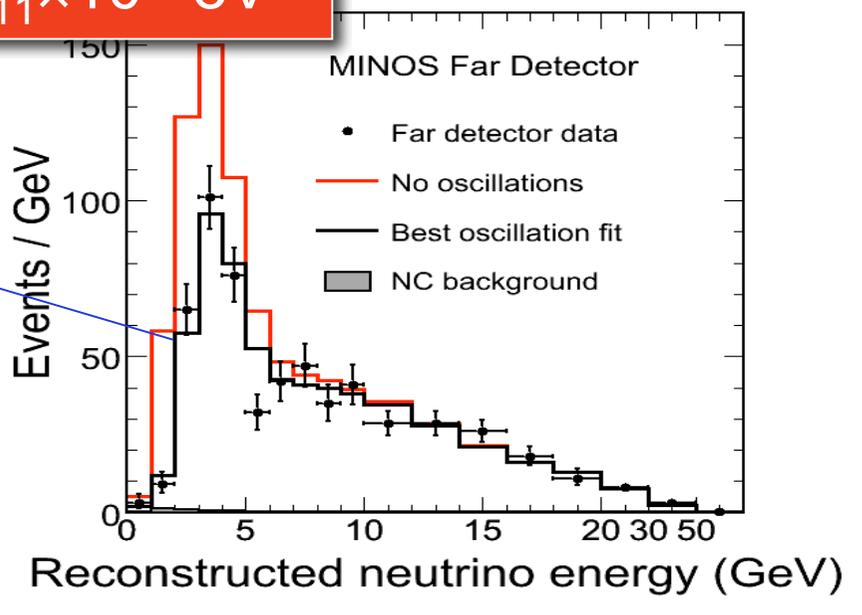
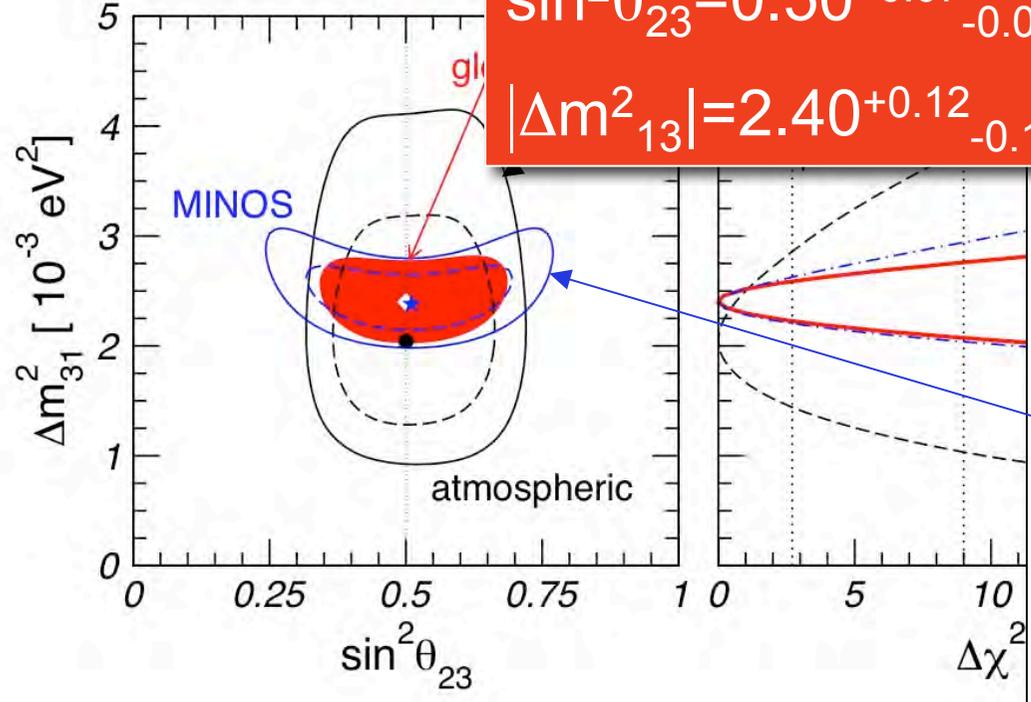
Sintonizzazione sulle onde corte ($E \sim \text{GeV}$)... ..



T. Schwetz, M.
 J. W. F. Valle
 arXiv:0808.201

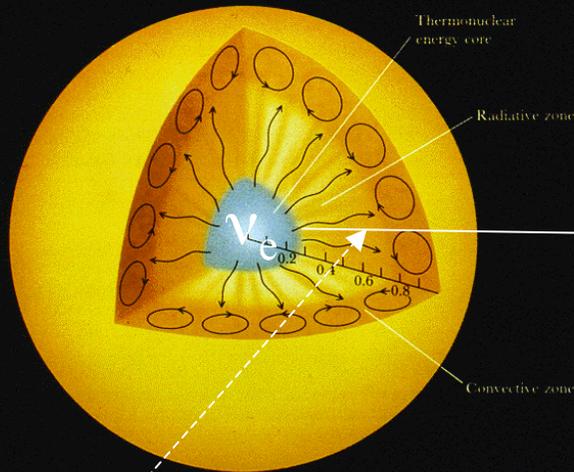


$\sin^2\theta_{23} = 0.50^{+0.07}_{-0.06} (\theta_{23} \approx 45^\circ)$
 $|\Delta m^2_{13}| = 2.40^{+0.12}_{-0.11} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

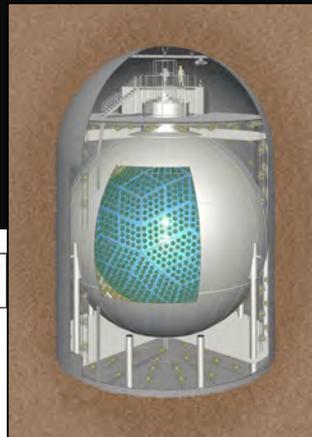


Sintonizzazione sulle onde lunghe ($E \sim \text{MeV}$)...

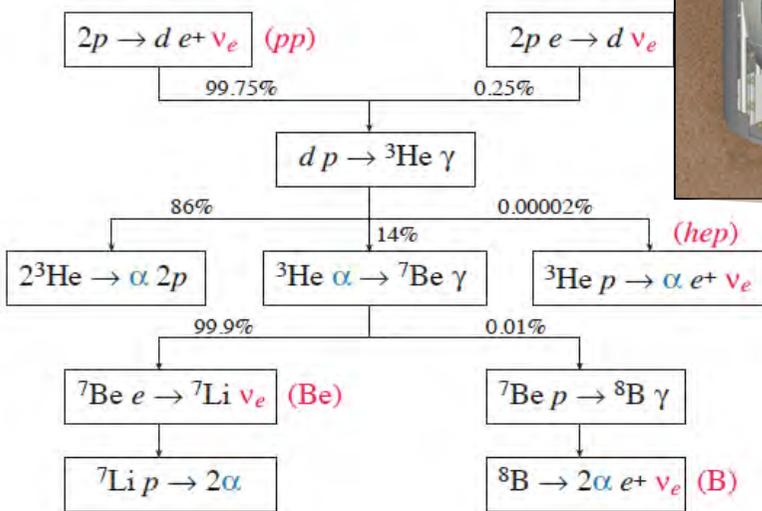
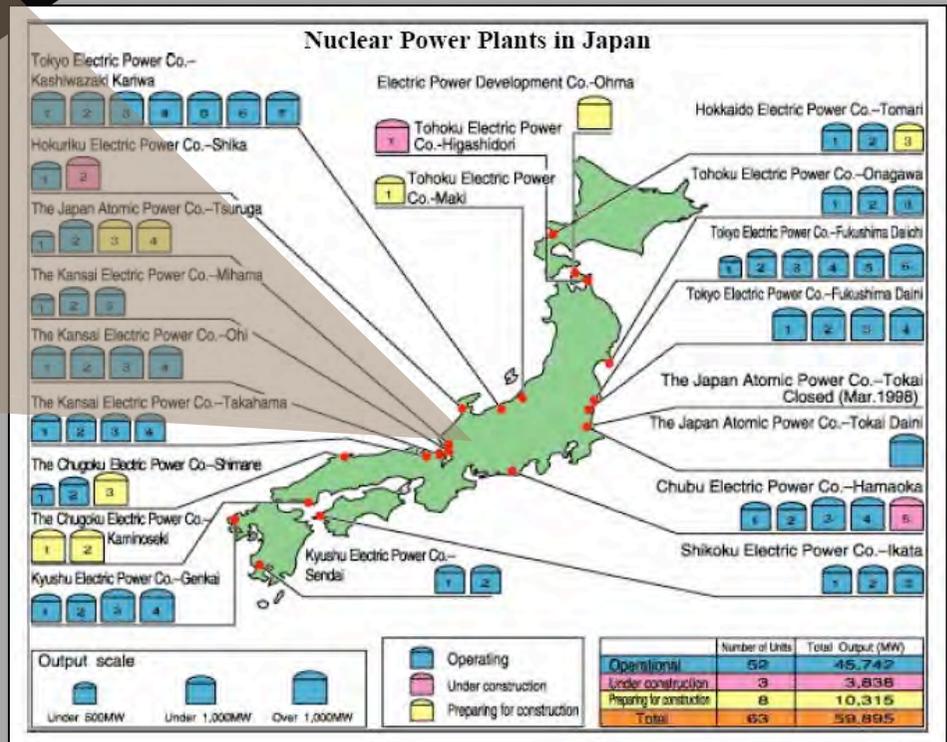
Neutrini solari



Lo scattering coerente dei neutrini nella materia modifica l'equazione di evoluzione del sapore (effetto MSW)

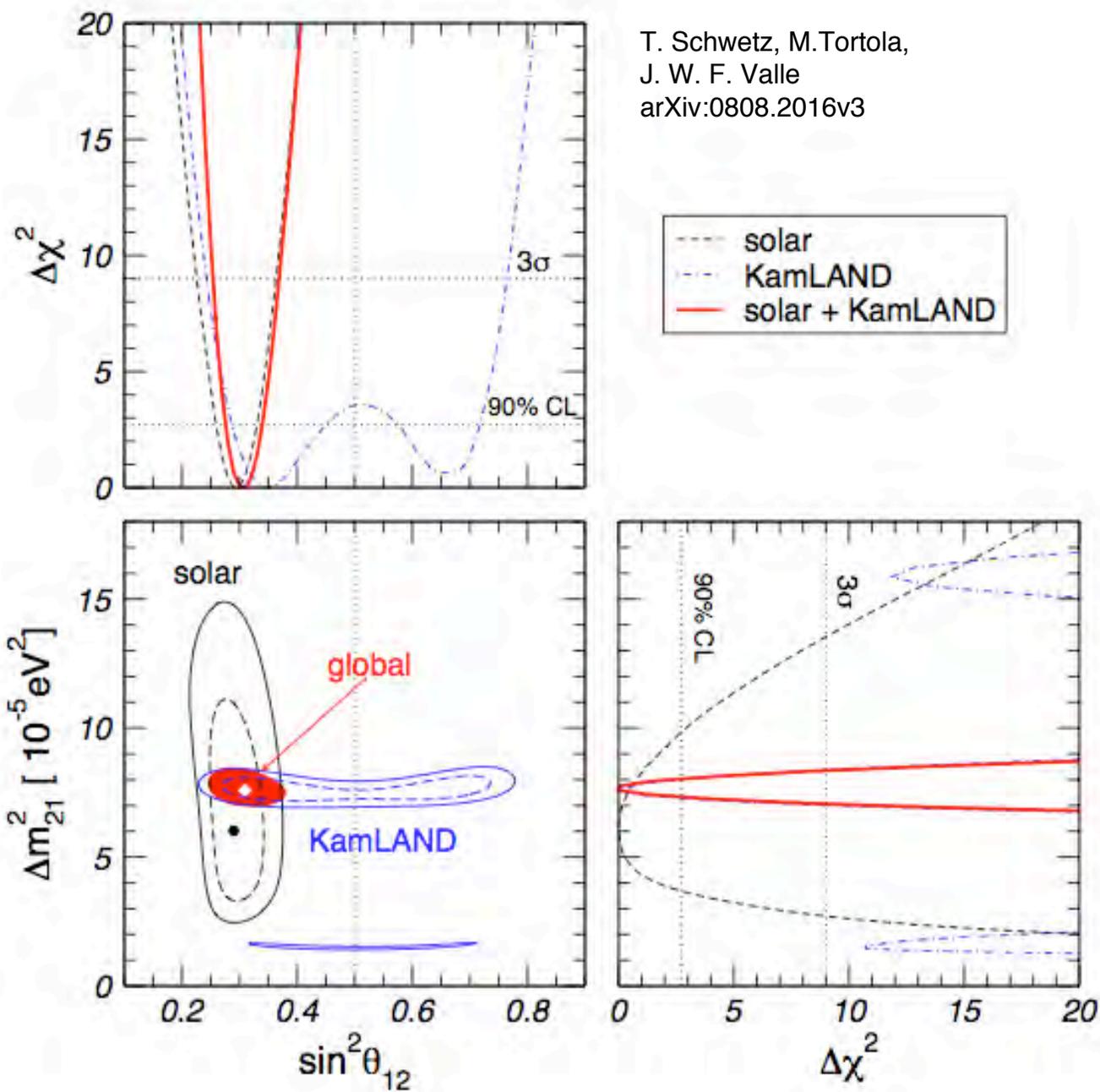


KamLand

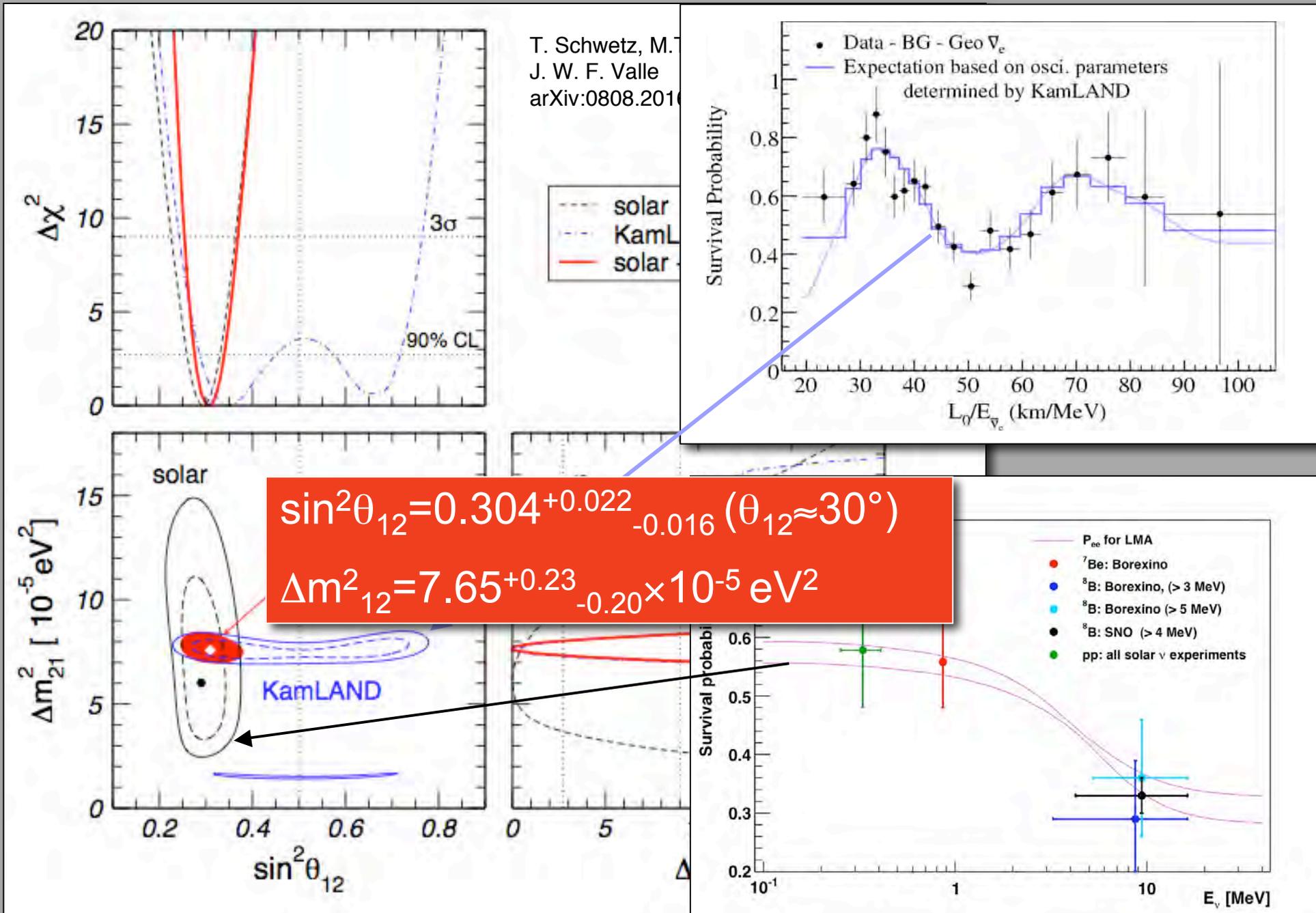


Sintonizzazione sulle onde lunghe ($E \sim \text{MeV}$)...

