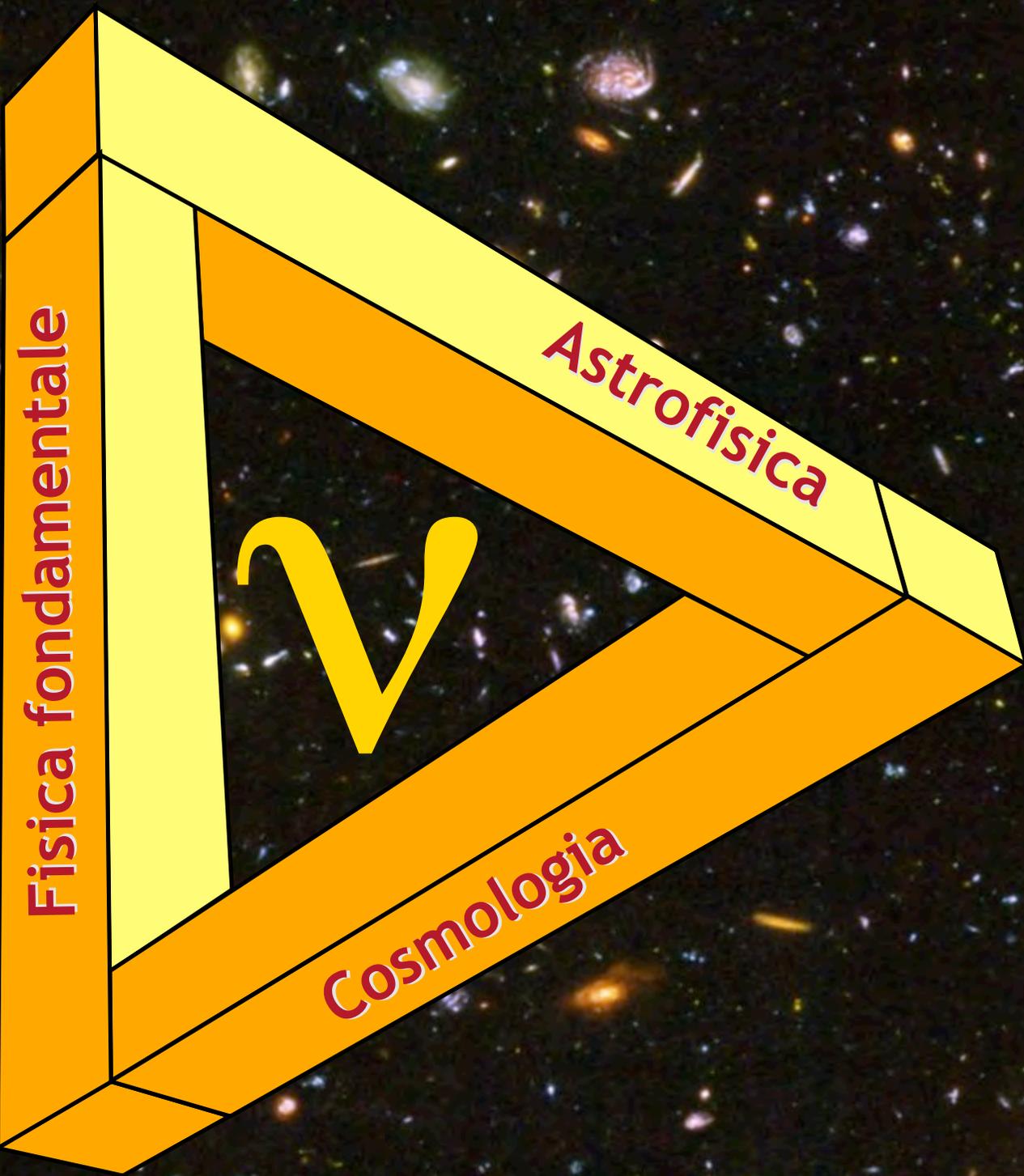


I neutrini particelle fondamentali e messaggeri cosmici



Daniele Montanino





La fisica 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

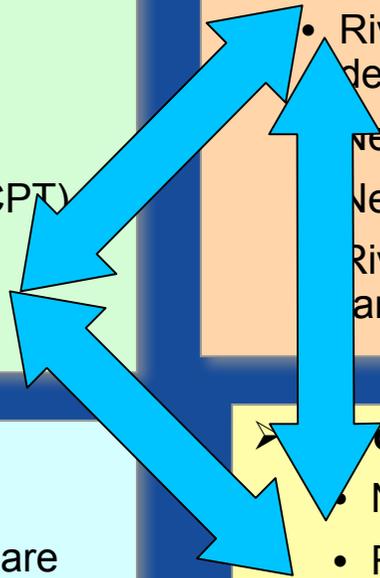
- Ruolo dei neutrini nell'evoluzione dell'universo (formazione di strutture)
- Misure "cosmologiche" della massa dei neutrini
- Nucleosintesi primordiale
- Lepto-bariogenesi
- Rivelazione diretta e indiretta dei neutrini del fondo cosmico
- Neutrini sterili come materia oscura
- Neutrini e energia oscura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

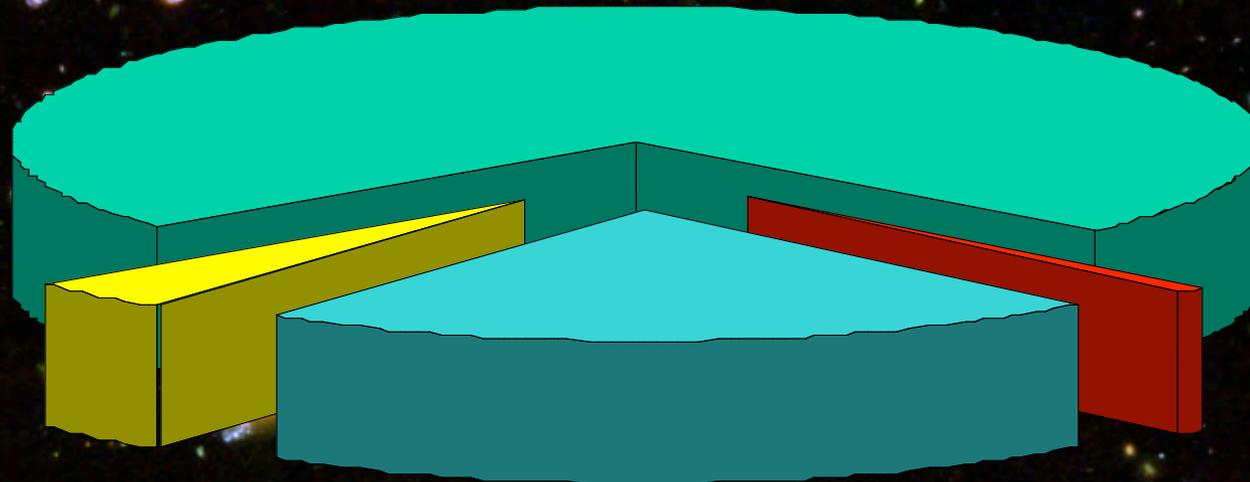
➤ Fisica e geofisica

- 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



“Inventario” energetico dell’universo

Energia oscura 73%
(Costante cosmologica)



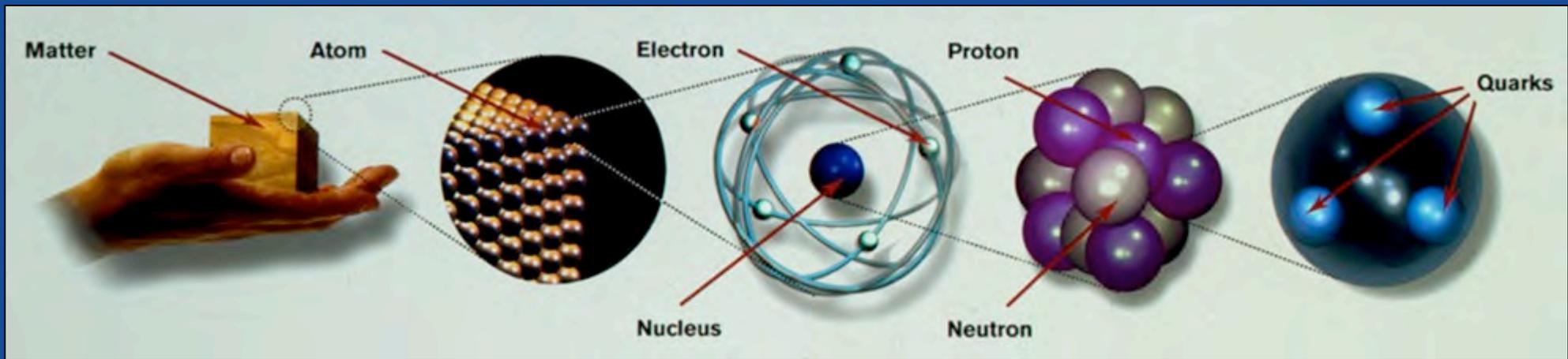
Materia ordinaria 4%
(di questa solo il 10% emette luce)

Materia oscura 23%

Neutrini 0.1–2%

Sebbene i neutrini costituiscano solo una frazione minima dell’energia presente nell’universo, essi, insieme ai fotoni, sono le particelle di gran lunga più abbondanti (circa 10^{10} neutrini per ogni particella “ordinaria”)

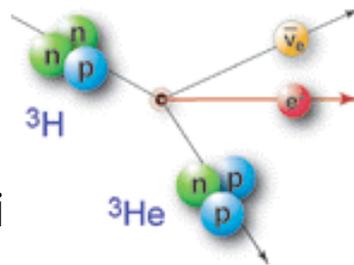
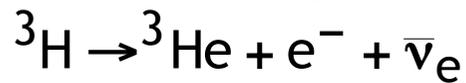
“Sistema periodico” delle particelle elementari



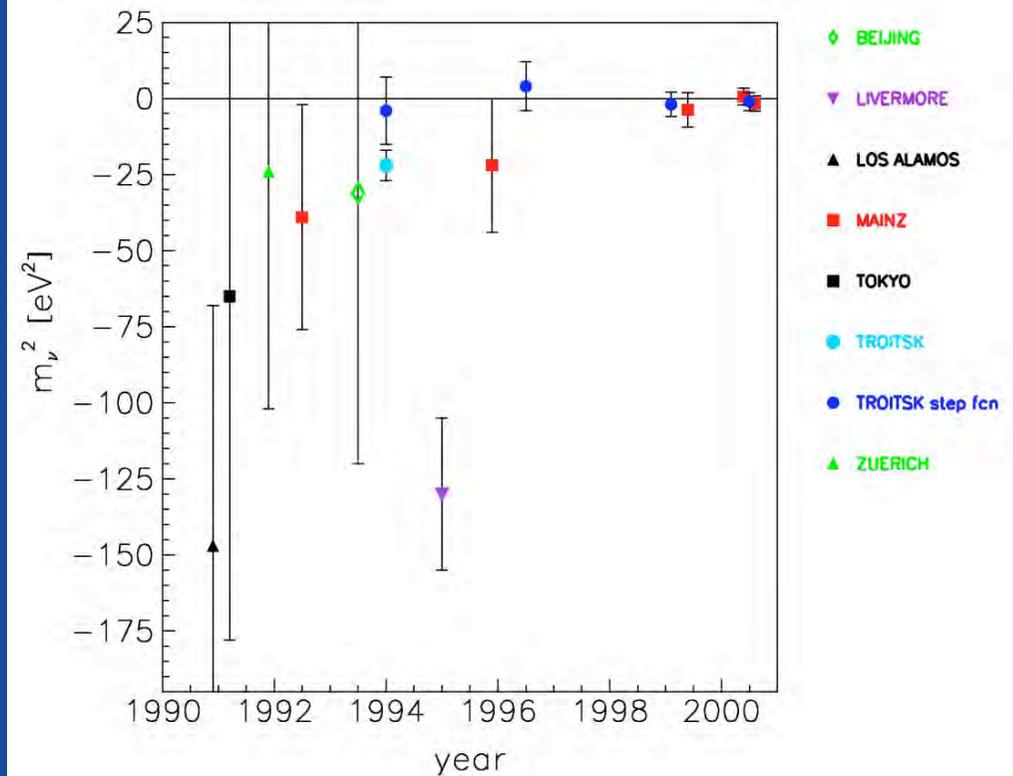
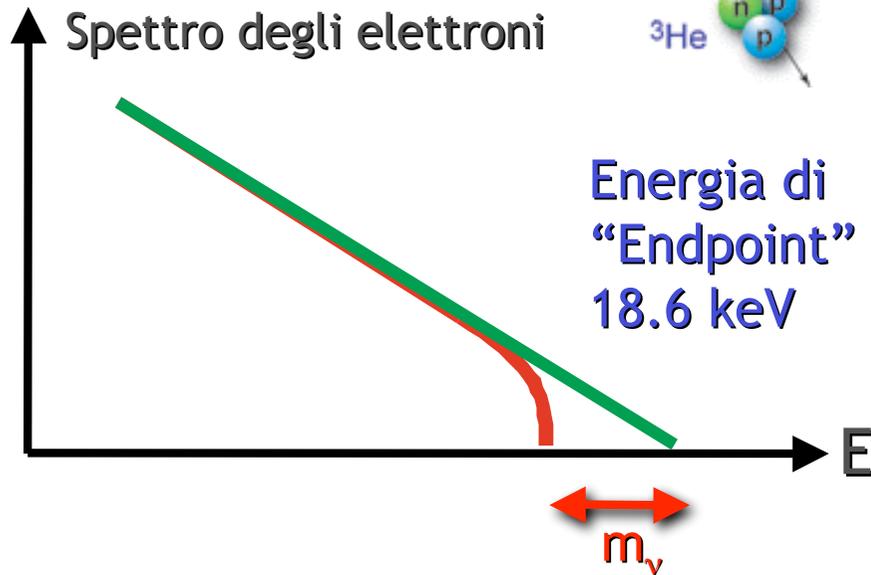
	Quark				Leptoni			
	Carica	+2/3	Carica	-1/3	Carica	-1	Carica	0
1° Famiglia	Up	u	Down	d	Elettrone	e	Neutrino-e	ν_e
2° Famiglia	Charm	c	Strange	s	Muone	μ	Neutrino- μ	ν_μ
3° Famiglia	Top	t	Bottom	b	Tau	τ	Neutrino- τ	ν_τ
Gravitazione								
Interazioni deboli								
Interazioni elettromagnetiche (QED)								
Interazioni forti (QCD)								

Limiti sulla massa del neutrino

Decadimento β del trizio



Spettro degli elettroni



Attualmente il miglior limite proviene dagli esperimenti di Mainz e Troitsk

$$m_\nu < 2.2 \text{ eV (95\% CL)}$$

- Nel futuro un nuovo esperimento (KATRIN) raggiungerà 0.2 eV
- Attualmente in costruzione
- Inizio presa dati: 2009

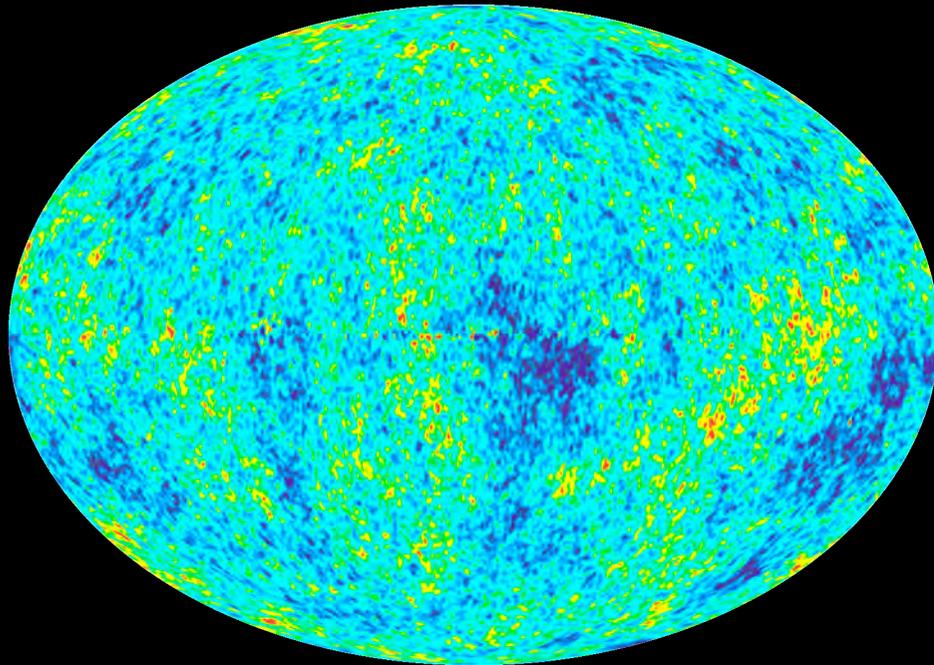
Sebbene le misure dirette siano compatibili con $m_\nu=0$,
le oscillazioni danno una evidenza per una massa non nulla dei neutrini

Limite cosmologico sulla massa dei neutrini

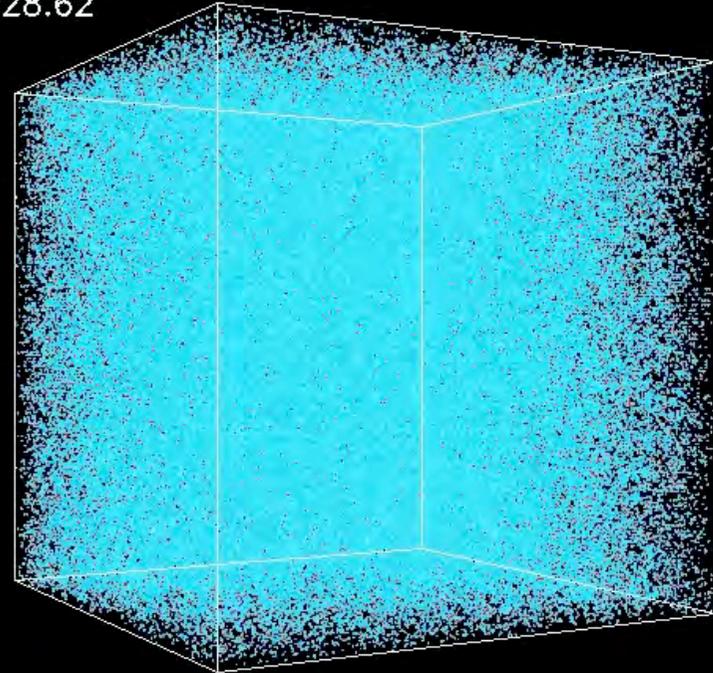
“Mare” di neutrini cosmici $\sim 112 \text{ cm}^{-3}$ neutrini + anti-neutrini per sapore

$$\Omega_\nu = \sum \frac{m_\nu}{94h^2 \text{ eV}} < 0.3$$

$m_\nu < 5 \text{ eV}$ Per ogni sapore



$Z=28.62$



Limiti più stringenti provengono dall'analisi delle anisotropie della radiazione cosmica di fondo (WMAP) e dalle formazioni di strutture cosmiche: $m_\nu \lesssim 1 \text{ eV}$

I neutrini di Majorana

Materia

Antimateria

I neutrini potrebbero essere antiparticelle di se stesse (Majorana)

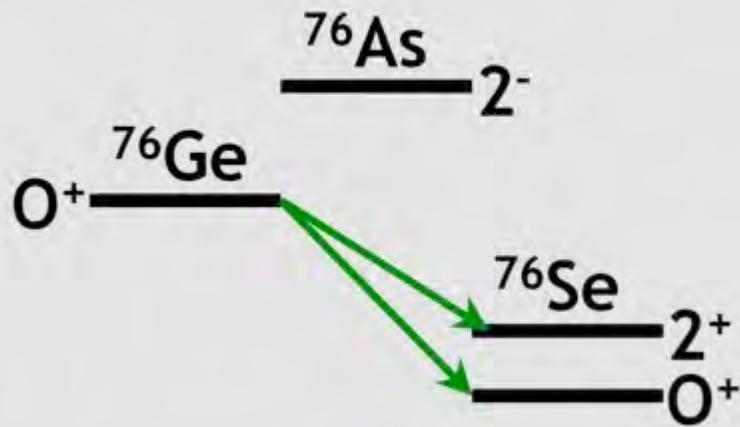


Possono avere un ruolo nella lepto-bariogenesi

	Quark		Leptoni		Anti-Leptoni		Anti-Quark	
Carica	+2/3	-1/3	-1	0	+1	+1/3	-2/3	
1 ^a Famiglia	u	d	e	ν_e	e^+	\bar{d}	\bar{u}	
2 ^a Famiglia	c	s	μ	ν_μ	μ^+	\bar{s}	\bar{c}	
3 ^a Famiglia	t	b	τ	ν_τ	τ^+	\bar{b}	\bar{t}	
Gravitazione								
Interazioni deboli								
Int. elettromagnetiche				Int. elettromagnetiche				
Int. forti						Int. forti		

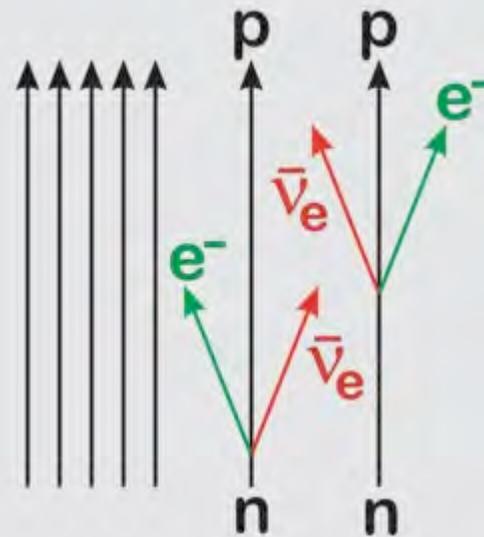
Doppio decadimento β senza neutrini

Alcuni nuclei decadono solo attraverso il canale "doppio β "

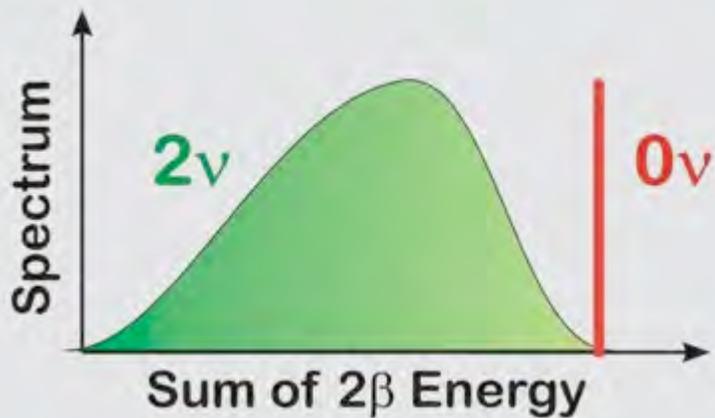
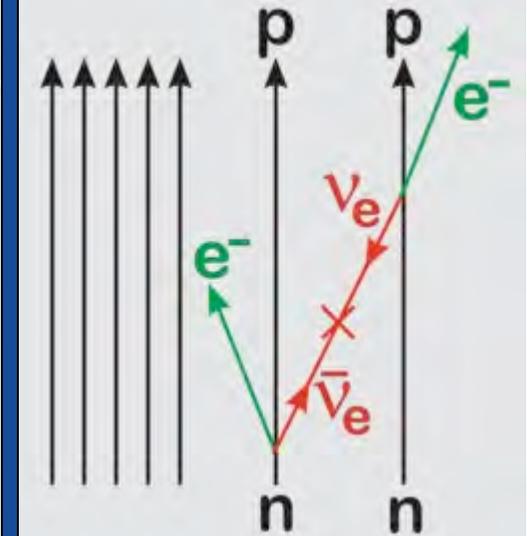


Vita media $\sim 10^{21}$ yr

Canale standard (2ν)



0ν , permesso da una massa di Majorana



Quantità misurata

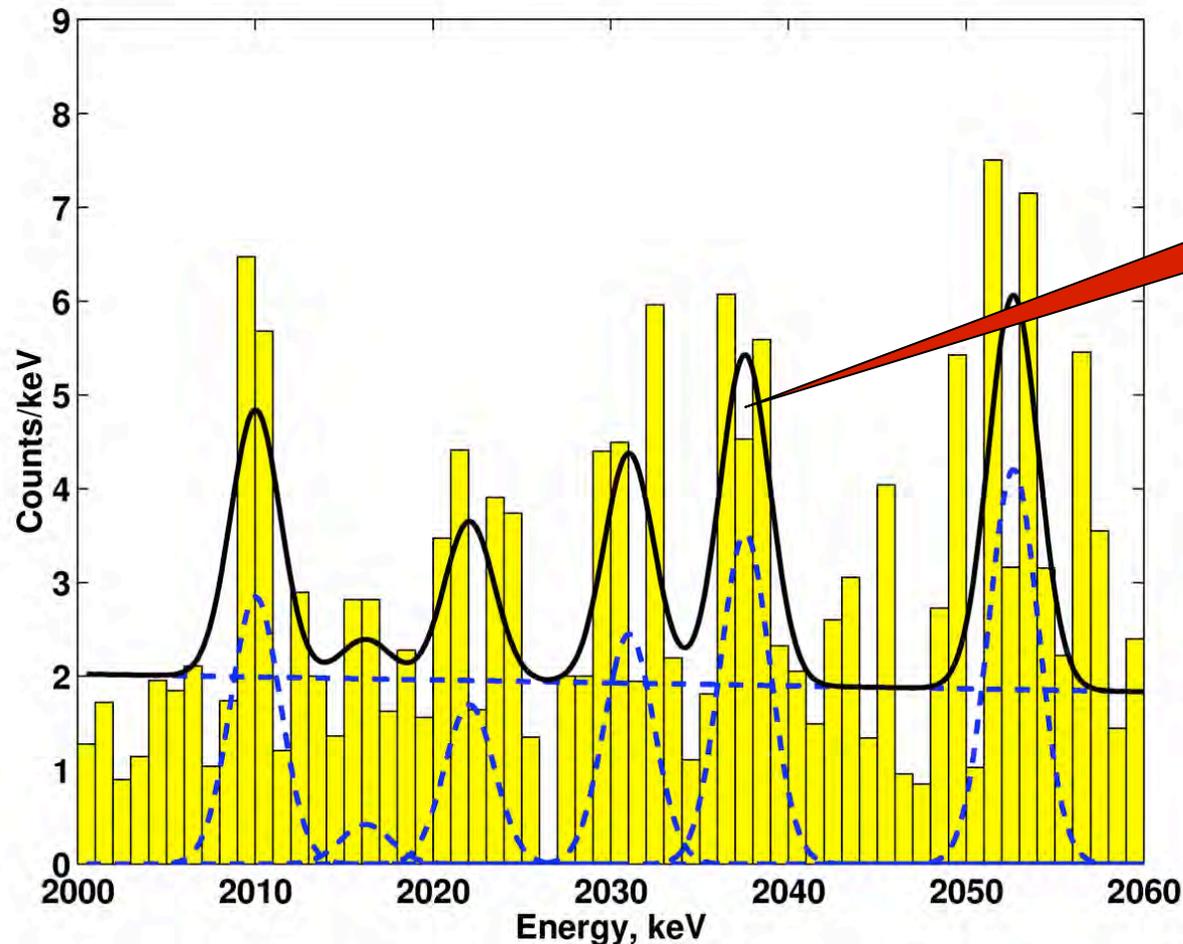
$$|m_{ee}| = \left| \sum_{i=1}^N \lambda_i |U_{ei}|^2 m_i \right|$$

Miglior limite dal ^{76}Ge

$$|m_{ee}| < 0.35 \text{ eV}$$

Una controversa evidenza per il decadimento $0\nu 2\beta$

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

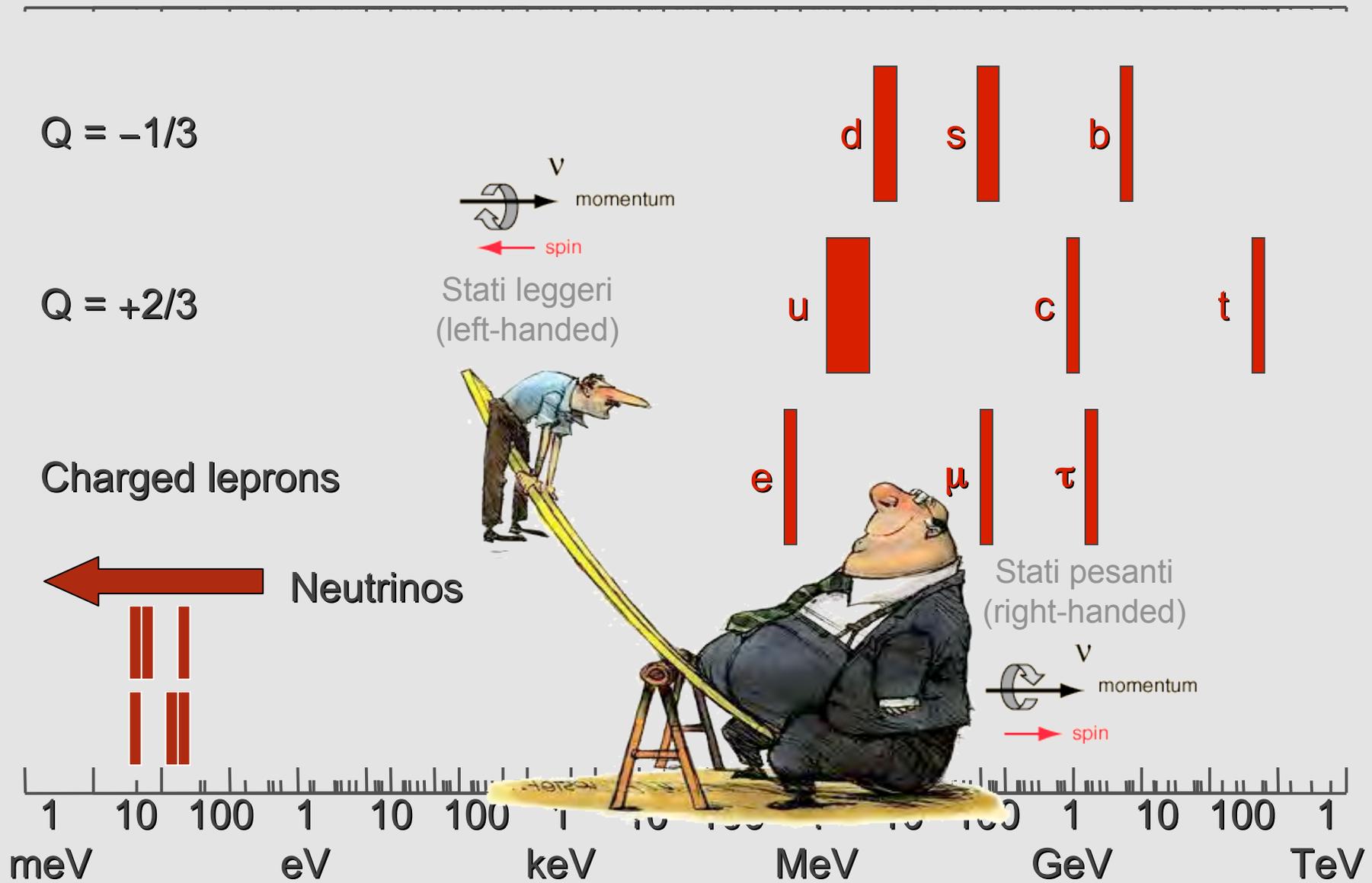


evidenza per una
linea $0\nu 2\beta$?

