

Esperimenti di oscillazione di neutrini

- L'epoca della fisica di precisione... con gli occhi dell'INFN
 - nei neutrini solari (Borexino)
 - con sorgenti artificiali di alta energia
 - OPERA
 - T2K
 - ICARUS
 - ai reattori
- La fisica della matrice di mixing leptonic
- La stagione delle anomalie

L'epoca delle scoperte

La fisica del mixing leptonic o forse...

1998

2000

2002

2004

2006

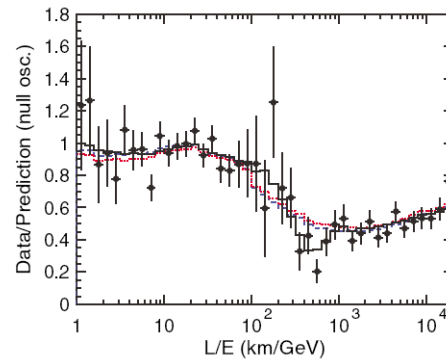
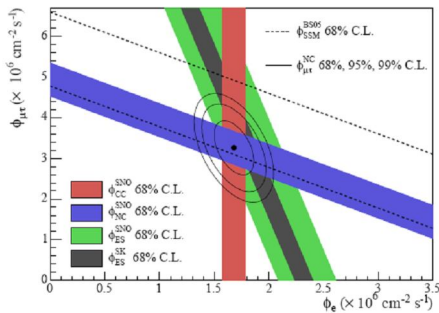
2008

2010

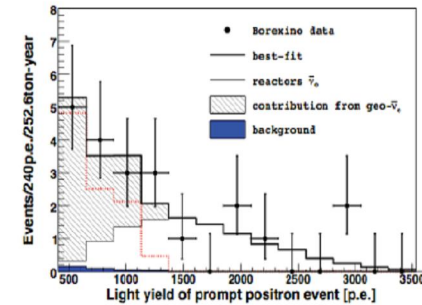
2012

Sorgenti naturali (solari- atmosferici)

Studio delle oscillazioni

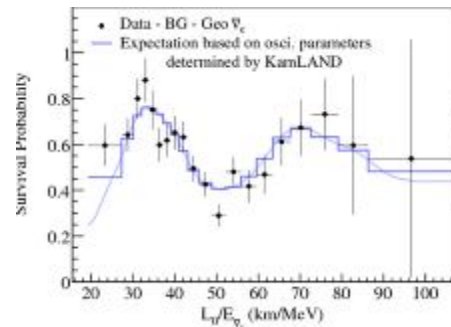
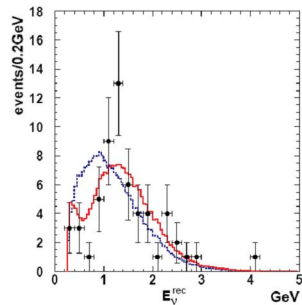


Studio delle sorgenti stesse (neutrini come "tools")

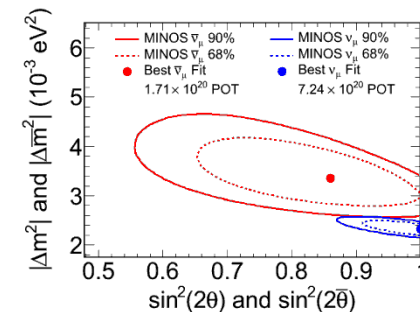


Sorgenti artificiali

Test indipendente delle oscillazioni



Test diretti, misure di precisione, ricerca di effetti subdominanti

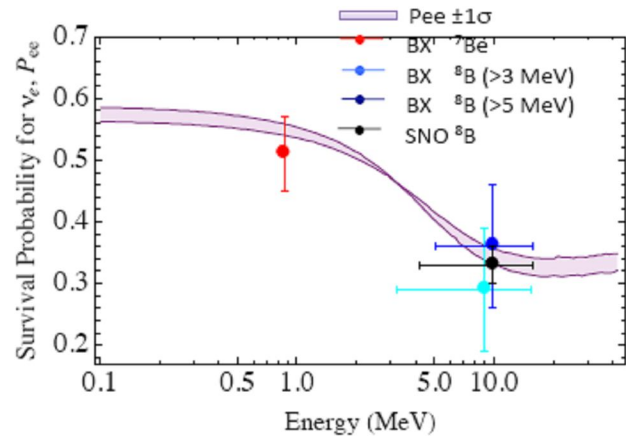


Il futuro appartiene alle sorgenti artificiali perche' sono le uniche all'altezza delle sfide della fisica di precisione o degli effetti subdominanti