T. Schwetz, M. Tortola,
J. W. F. Valle
arXiv:0808.2016v3



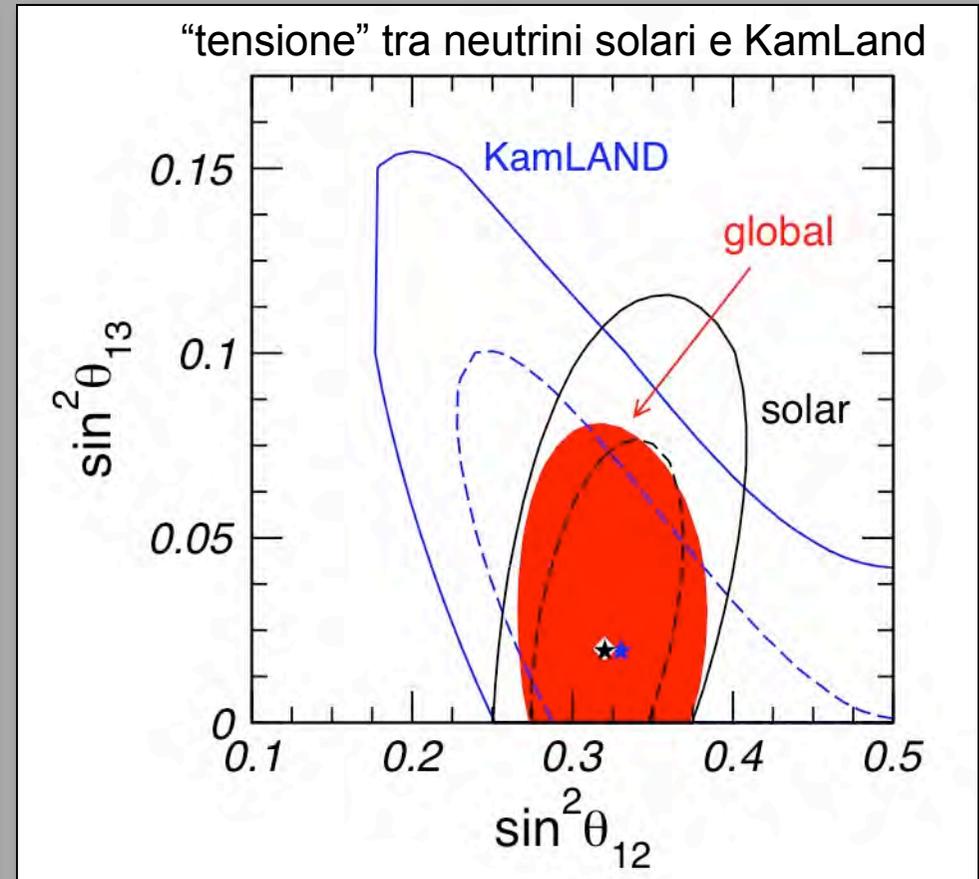
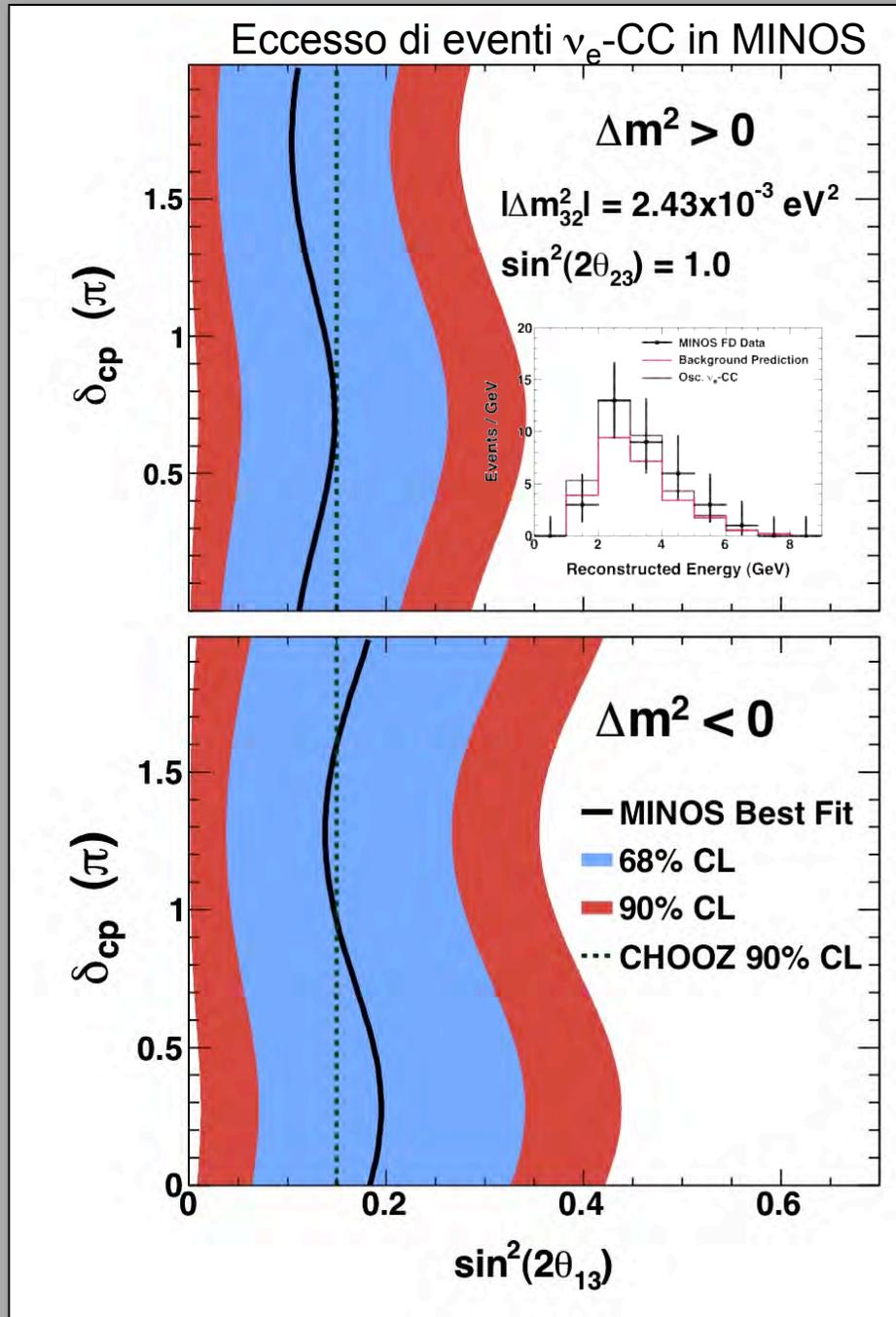
Sintonizzazione sulle onde lunghe ($E \sim \text{MeV}$)...



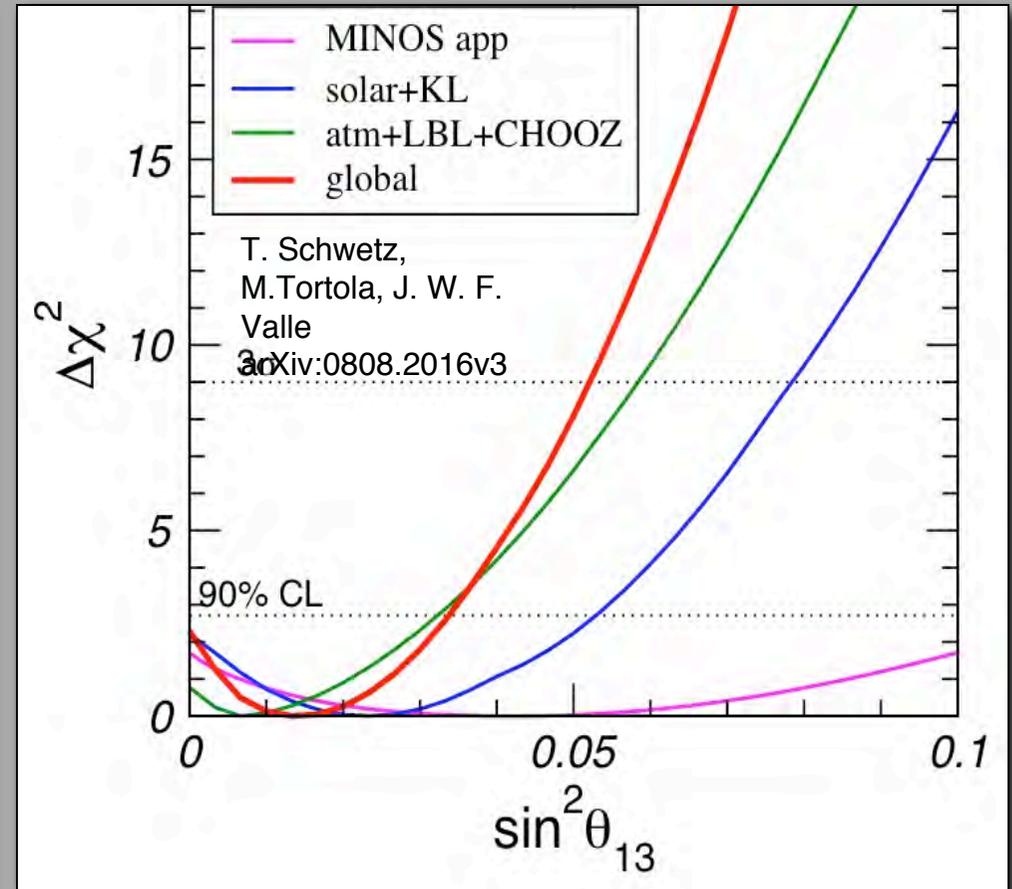
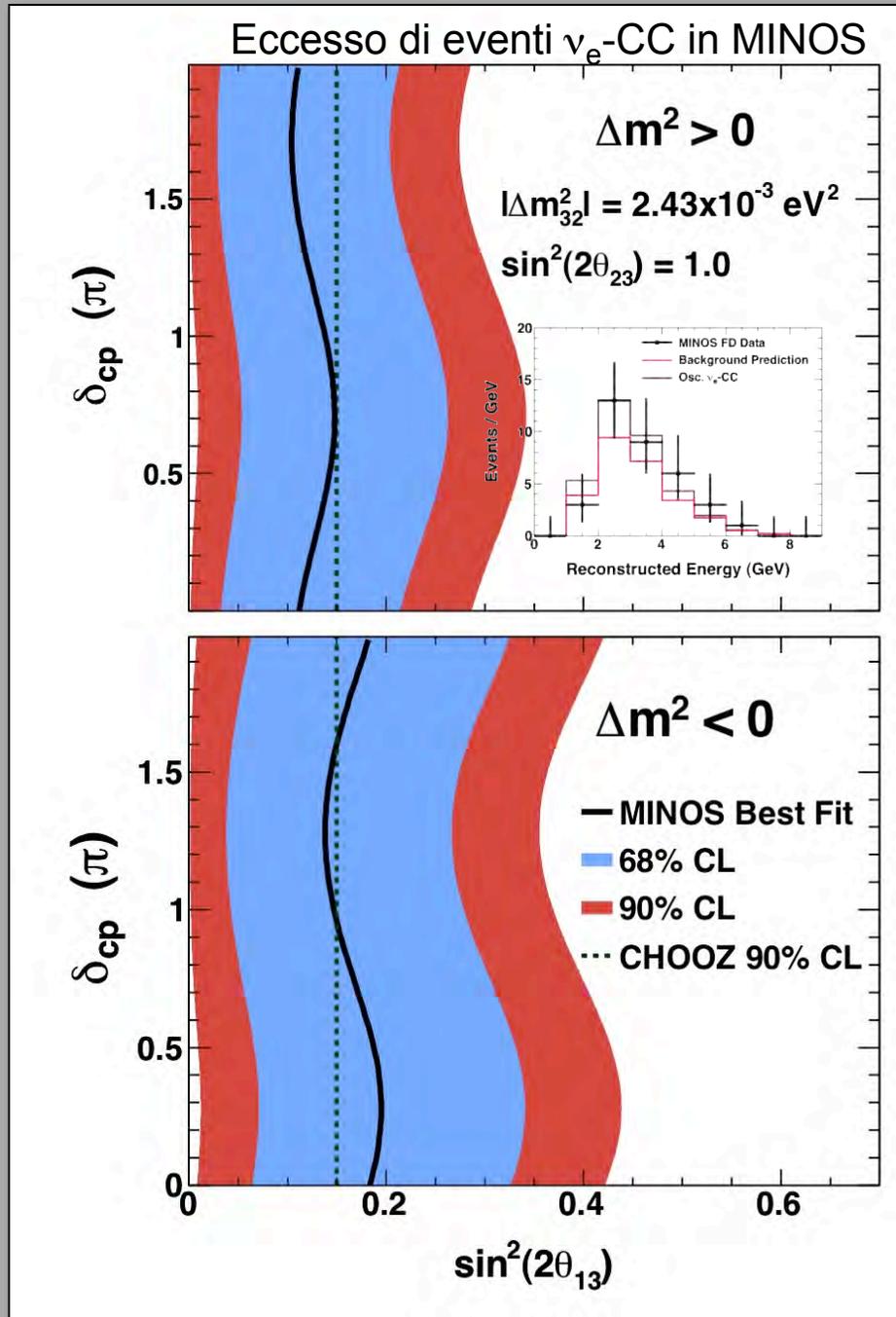
L'esplorazione della prima terra sconosciuta



Verso una misura di θ_{13} ?



Verso una misura di θ_{13} ?



$$\sin^2 \theta_{13} = 0.013^{+0.013}_{-0.009}$$

Prossime misure ai reattori

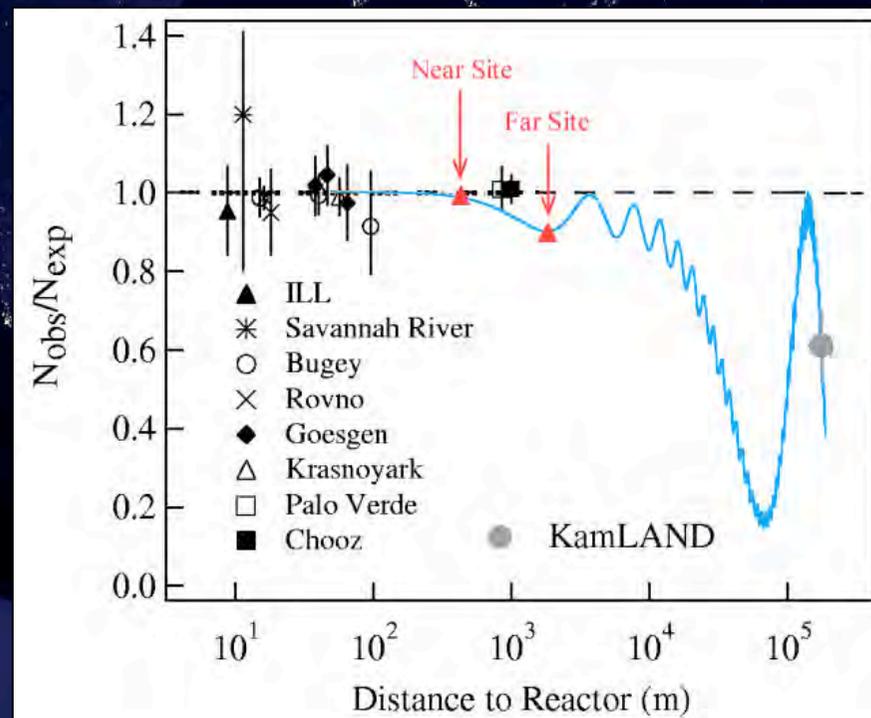


Limiti attesi (near + far, 3 yr):

Double CHOOZ: $\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$

Daya Bay: $\sin^2 2\theta_{13} < 0.01$

RENO: $\sin^2 2\theta_{13} < 0.02$

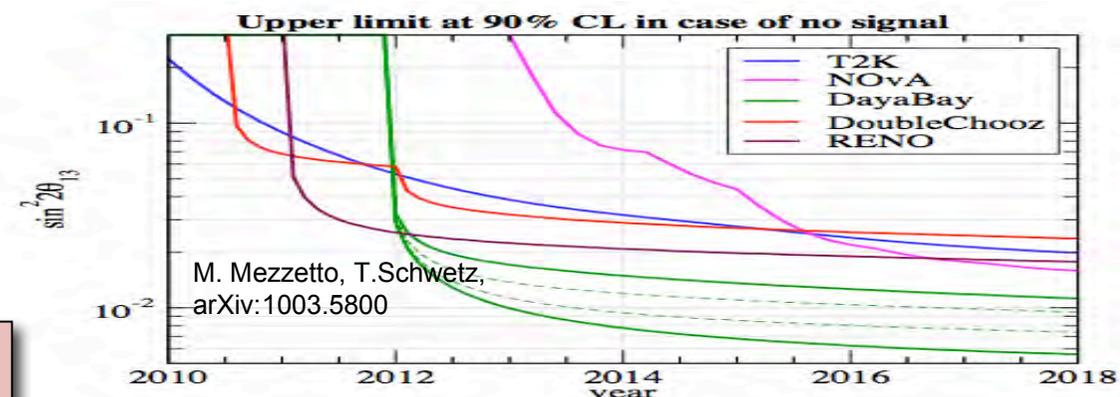


Roadmap per il futuro

Reattori Nucleari	Decadimento nucleare	Kamland Borexino	Parametri "solari"
		2 Chooz Altri progetti	$\sin^2 2\theta_{13} \lesssim 0.03$
Fasci convenzionali	Fasci secondari di protoni	K2K NuMI, CNGS T2K, T2KK, NOVA	Parametri "atmosferici" $\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.01$
Super-Beam	Fasci primari di protoni > 1 MW	Super-JHF, Super-NuMI, ...	$\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.001$
"Beta beam"	Decadimenti nucleari (alto fattore di Lorentz)	R&D	$\sin^2 2\theta_{13} \sim 0.0001$
Neutrino factory	Anello di immagazzinamento di muoni $\mu \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$	R&D 	Violazioni di CP Gerarchia di massa

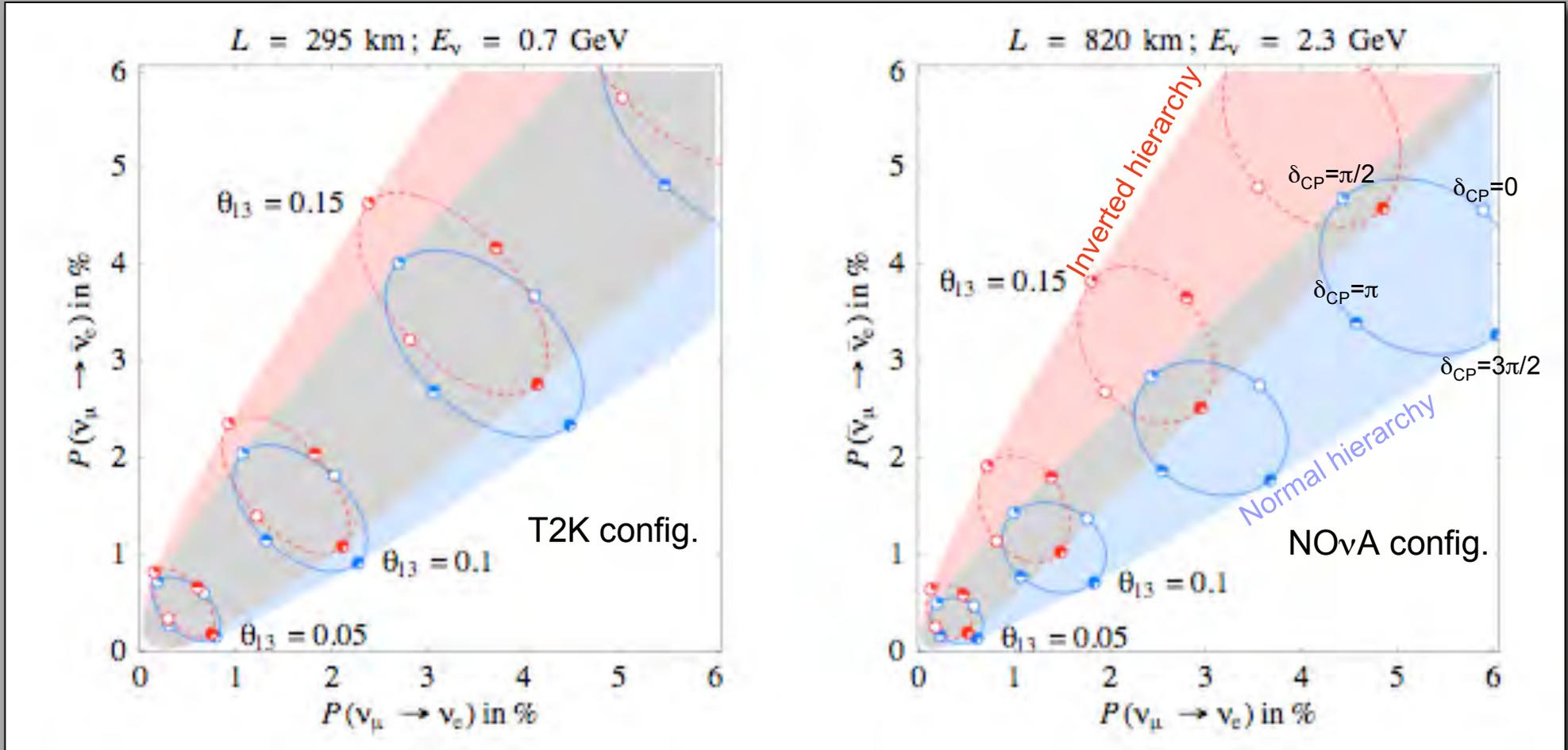
Inoltre: possibilità di studiare eventuali accoppiamenti non standard (es. FCNC) dei neutrini con la materia