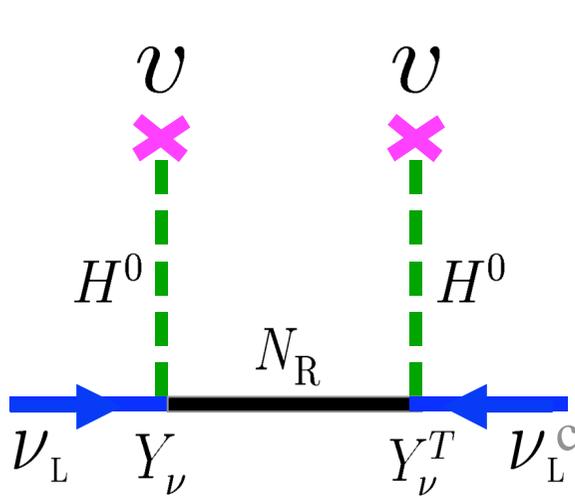
Una serie di
esperimenti in fase
di costruzione
(CUORE, MARE,
GERDA...) dovrà
chiarire questo
punto

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.

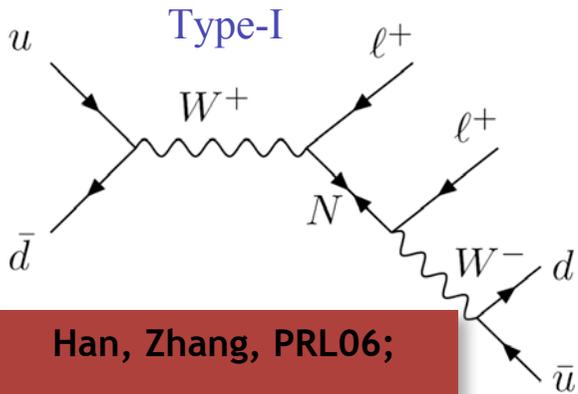
Le masse dei fermioni nel Modello Standard



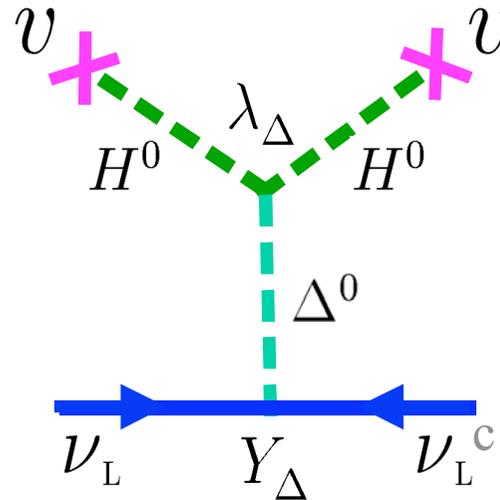
Il meccanismo "see-saw" potrà essere provato a LHC?



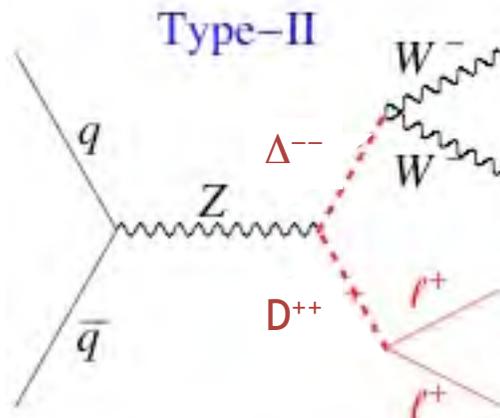
$$M_\nu \approx -v^2 Y_\nu \frac{1}{M_R} Y_\nu^T$$



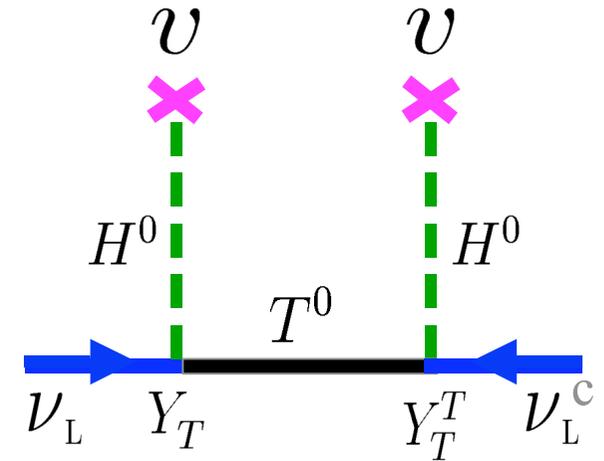
Han, Zhang, PRL06;
del Aguila et al, JHEP07



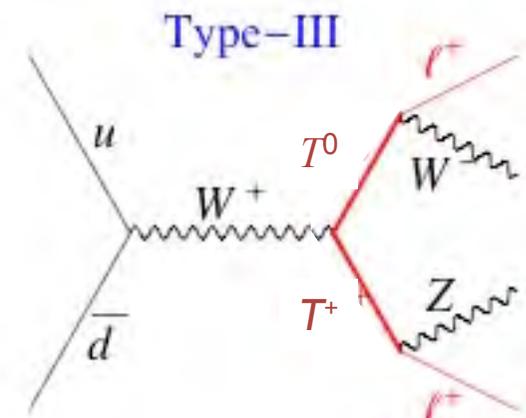
$$M_\nu \approx \lambda_\Delta Y_\Delta \frac{v^2}{M_\Delta}$$



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

Oscillazioni di “sapore” dei neutrini

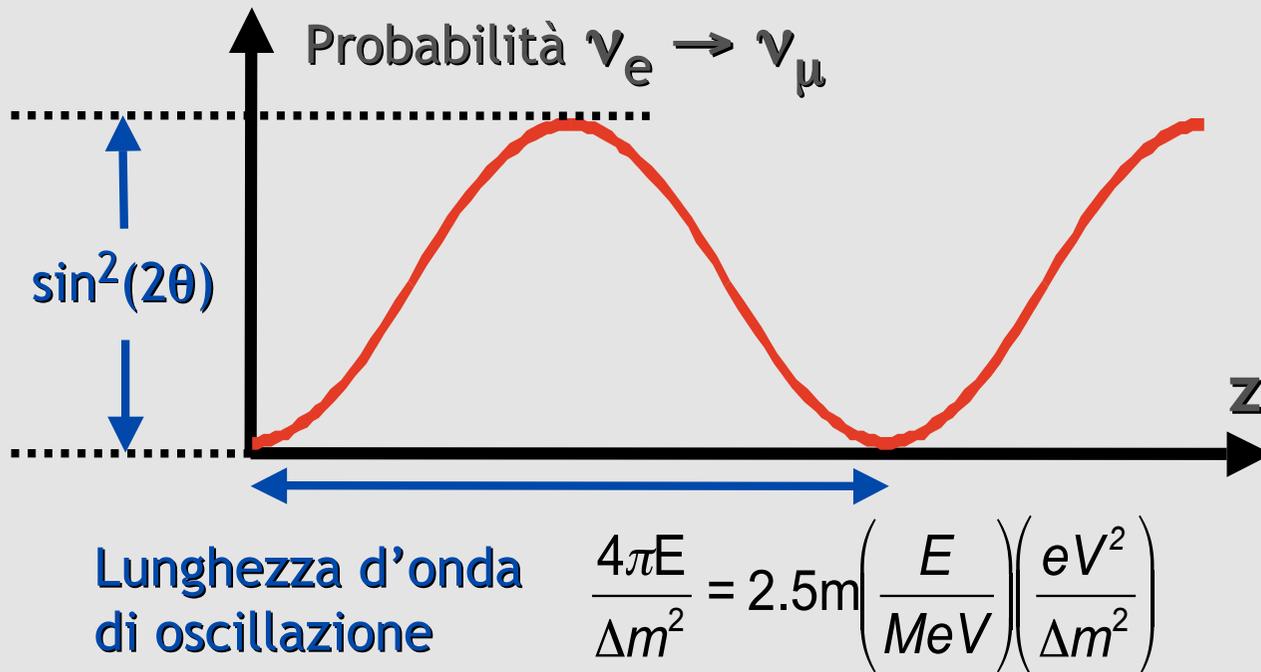
Mescolamento tra i due sapori

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = U_\theta \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Ogni autostato di massa si propaga come e^{ipz}

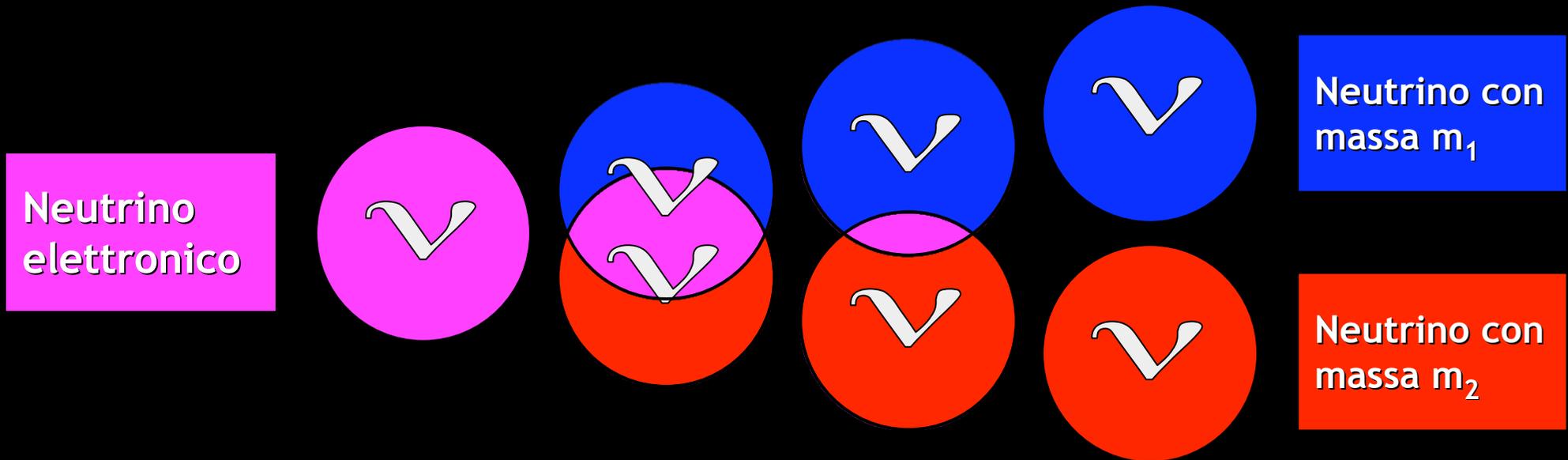
con $p = \sqrt{E^2 - m^2} \approx E - \frac{m^2}{2E}$

La differenza di fase $\frac{\Delta m^2}{2E} z$ da luogo alle oscillazioni



Bruno Pontecorvo
(1913 - 1993)

“Mixing” di neutrini con massa differente

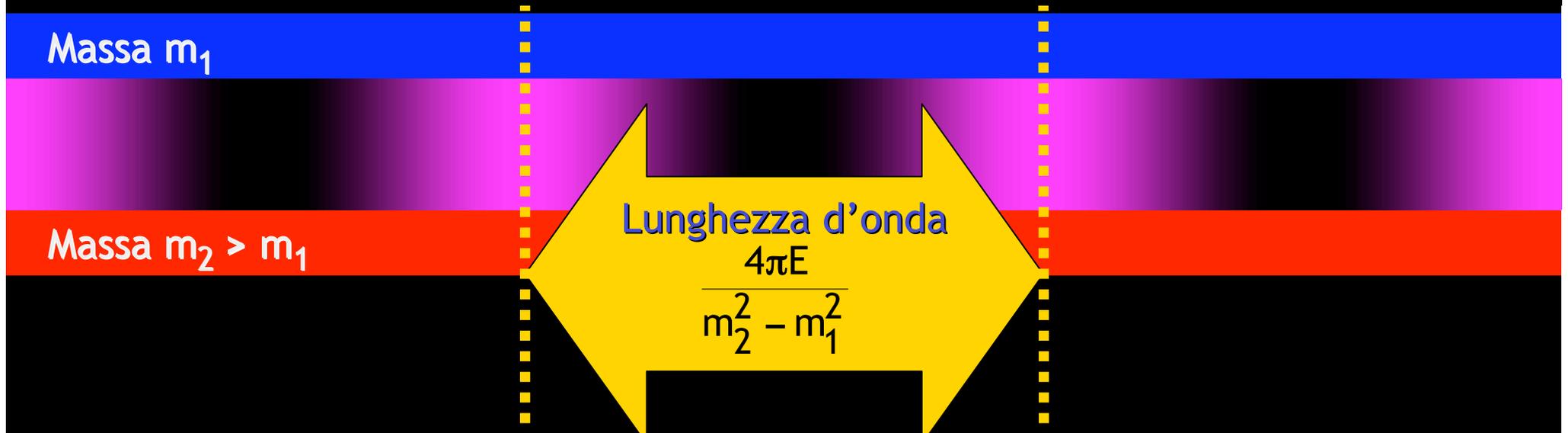


Massa m_1

Massa $m_2 > m_1$

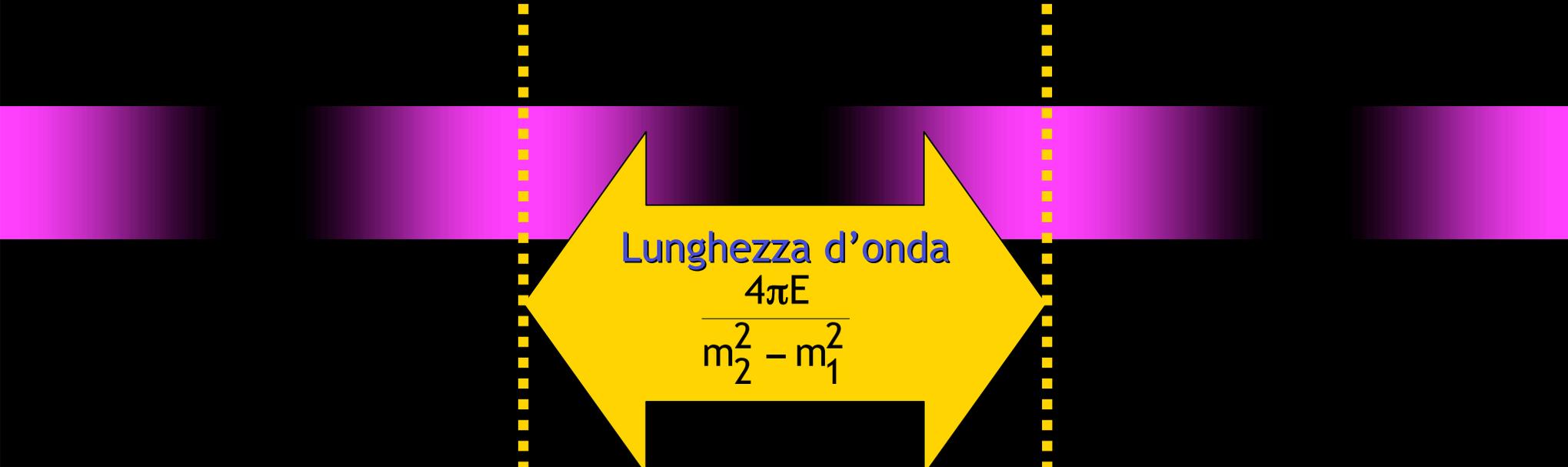
Propagazione dei neutrini come fenomeno ondulatorio

Oscillazione dei neutrini



Oscillazione dei neutrini

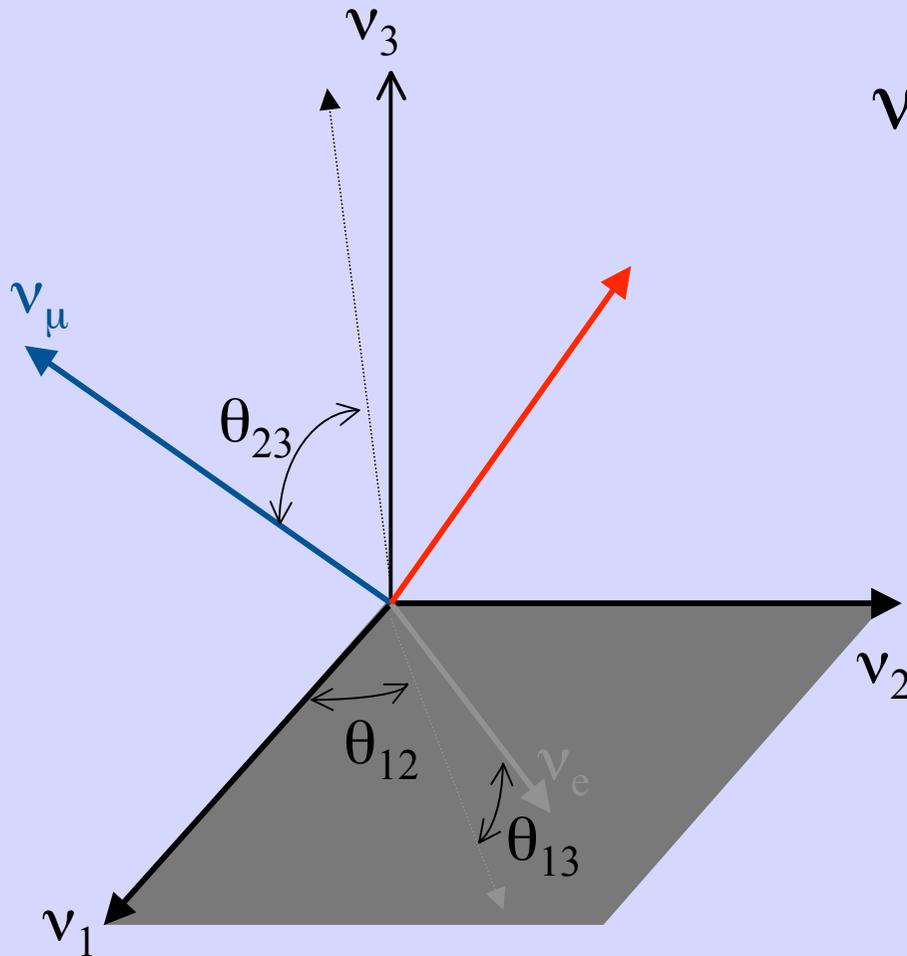
$$P(\nu_a \rightarrow \nu_b) = \sin 2\theta \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 x}{4E}\right); \quad P(\nu_a \rightarrow \nu_a) = 1 - P(\nu_a \rightarrow \nu_b)$$



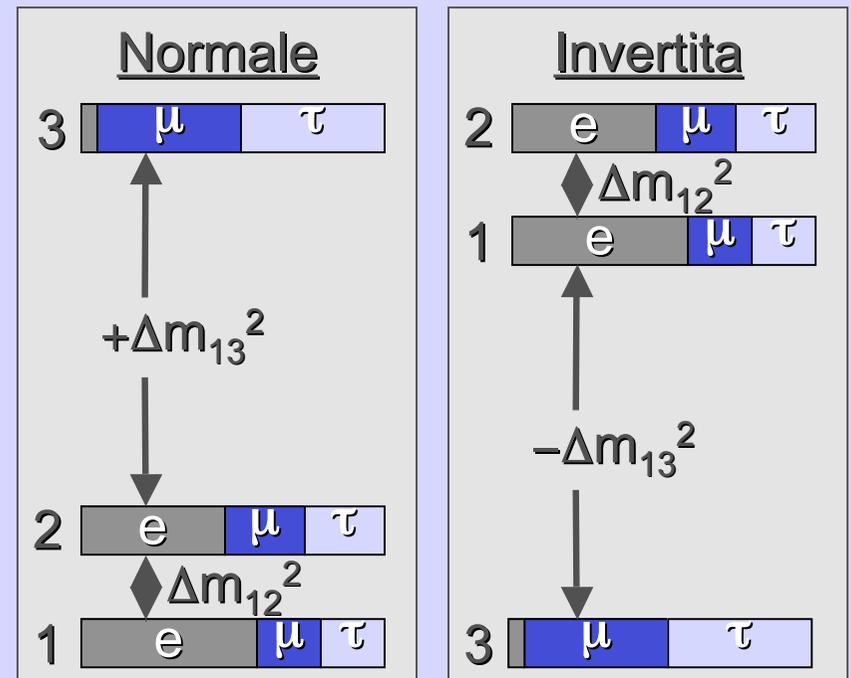
Lunghezza d'onda
 $\frac{4\pi E}{m_2^2 - m_1^2}$

Spettro di massa e mixing dei neutrini

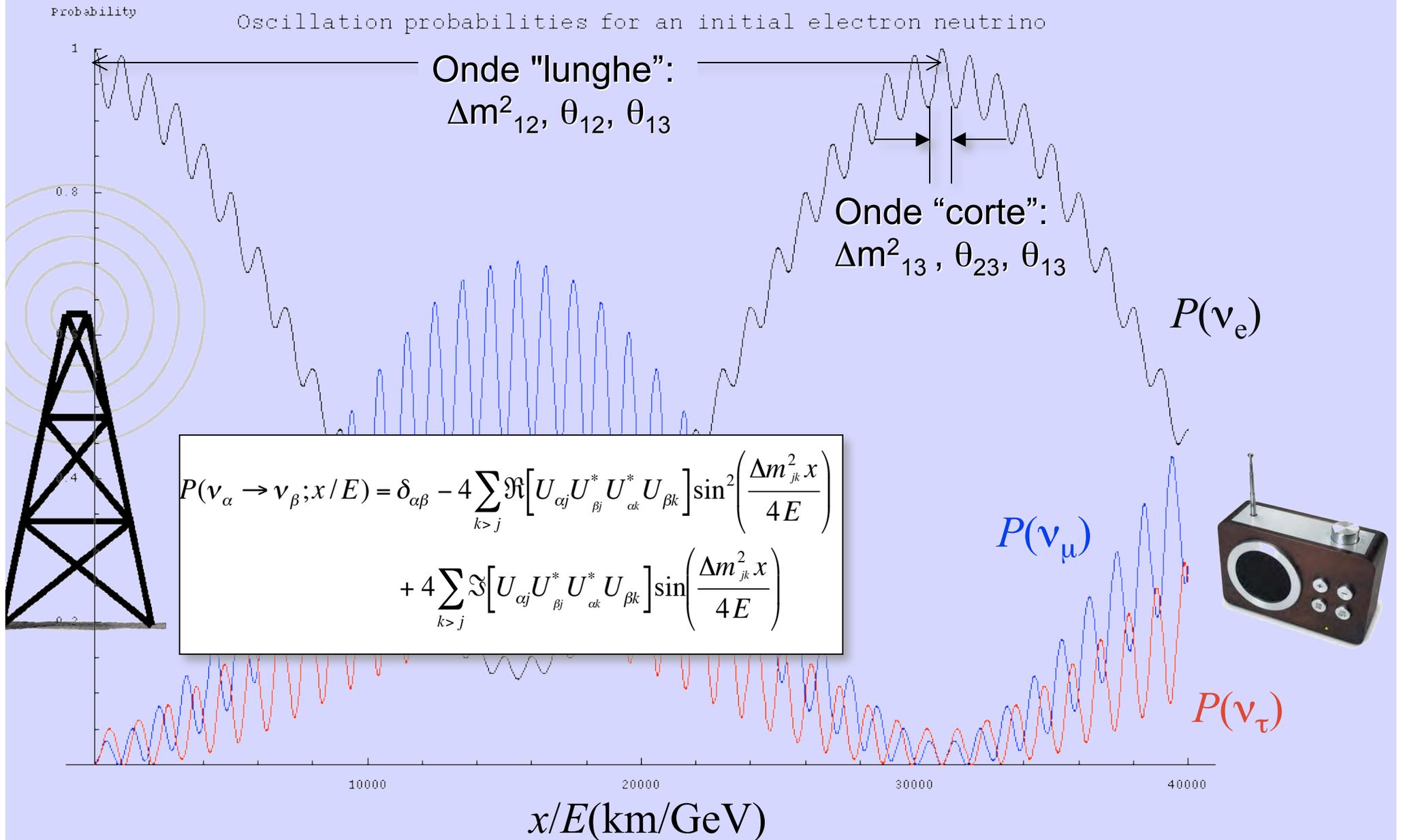
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \cos \theta_{23} & -\sin \theta_{23} \\ & \sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_{13} & -e^{i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ & 1 & \\ e^{i\delta_{CP}} \sin \theta_{13}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