Il caso piu' eclatante: Borexino

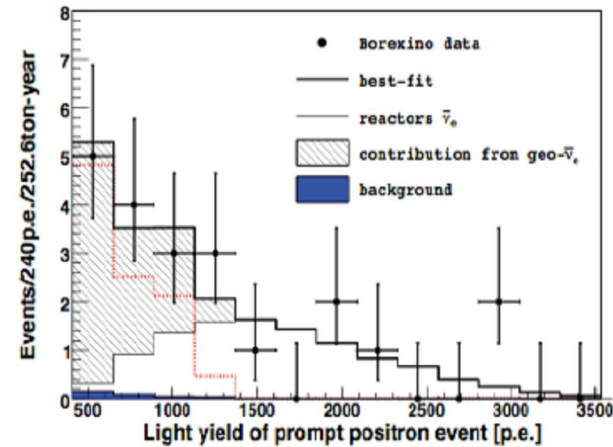
Un esperimento progettato originariamente per "l'era delle scoperte", ha fornito risultati molto importanti per:

Test del meccanismo di Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein (oscillazioni nella materia)



E. Meroni @ Venice 2011

Osservazione a 4.2σ dei neutrini prodotti dai decadimenti radiattivi terrestri (geoneutrinos)

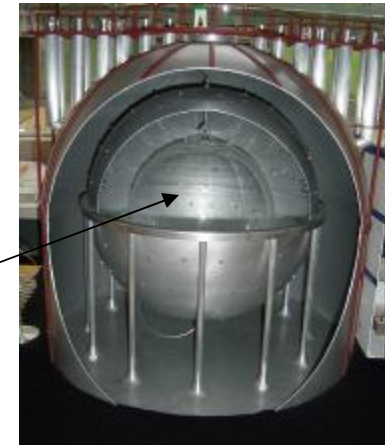


E. Meroni @ Venice 2011

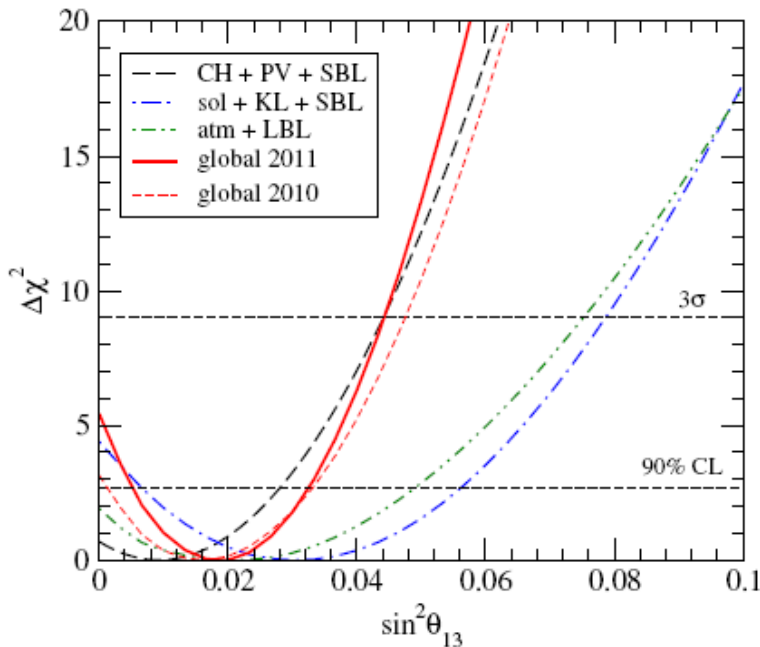
Hypothesis	Expected rate (cpd/100t)
No oscillation + High Metallicity	74±4
No oscillation + Low Metallicity	67±4
Oscillation MSW + High Metallicity	48±4
Oscillation MSW + Low Metallicity	44±4