Vedere il talk di Pasquale Migliozzi

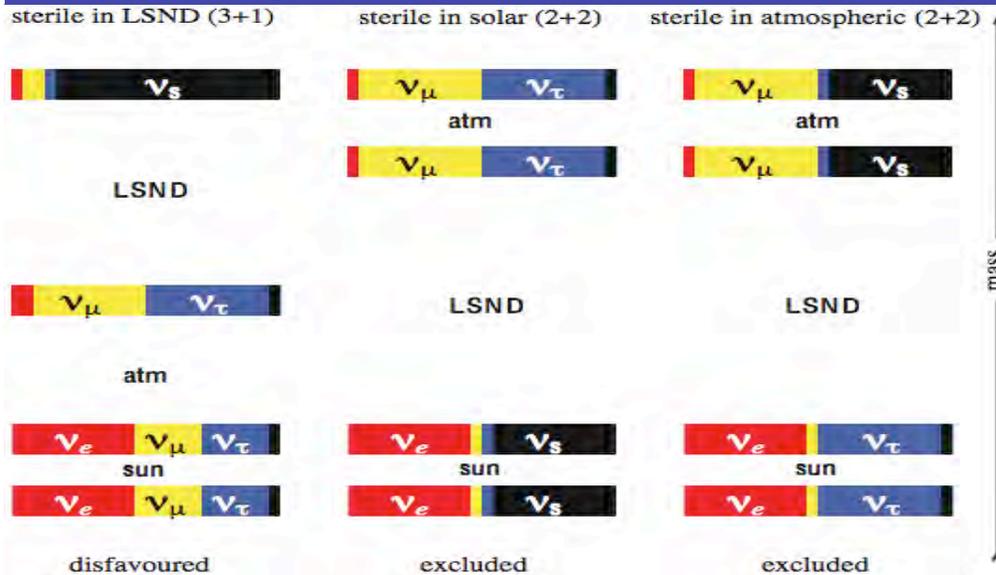


Violazioni di CP

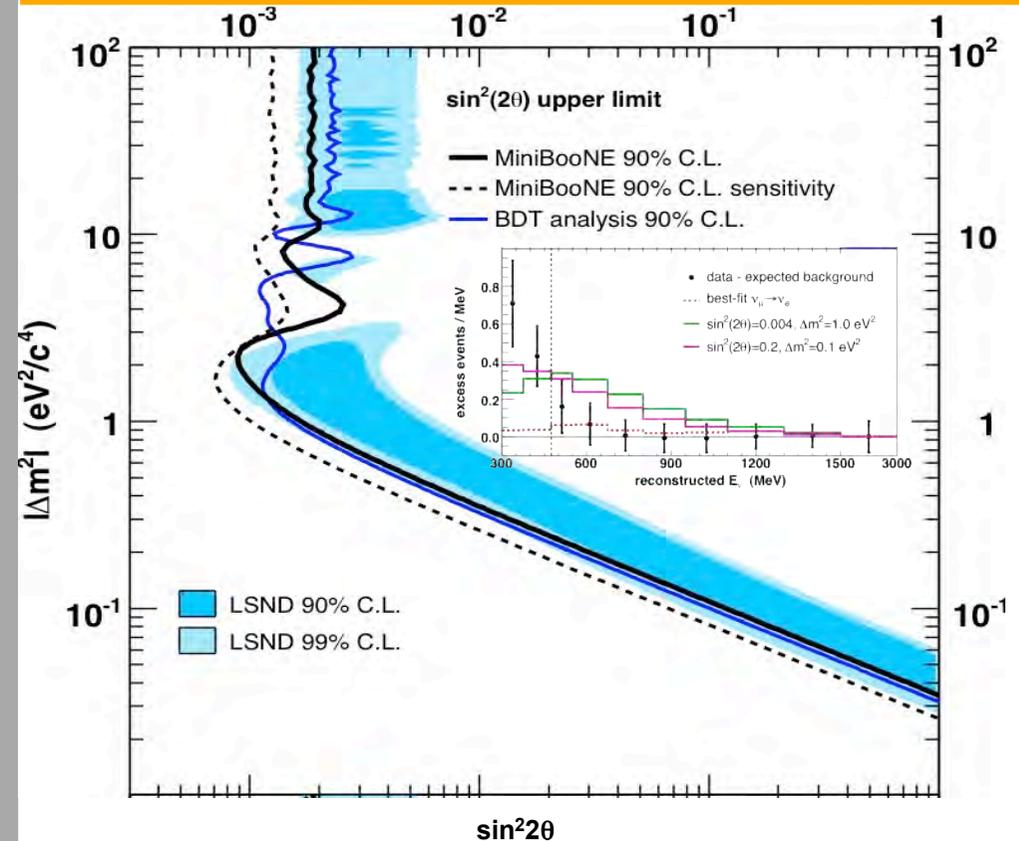
La conoscenza di θ_{13} può aprire la strada alla conoscenza delle violazioni di CP nel settore leptonic



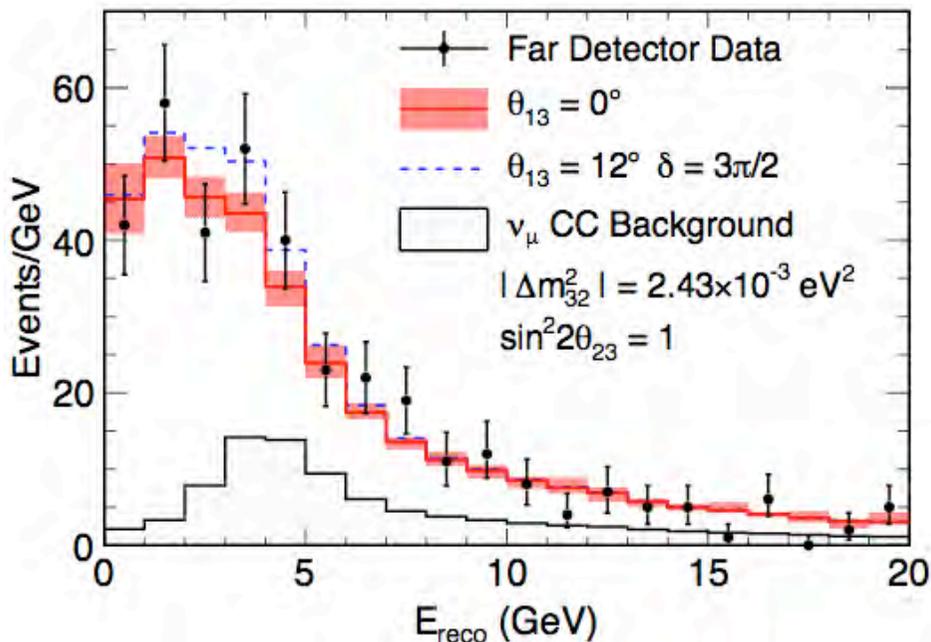
Nella Terra incognita vivono neutrini sterili?



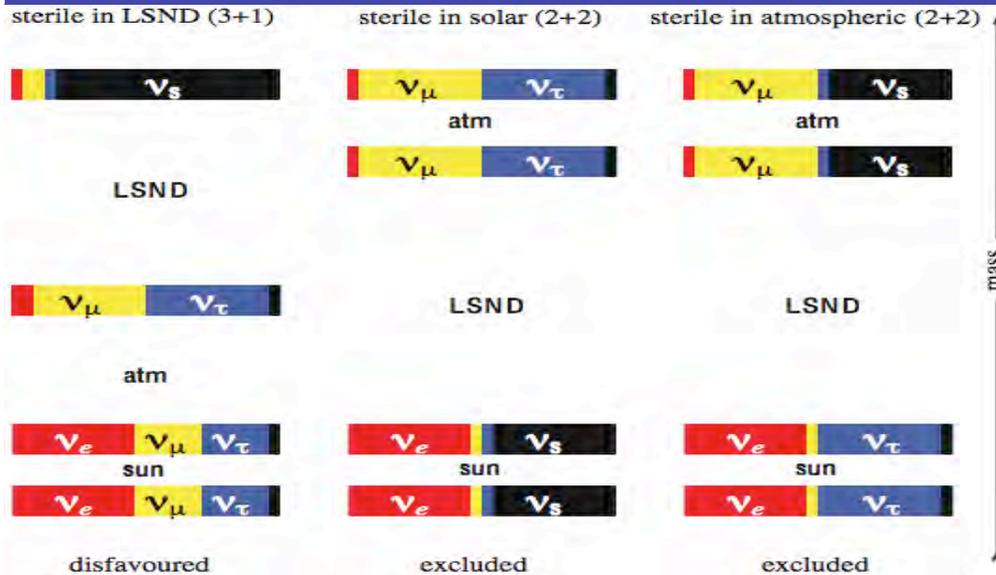
Evidenza di LSND per oscillazioni $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ alla scala dell' eV^2 non confermata da MiniBOONE



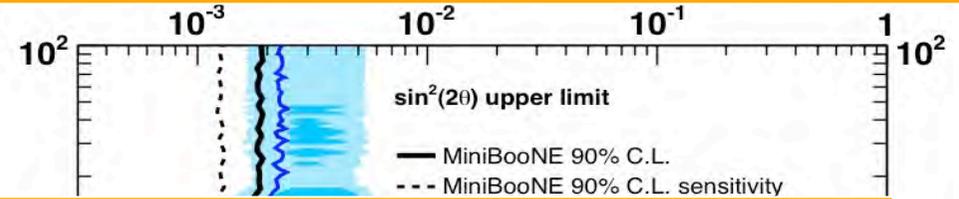
Nessuna evidenza di "sparizione" di neutrini nel numero di eventi di corrente neutra in MINOS



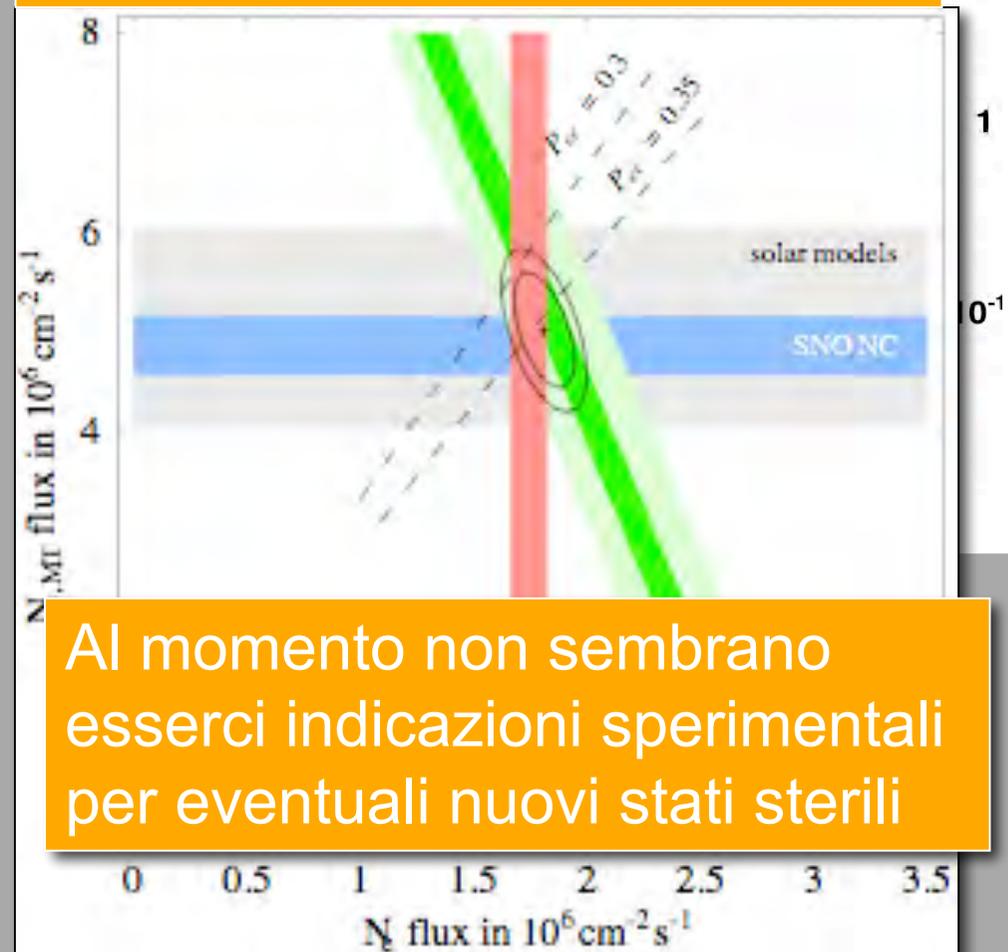
Nella terra incognita vivono neutrini sterili?



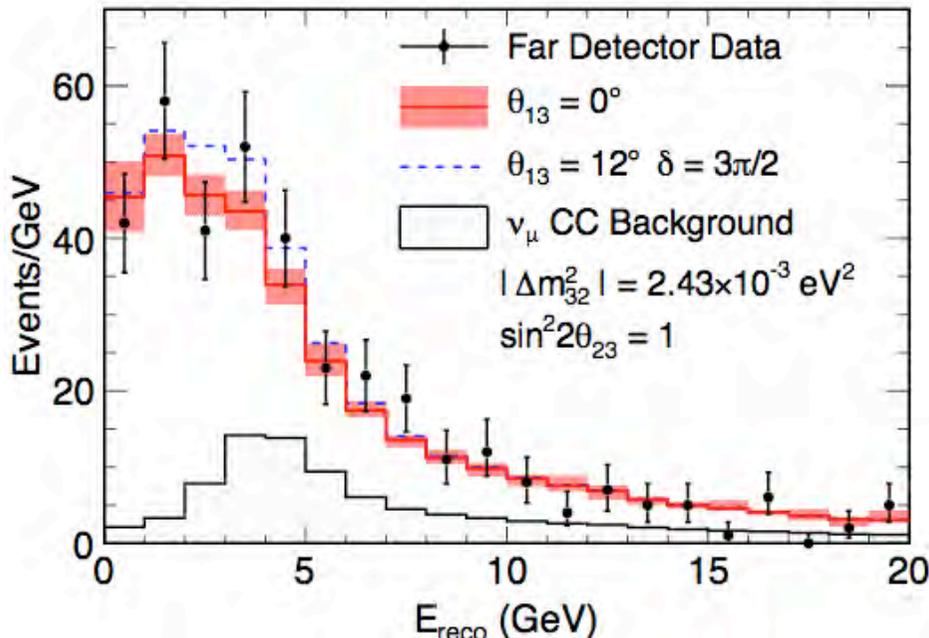
Evidenza di LSND per oscillazioni $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ alla scala dell' eV^2 non confermata da MiniBOONE



Il flusso di neutrini solari dal 8B misurato da SNO è compatibile con il flusso atteso dai modelli solari



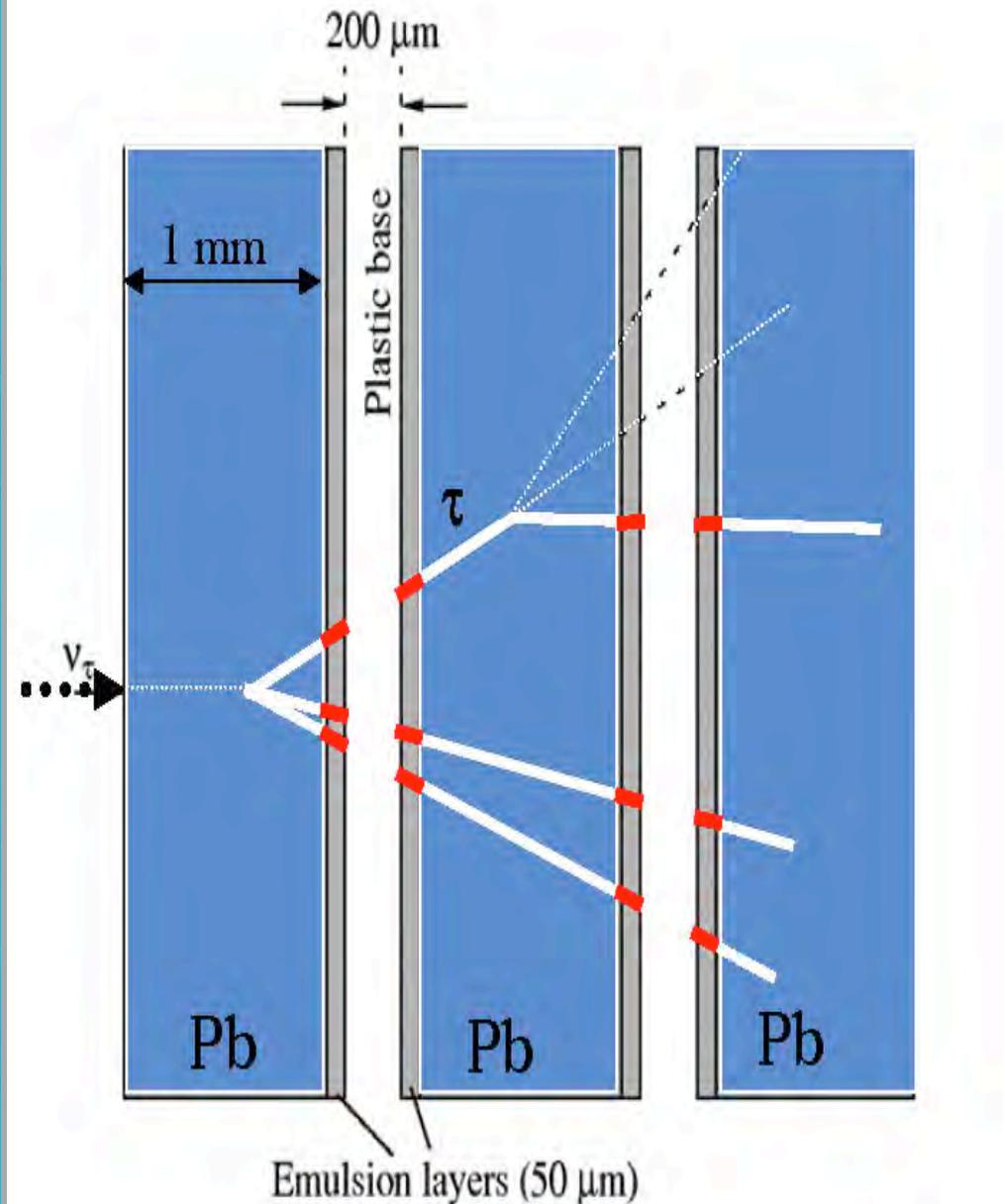
Nessuna evidenza di "sparizione" di neutrini nel numero di eventi di corrente neutra in MINOS