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



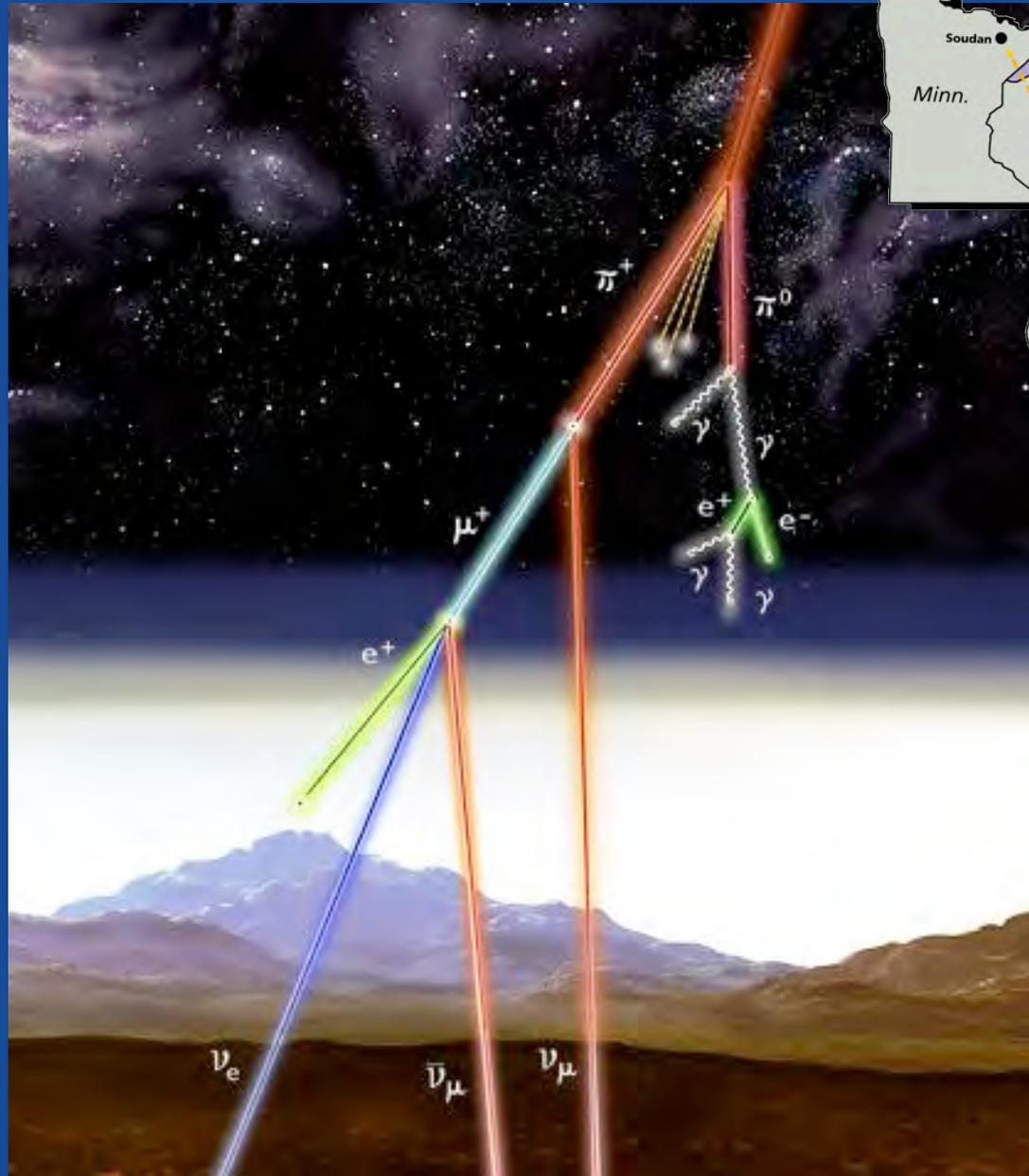
Le oscillazioni di sapore



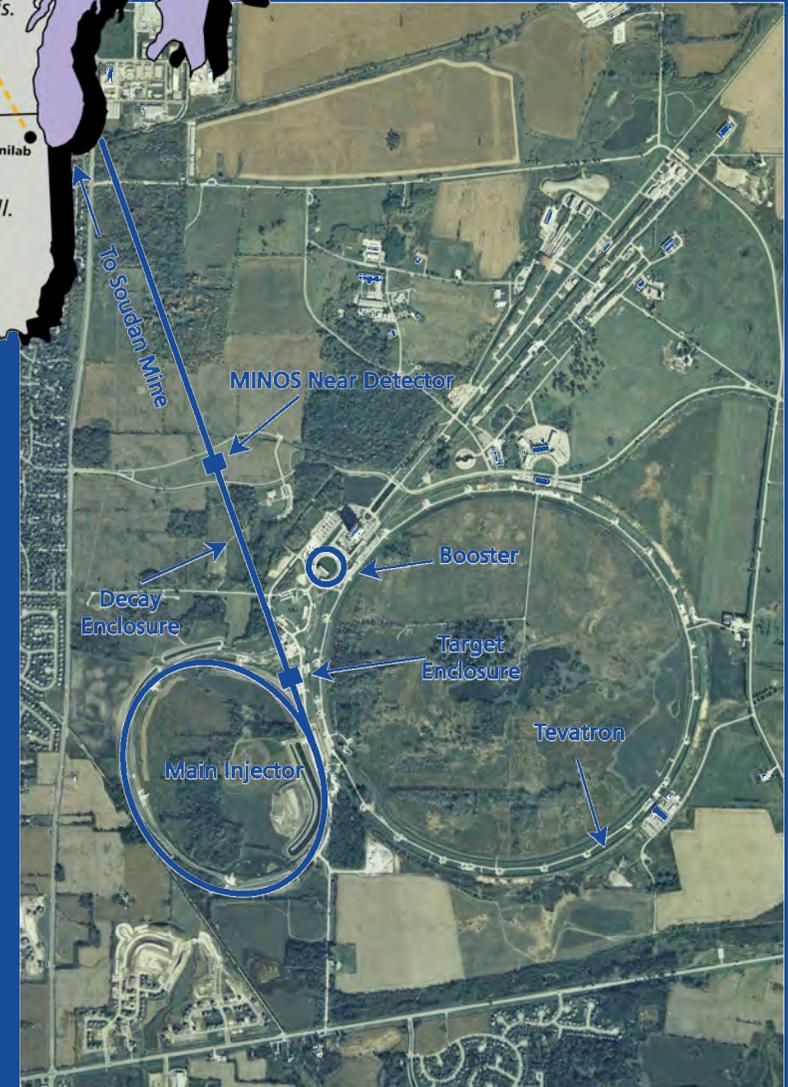
Terre conosciute e terre sconosciute



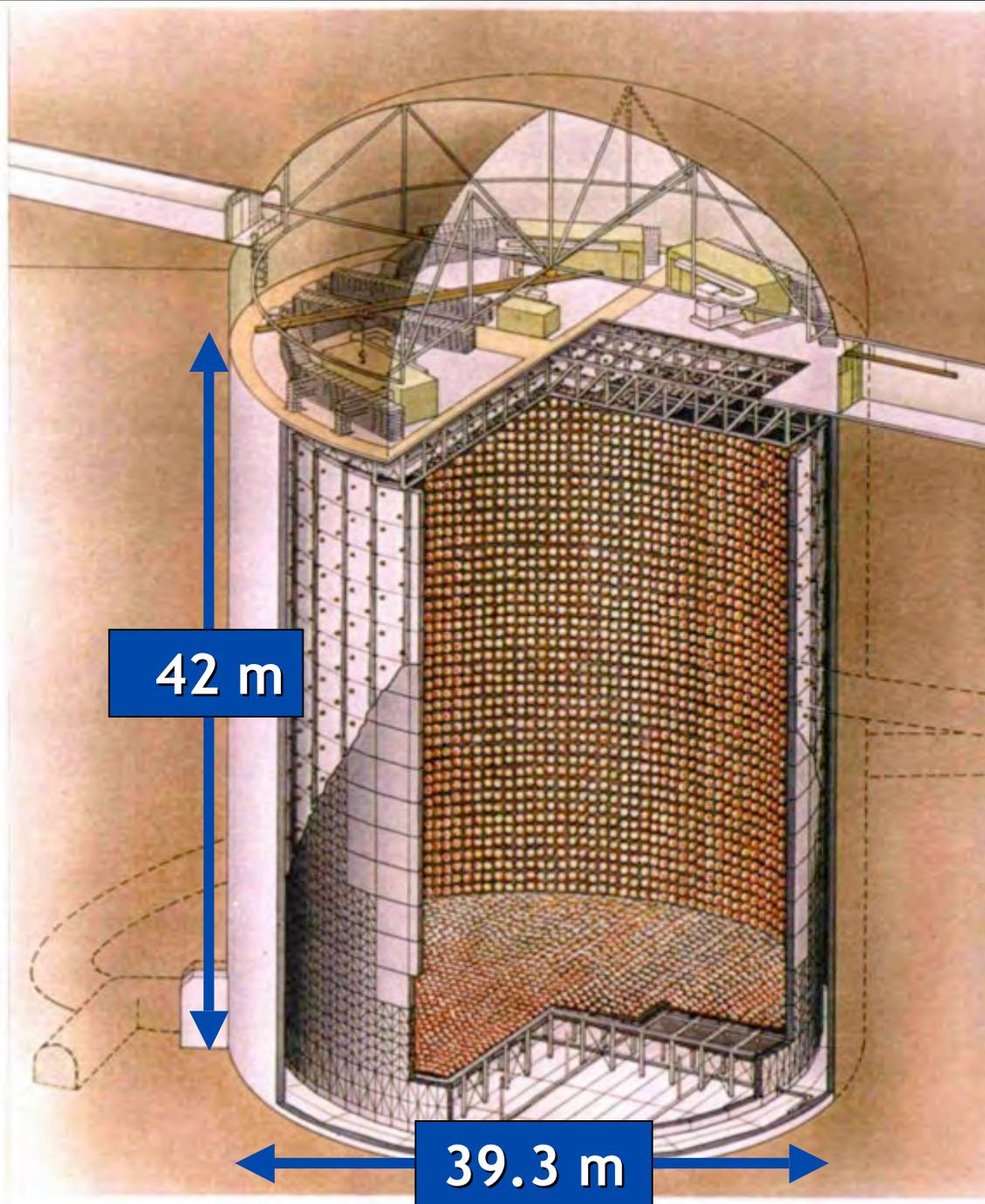
Sintonizzazione sulle onde corte (E~GeV)...



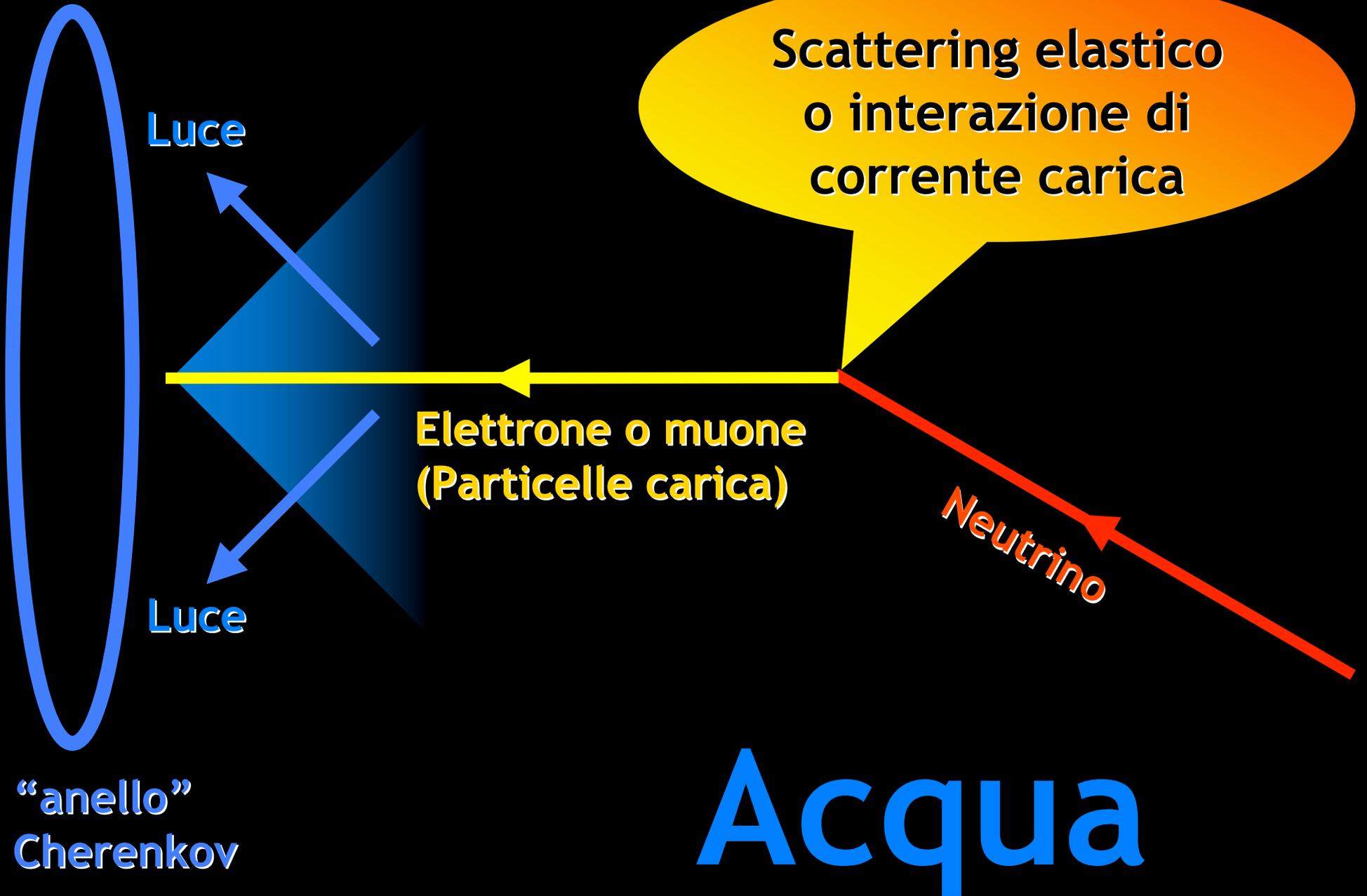
Long Baseline
(es. MINOS)



Rivelatore di neutrini SuperKamiokande (Giappone)



Effetto Cherenkov



Scattering elastico
o interazione di
corrente carica

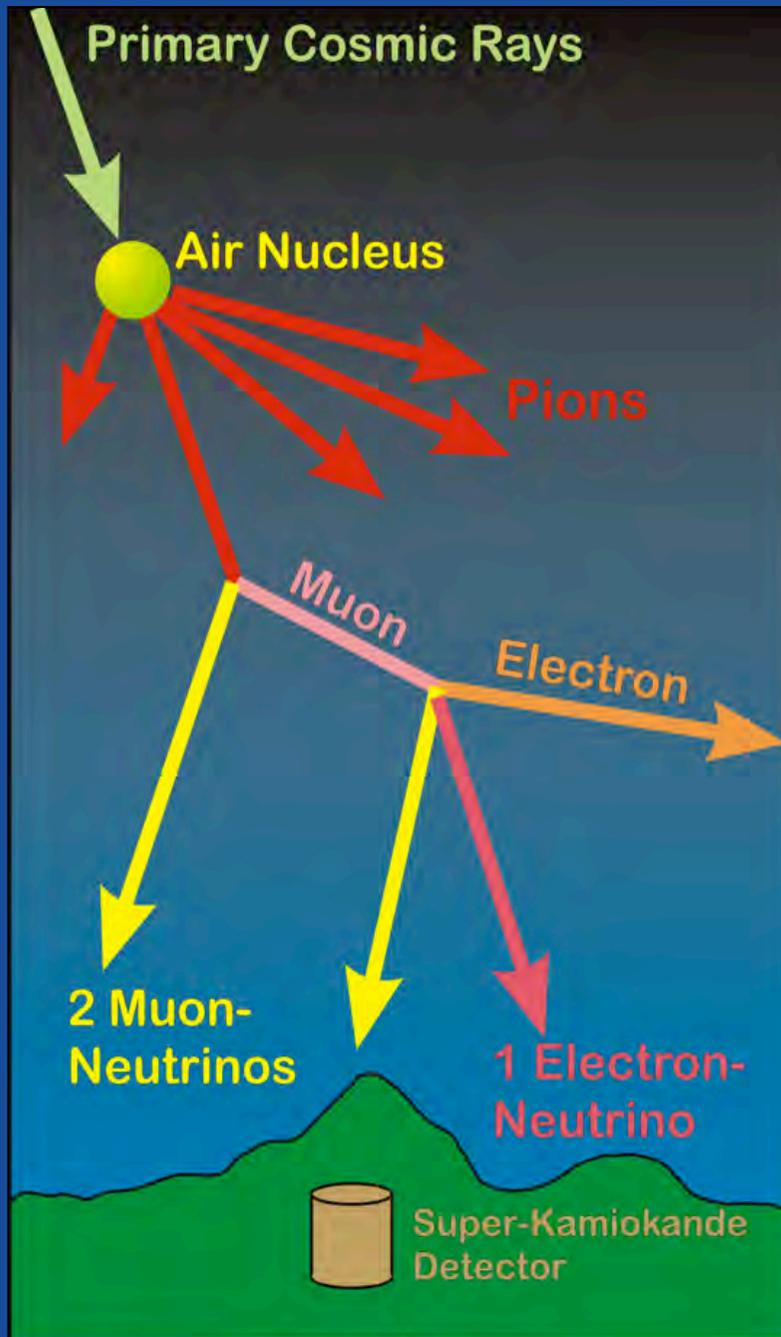
Elettrone o muone
(Particelle carica)

Neutrino

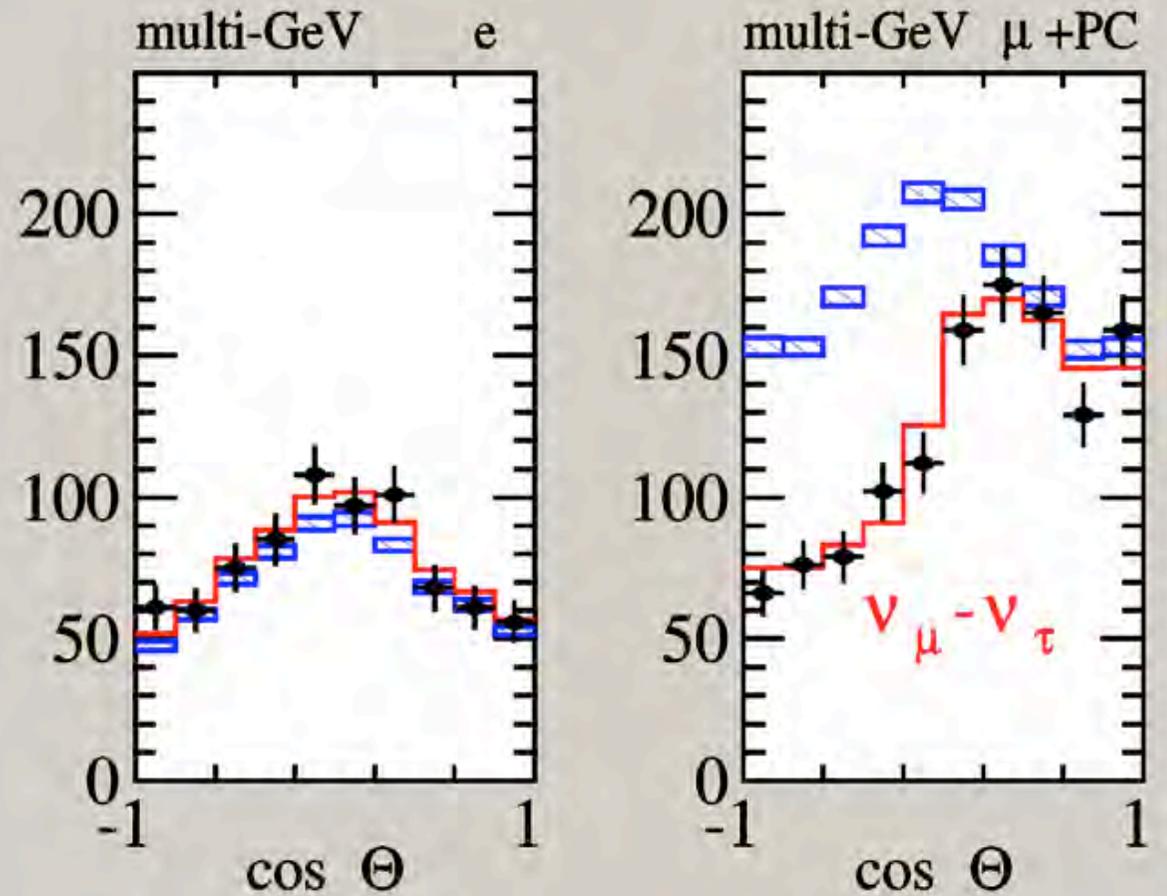
"anello"
Cherenkov

Acqua

L' "anomalia" dei neutrini atmosferici



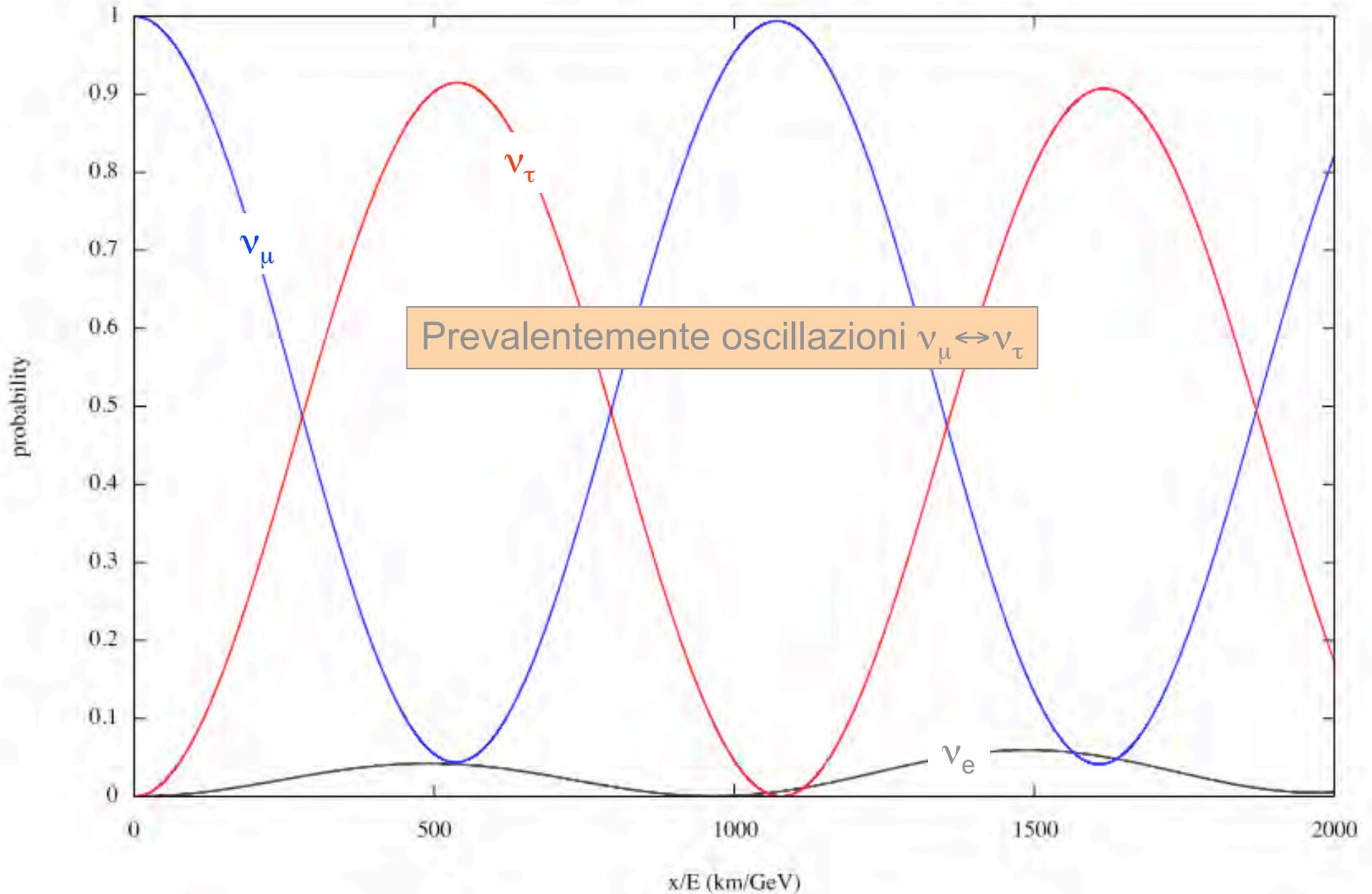
Distribuzione in funzione dell'angolo di zenith dei ν in SuperKamiokande [hep-ex/0210019]



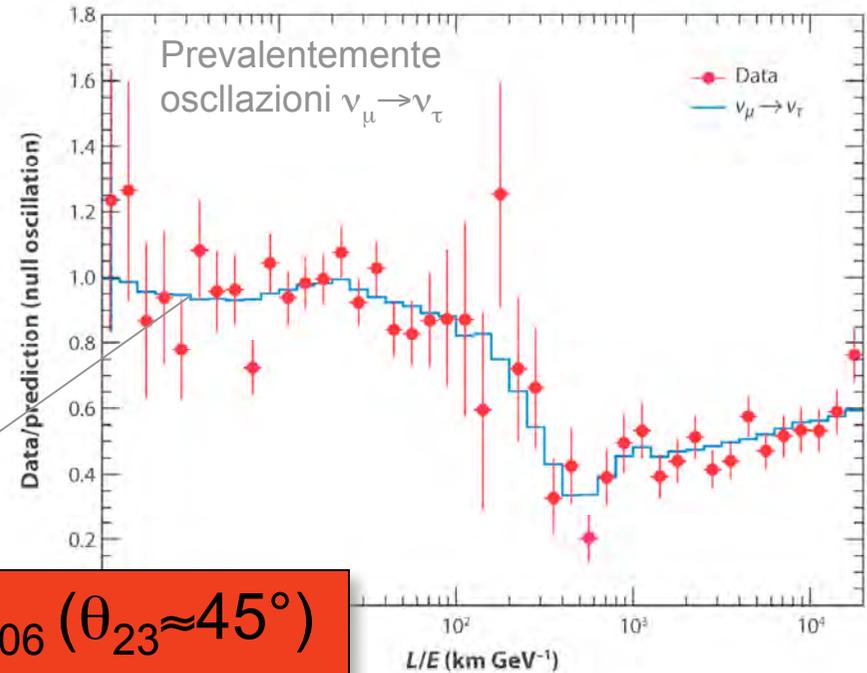
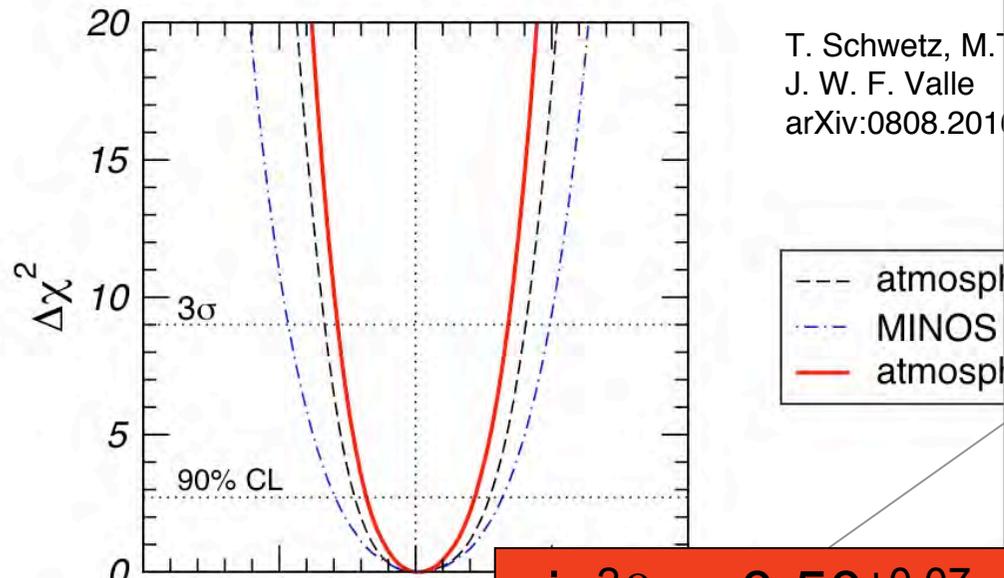
Circa metà dei neutrini muonici provenienti dal basso è mancante