46.0 ± 1.5 (stat) ± 1.3 (sys)

Misura dei neutrini solari con scattering elastico $\nu_e e \rightarrow \nu_e e$. Basato su 270 t di scintillatore ultrapuro



I limiti intrinseci delle sorgenti naturali per la fisica di precisione



T. Schwetz et al., arXiv:1103.0734 [hep-ph]

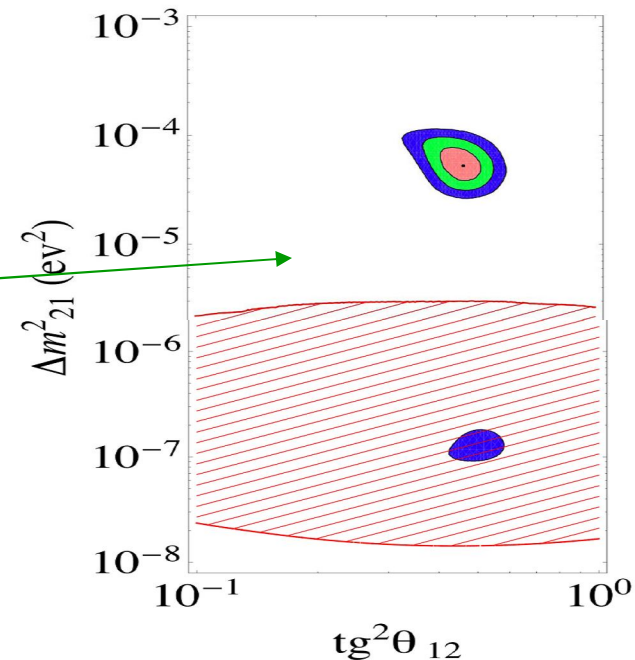
G. Fogli et al., Phys.Rev.Lett. 101 (2008) 141801

Gi esperimenti con sorgenti naturali sono capace di testare le predizioni leading delle oscillazioni anche in modo sofisticato (Borexino: LMA senza Kamland, ovvero senza assumere CPT) ma testare, per esempio, questo hint e' assolutamente fuori portata

Un hint a circa 2σ di un valore “molto grande” ($\approx 8^\circ$) di ϑ_{13}

E' un hint persistente ma i dettagli cambiano di anno in anno a seconda delle analisi sperimentali

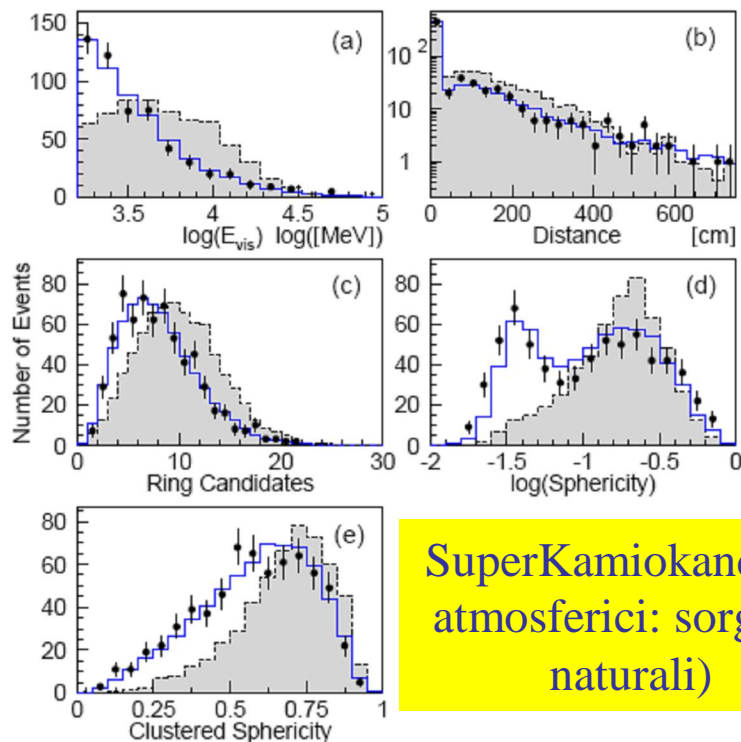
Basato su un'inconsistenza tra neutrini solari e neutrini oscillati con la stessa frequenza dei solari ai reattori e una lieve inconsistenza anche tra neutrini atmosferici e neutrini oscillati con la stessa frequenza degli atmosferici agli acceleratori