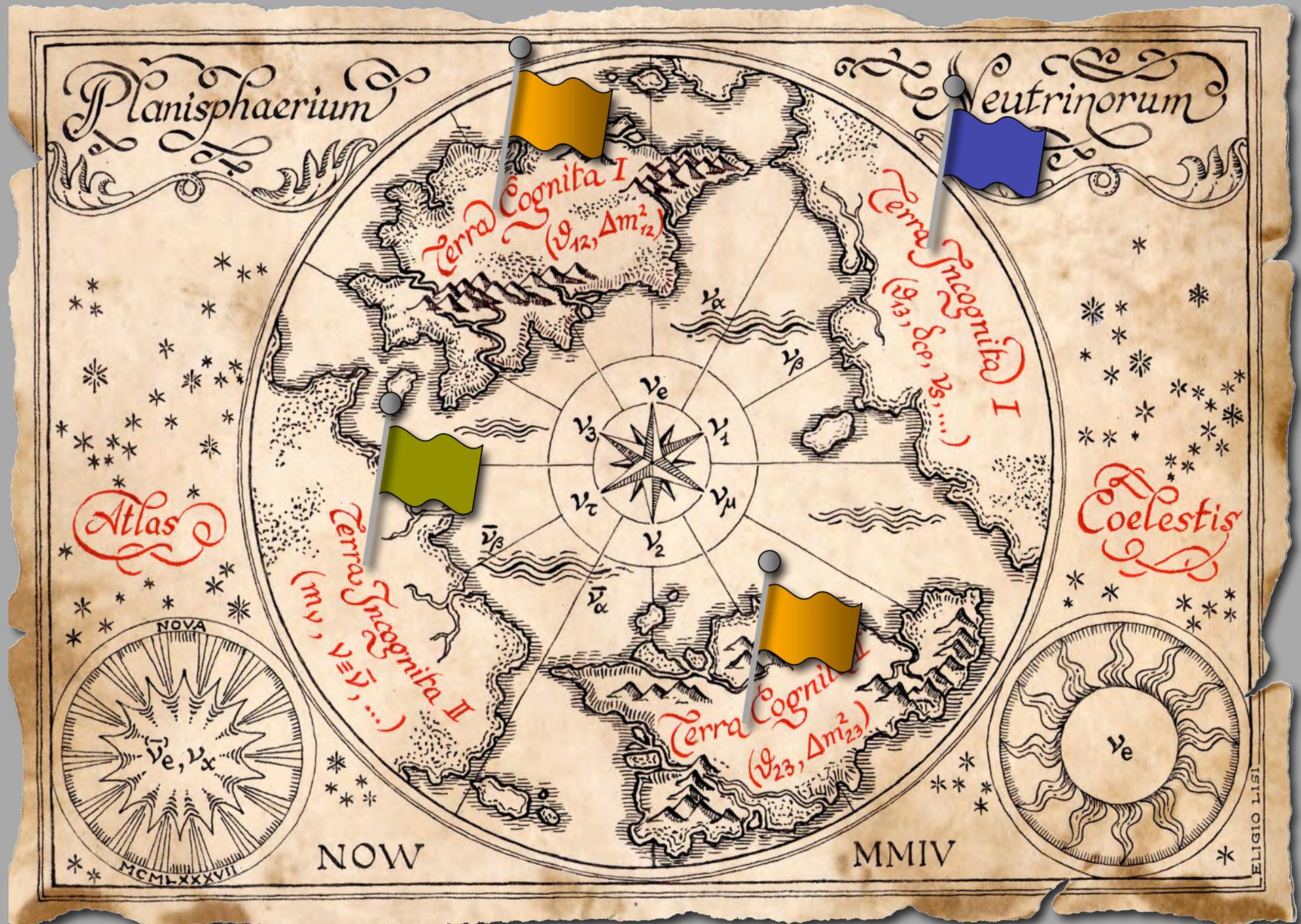
Al momento non sembrano esserci indicazioni sperimentali per eventuali nuovi stati sterili

Apparizione del ν_τ

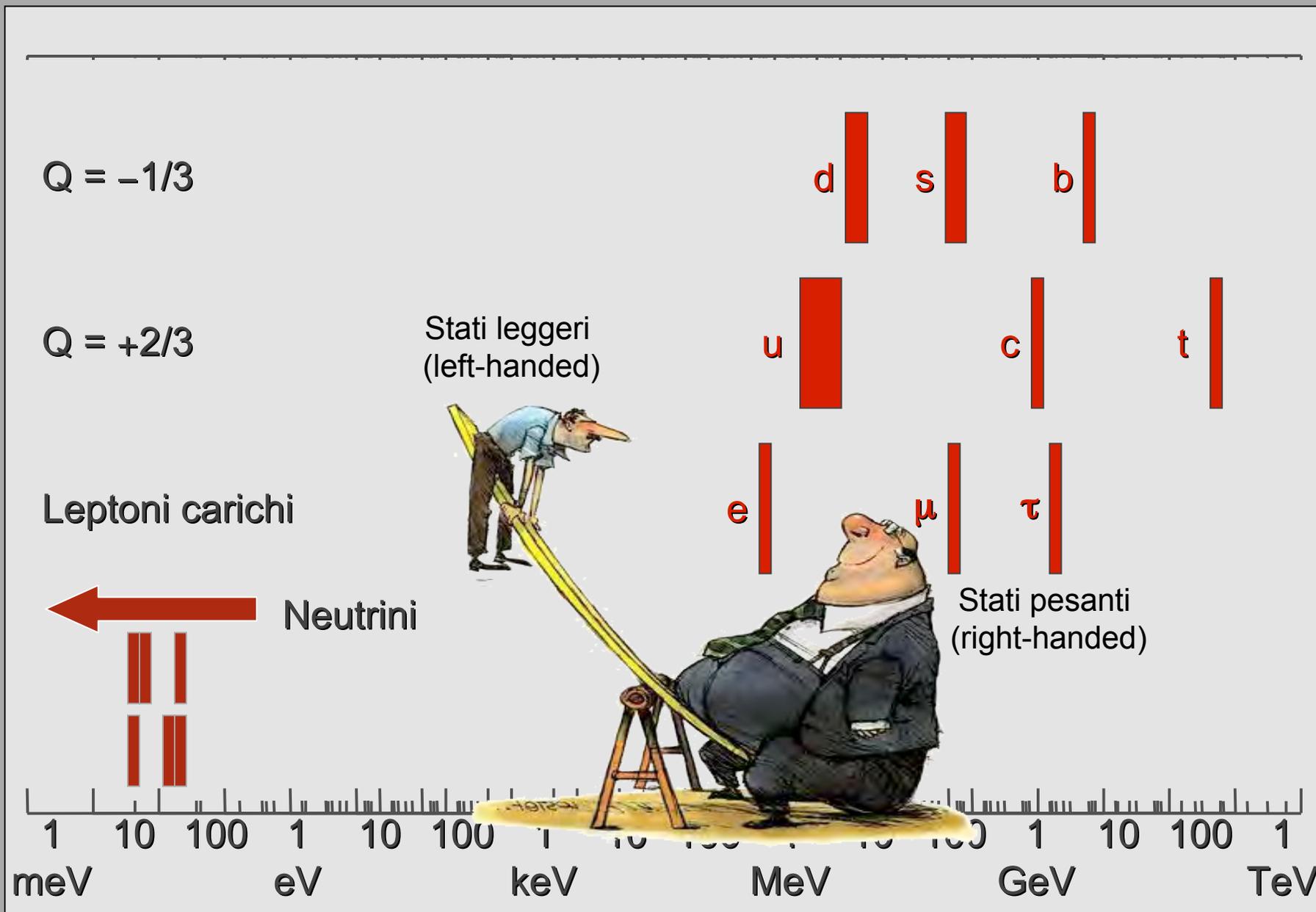
Un vero evento di tau potrebbe già celarsi nella statistica raccolta finora da OPERA...



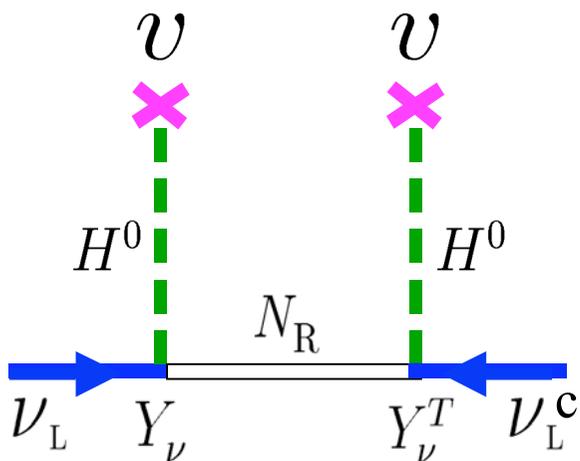
L'esplorazione della seconda terra sconosciuta



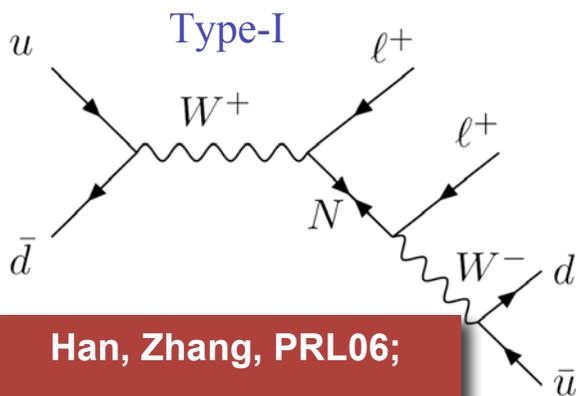
Lo spettro di massa dei fermioni del Modello Standard



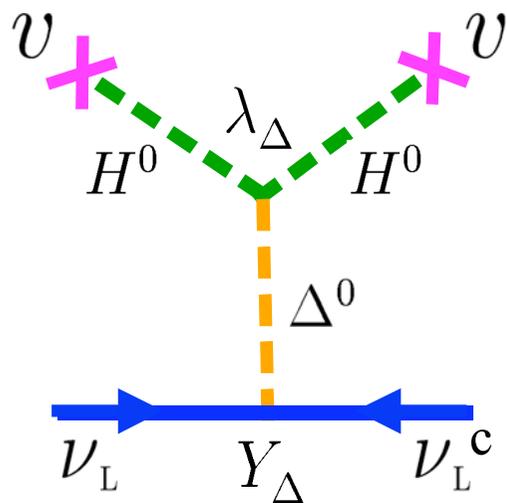
Meccanismo See-Saw verificabile a LHC?



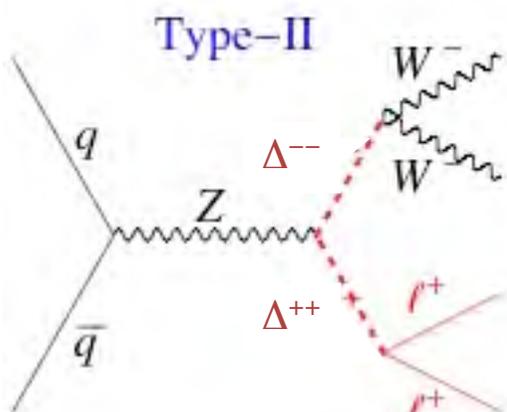
$$M_\nu \approx -v^2 Y_\nu \frac{1}{M_R} Y_\nu^T$$



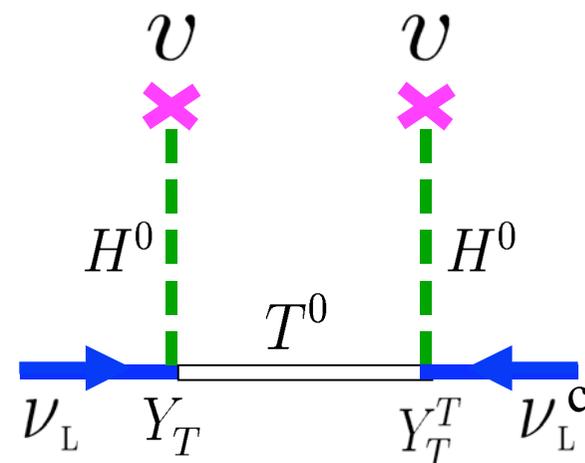
Han, Zhang, PRL06;
del Aguila et al, JHEP07



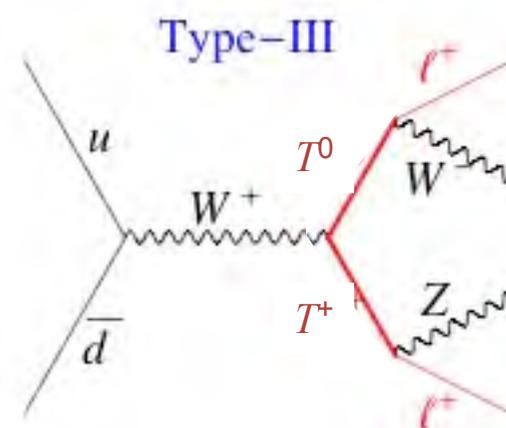
$$M_\nu \approx \lambda_\Delta Y_\Delta \frac{v^2}{M_\Delta}$$



Han et al PRD07;
Fileviez, Perez et al 08



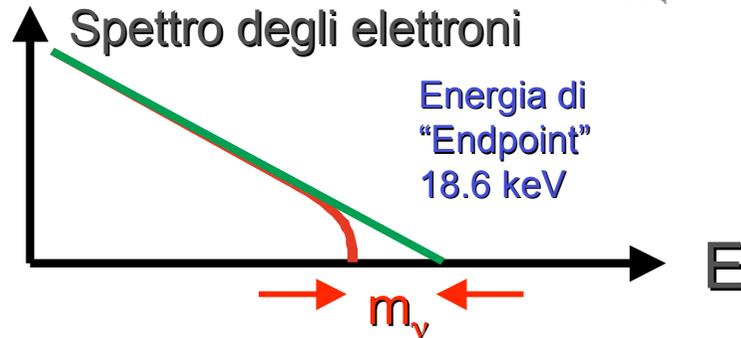
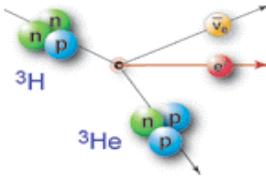
$$M_\nu \approx -v^2 Y_T \frac{1}{M_T} Y_T^T$$



Bajc et al, PRD 07, JHEP 07;
Franceschini et al 08

Le misure dirette della massa del neutrino

Decadimento β del trizio



Sensibile alla quantità

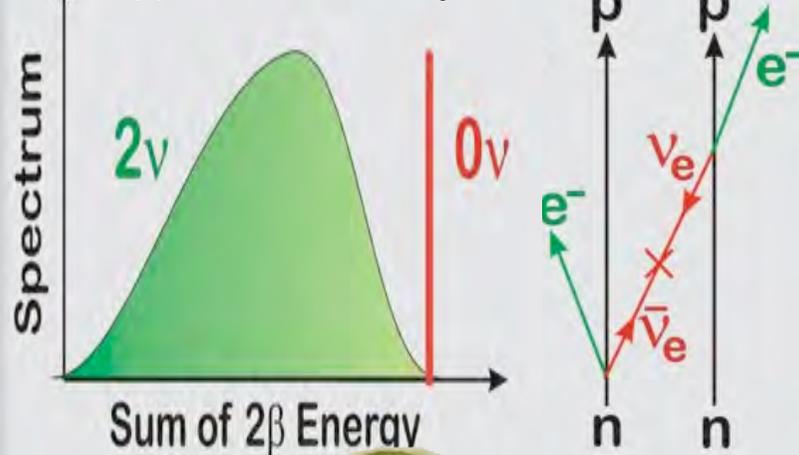
$$m_\beta = \sqrt{\sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i^2}$$

$$= \sqrt{\cos^2 \theta_{13} [\cos^2 \theta_{12} m_1^2 + \sin^2 \theta_{12} m_2^2] + \sin^2 \theta_{13} m_3^2}$$

Limite attuale:

$$m_\beta \leq 2.1 \text{ eV}$$

Doppio decadimento β senza neutrini



Sensibile alla quantità

$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right|$$

$$= \left| \cos^2 \theta_{13} [\cos^2 \theta_{12} e^{i\varphi_1} m_1 + \sin^2 \theta_{12} e^{i\varphi_2} m_2] + \sin^2 \theta_{13} m_3 \right|$$

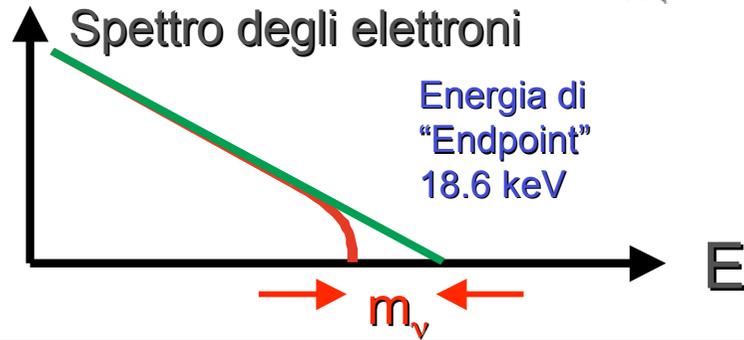
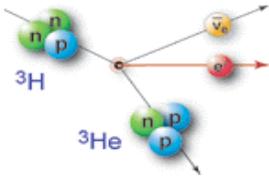
Limite attuale:

$$m_{\beta\beta} \leq 0.39 \text{ eV} \text{ ma...}$$



Le misure dirette della massa del neutrino

Decadimento β del trizio



Sensibile alla quantità

$$m_\beta = \sqrt{\sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i^2}$$

$$= \sqrt{\cos^2 \theta_{13} [\cos^2 \theta_{12} m_1^2 + \sin^2 \theta_{12} m_2^2] + \sin^2 \theta_{13} m_3^2}$$

Limite attuale:

$$m_\beta \leq 2.1 \text{ eV}$$

Doppio decadimento β senza neutrini

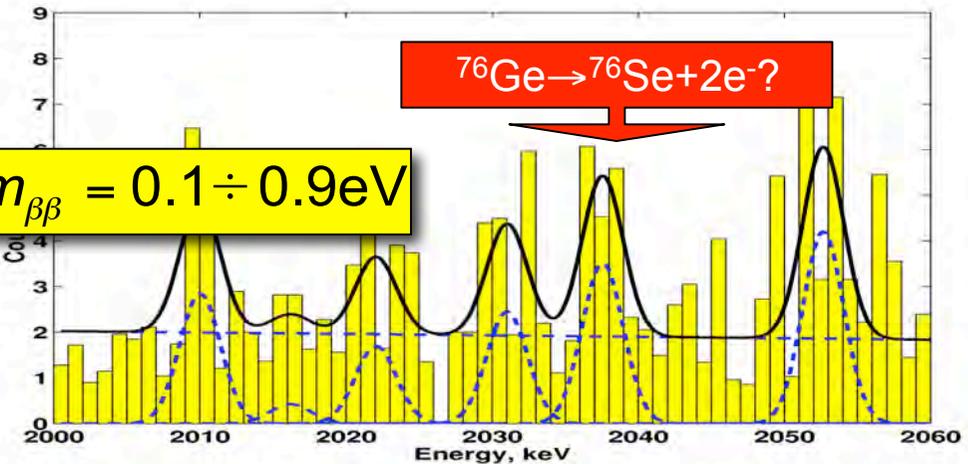
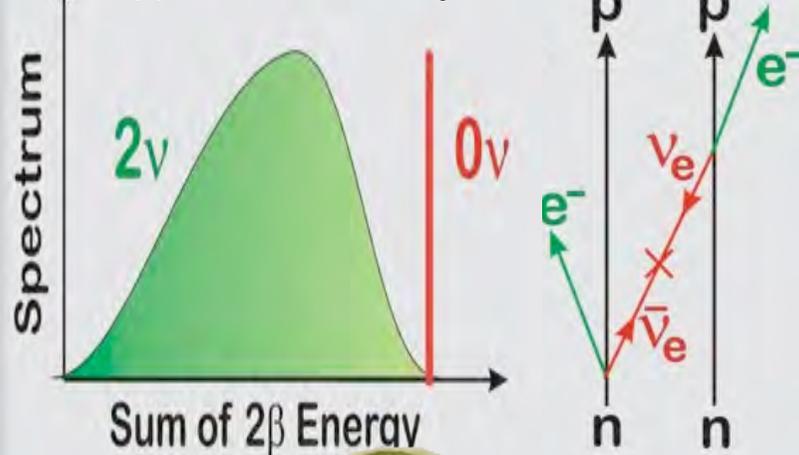


Fig. 31. The single site sum spectrum of the four detectors 2,3,4,5 for the period November 1995 to May 2003 (51.389 kg y), and its fit (see section 3), in the range 2000 - 2060 keV.