Oscillazioni a “onde corte”

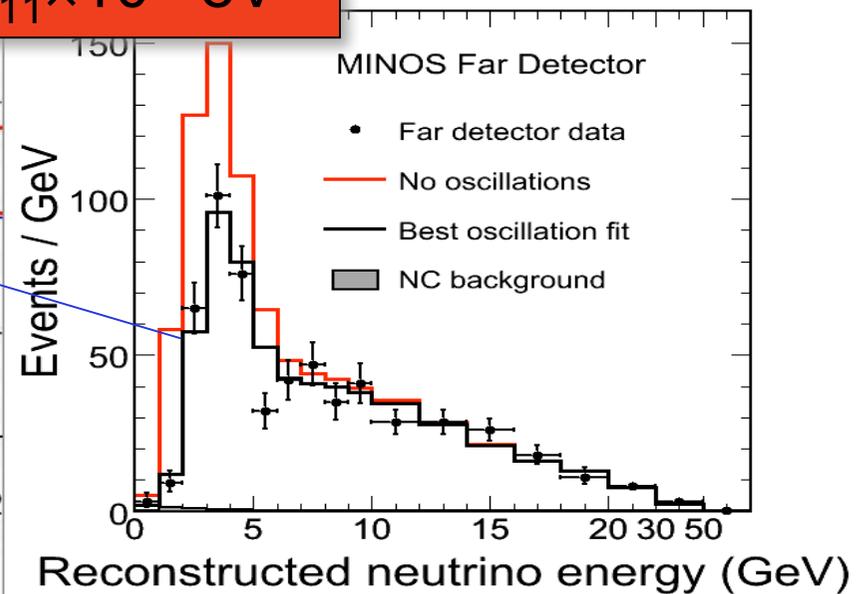
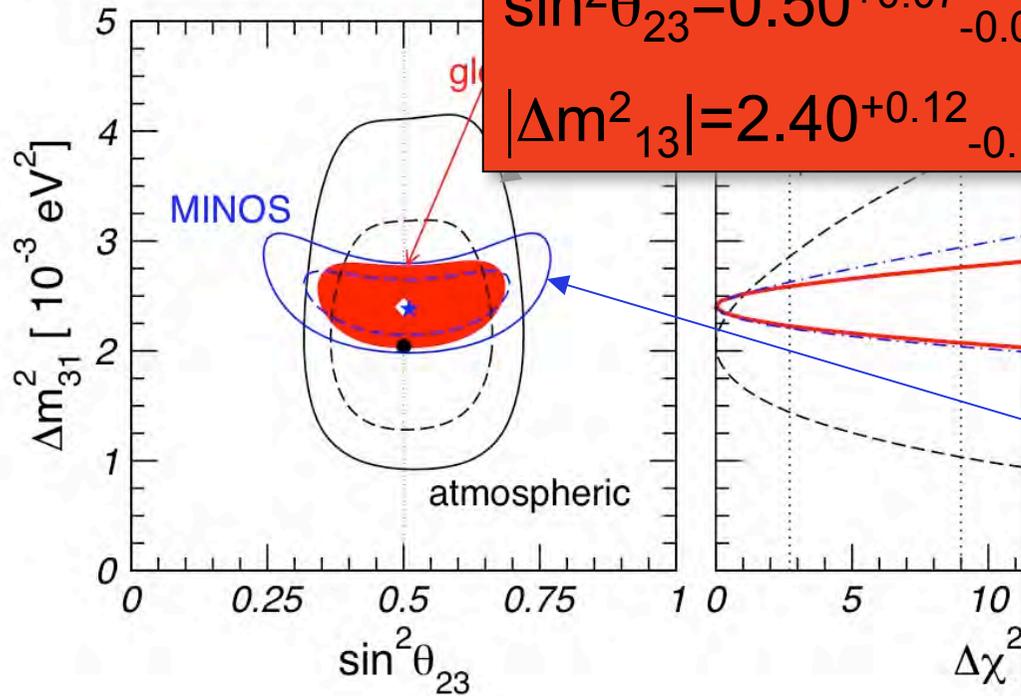
Oscillation probabilities for an initial muon neutrino



Sintonizzazione sulle onde corte (E~GeV)... ..



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



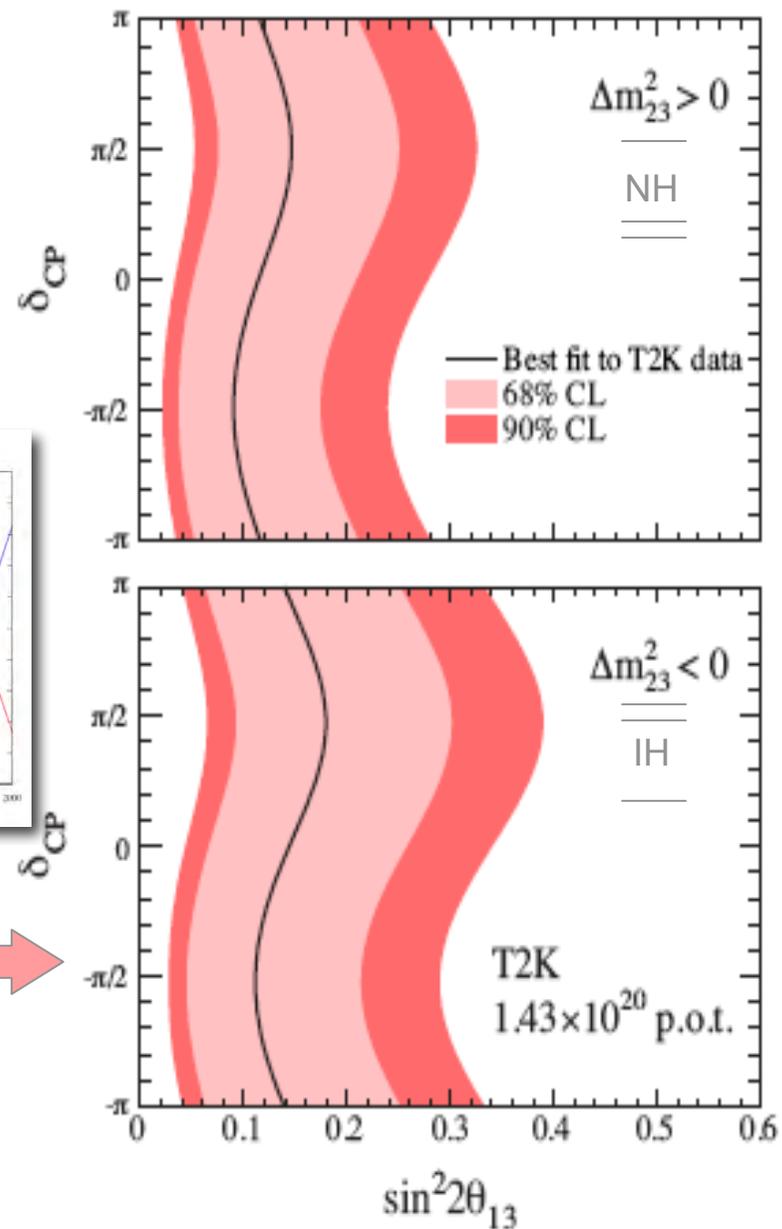
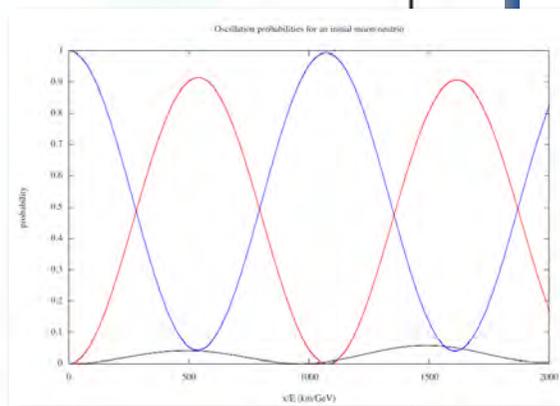
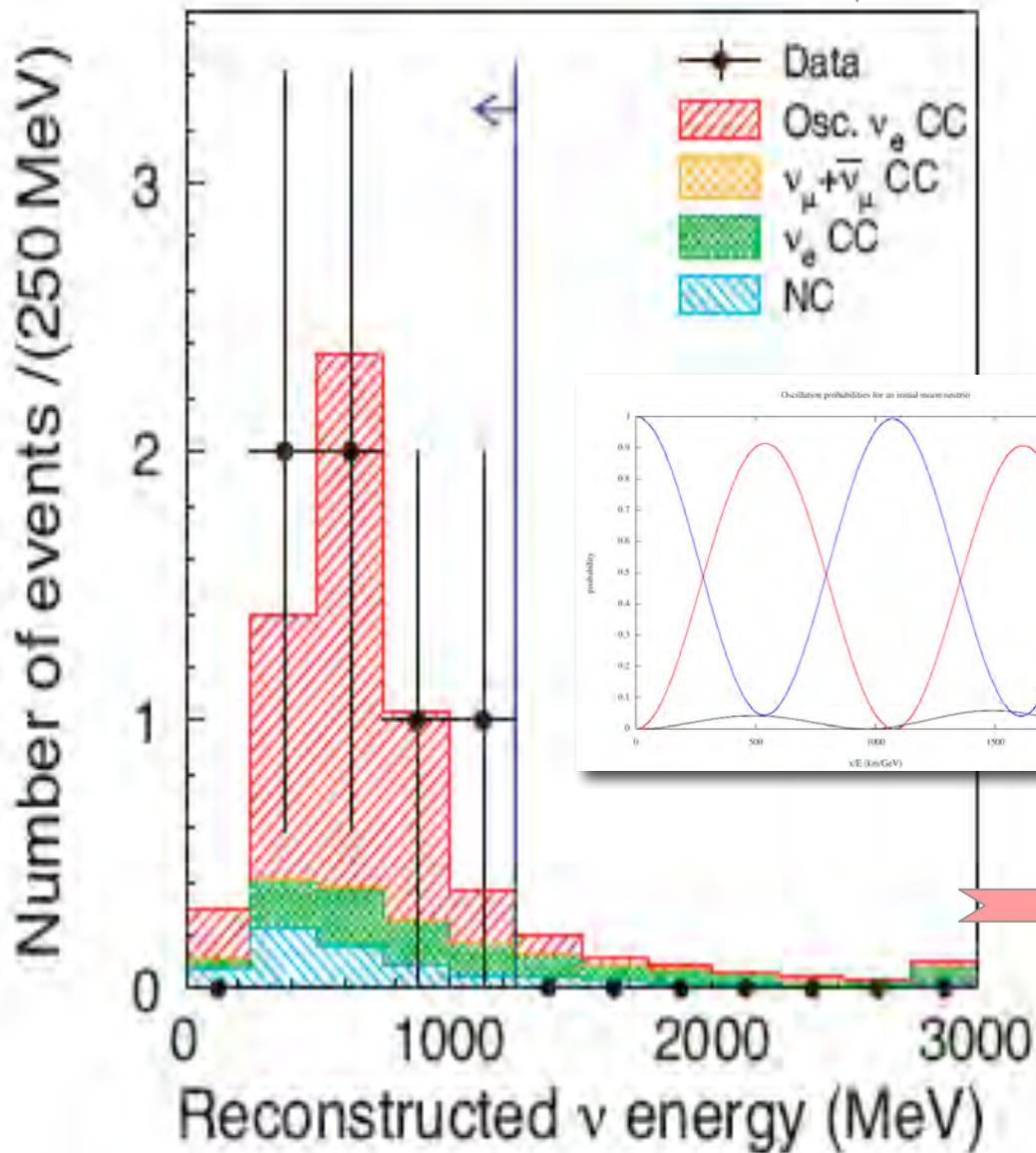
Apparizione dei neutrini tau: OPERA

La rivelazione del ν_τ non è un'impresa semplice: un esperimento dedicato al Gran Sasso ha però già rivelato un evento di ν_τ confermando il paradigma delle oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ sulla scala dei neutrini atmosferici

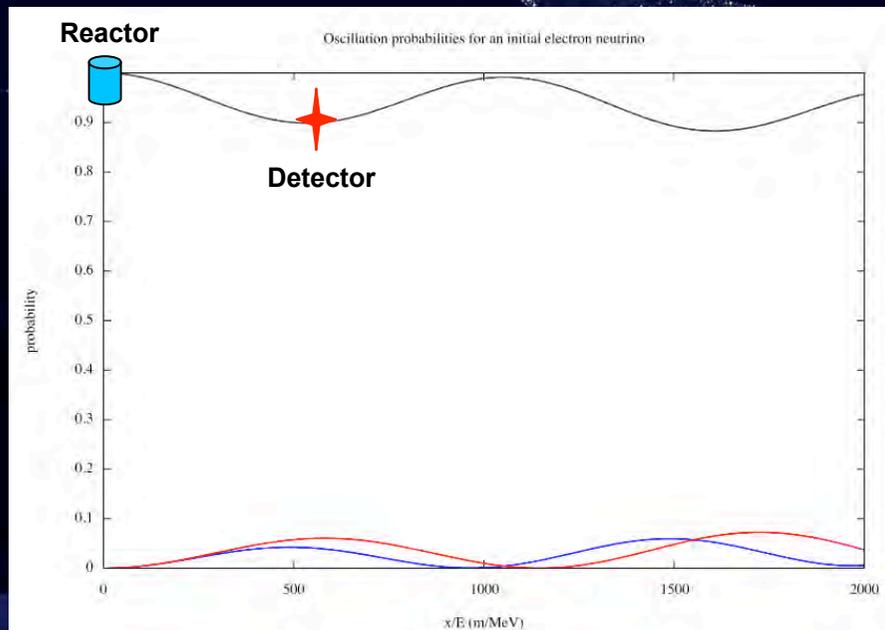


La misura di θ_{13}

Eccesso di eventi di ν_e nel fascio di ν_μ in T2K

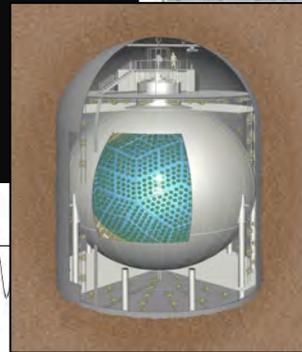
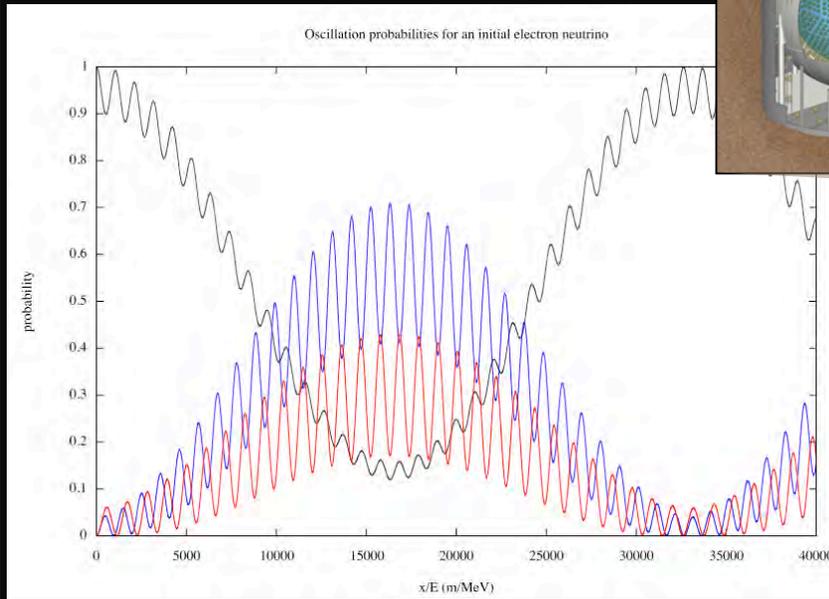
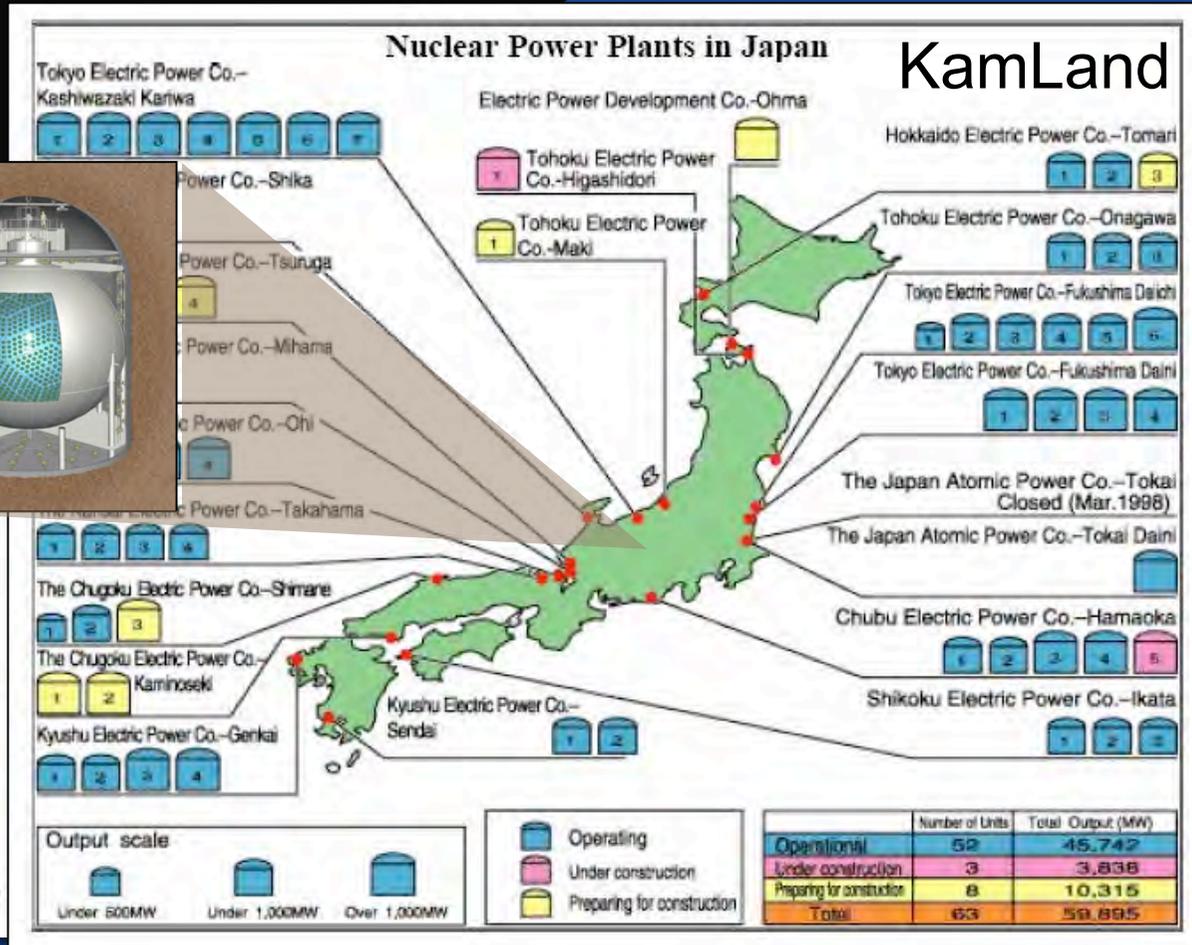
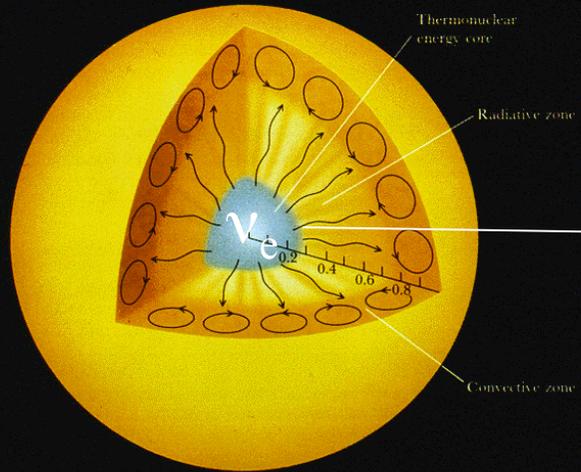


Misura di θ_{13} ai reattori

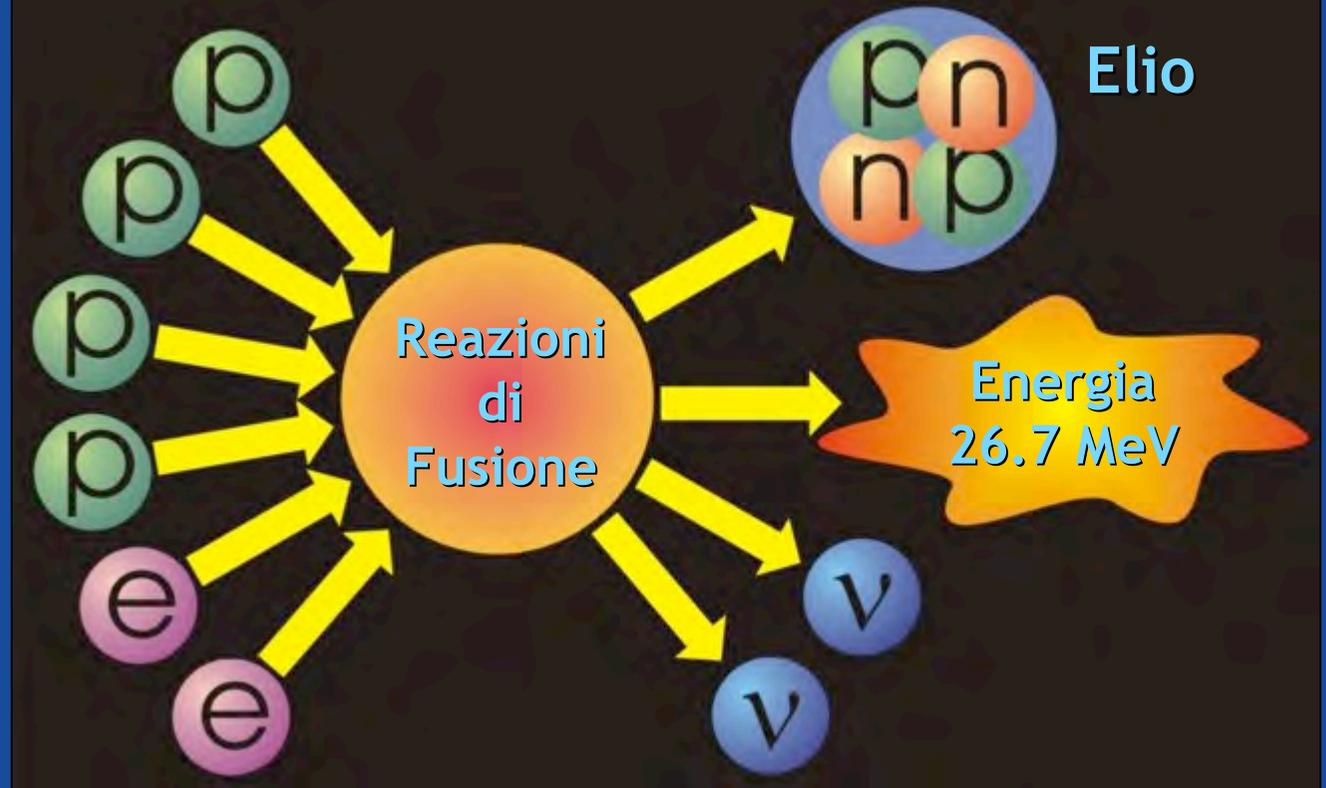
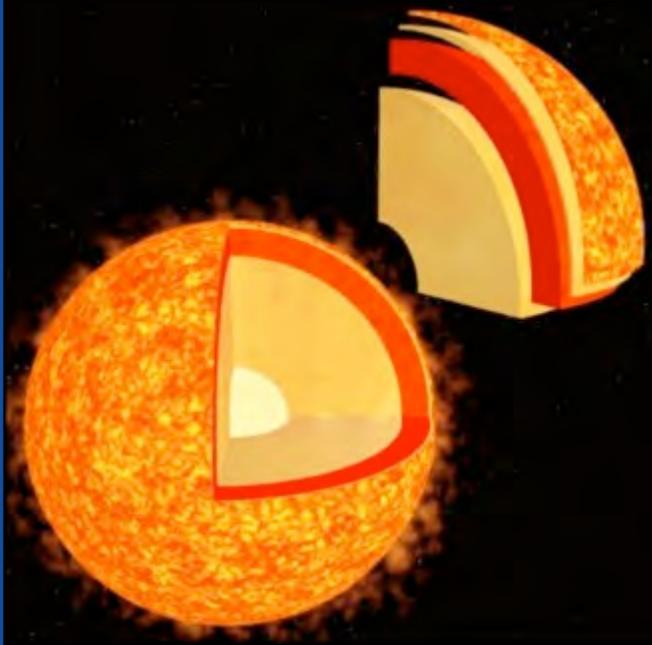


Sintonizzazione sulle onde lunghe (E~MeV)...