Un caso analogo: il test diretto

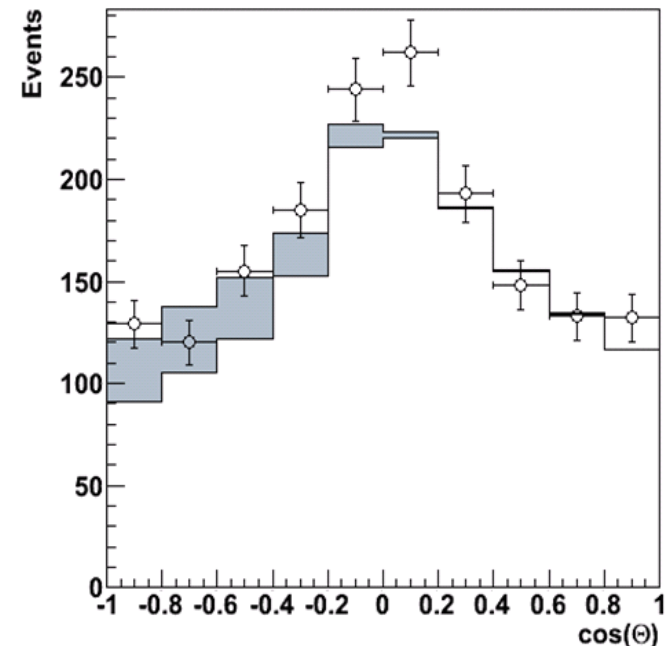
- Il test piu' diretto delle oscillazioni: osservare un leptone dalle interazioni di correnti cariche con flavor diverso dal flavor del neutrino iniziale
- Impossibile con i solari e i reattori: ν_e sotto la soglia cinematica del muone
- Relativamente semplice con sorgenti di muoni studiando $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ma le oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ sono soppresse di (almeno) un ordine di grandezza
- Necessario usare le oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$: sperimentalmente difficilissimo