H.V. Klapdor-Kleingrothaus et al.: Exp "Heidelberg Moscow" (Gran Sasso) 1990-2003, arXiv:hep-ph/0403018

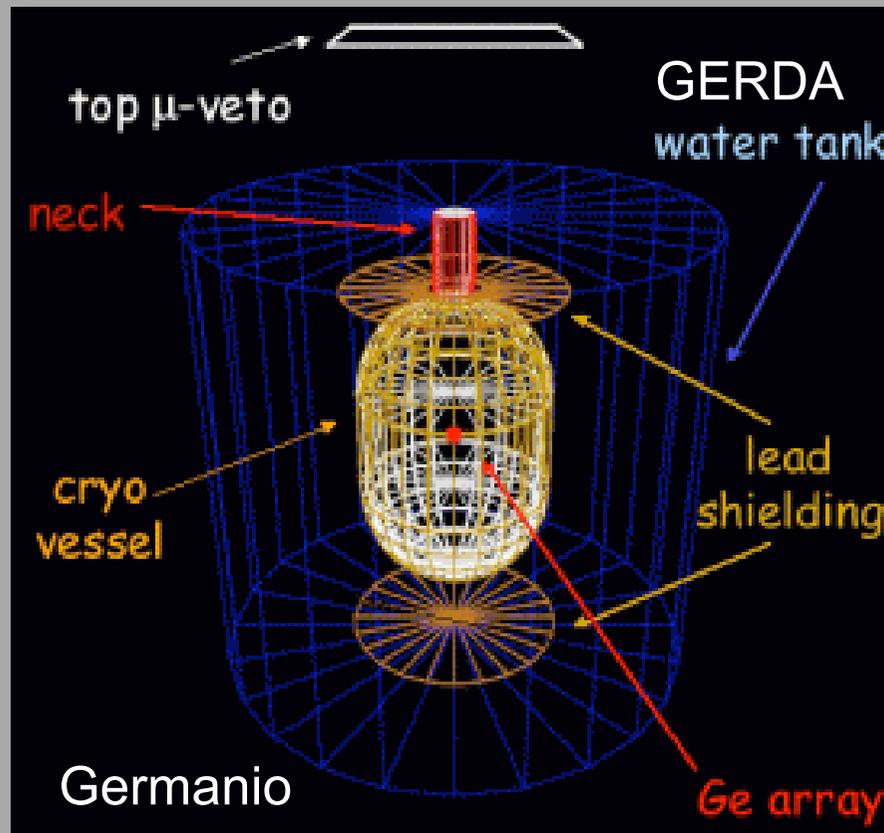
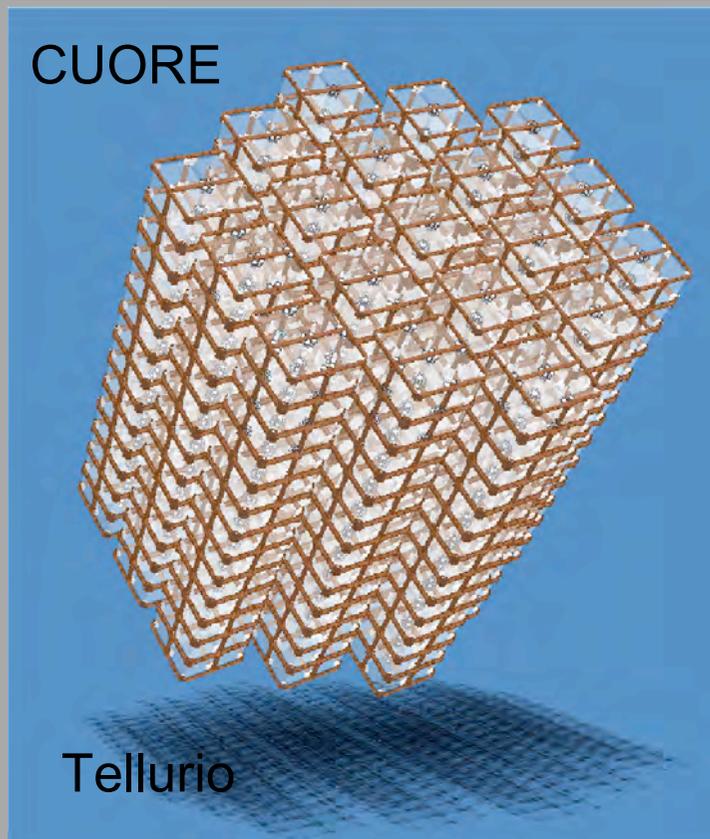
Misure future



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

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

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



Vedere il talk di Stefano Pirro

Misure future



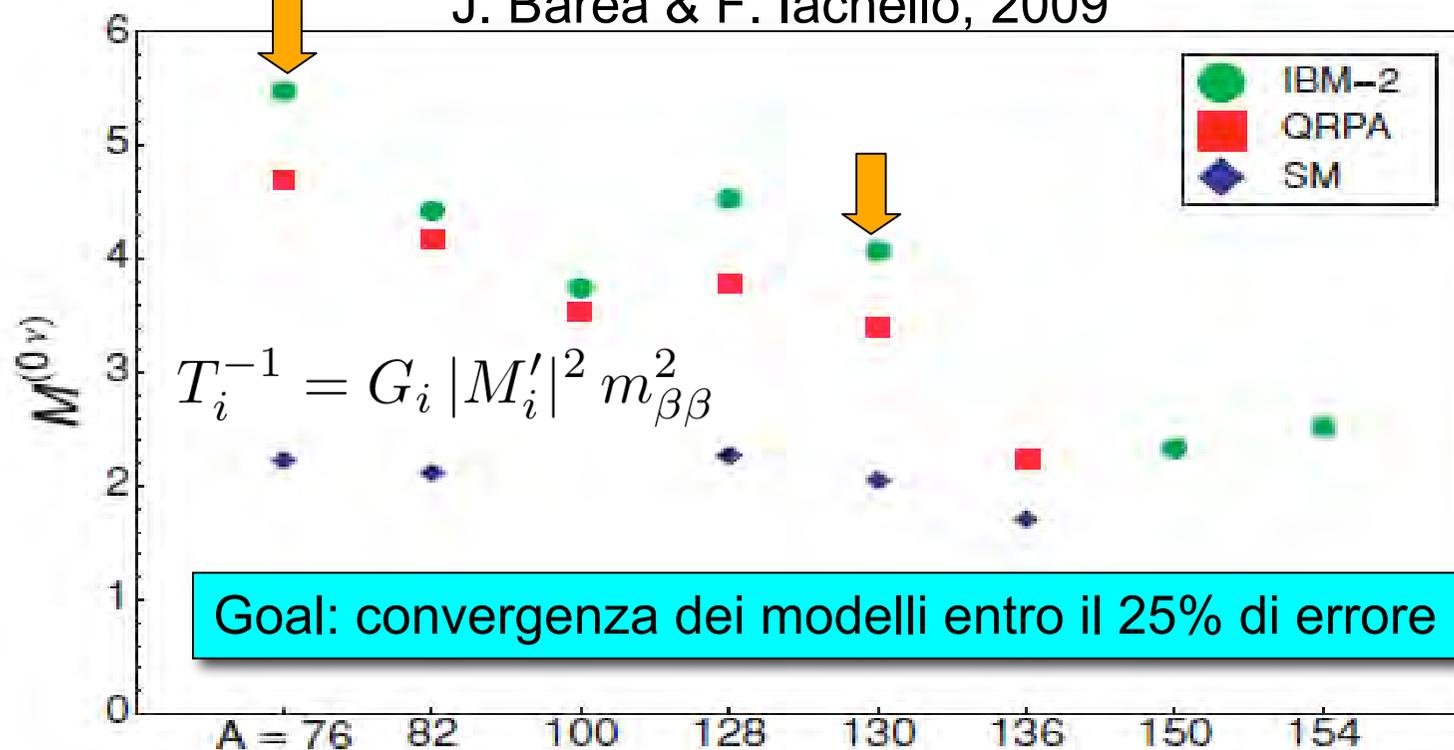
KATRIN

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

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

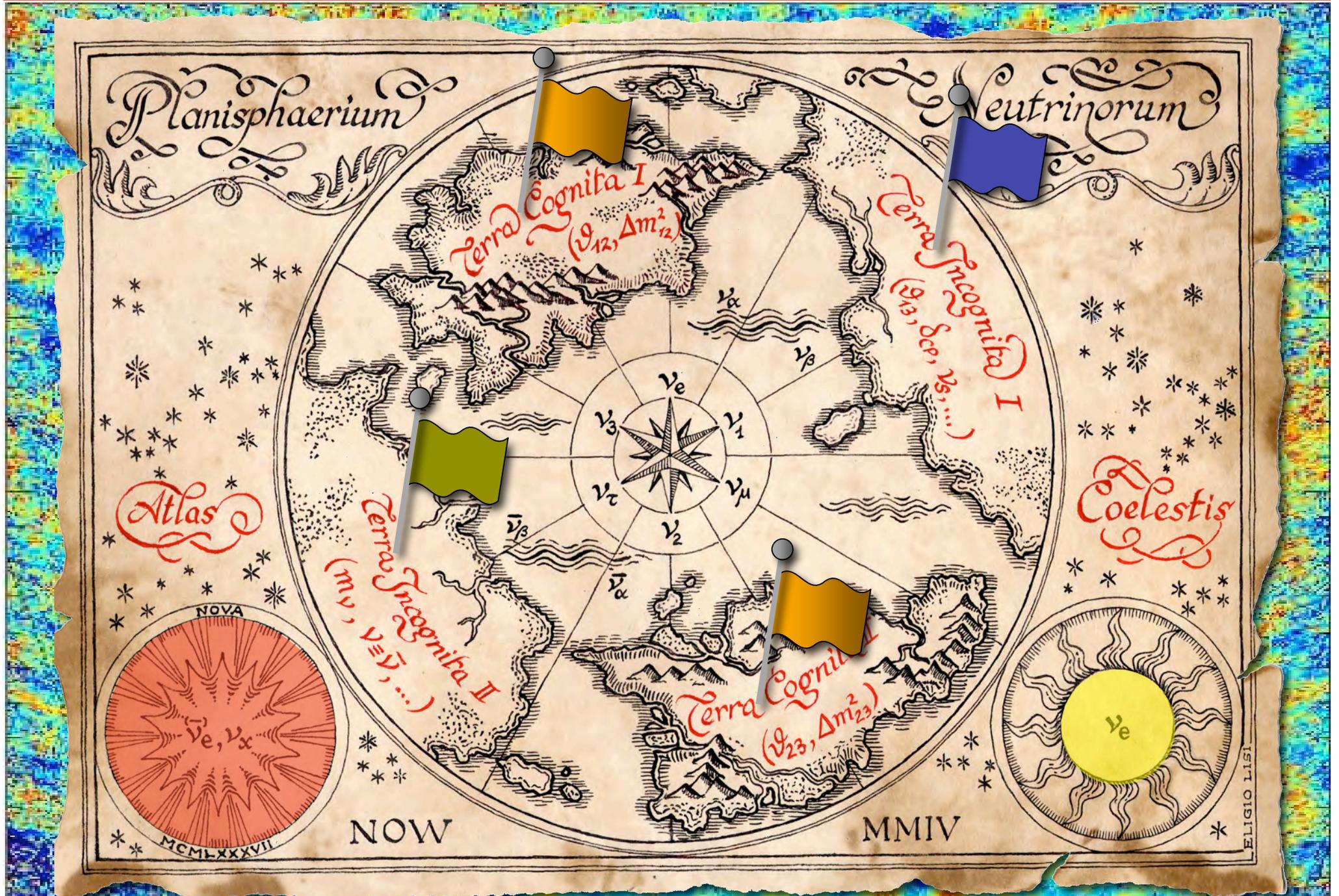
$$m_{\beta} = 0 \pm 0.12 \quad (<0.2 \text{ al } 90\% \text{ CL})$$

J. Barea & F. Iachello, 2009



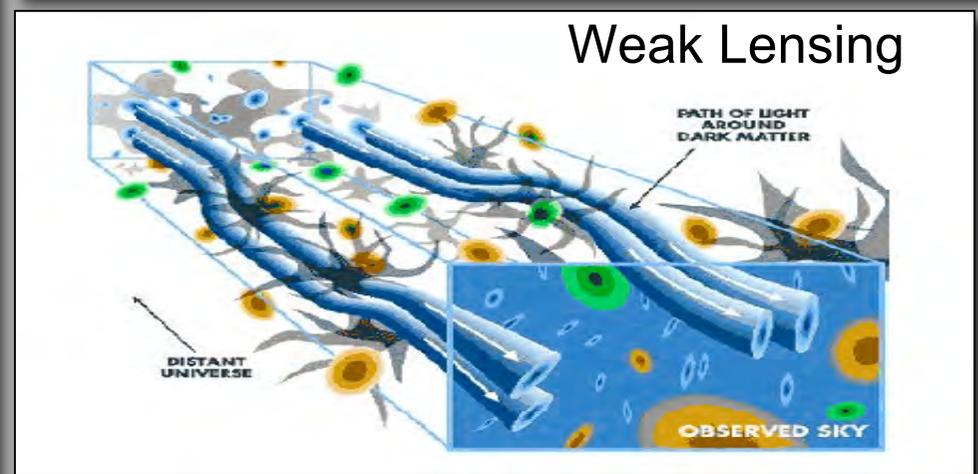
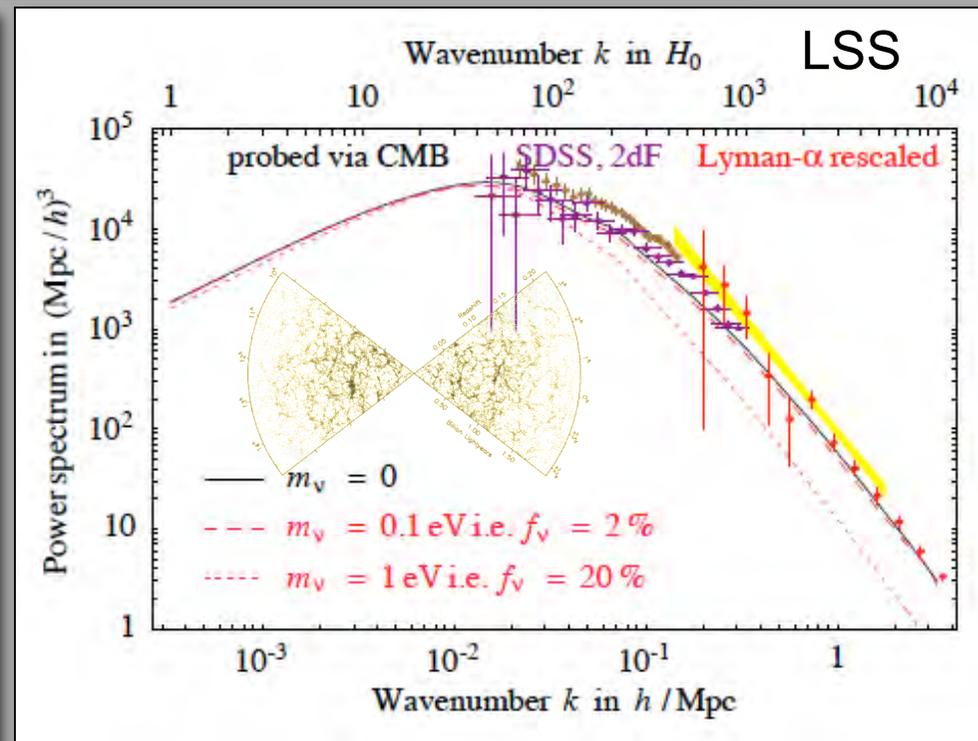
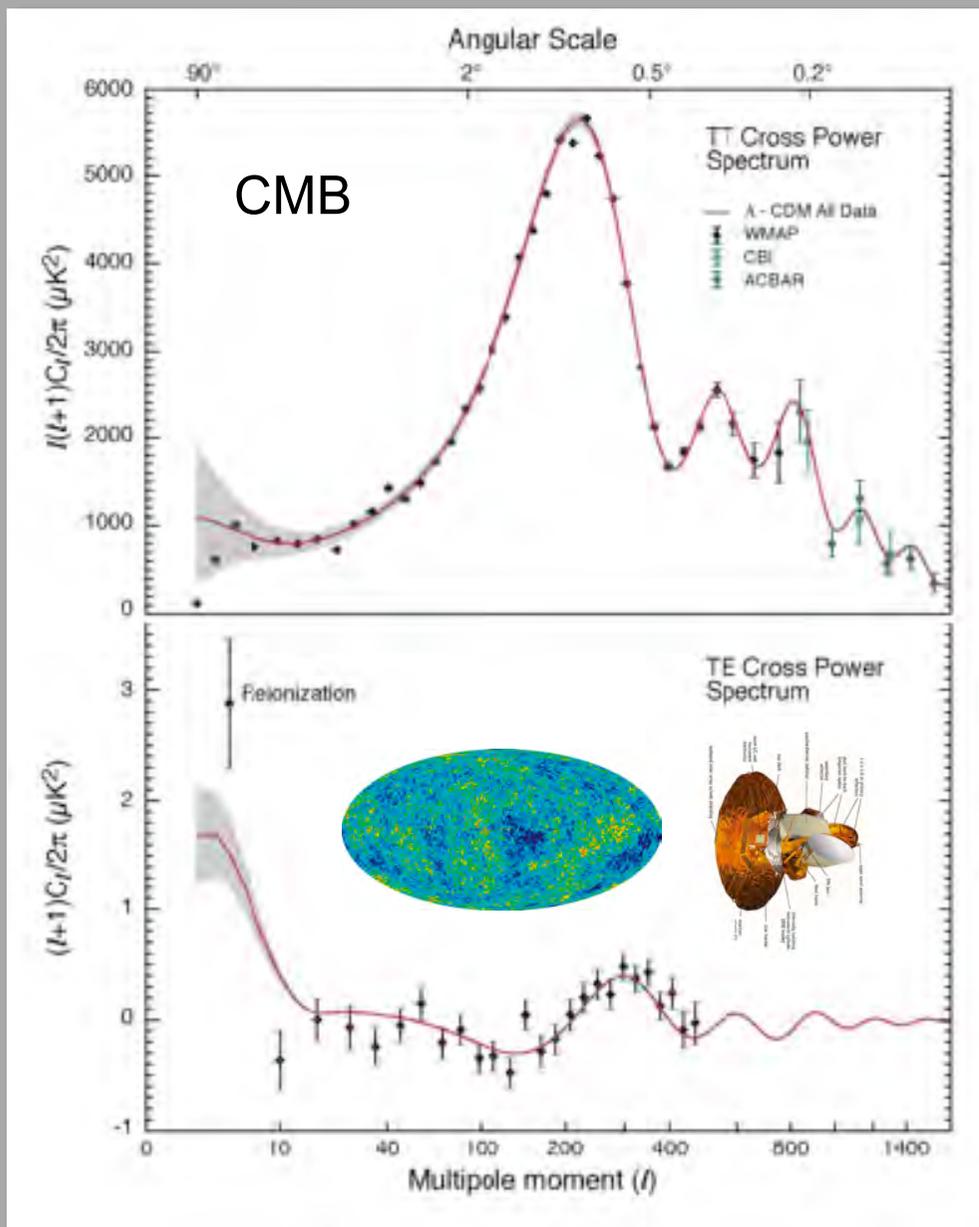
Vedere il talk di Stefano Pirro