Neutrini solari



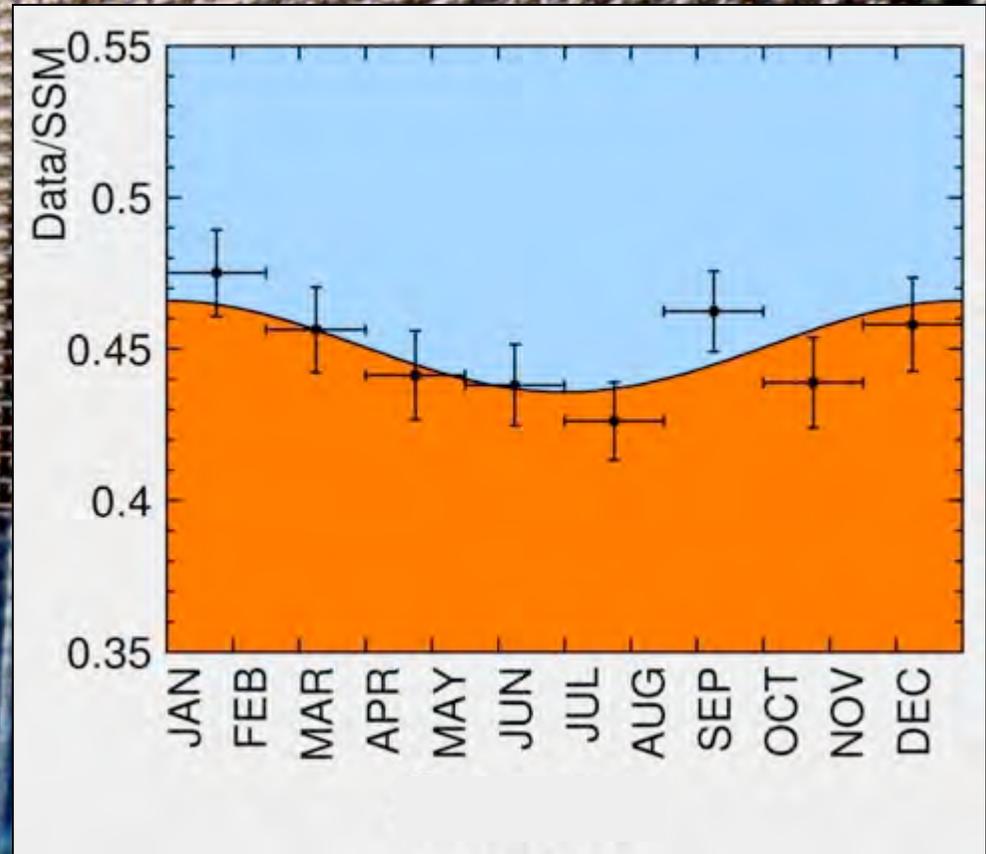
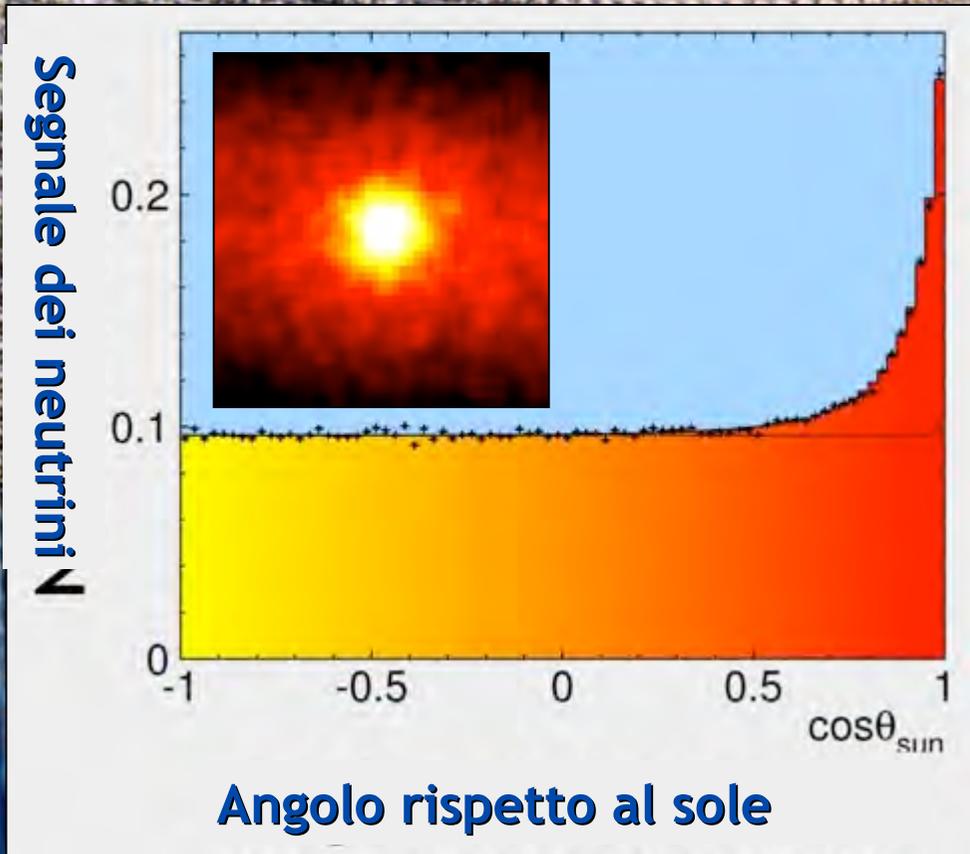
Neutrini dal Sole



**Radiazione solare: 98 % fotoni
2 % neutrini
66 miliardi neutrini/cm² sec sulla terra!**

Hans Bethe (1906–2005, Premio Nobel 1967)
Fusione termonucleare nelle stelle (1938)

Super-Kamiokande: il Sole "visto" a neutrini



Borexino @ Gran Sasso

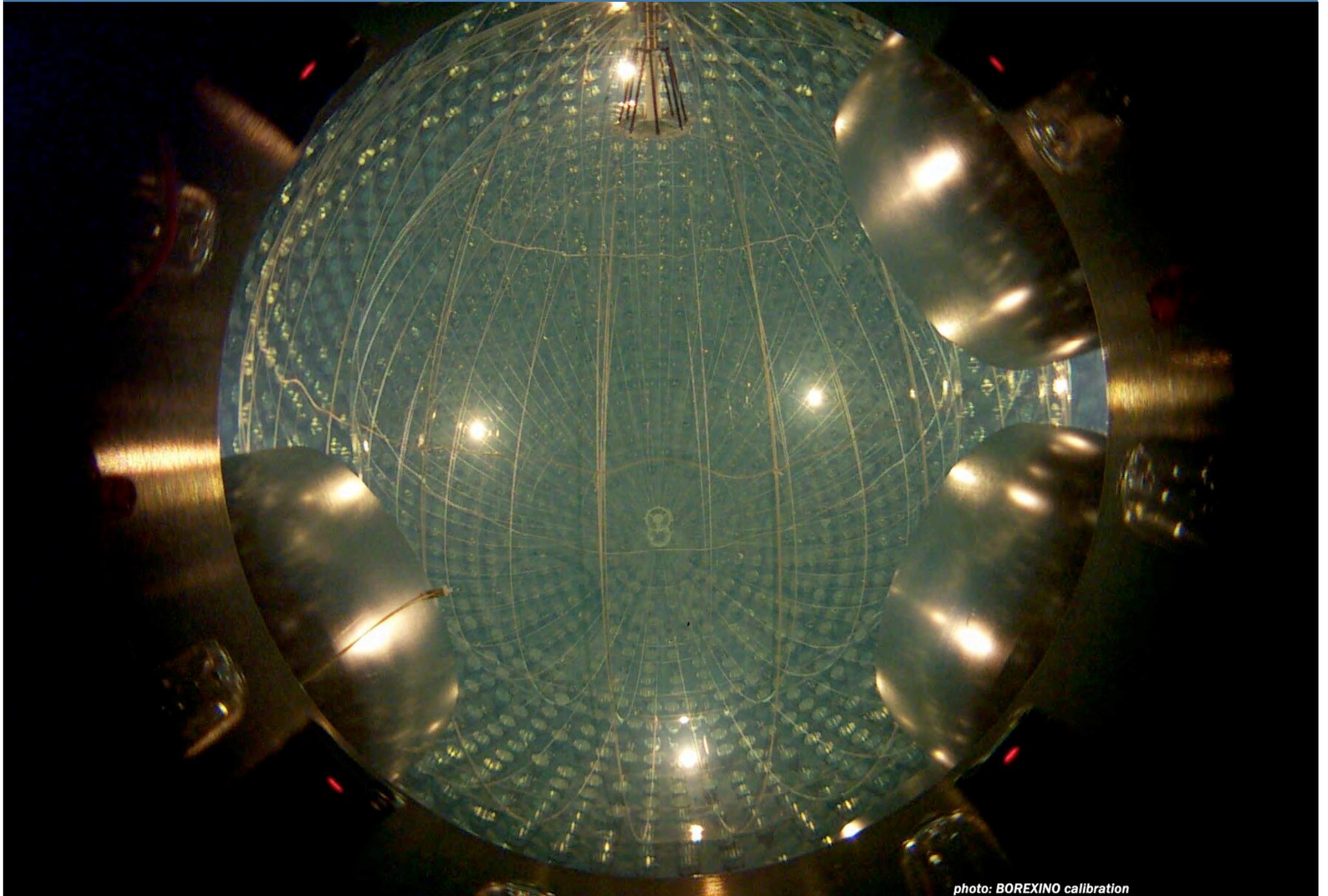
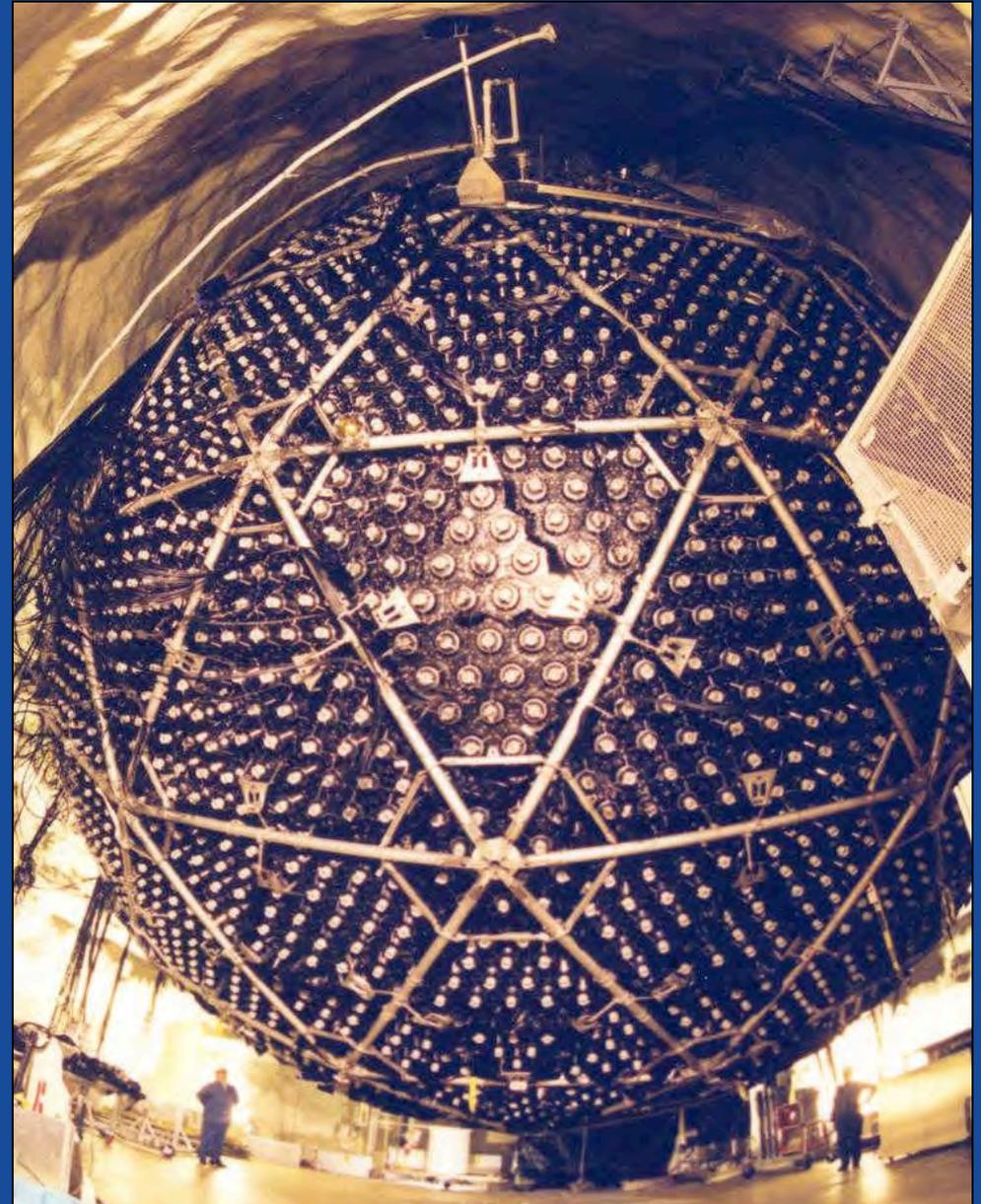
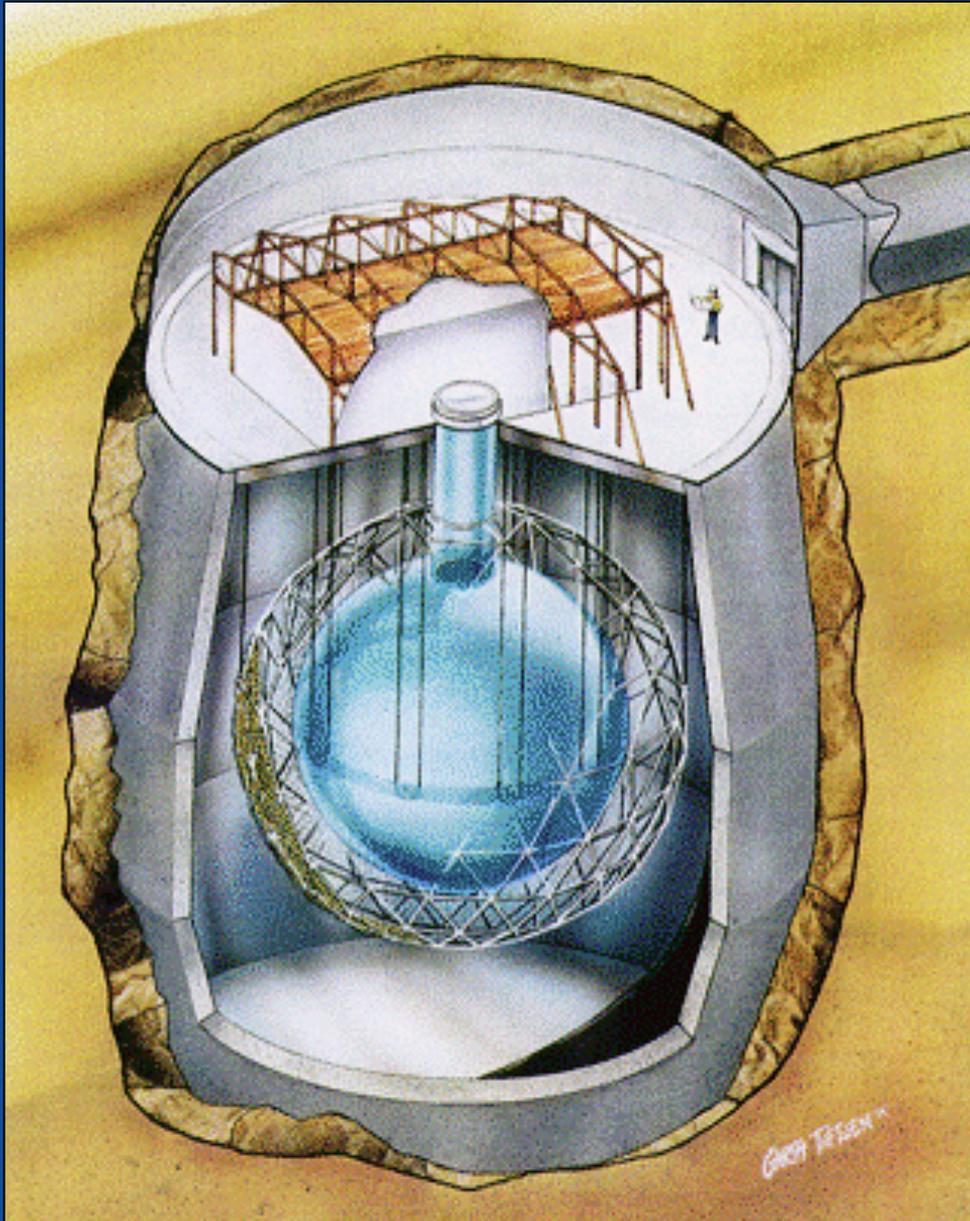


photo: BOREXINO calibration

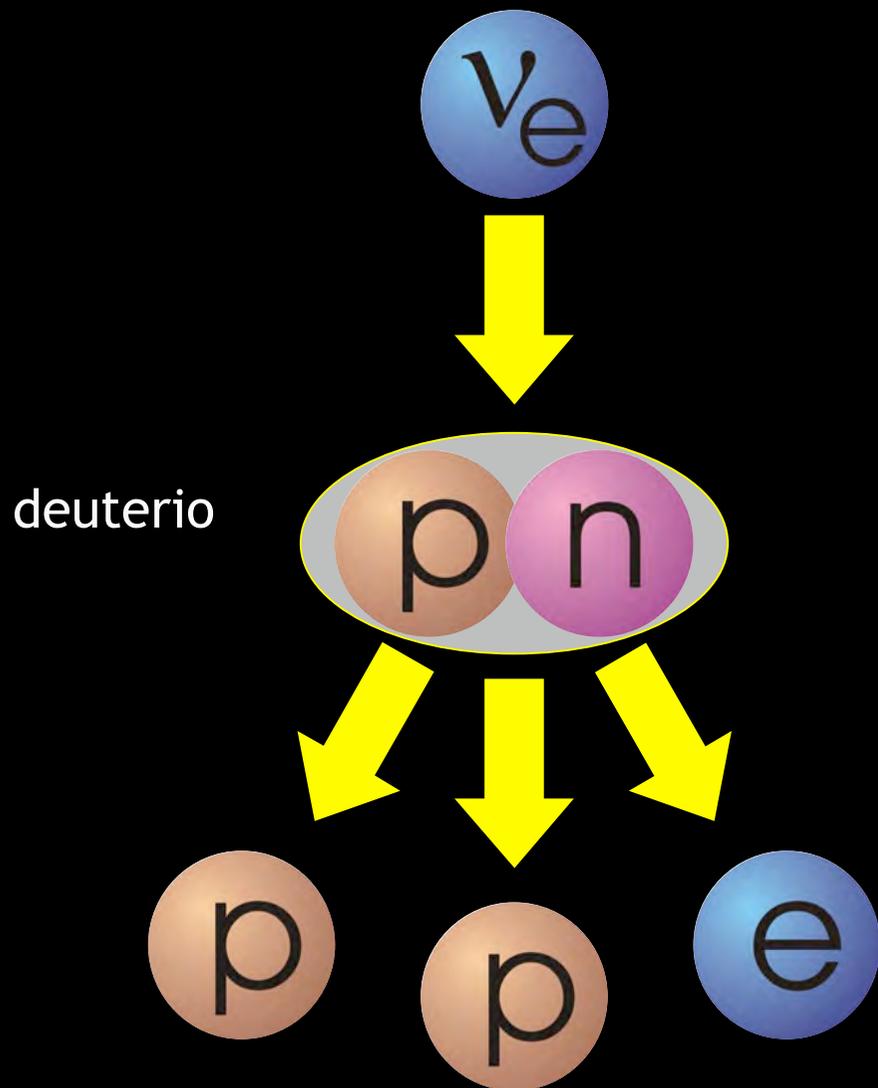
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

1000 tonnellate di acqua pesante

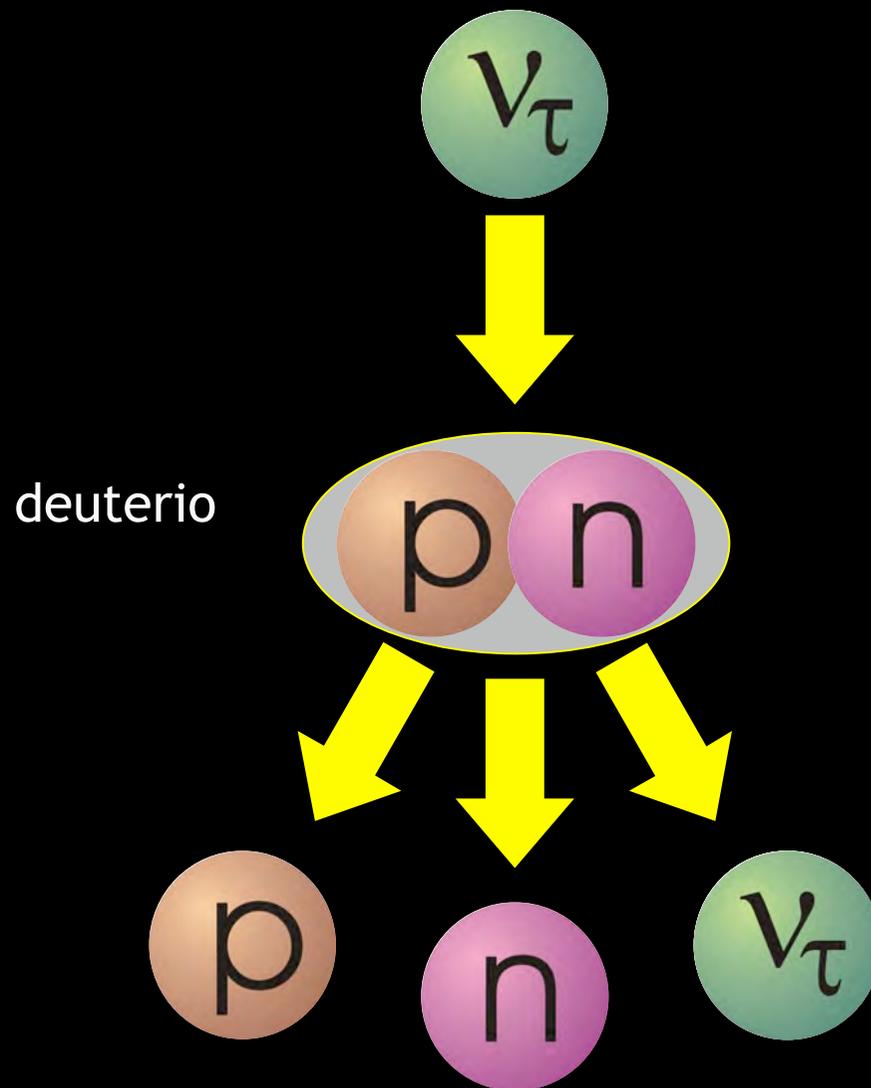


Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

1000 tonnellate di acqua pesante

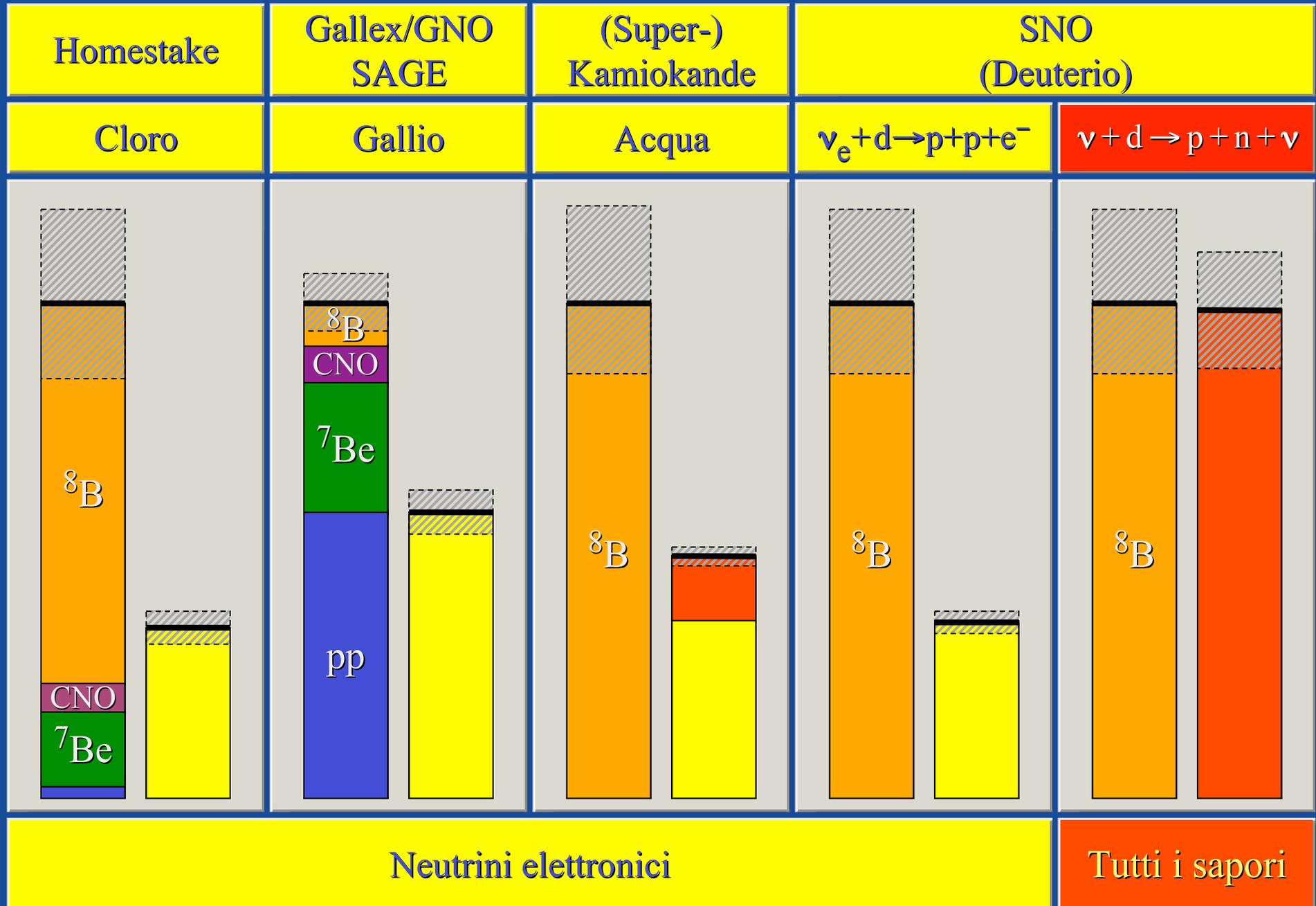


Neutrini elettronici



Neutrini di tutti i sapori

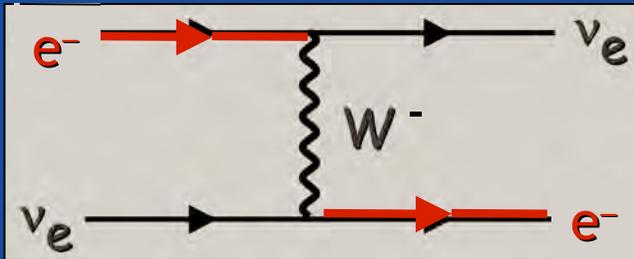
Il "deficit" dei neutrini solari



“Rifrazione” dei neutrini nella materia

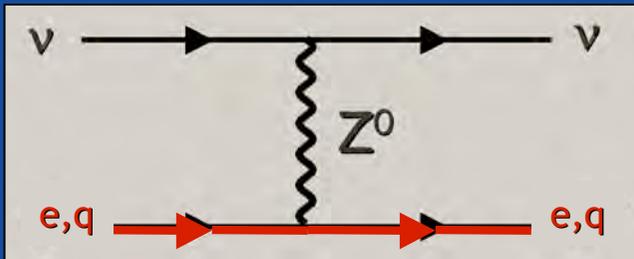
I neutrini che si propagano nella materia risentono dell'interazione con le particelle del mezzo stesso (effetto MSW)

Correnti
“cariche”



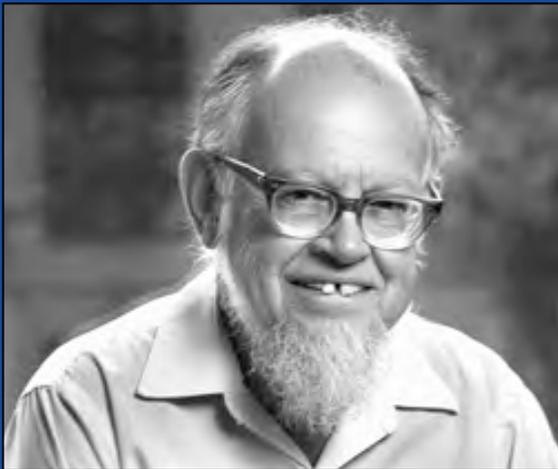
e^-, q elettrone o quark del mezzo

Correnti
“neutre”



$$V = \pm\sqrt{2} G_{\text{FN}} n_{\text{B}} \times \begin{cases} -\frac{1}{2} Y_{\text{n}} + Y_{\text{e}} & \text{per } \nu_{\text{e}} \\ -\frac{1}{2} Y_{\text{n}} & \text{per } \nu_{\mu}, \nu_{\tau} \end{cases}$$

$$\sqrt{2} G_{\text{FN}} n_{\text{B}} = 0.762 \times 10^{-13} \text{ eV} \frac{\rho}{\text{g cm}^{-3}}$$