SuperKamiokande Coll. Phys.Rev.Lett. 97 (2006) 171801

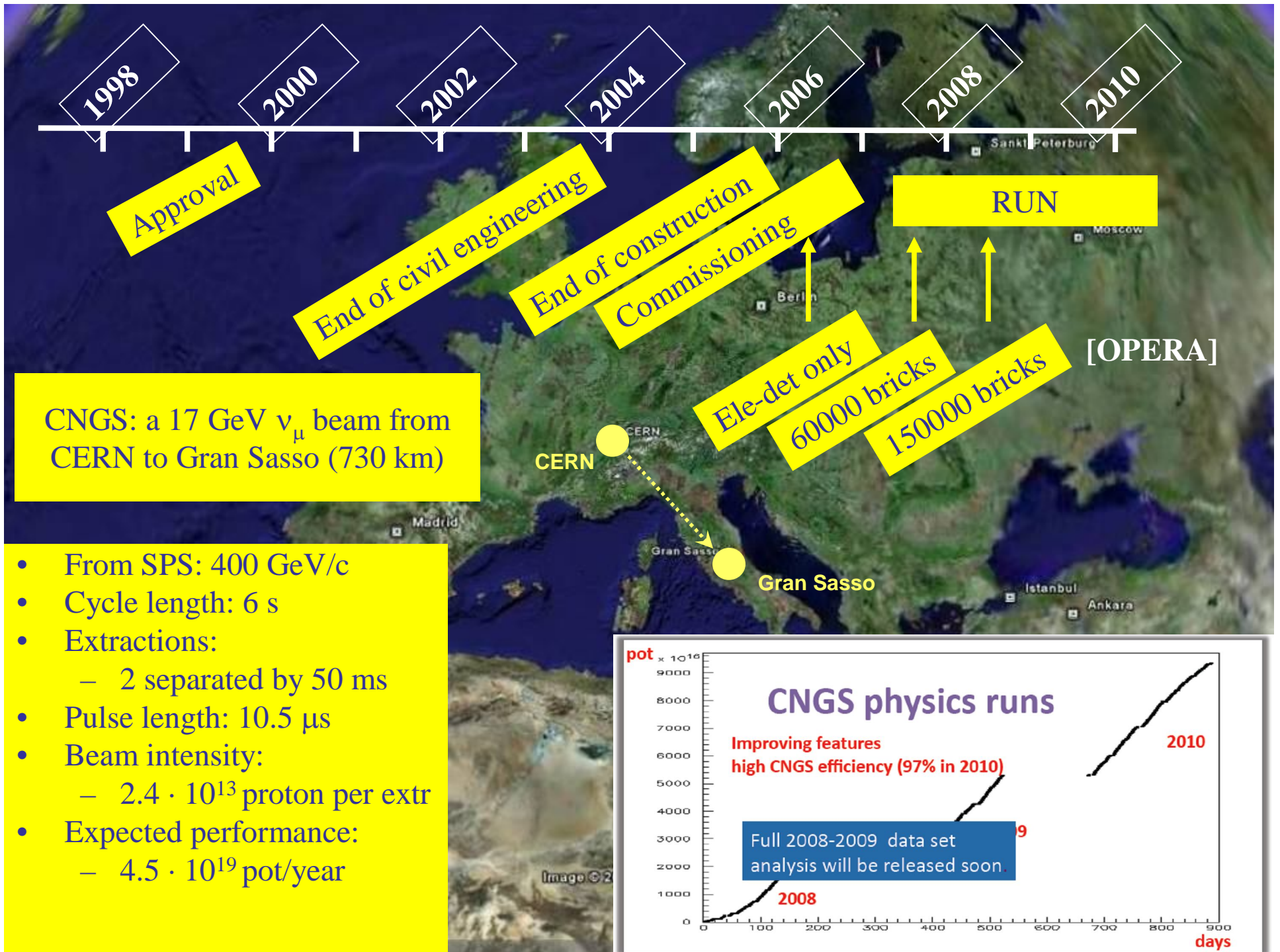


SuperKamiokande (ν atmosferici: sorgenti naturali)