Per aspera ad astra



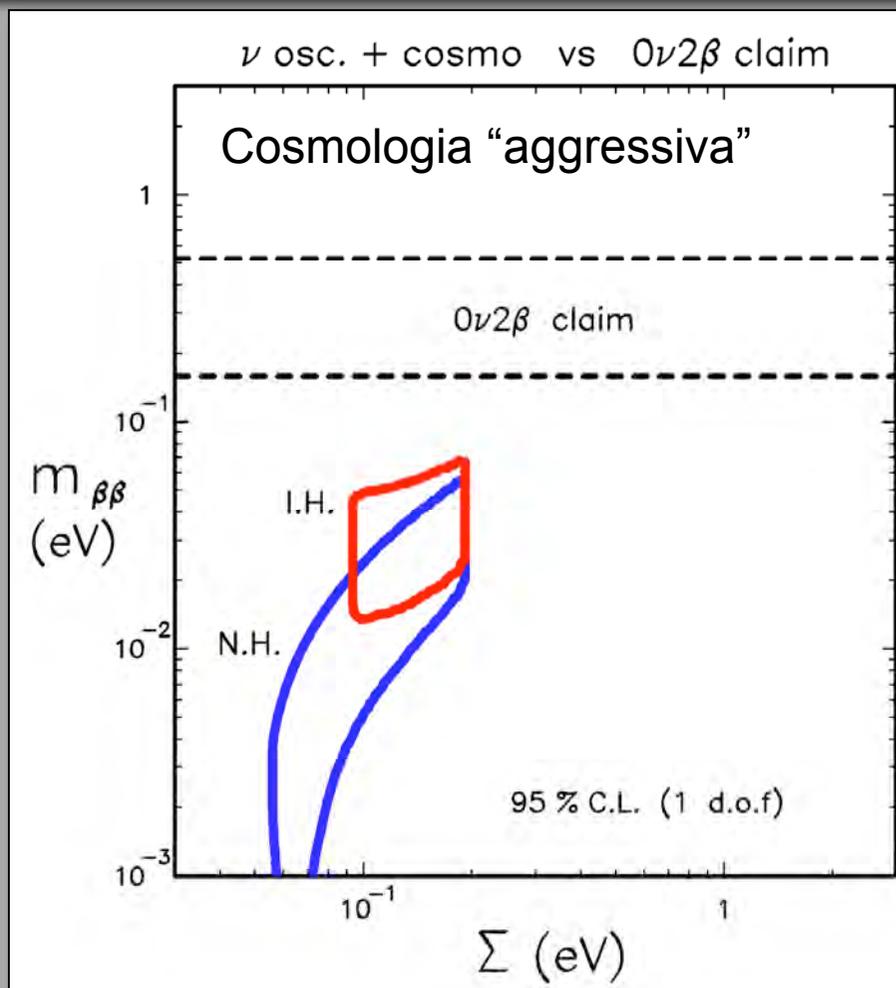
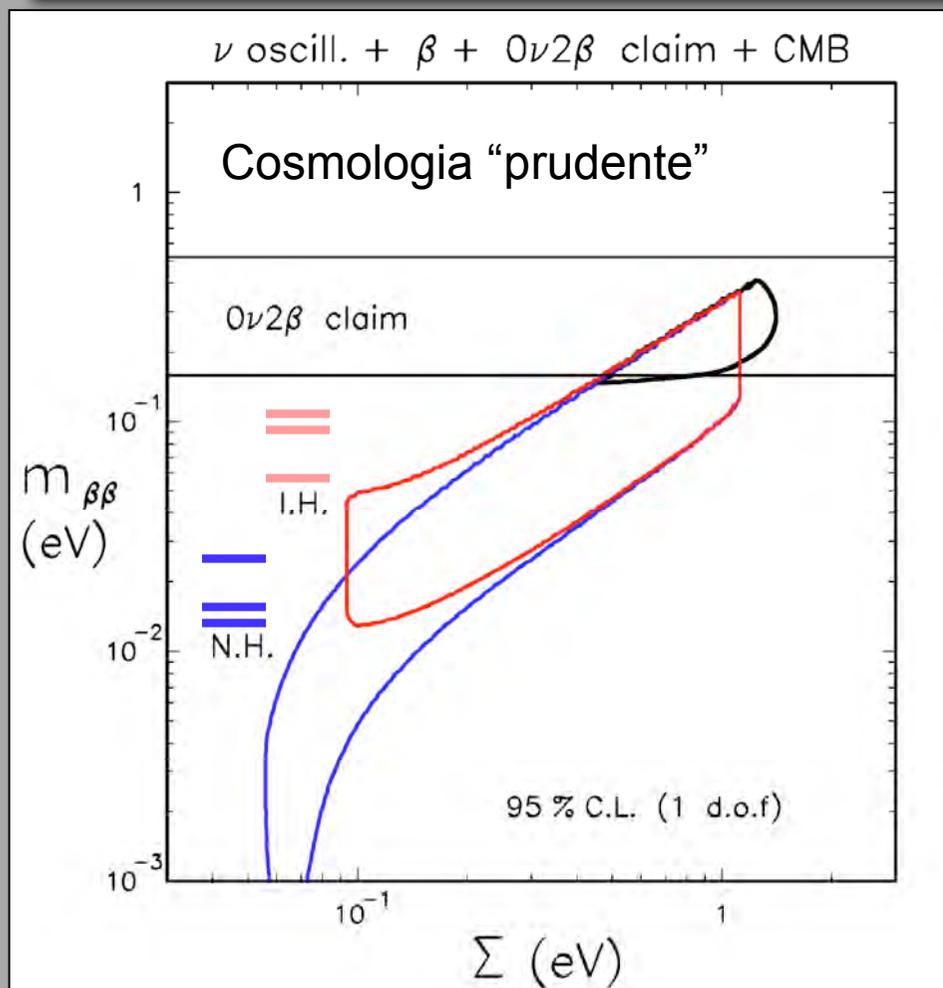
Massa dei neutrini & Cosmologia

I neutrini "relic" hanno un ruolo fondamentale in cosmologia.



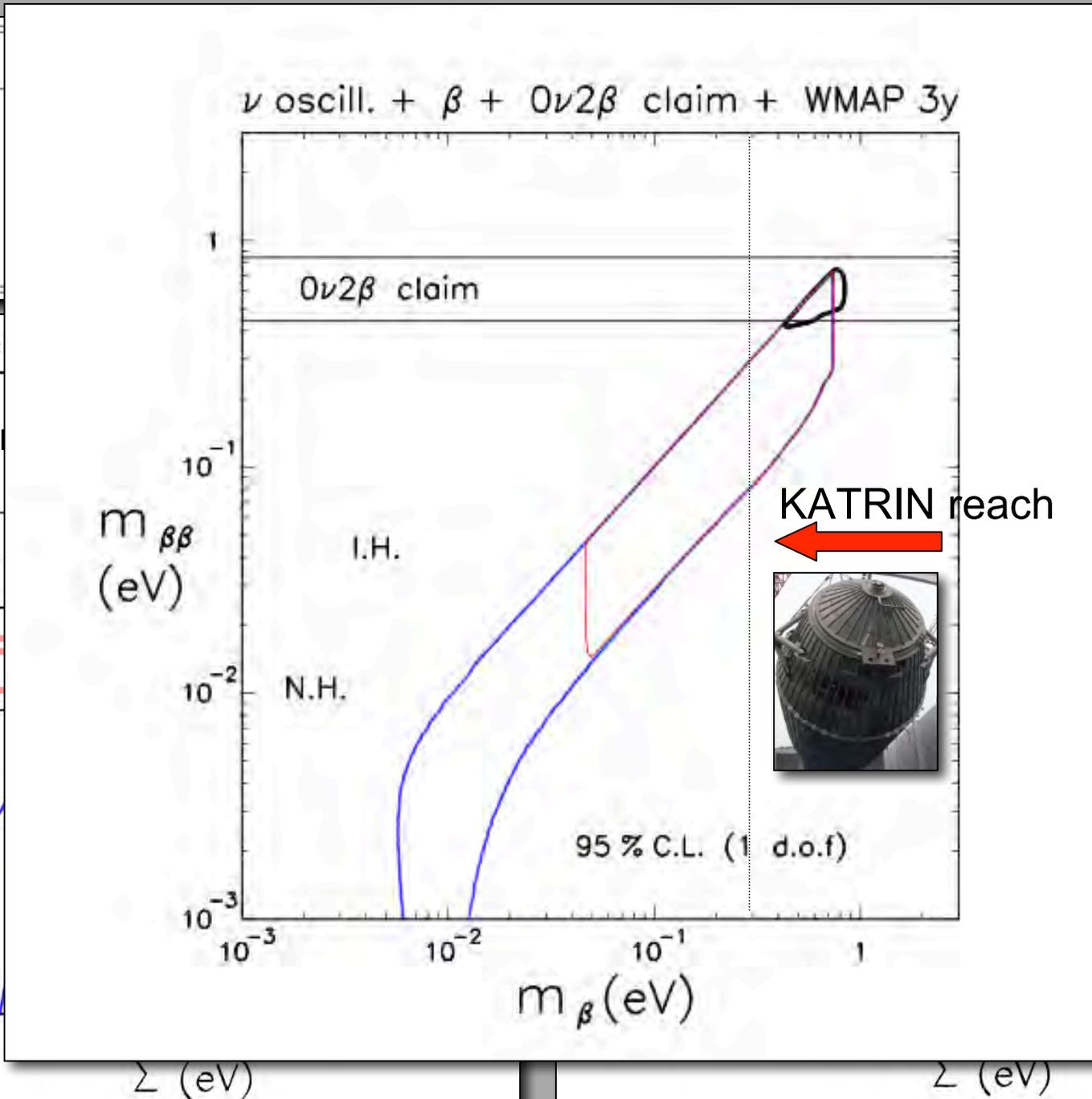
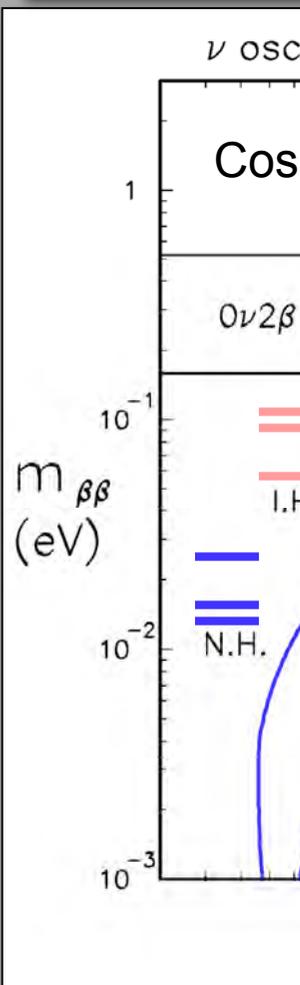
Massa dei neutrini & Cosmologia

Case	Cosmological data set	G.L.Fogli <i>et al.</i> (2008)	Σ (at 2σ)
1	CMB	$\Sigma = m_1 + m_2 + m_3$	< 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 + Ly α		< 0.19 eV