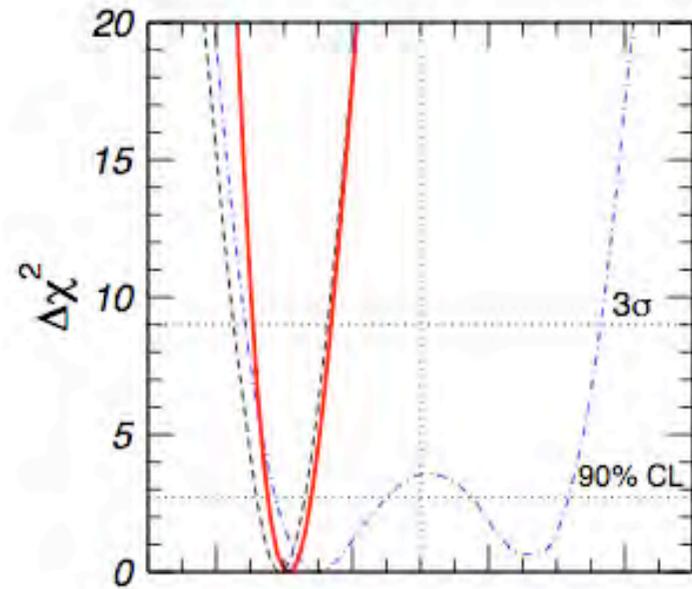


Lincoln Wolfenstein

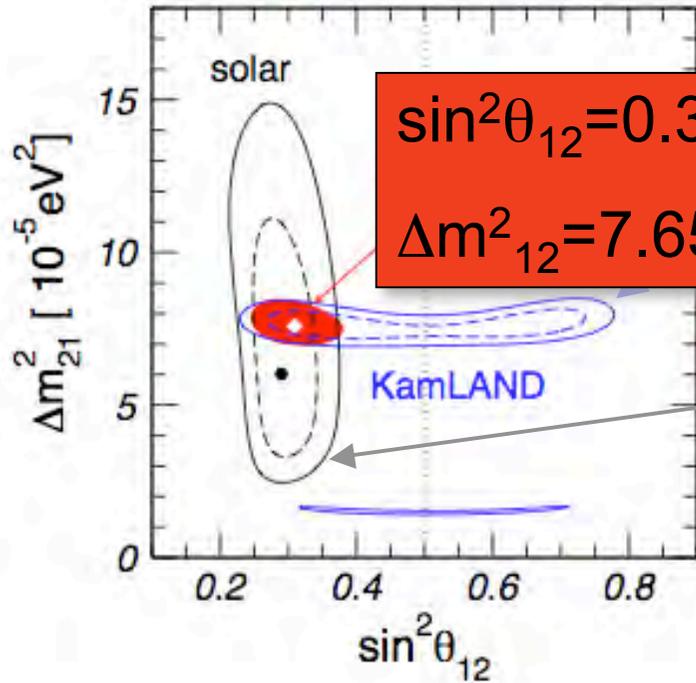
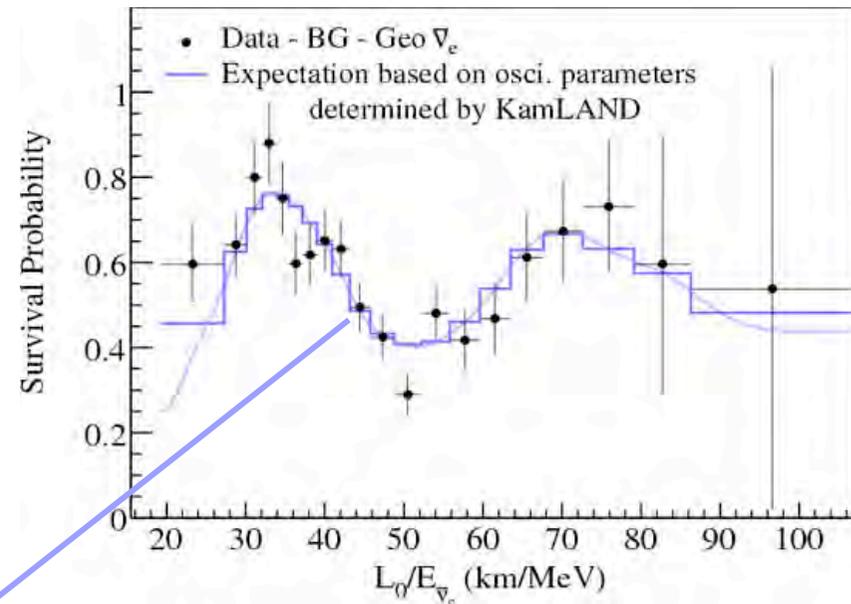
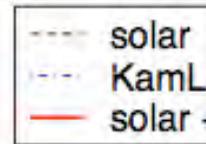
L'equazione che descrive l'evoluzione degli stati di sapore nella materia ordinaria viene modificata come (PRD 17:2369, 1978)

$$i \frac{\partial}{\partial z} \begin{pmatrix} \nu_{\text{e}} \\ \nu_{\mu} \end{pmatrix} = \left[\frac{U_{\theta} M^2 U_{\theta}^T}{2E} + \begin{pmatrix} n_{\text{e}} - \frac{1}{2} n_{\text{n}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} n_{\text{n}} \end{pmatrix} \right] \begin{pmatrix} \nu_{\text{e}} \\ \nu_{\mu} \end{pmatrix}$$

Sintonizzazione sulle onde lunghe (E~MeV)...

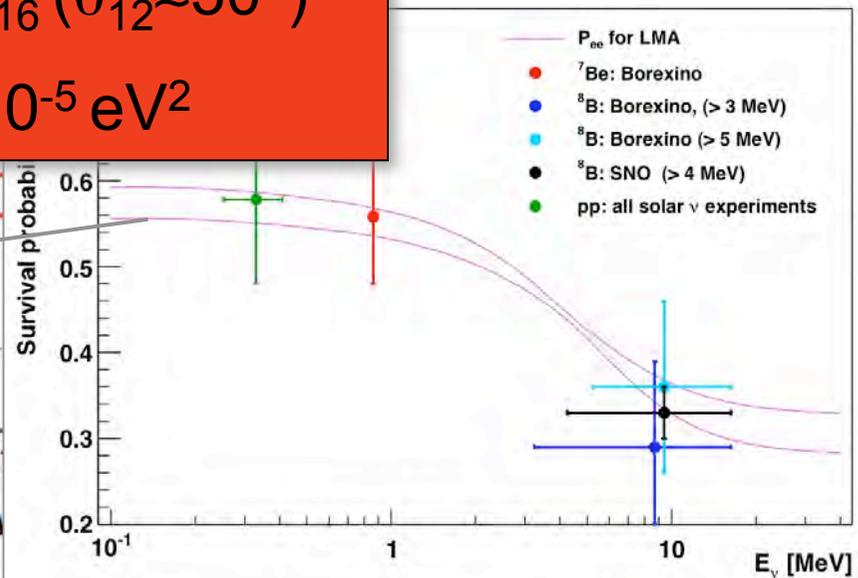


T. Schwetz, M. J. W. F. Valle
 arXiv:0808.2016



$$\sin^2\theta_{12} = 0.304^{+0.022}_{-0.016} \quad (\theta_{12} \approx 30^\circ)$$

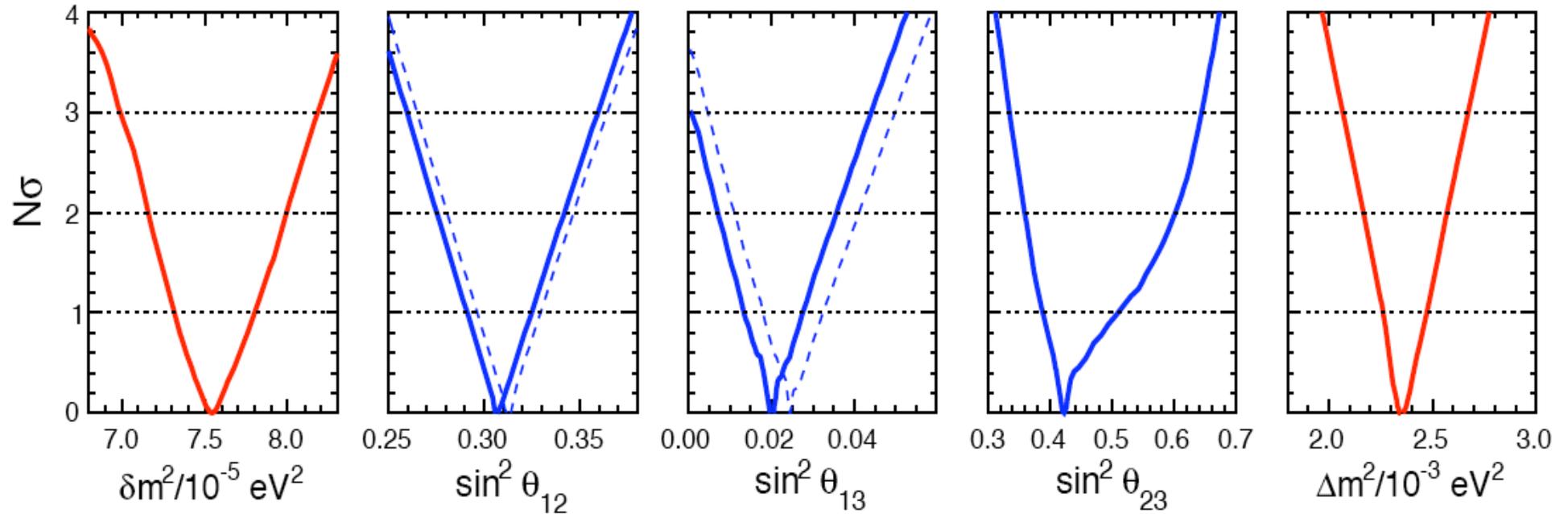
$$\Delta m^2_{12} = 7.65^{+0.23}_{-0.20} \times 10^{-5} \text{eV}^2$$



Lo stato dell'arte

G.L. Fogli et al., arXiv:1106.6028

Synopsis of global 3ν oscillation analysis

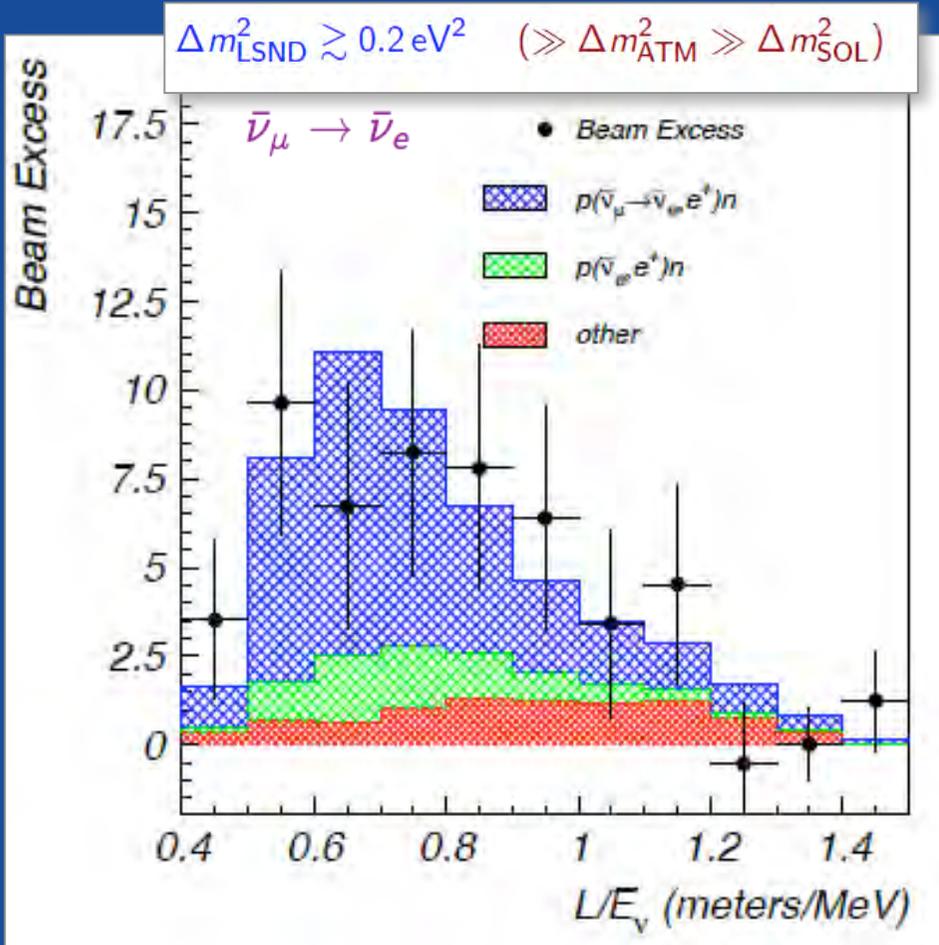


Parameter	$\Delta m^2_{12} 10^{-5} \text{ eV}^2$	$\sin^2 \theta_{12}$	$\sin^2 \theta_{13}$	$\sin^2 \theta_{23}$	$\Delta m^2_{13} 10^{-3} \text{ eV}^2$
Best fit	7.58	0.306 (0.312)	0.021 (0.025)	0.42	2.35
1σ range	7.32 – 7.80	0.291 – 0.324 (0.296 – 0.329)	0.013 – 0.028 (0.018 – 0.032)	0.39 – 0.50	2.26 – 2.47
2σ range	7.16 – 7.99	0.275 – 0.342 (0.280 – 0.347)	0.008 – 0.036 (0.012 – 0.041)	0.36 – 0.60	2.17 – 2.57
3σ range	6.99 – 8.18	0.259 – 0.359 (0.265 – 0.364)	0.001 – 0.044 (0.005 – 0.050)	0.34 – 0.64	2.06 – 2.67

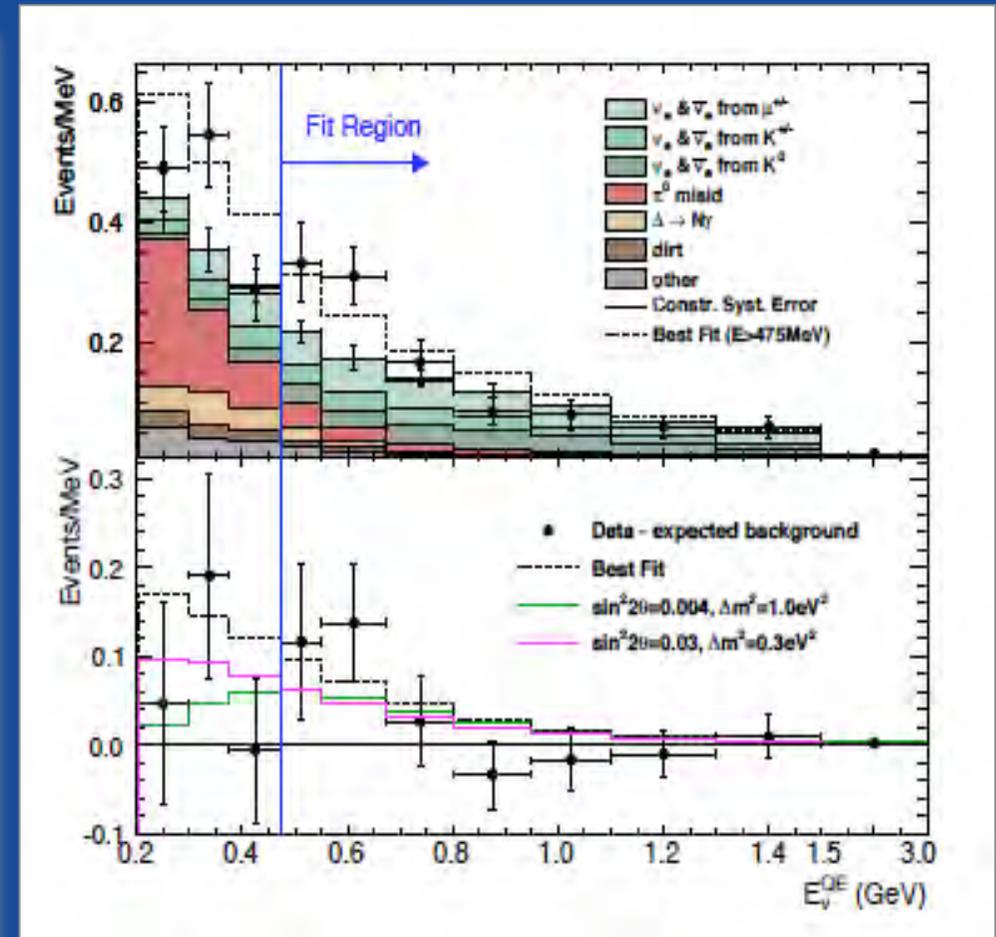
Neutrini sterili?

Recentemente sono emerse alcune anomalie che farebbero pensare all'esistenza di ulteriori neutrini oltre a quelli "standard"

LSND excess



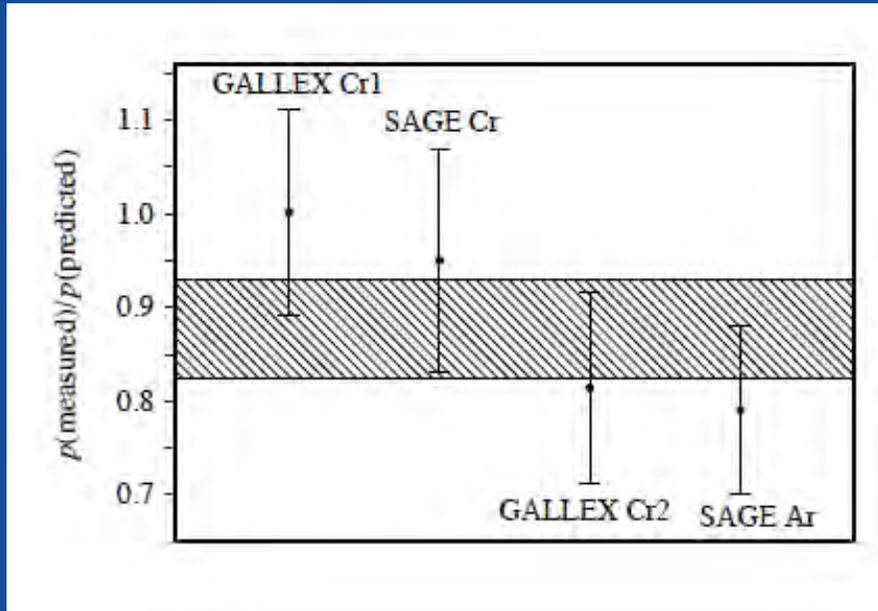
MiniBoone excess



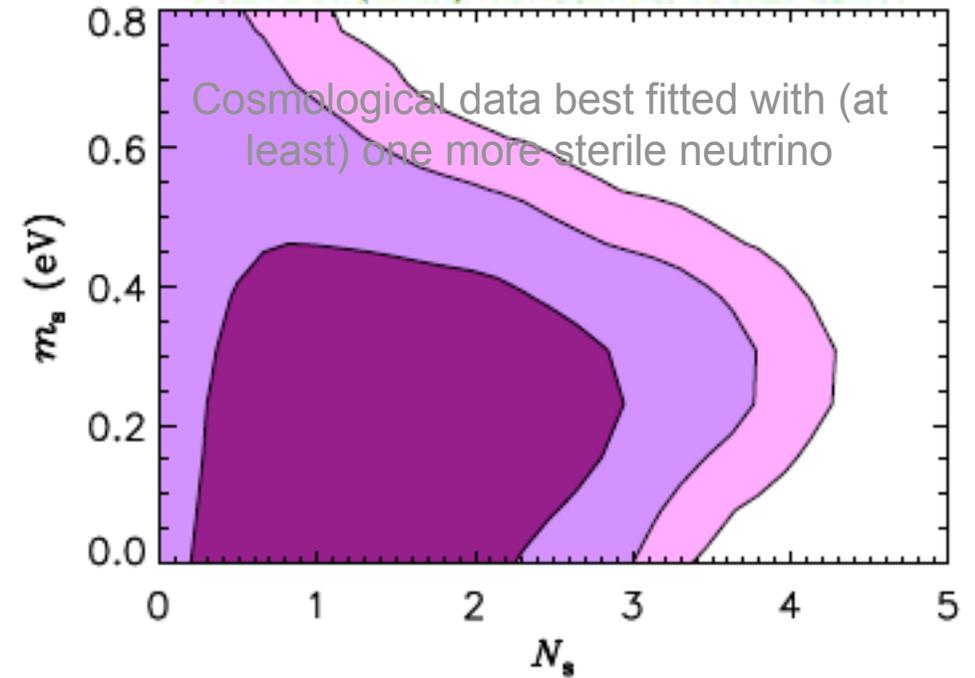
Questi eccessi sono in conflitto con lo scenario standard a 3ν

Neutrini sterili?

Gallium anomaly

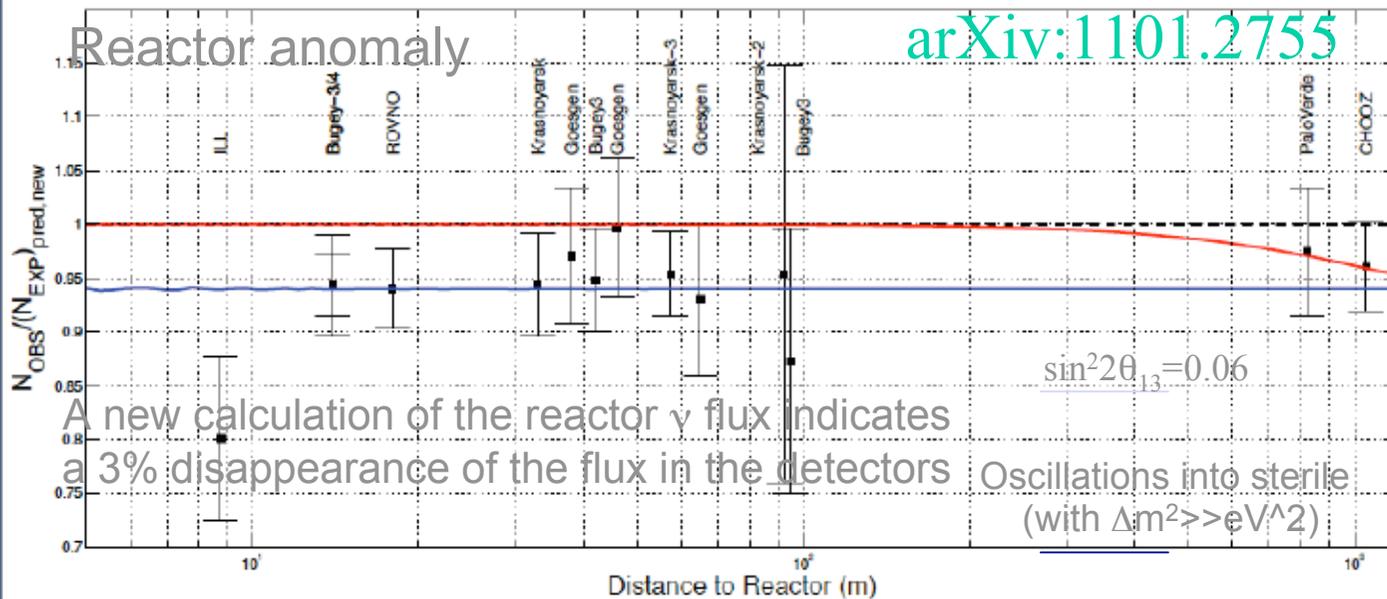


PRL 105 (2010) 181301, arXiv:1006.5276



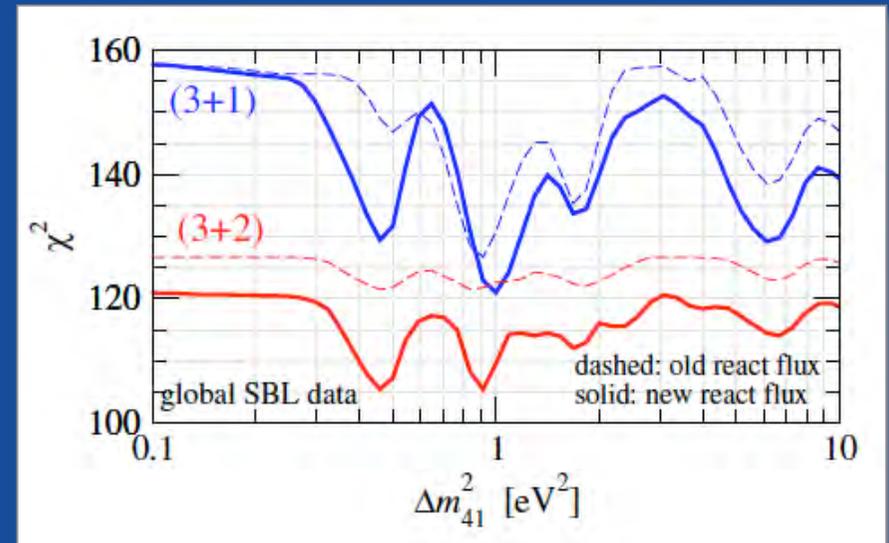
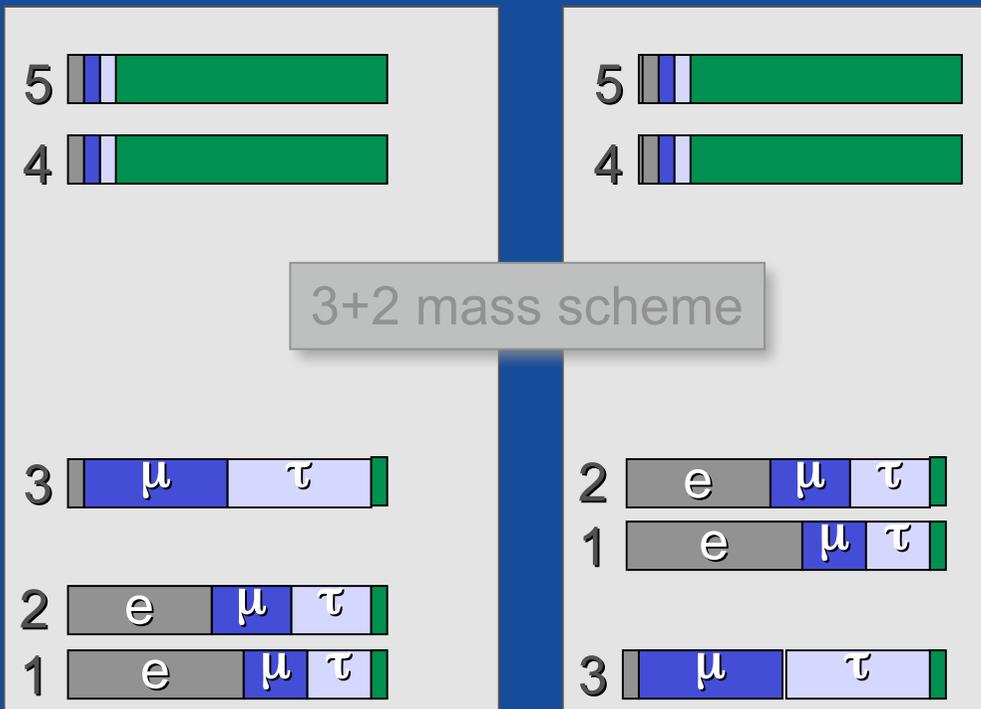
Reactor anomaly

arXiv:1101.2755



Neutrini sterili?