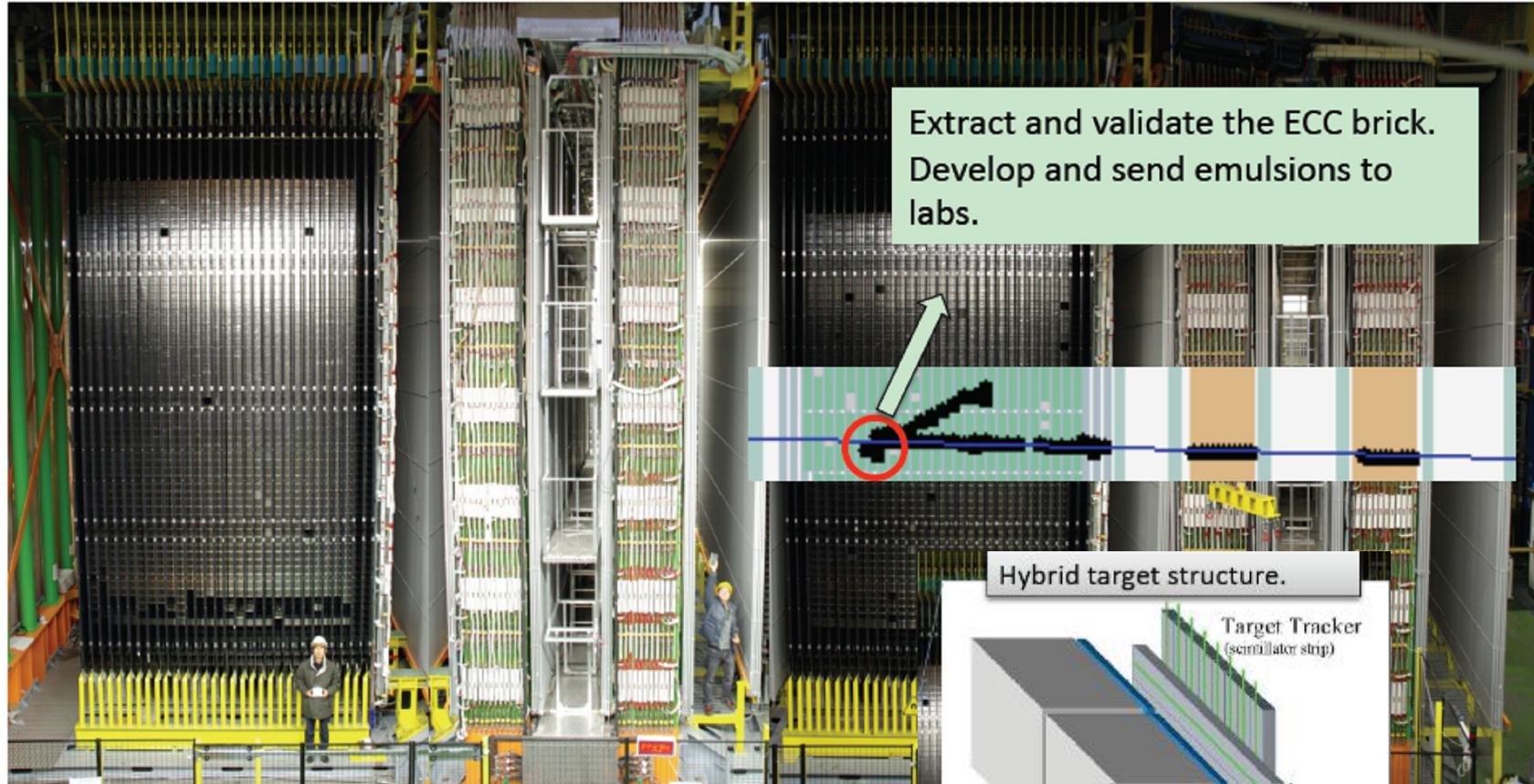
Wendell @ Venice 2011



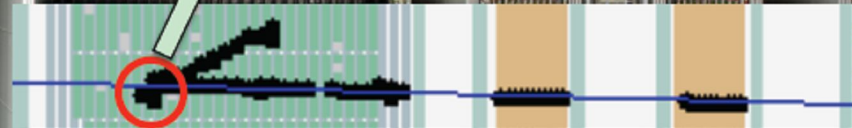
Nuova analisi null hyp esclusa a 3.8σ
(attesa da MC 2.6σ)



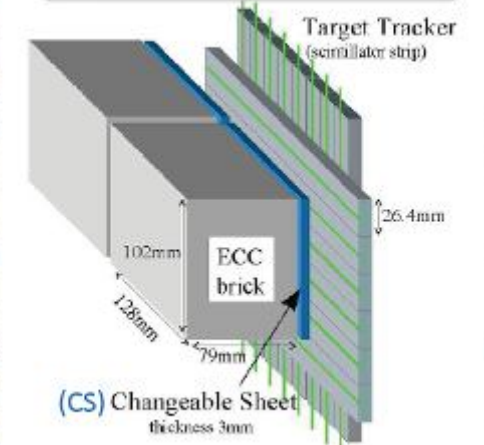
OPERA detector



Extract and validate the ECC brick.
Develop and send emulsions to labs.

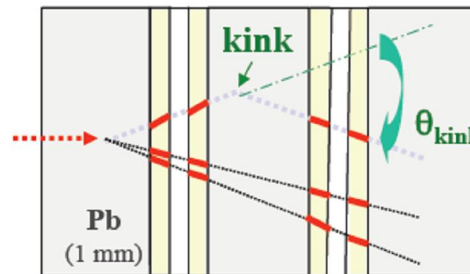


Hybrid target structure.