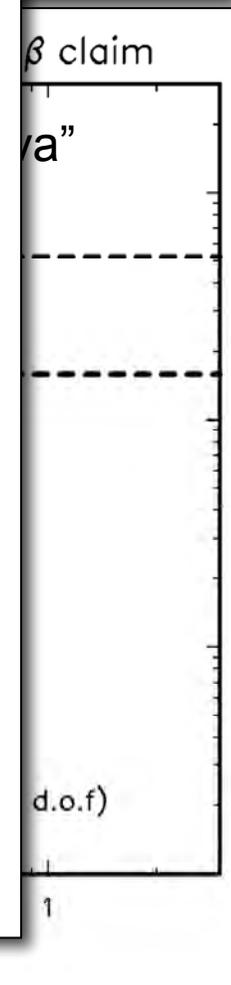


Massa dei neutrini & Cosmologia

Case
1
2
3
4
5

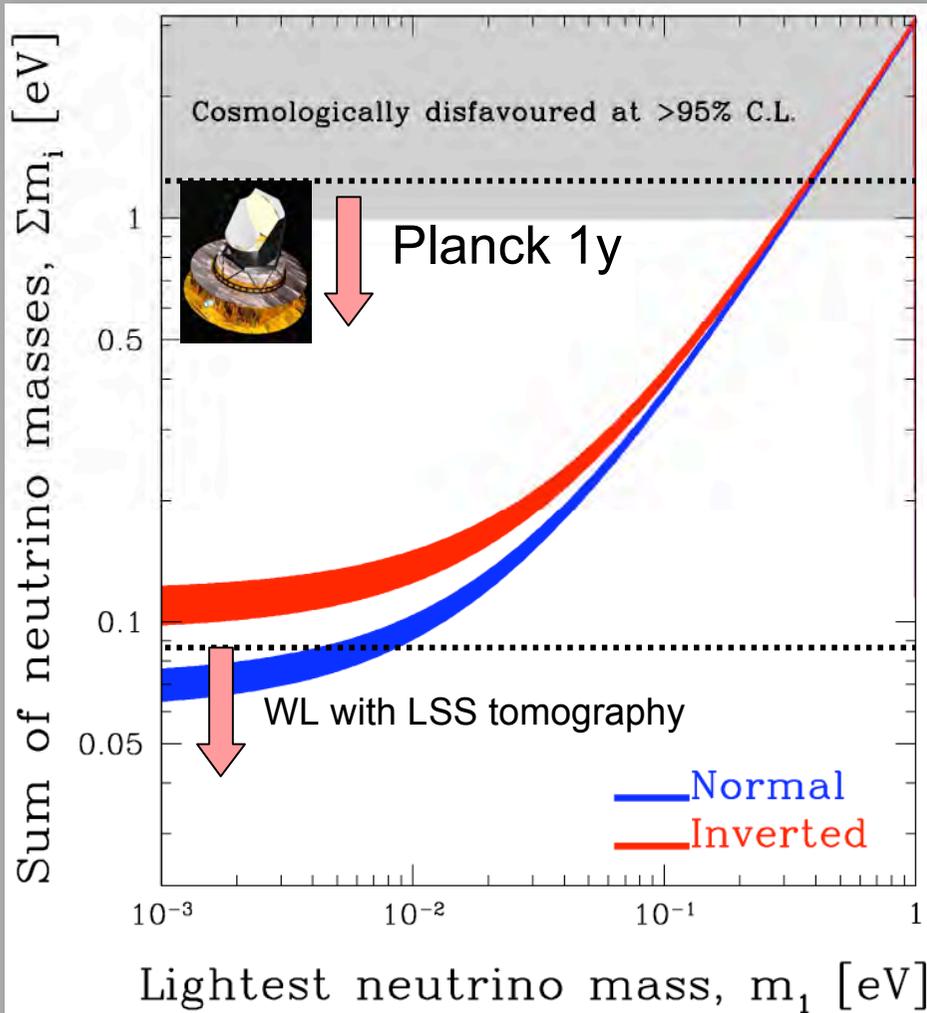


Σ (at 2σ)
< 1.19 eV
< 0.71 eV
< 0.75 eV
< 0.60 eV
< 0.19 eV



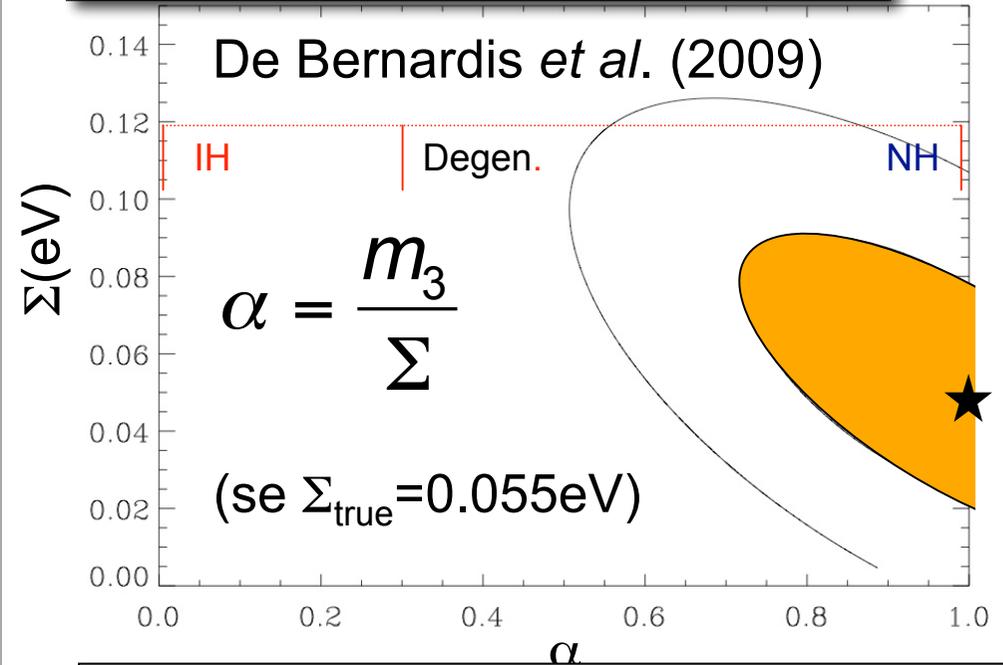
Prospettive future

Forecast della sensibilità

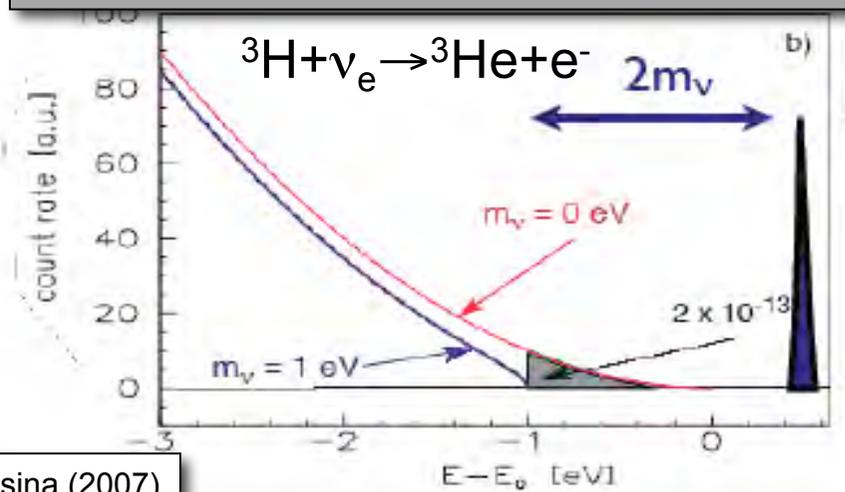


A. Cocco, G. Mangano, M. Messina, (2007)

Determinazione della gerarchia di massa con Planck e Euclid



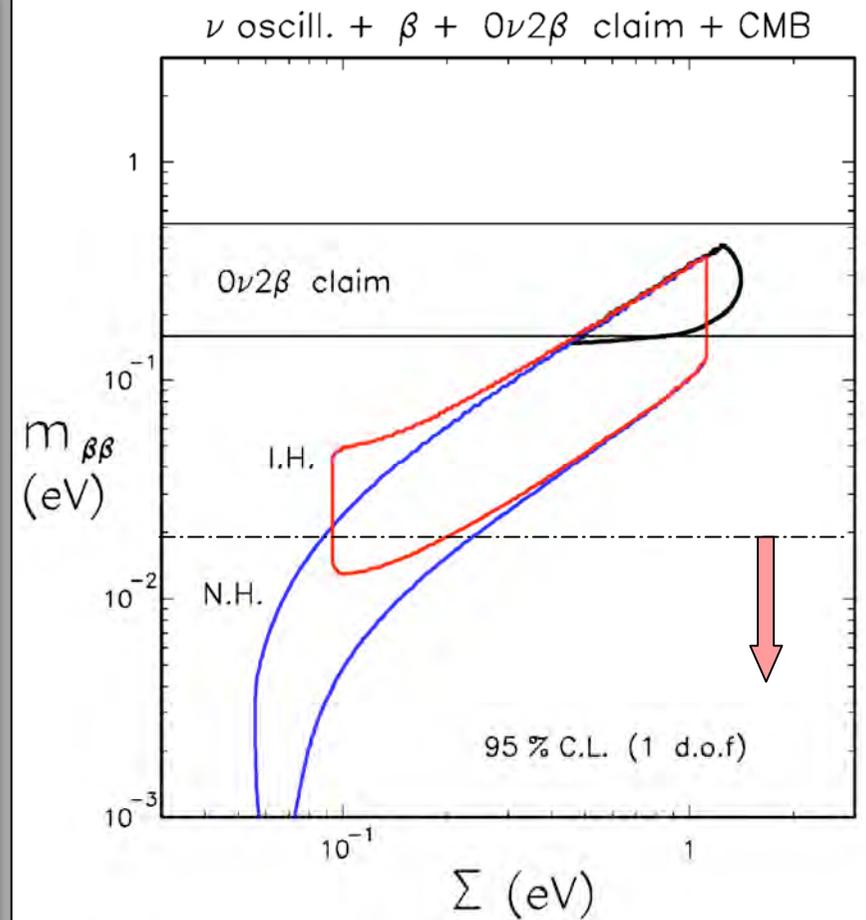
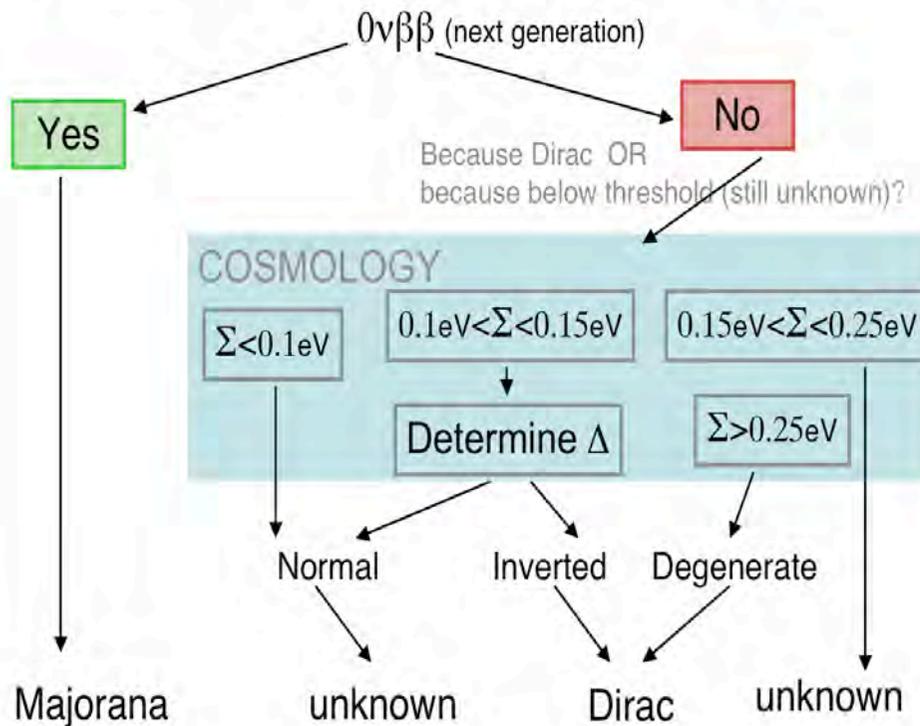
Rivelazione diretta dei relic neutrinos(!)



Determinazione della natura del neutrino

R. Jimenez et al. (2010)

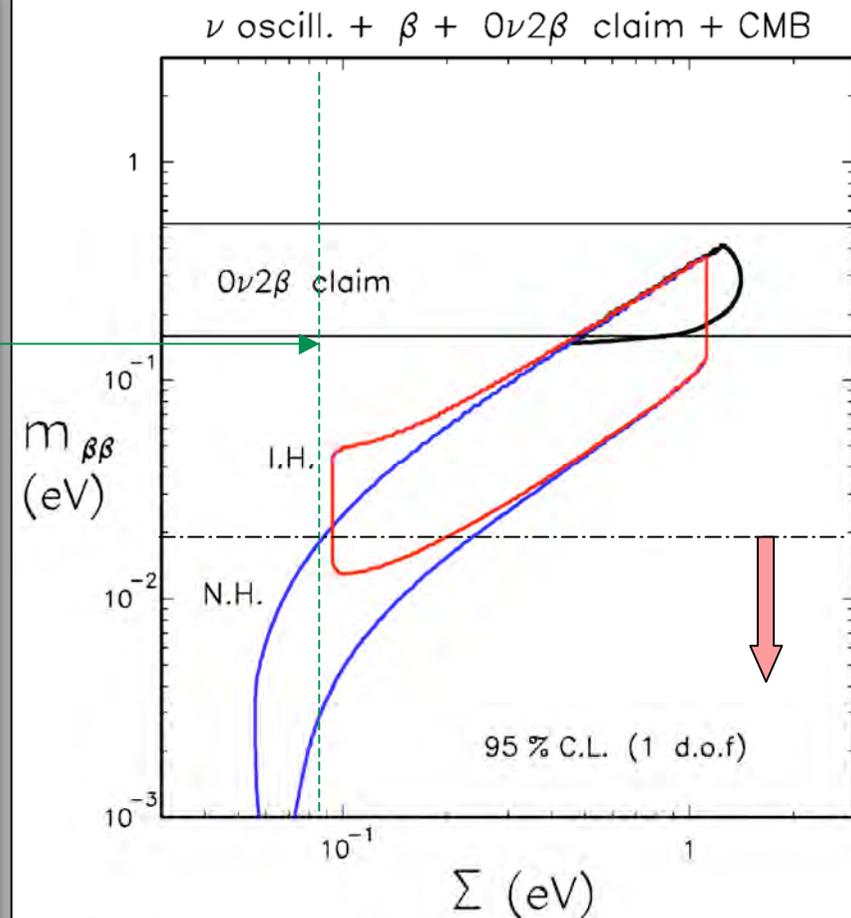
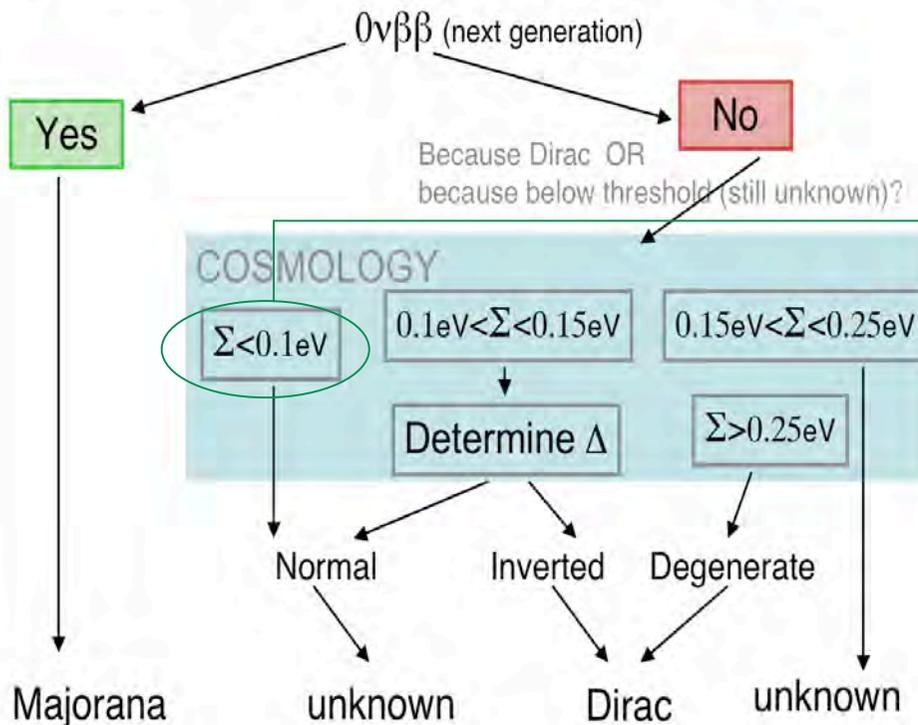
Are neutrinos their own anti-particle?(are they Majorana or Dirac?)



Determinazione della natura del neutrino

R. Jimenez et al. (2010)

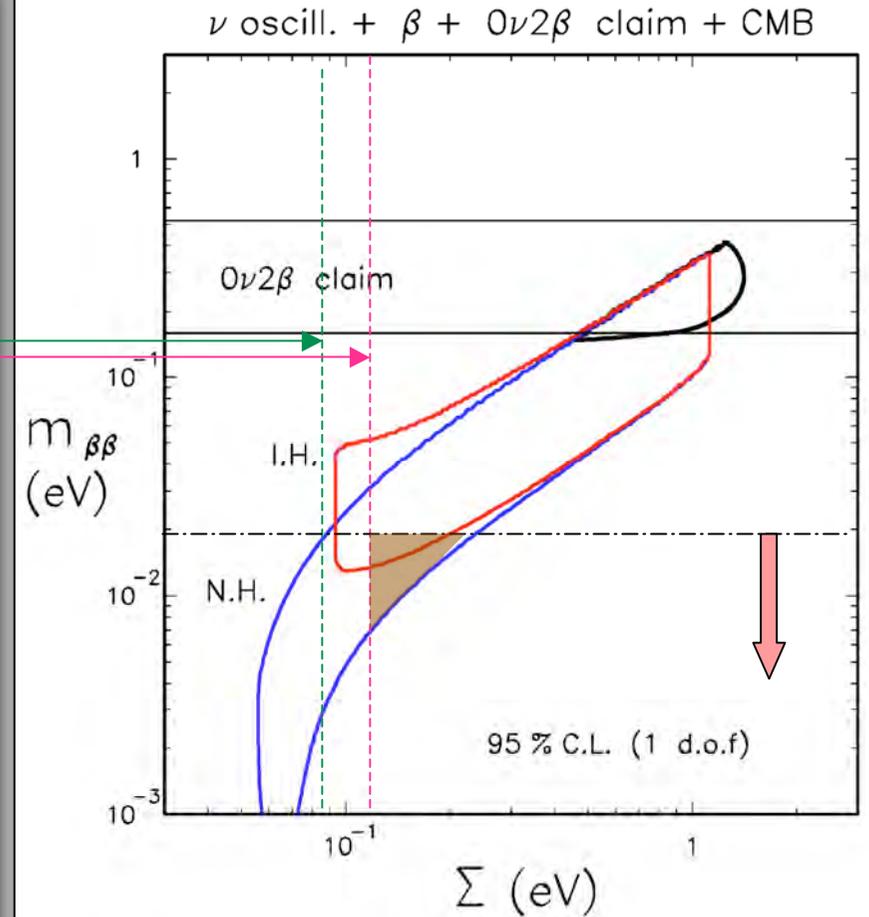
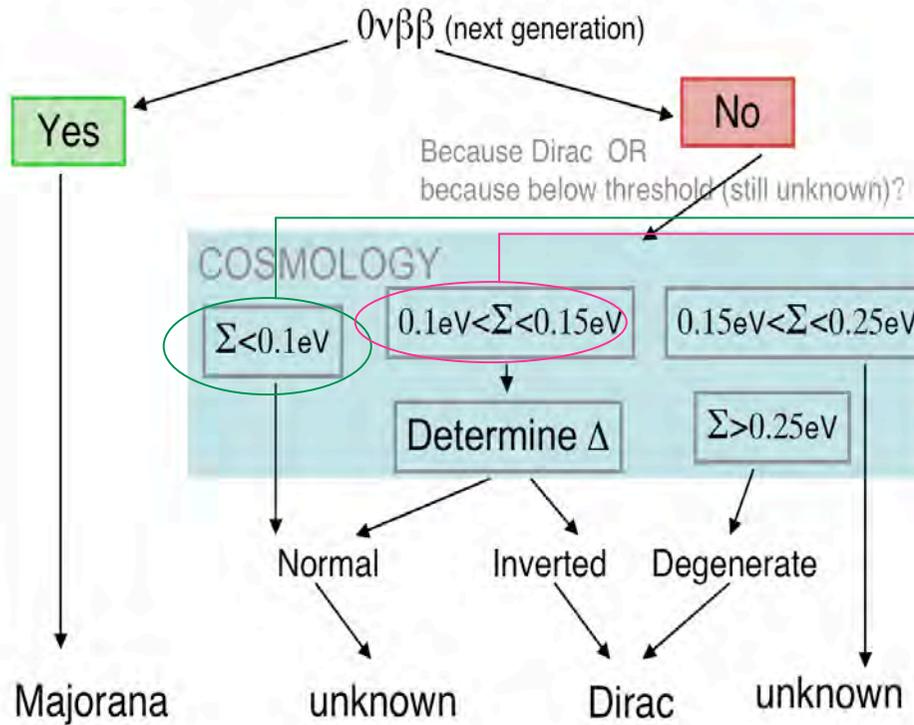
Are neutrinos their own anti-particle?(are they Majorana or Dirac?)



Determinazione della natura del neutrino

R. Jimenez et al. (2010)

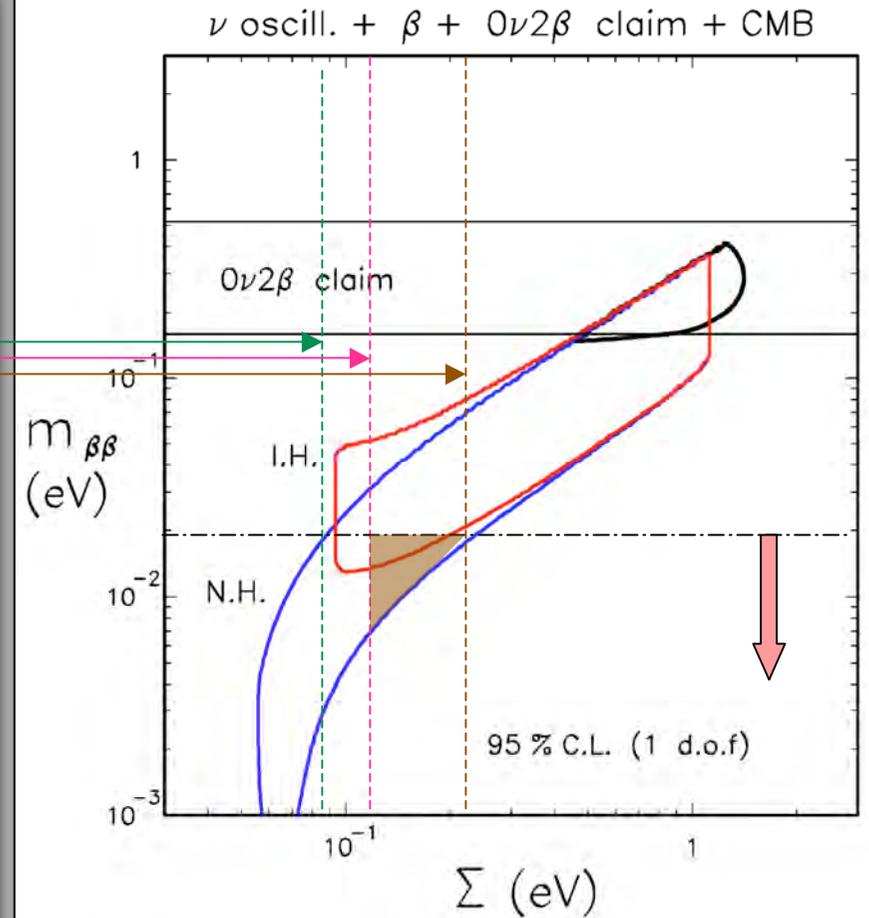
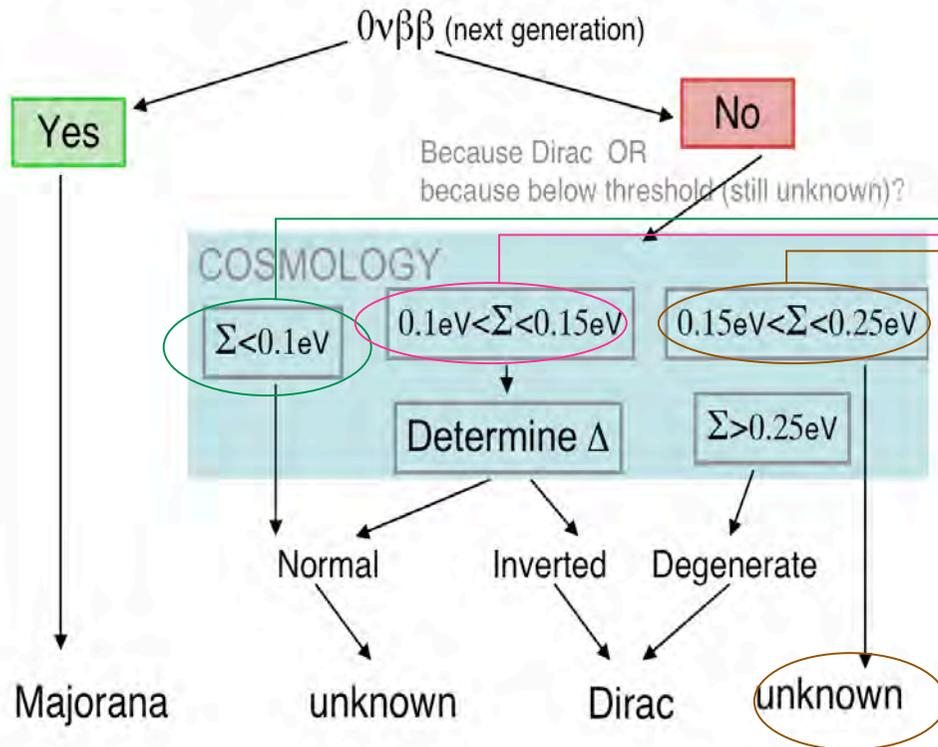
Are neutrinos their own anti-particle?(are they Majorana or Dirac?)



Determinazione della natura del neutrino

R. Jimenez et al. (2010)

Are neutrinos their own anti-particle?(are they Majorana or Dirac?)