- ✓ In uno schema a 3+1 neutrini non è possibile inquadrare tutti i dati (a meno che non si includano anche improbabili violazioni di CPT)
- ✓ Un buon fit si ottiene in uno schema 3+2 con violazioni di CP



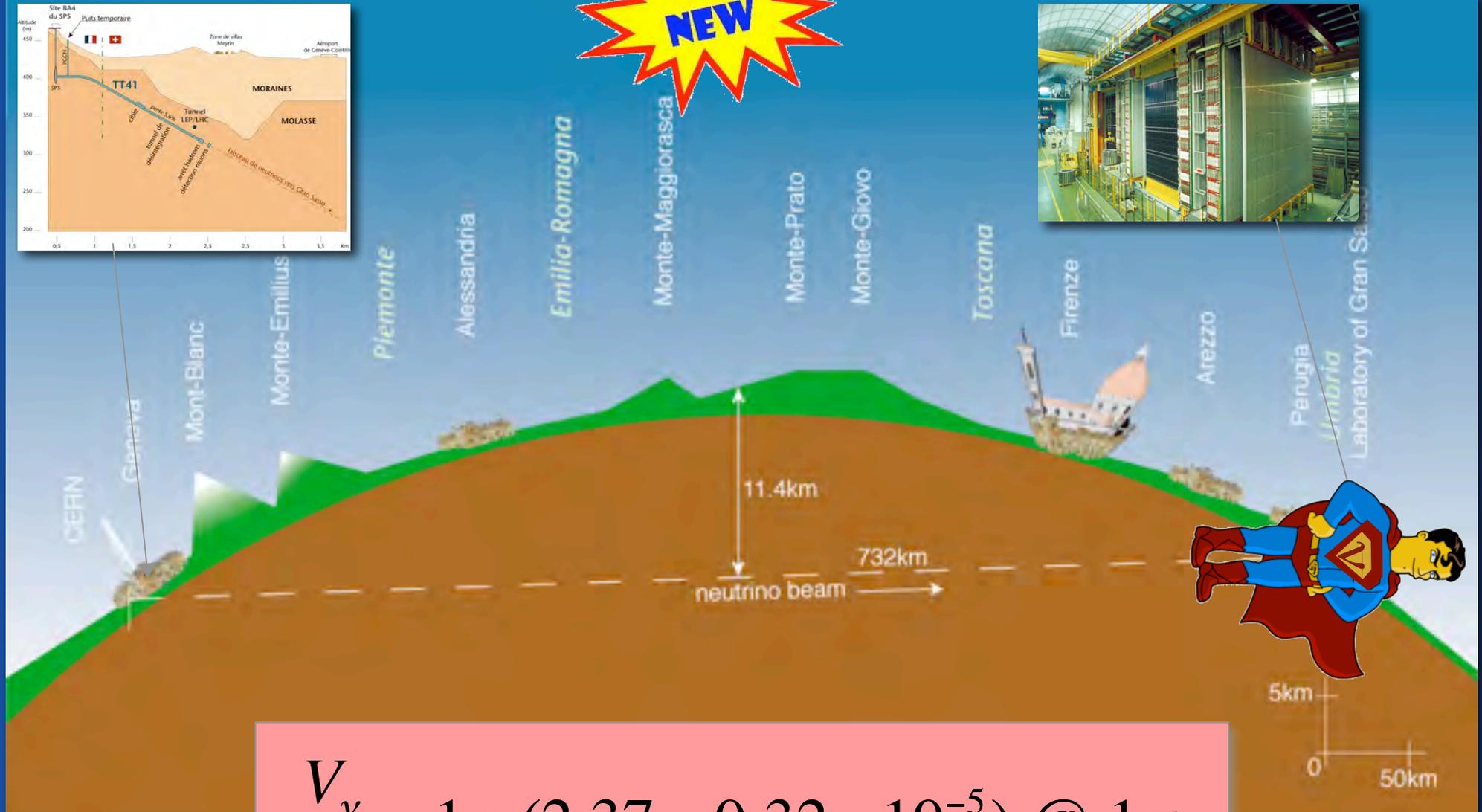
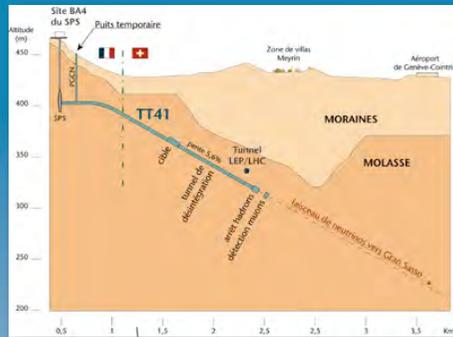
(see Schwetz talk @ Neutel 2011)

Δm_{41}^2	$ U_{e4} $	$ U_{\mu 4} $	Δm_{51}^2	$ U_{e5} $	$ U_{\mu 5} $	δ/π	χ^2/dof
0.47	0.131	0.170	0.93	0.135	0.142	1.62	105.9/130

Un nuovo pericoloso scoglio: superluminalità?



Neutrino Superluminali???



$$\frac{V_{\nu}}{c} = 1 + (2.37 \pm 0.32 \times 10^{-5}) @ 1\sigma$$

Neutrini Superluminali ???

Misura: tempo di volo dal CERN al Gran Sasso. Però questa misura non è affatto semplice...

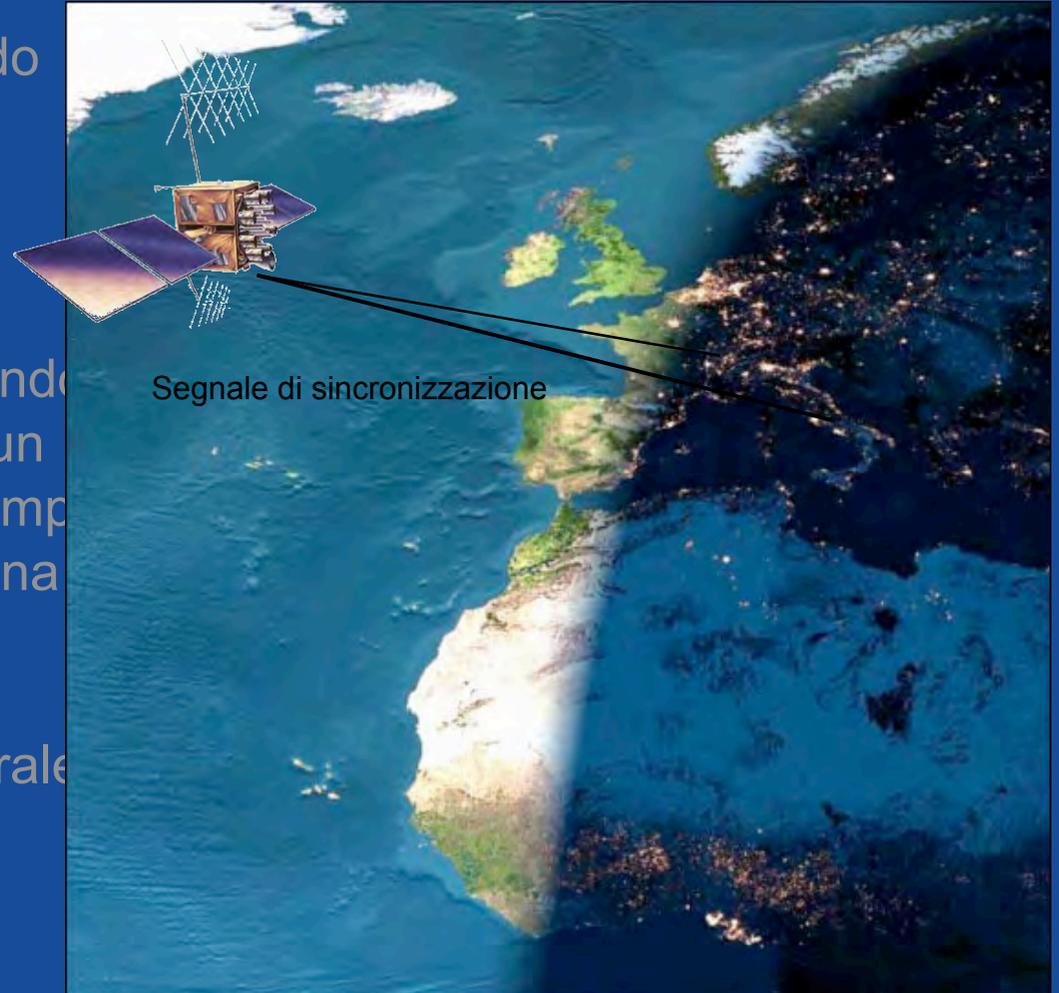
✓ La distanza è misurata combinando dati GPSA che di geodesia:

$D=(731278.0\pm 0.2)\text{m}$ (un errore di 0.3ppm!)

✓ Il tempo di volo è misurato utilizzando orologi atomici sincronizzati tramite un satellite GPS in “common view”. Il tempo di partenza e di arrivo misurati con una precisione di 2ns.

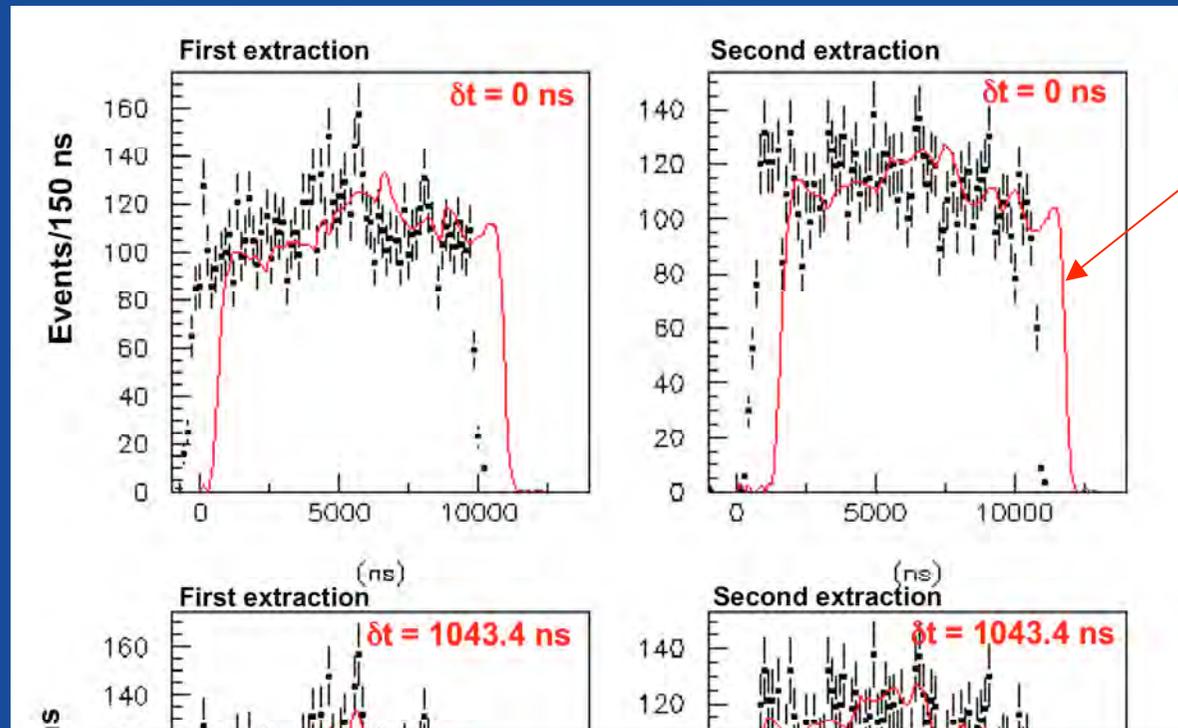
✓ Effetti di relatività speciale e generale tenuti in conto..

Dettagli in arXiv:1109.4897



Neutrini Superluminali ???

Il tempo di volo è ottenuto fittando la “forma d’onda” teorica iniziale degli impulsi di neutrino con quella osservata al rivelatore.



(temporizzazione obsoleta)

Anticipo misurato:
 $\delta t_{\text{obs}} = 1043.4 \pm 7.8 \text{ ns}$

Anticipo teorico ($V_{\nu} = c$)
 $\delta t_c = 985.6 \text{ ns}$



$\delta t = 57.8 \pm 7.8 \text{ ns}$
Un risultato a 6σ !

Il risultato precedente è stato confermato utilizzando degli impulsi più brevi: $\delta t = 62.1 \pm 3.7 \text{ ns}$ (Novembre 2011)

Nessuna evidenza di distorsione spettrale trovata $\rightarrow V$ non dipende significativamente da E alle energie di OPERA ($\sim 17 \text{ GeV}$)

Neutrini Superluminali ???

Il risultato è molto controverso

✓ Dall'osservazione dei neutrini provenienti dalla supernova 1987A ($E \sim \text{MeV}$) si ricava che $(V-c)/c < 10^{-12}$ altrimenti il segnale dei neutrini sarebbe arrivato ben 3 anni prima dell'osservazione ottica!

⇒ Forte dipendenza dall'energia?

⇒ Effetti locali? (es: nuove interazioni con la materia o con la gravità?)

✓ Sotto assunzioni generali Cohen and Glashow hanno mostrato che i neutrini superluminali irradierebbero energia attraverso un meccanismo simile alla radiazione Cherenkov (arXiv:1109.6562)

Possibili soluzioni

✓ Una falla nell'esperimento o nell'analisi dei dati?

⇒ Tutte le critiche sono state rigettate dalla collaborazione sperimentale ma alcuni "inghippi" potrebbero ancora non essere stati scoperti...

✓ Vero segnale di nuova fisica? Una pletora di (pazze) idee sono state proposte:

⇒ Violazioni della invarianza di Lorentz, del principio di equivalenza, modifiche o violazioni della relatività speciale o generale, "scorciatoie" nelle extra dimensioni, nuove interazioni dei neutrini con la materia, con la gravità o con campi scalari, effetti nuovi di meccanica quantistica, etc. etc...

...in altre parole: CHI LO SA???

Neutrini Superluminali ???

Rimaniamo in attesa di una conferma indipendente da altri esperimenti a lunga base (MINOS and T2K *in primis*)

Se questo segnale verrà confermato molte delle pietre miliari della fisica moderna dovranno essere rimesse in discussione!!!

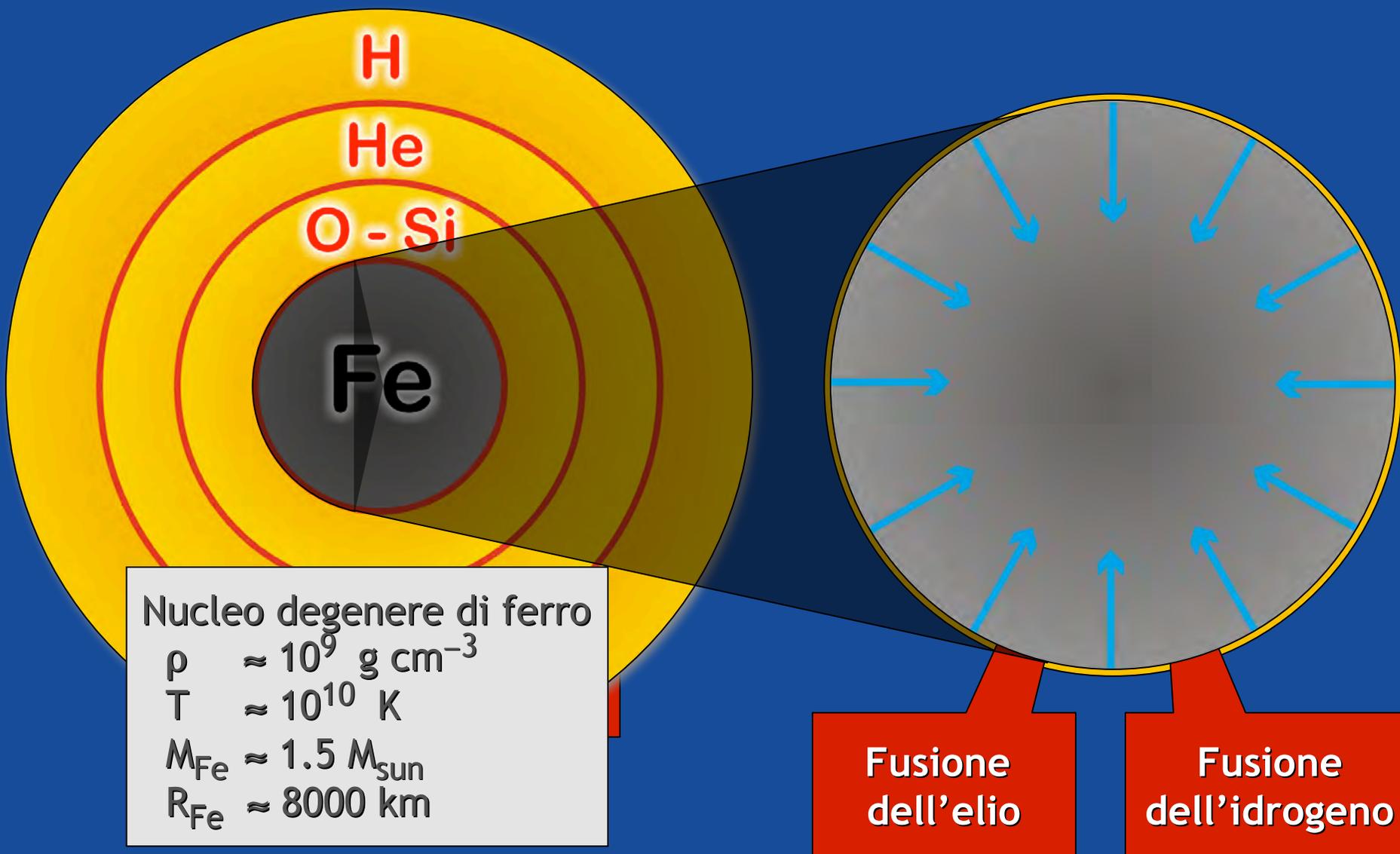
Per aspera ad astra



Collasso stellare ed esplosione di supernova

Struttura a “cipolla”

Collasso (implosione)



Collasso stellare ed esplosione di supernova

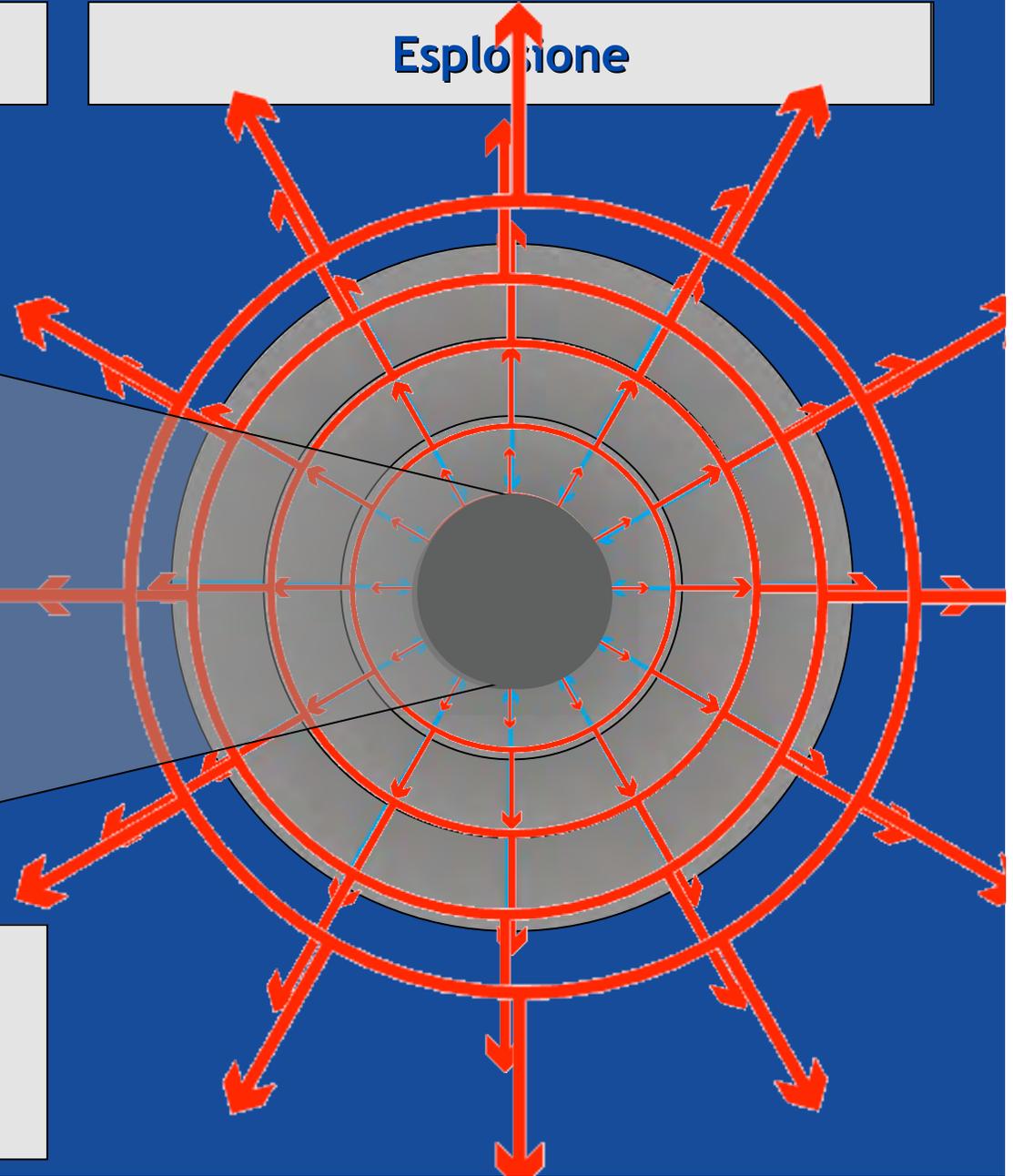
Proto-stella di neutroni

Esplosione

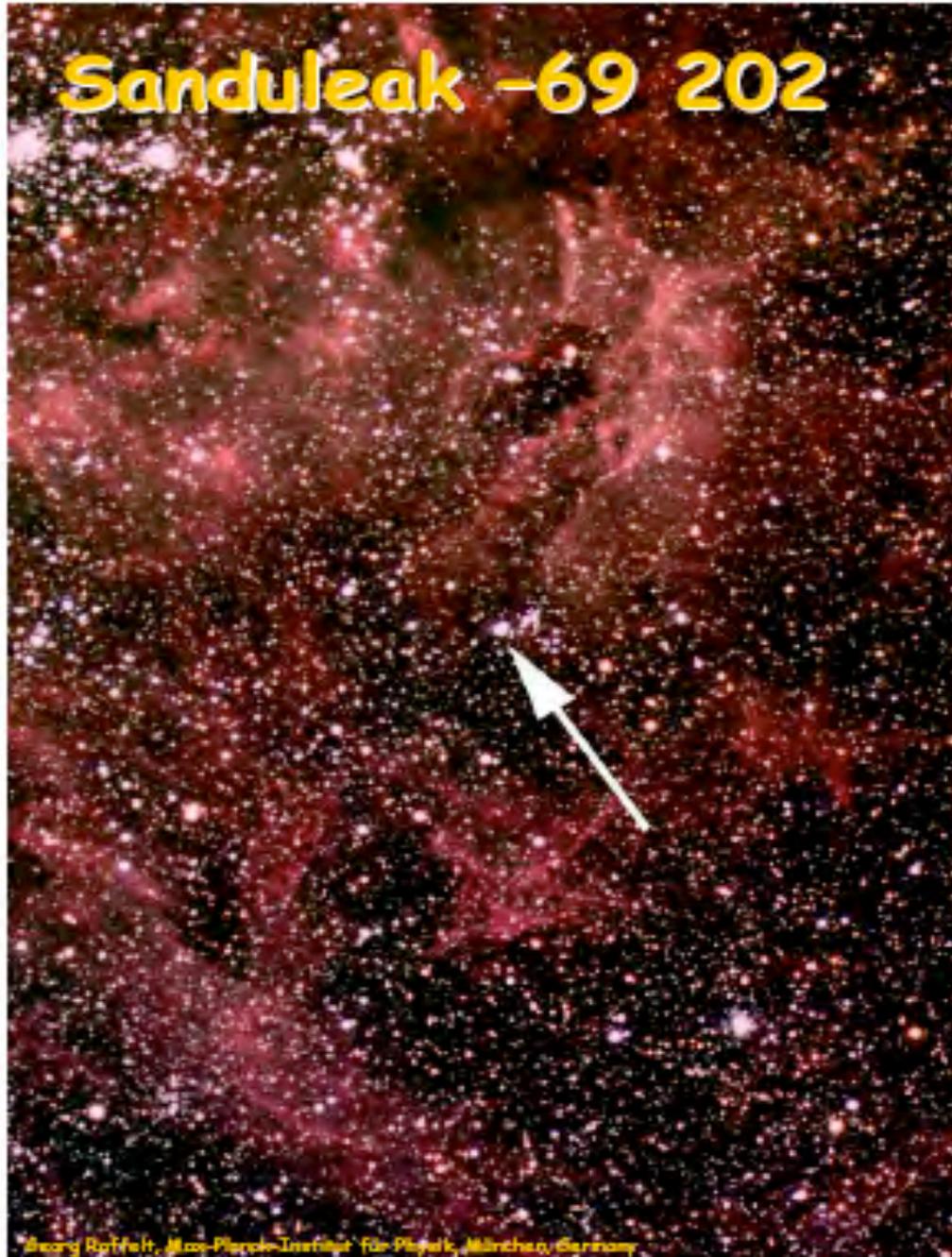
~ 50 km

Raffreddamento
a neutrini

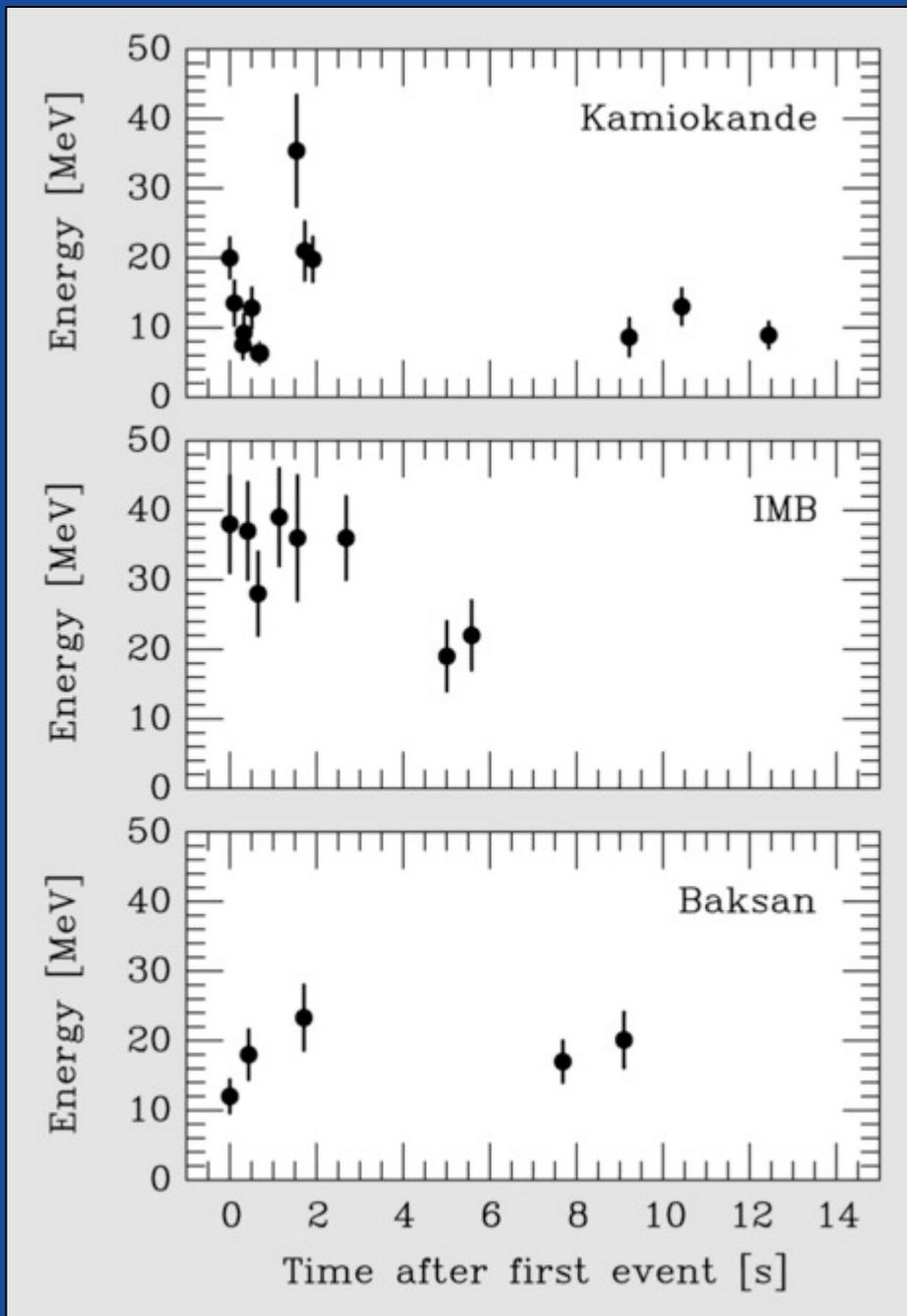
Proto-stella di neutroni
 $\rho \approx \rho_{\text{nuc}} = 3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$
 $T \approx 30 \text{ MeV}$