Long decays

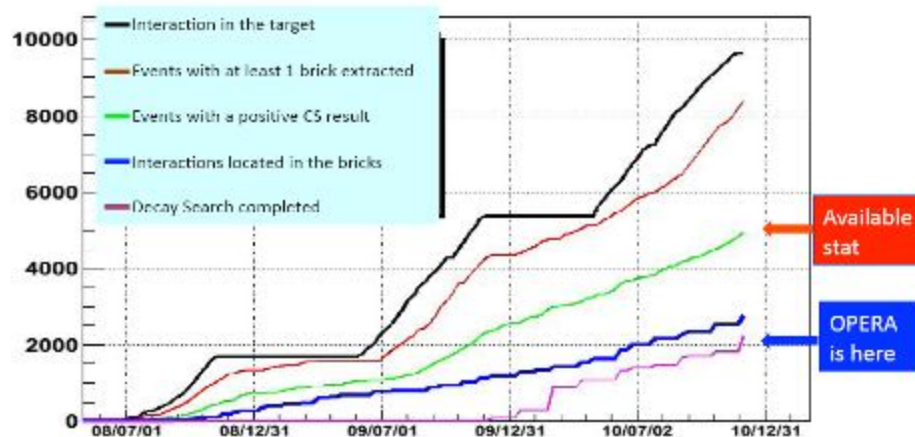
$$\begin{aligned} \tau &\rightarrow e\nu_\tau\nu_e \\ \tau &\rightarrow \mu\nu_\tau\nu_\mu \\ \tau &\rightarrow h\nu_\tau \end{aligned}$$



La ricerca del tau:

year	beam days	protons on target	SPS eff.	events in the bricks
2008	123	1.78×10^{19}	61%	1698
2009	155	3.52×10^{19}	70%	3693
2010	187	4.04×10^{19}	81%	4248
TOTAL	465	9.34×10^{19}	<71%>	9639