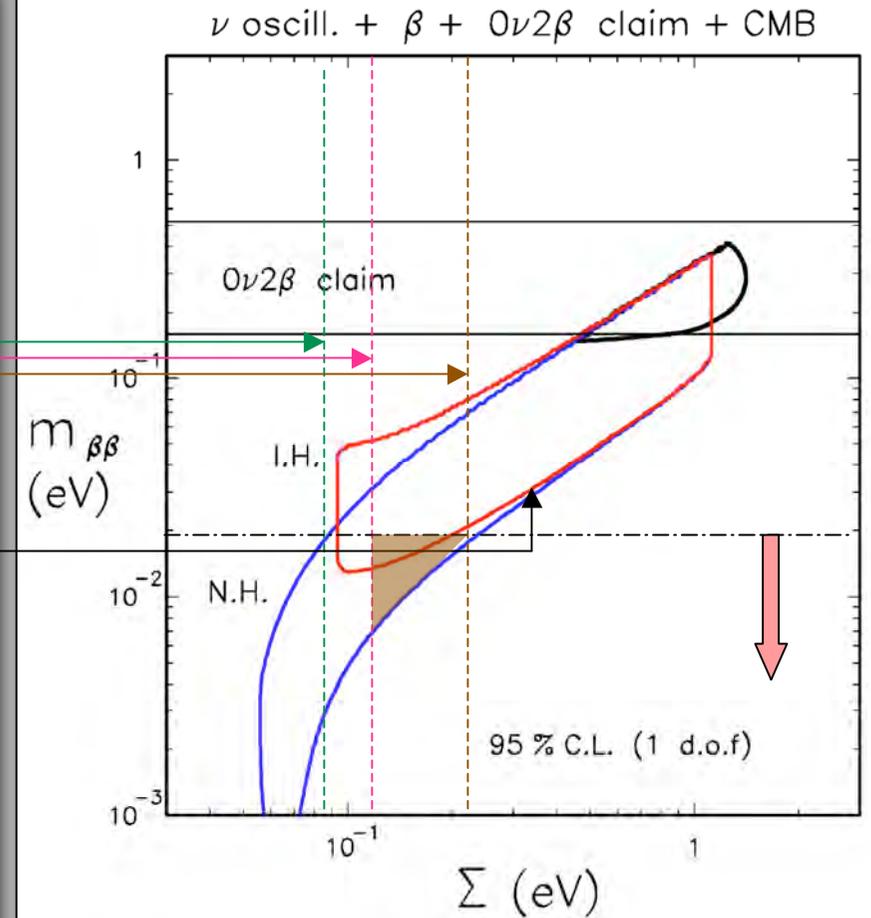
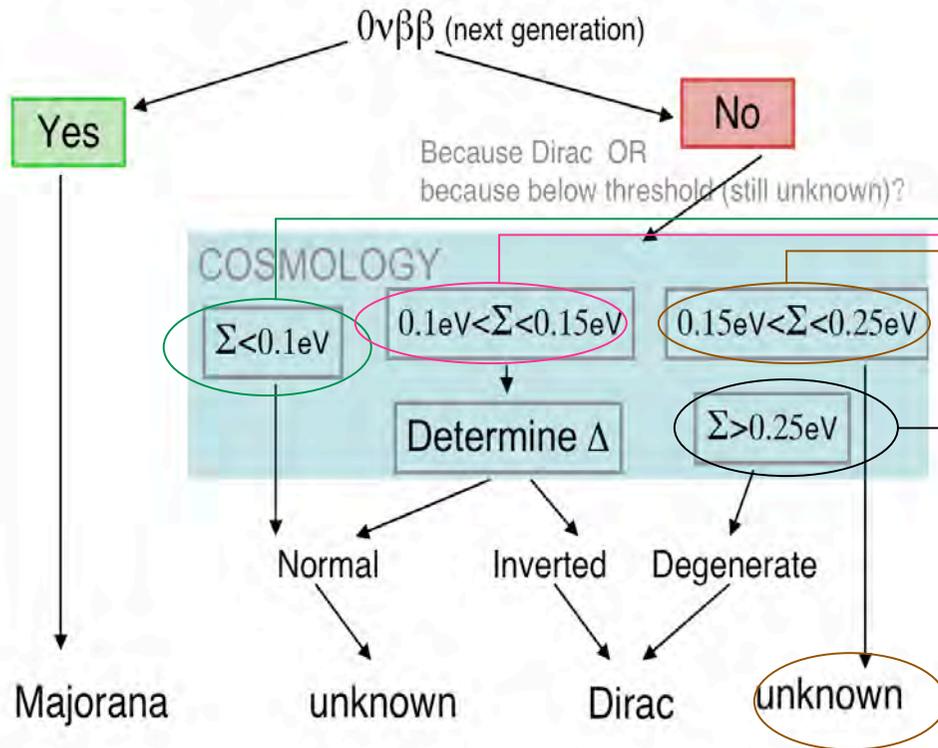


In questo caso occorrerà attendere la prossima generazione di LBL's per stabilire la gerarchia

Determinazione della natura del neutrino

R. Jimenez et al. (2010)

Are neutrinos their own anti-particle?(are they Majorana or Dirac?)



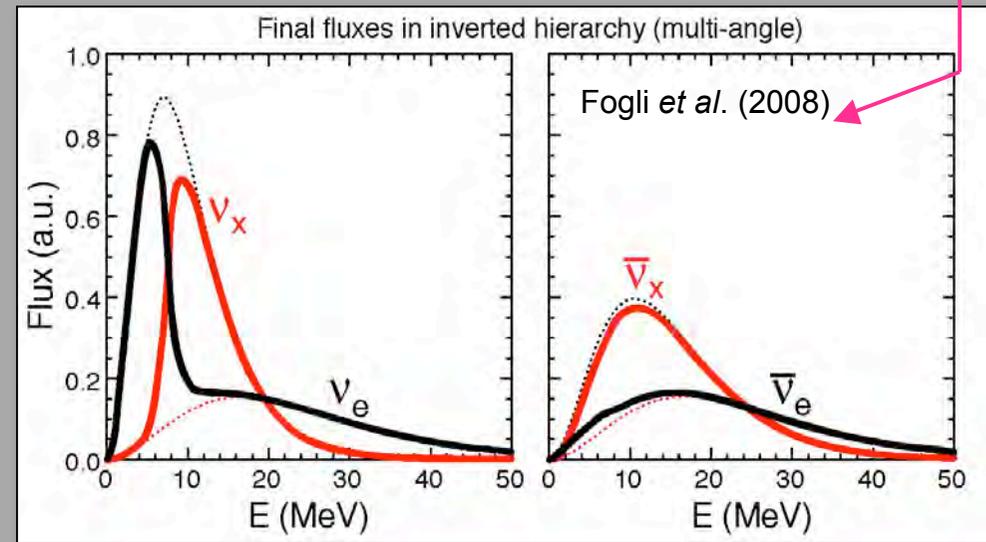
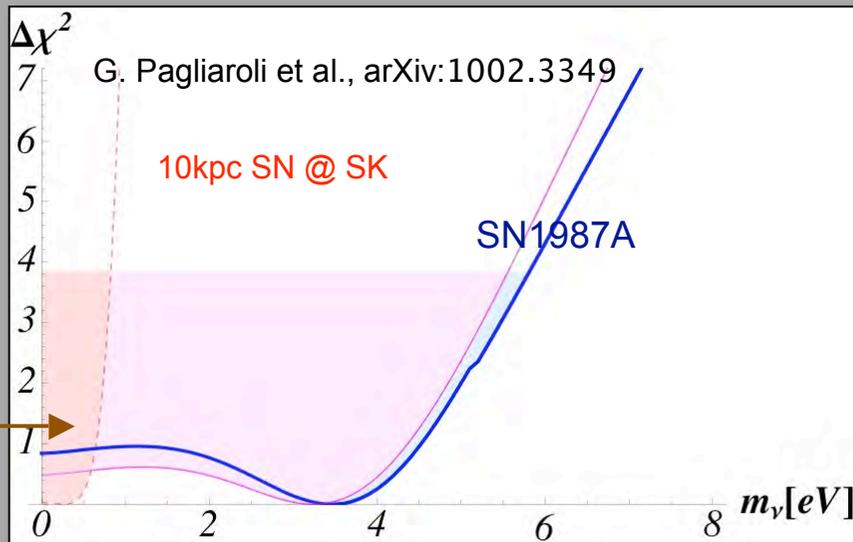
In questo caso occorrerà attendere la prossima generazione di LBL's per stabilire la gerarchia

Neutrini da supernovae

Le supernove da nucleo collassato emettono il 99% dell'energia disponibile sotto forma di neutrini. Esse sono quindi un laboratorio ideale per lo studio della fisica dei neutrini.

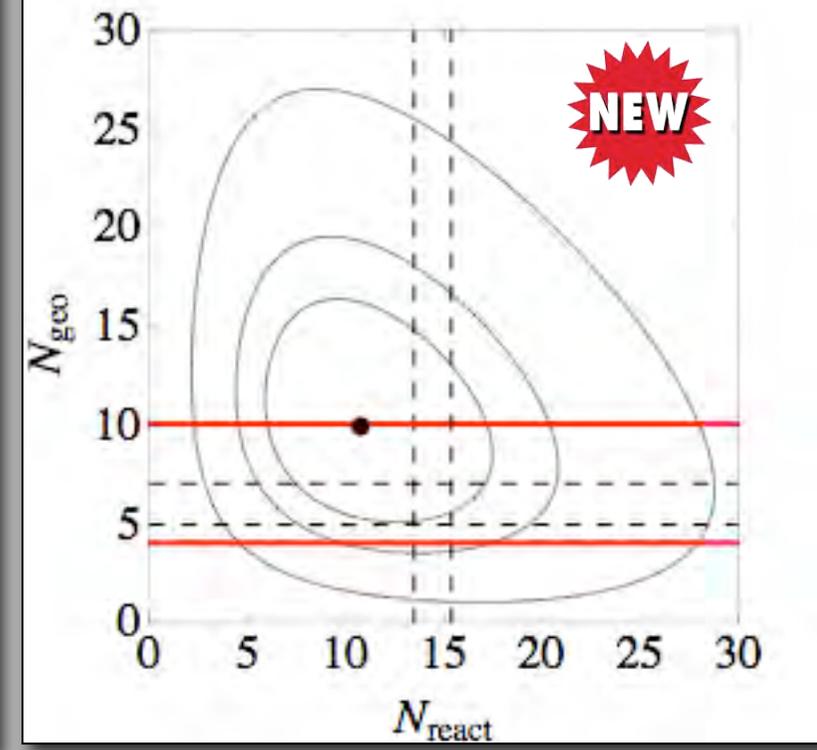
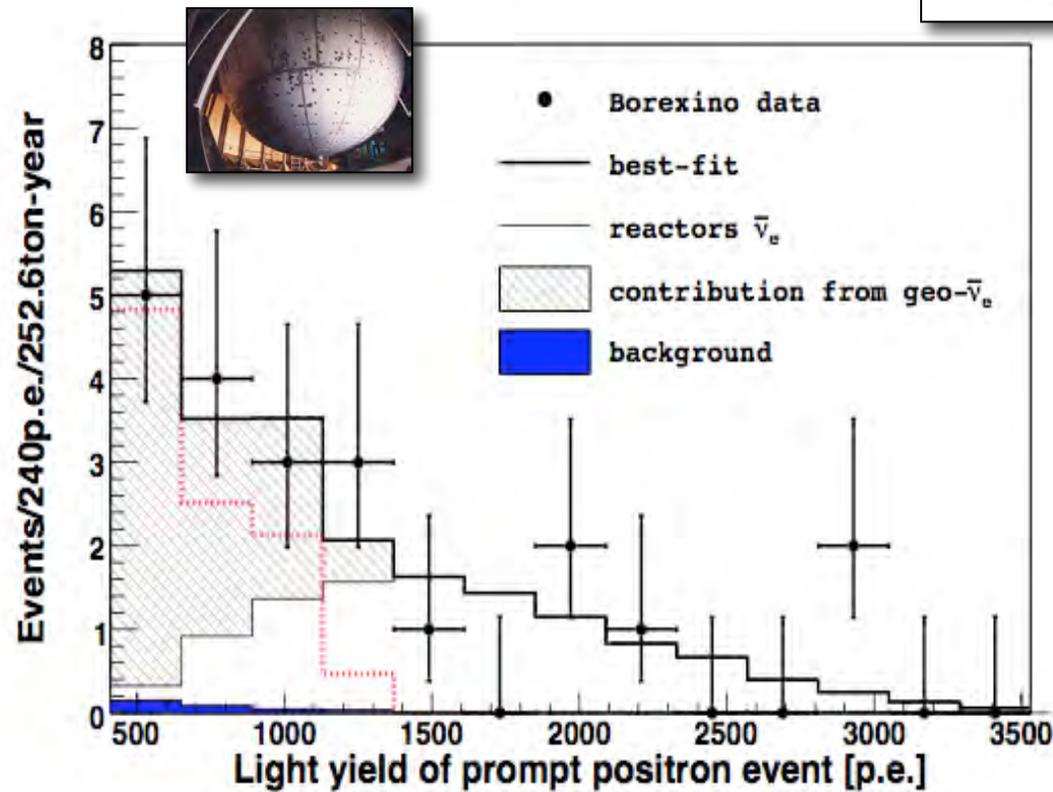
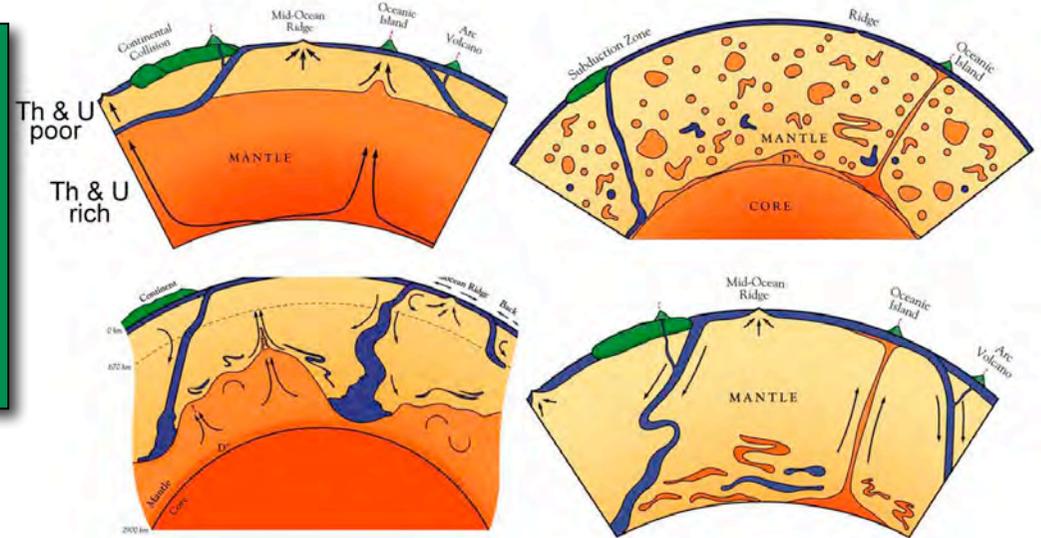
Tramite i neutrini da SN è possibile ottenere informazioni su:

- massa assoluta dei neutrini (tramite la dispersione temporale del segnale a varie energie) sino a $m < O(1\text{eV})$
- gerarchia di massa, angolo θ_{13} p.e., per mezzo dello "spectral swap" indotto da fenomeni non lineari di oscillazioni collettive in gas densi di neutrini
- possibili interazioni non standard dei neutrini stessi
- ottenere informazioni sulla dinamica dell'esplosione e della propagazione dell'onda d'urto nell'envelope stellare
- ottenere informazioni sul rate di formazione stellare e altri parametri astrofisici
- fornire una "survey" delle supernove galattiche non visibili (dust) e delle galassie vicine ... e molto altro! Purtroppo però le supernovae non sono esperimenti programmabili...



Geo-neutrini

- ✓ Qual è il rapporto K/U e Th/U?
- ✓ Qual è il contributo radiogenico al calore terrestre?
- ✓ Qual è la distribuzione dei serbatoi radiogenici nel mantello?
- ✓ Ci sono elementi radiogenici nel nucleo?
- ✓ Qual è la natura del confine nucleo-mantello?



Conclusioni

- ✓ Massa e mixing dei neutrini: un fatto oramai stabilito ogni oltre ragionevole dubbio!
- ✓ I parametri Δm^2_{12} , Δm^2_{13} , θ_{12} , θ_{23} misurati con precisione
- ✓ Limiti molto robusti sulle masse assolute
- ✓ Verso una misura di θ_{13} : viatico per la misura delle violazioni di CP nel settore leptonic
- ✓ Molte sfide per il futuro:
 - ☛ Misura della massa assoluta e determinazione della gerarchia di massa
 - ☛ Determinazione della natura del neutrino (Dirac o Majorana)
 - ☛ Uso dei neutrini per lo studio di oggetti astrofisici o per la geofisica
 - ☛ Approfondire il ruolo del neutrino nella fisica fondamentale e/o in cosmologia

UN RADIOSO FUTURO PER LA FISICA DEL NEUTRINO!

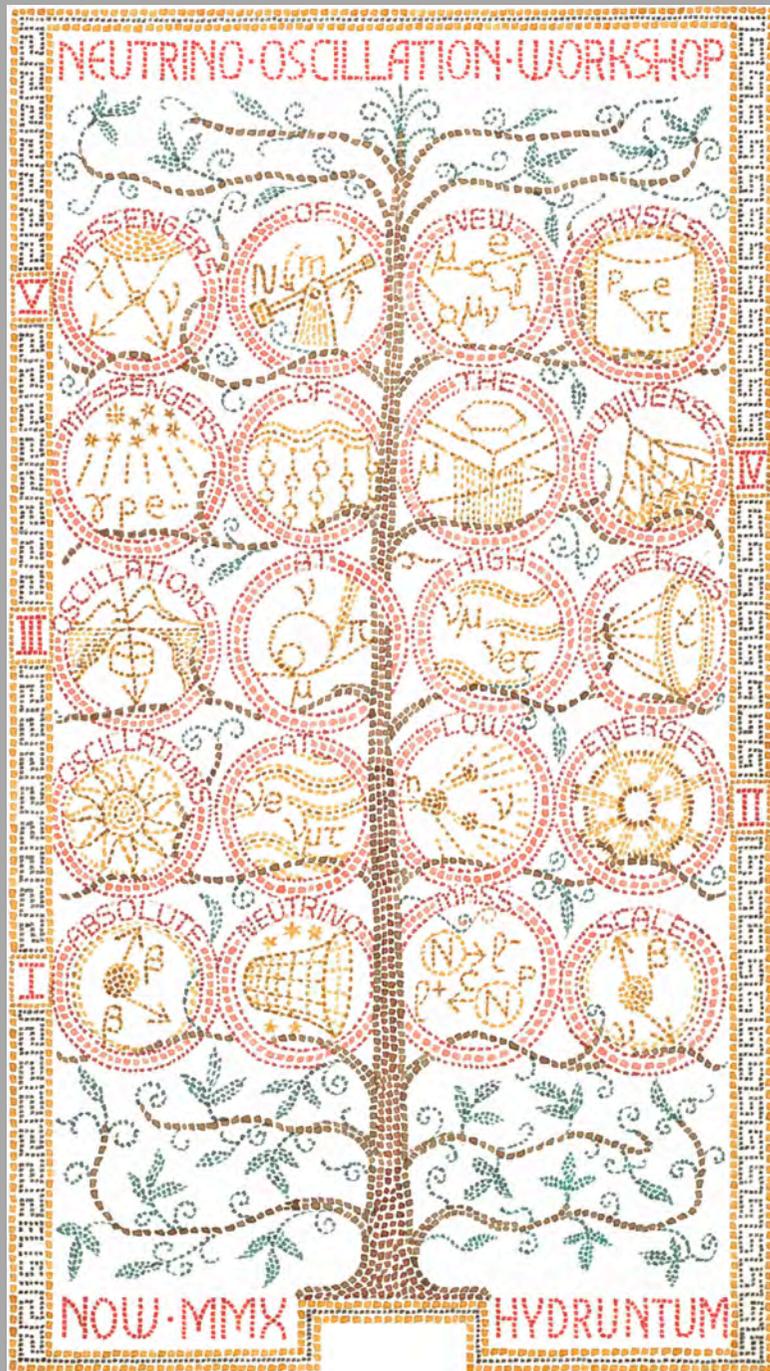
Annuncio

NOW 2010

Neutrino Oscillation Workshop
Conca Specchiulla (Otranto), 4-11 settembre 2010

Per informazioni:

<http://www.ba.infn.it/~now/now2010/>



Comitato organizzatore locale (LOC)

- Paolo Bernardini (Lecce)
- Giampaolo Co' (Lecce)
- **Gian Luigi Fogli** (Bari), chairman
- Francesco De Paolis (Lecce)
- Eligio Lisi (Bari)
- Antonio Marrone (Bari)
- Gennaro Miele (Napoli)
- Daniele Montanino (Lecce)
- Antonio Palazzo (Valencia)
- Anna Maria Rotunno (Bari)