Supernova 1987A



Segnale di neutrini dalla SN1987A



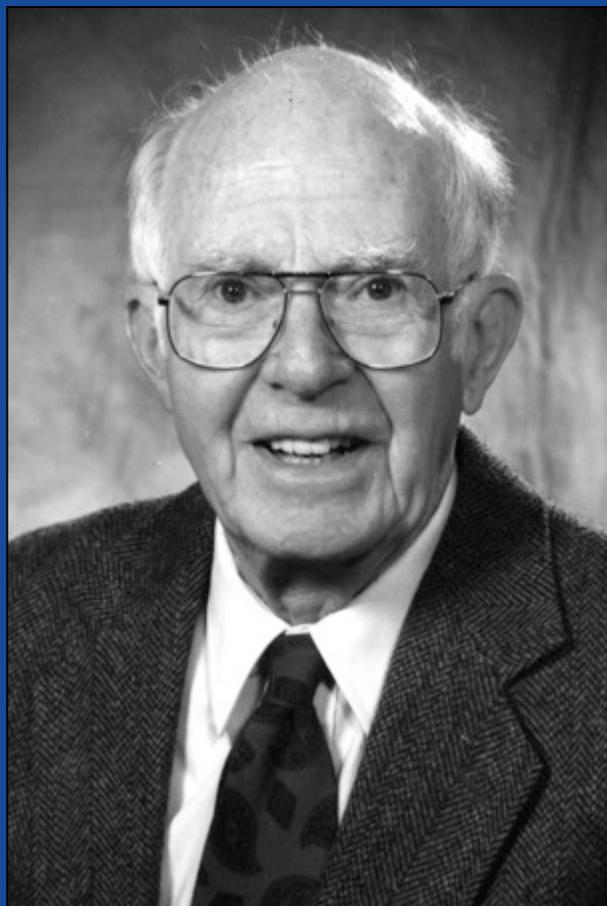
Kamiokande-II (Giappone)
Rivelatore "Water Cherenkov"
2140 tonnellate
Incertezza temporale ± 1 min

Irvine-Michigan-Brookhaven (US)
Rivelatore "Water Cherenkov"
6800 tonnellate
Incertezza temporale ± 50 ms

Baksan Scintillator Telescope
(Unione sovietica)
200 tonnellate
Incertezza temporale $+2/-54$ s

Entro le incertezze temporali
i segnali sono in coincidenza

Premi Nobel per la fisica 2002



Ray Davis Jr.
(1914 – 2006)



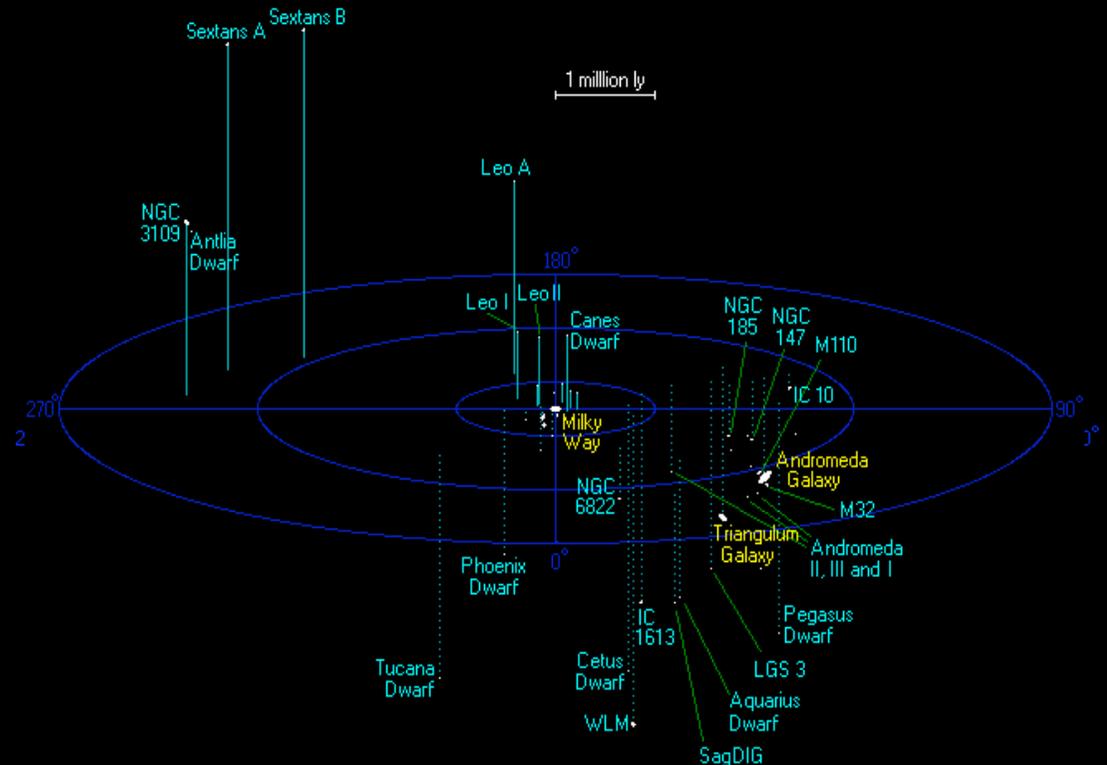
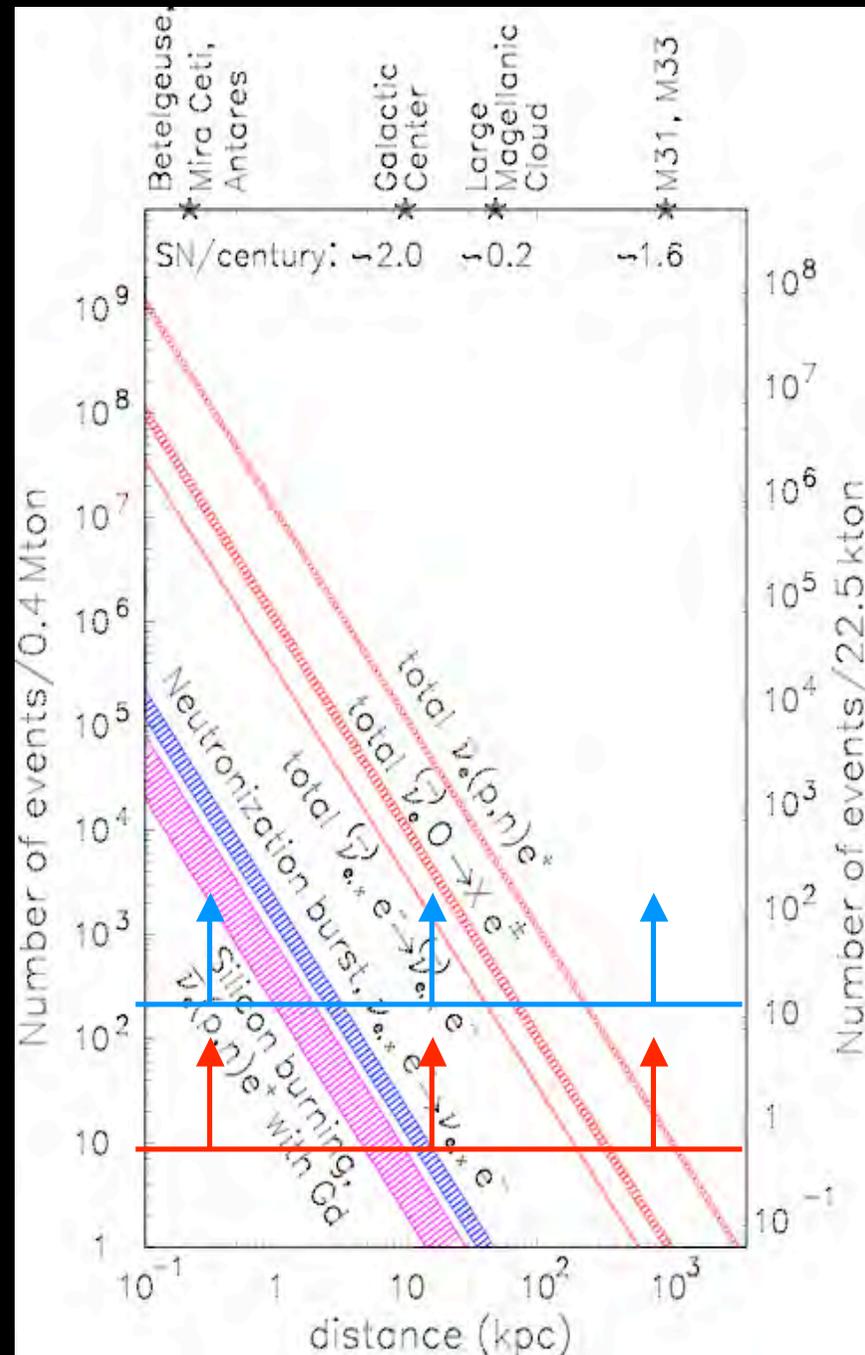
Masatoshi Koshihara
(*1926)



“per i contributi pioneristici in astrofisica e in particolare per la nascita dell’astronomia a neutrini”

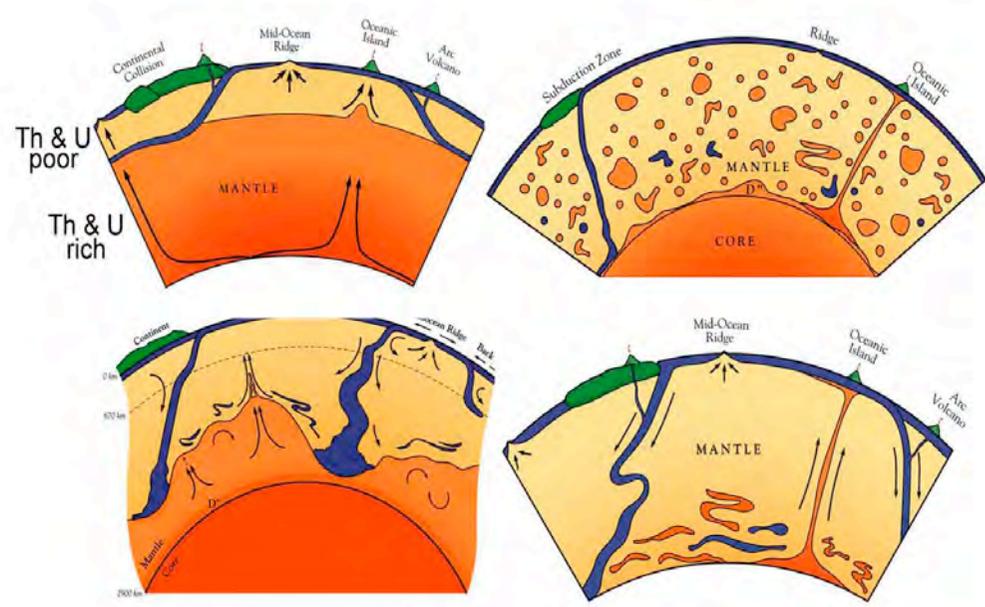
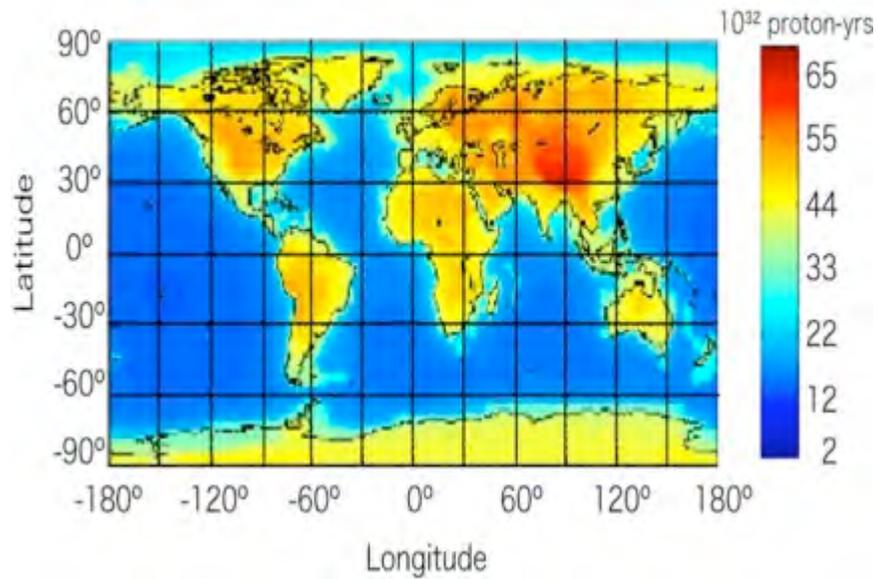
Neutrini da Supernova

Con i detector futuri sarà possibile anche tenere sotto controllo tutto il gruppo locale (sino ad Andromeda) $\sim 10^3$ kpc

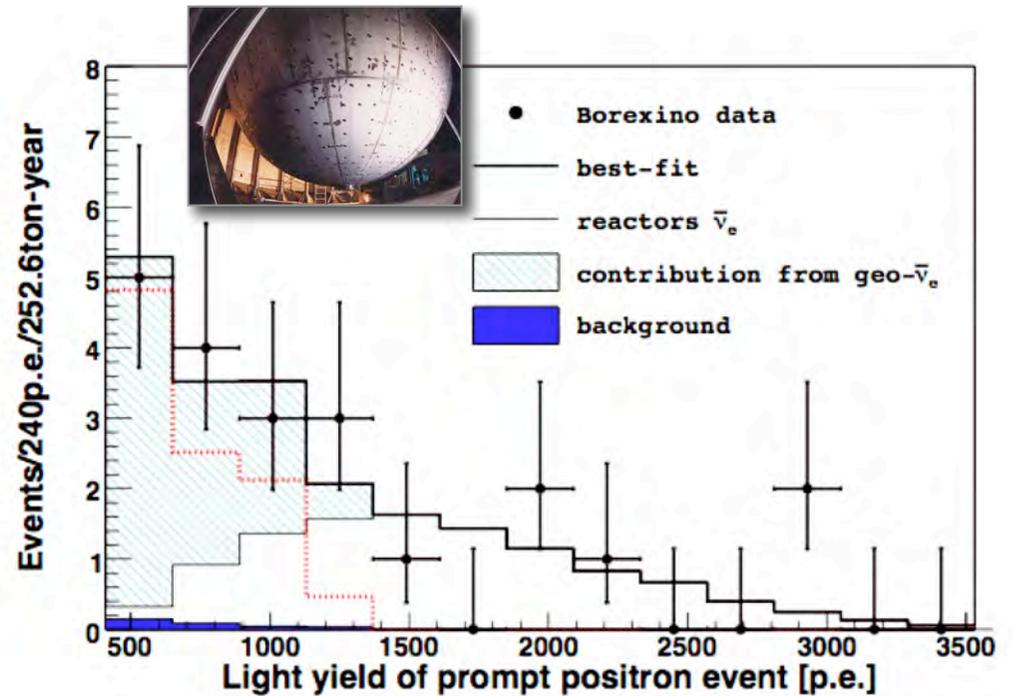
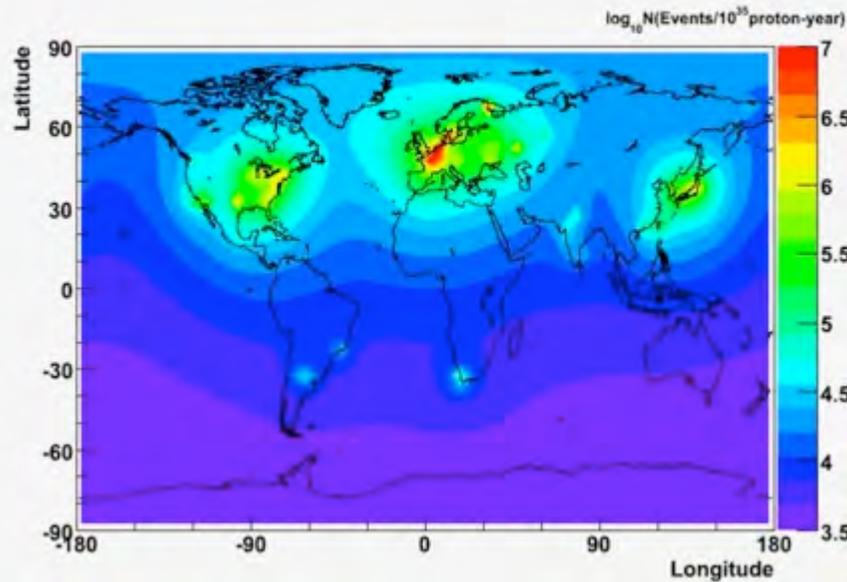


Geo Neutrini

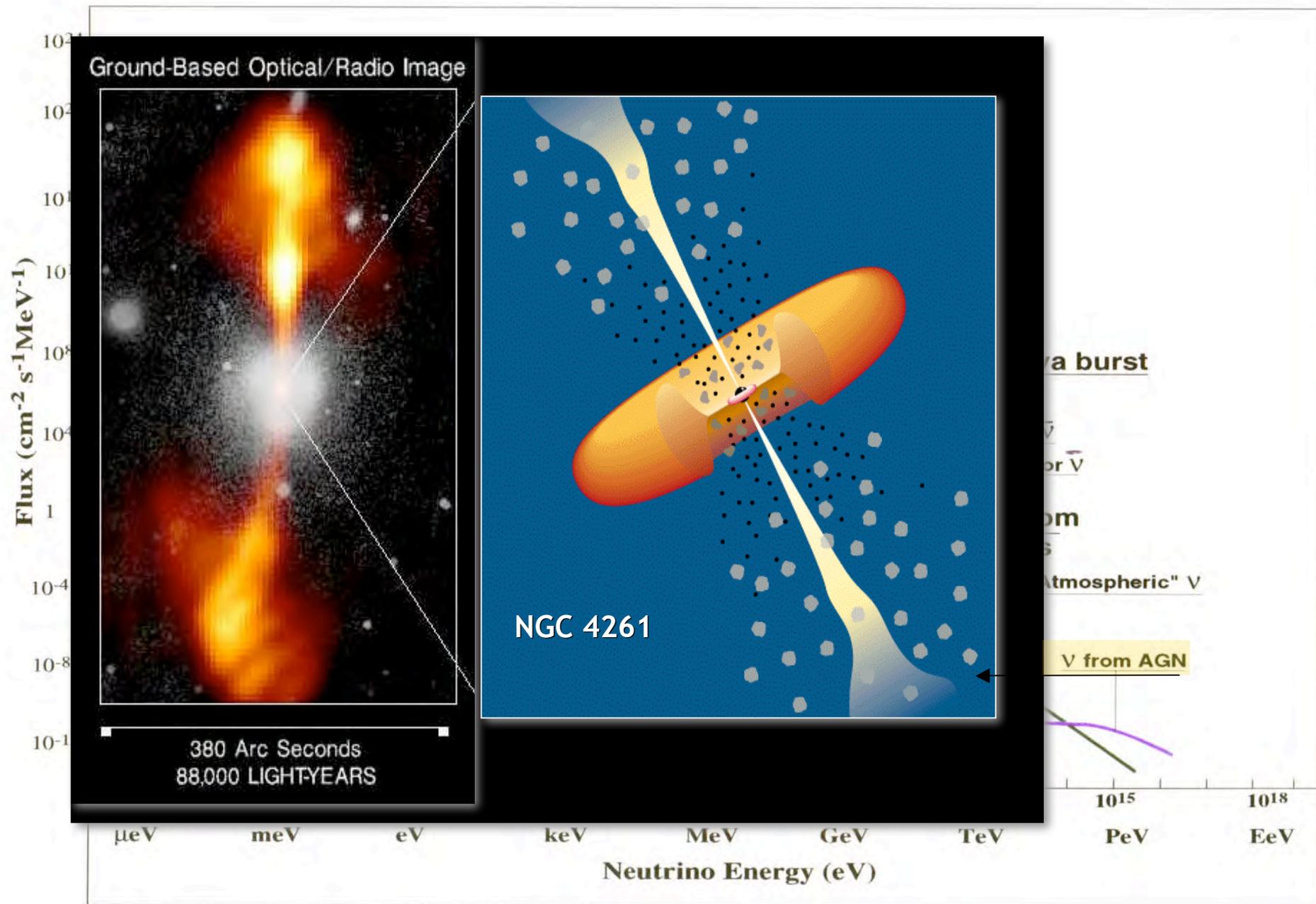
Flusso predetto di geoneutrini



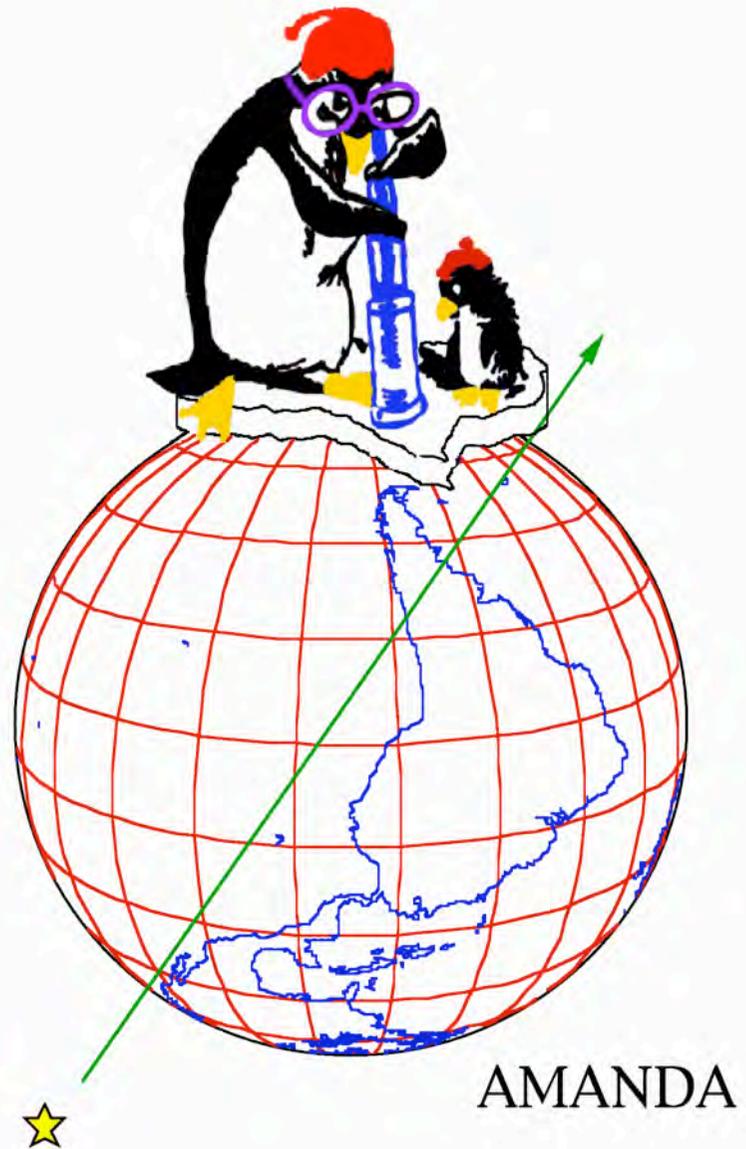
Fondo dei reattori



Flusso di neutrini astrofisici



“Telescopio a neutrini” - Amanda & ICE³

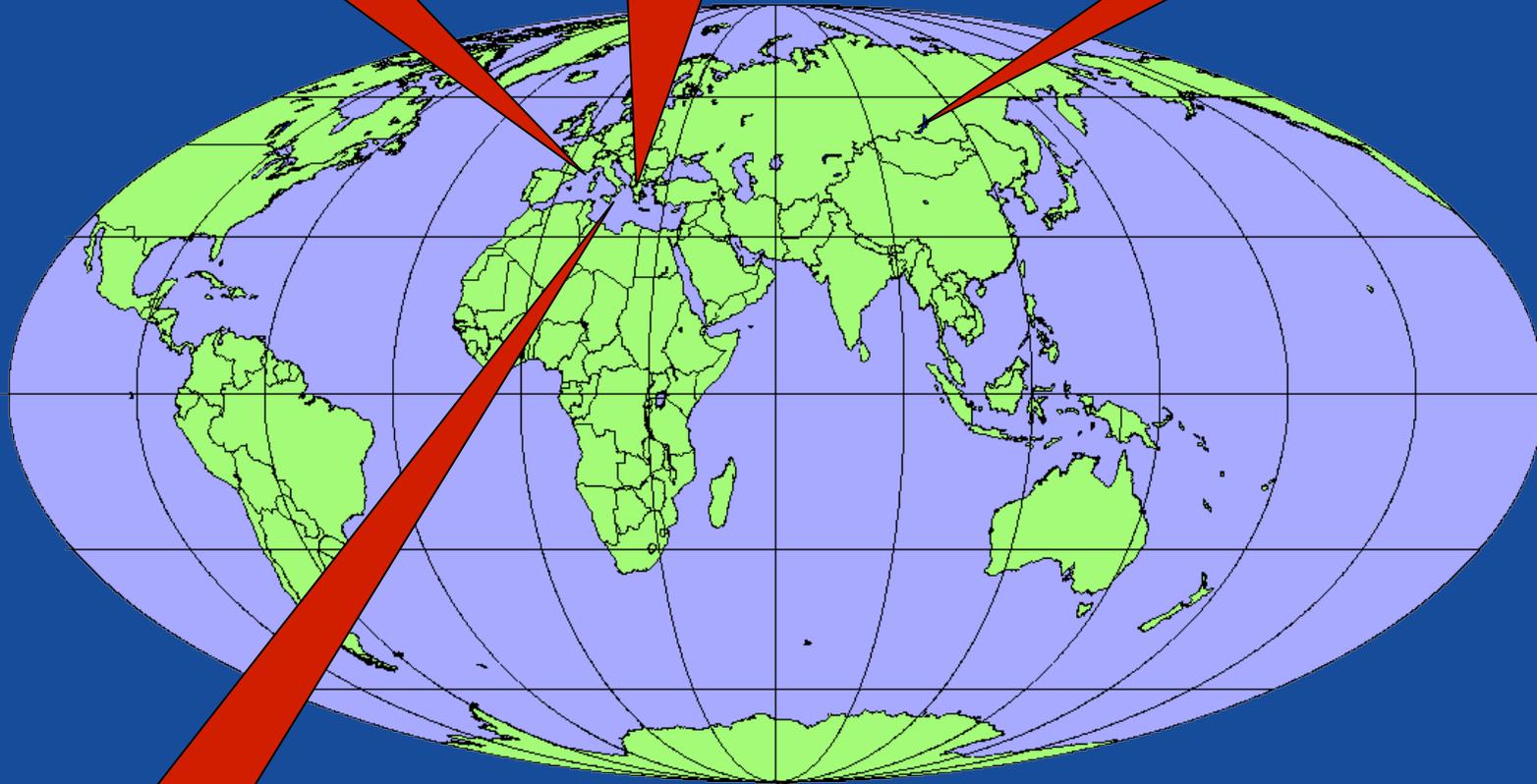


Telescopi a neutrini

**Antares
Project**

Nestor

**Baikal
200 PMTs**



Nemo

**Amanda II, 800 PMTs
IceCube**

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:
 - ☛ Spiegare le evidenze per i neutrini sterili e/o superluminali! (segnali di nuova fisica “dura”)
 - ☛ Misura della massa assoluta e determinazione della gerarchia di massa
 - ☛ Determinazione della natura del neutrino (Dirac o Majorana)
 - ☛ Determinazione di eventuali altre proprietà “non standard” dei neutrini (stati sterili? nuove interazioni?)
 - ☛ 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!