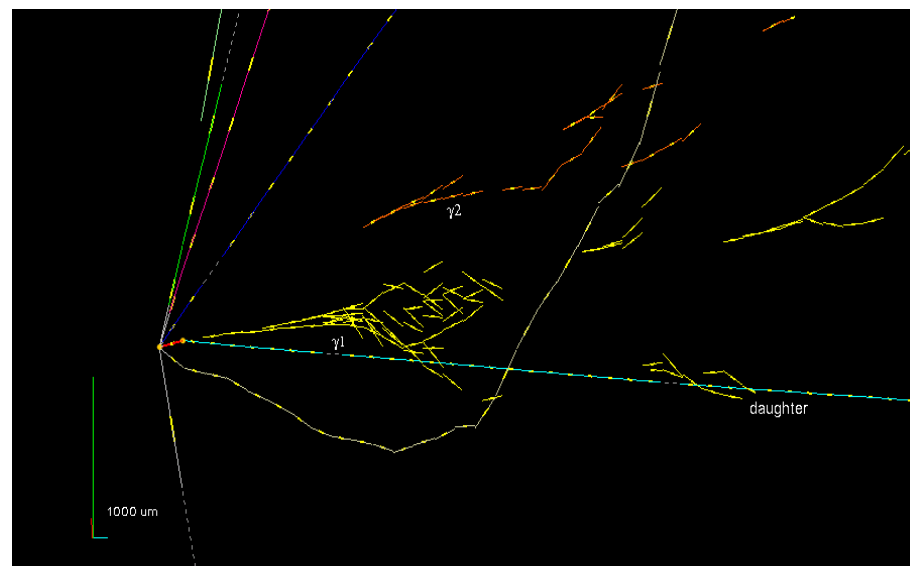
↳ 2.1 nominal CNGS years



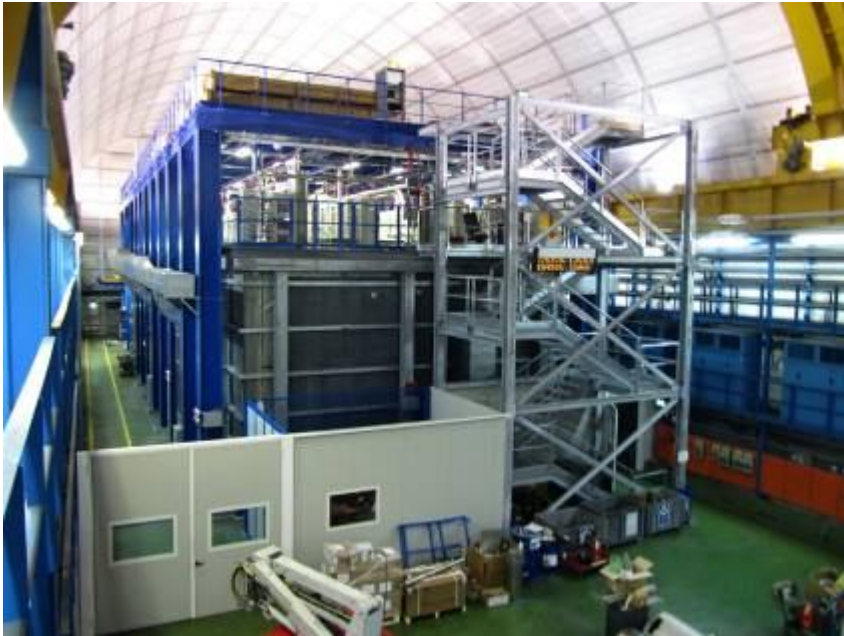
Publicata l'analisi del 30% dei dati 2008-2009

Un'analisi preliminare della produzione di eventi di charm

Analisi finale dei dati 2008-2009 tra circa un mese.

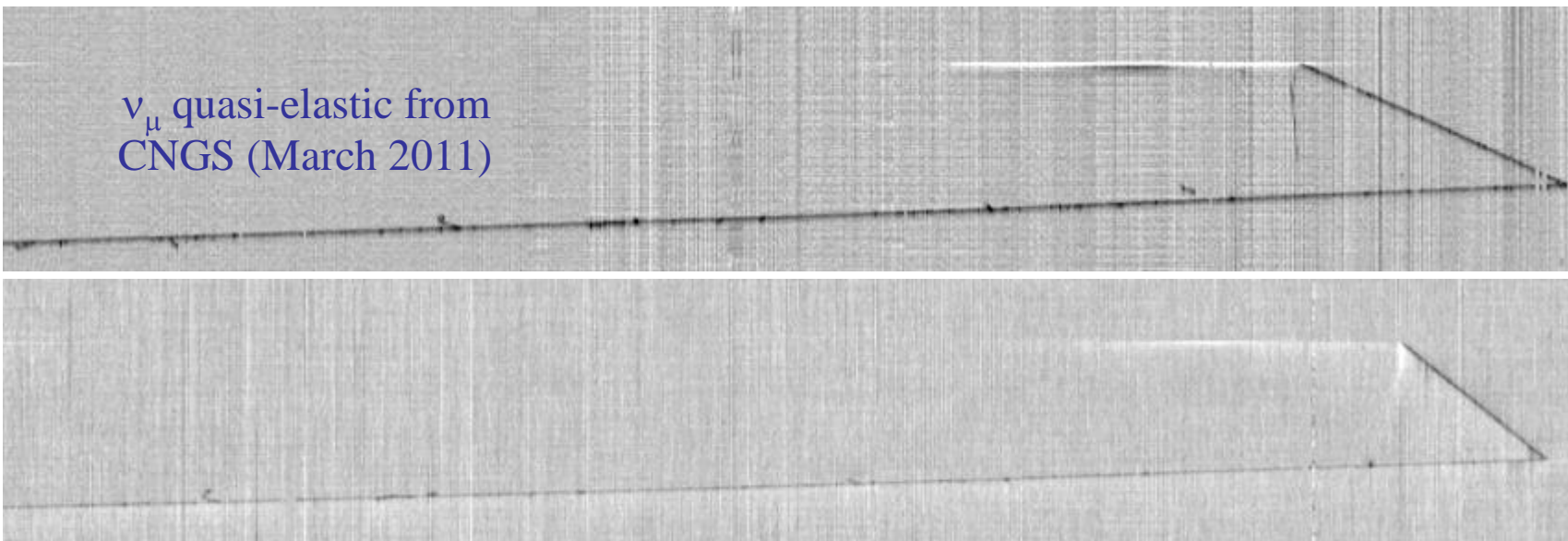


Il CNGS e' un banco di prova anche per la tecnologia dell'argon liquido:
ICARUS 600 ton e' in presa dati dal 1 ottobre 2010

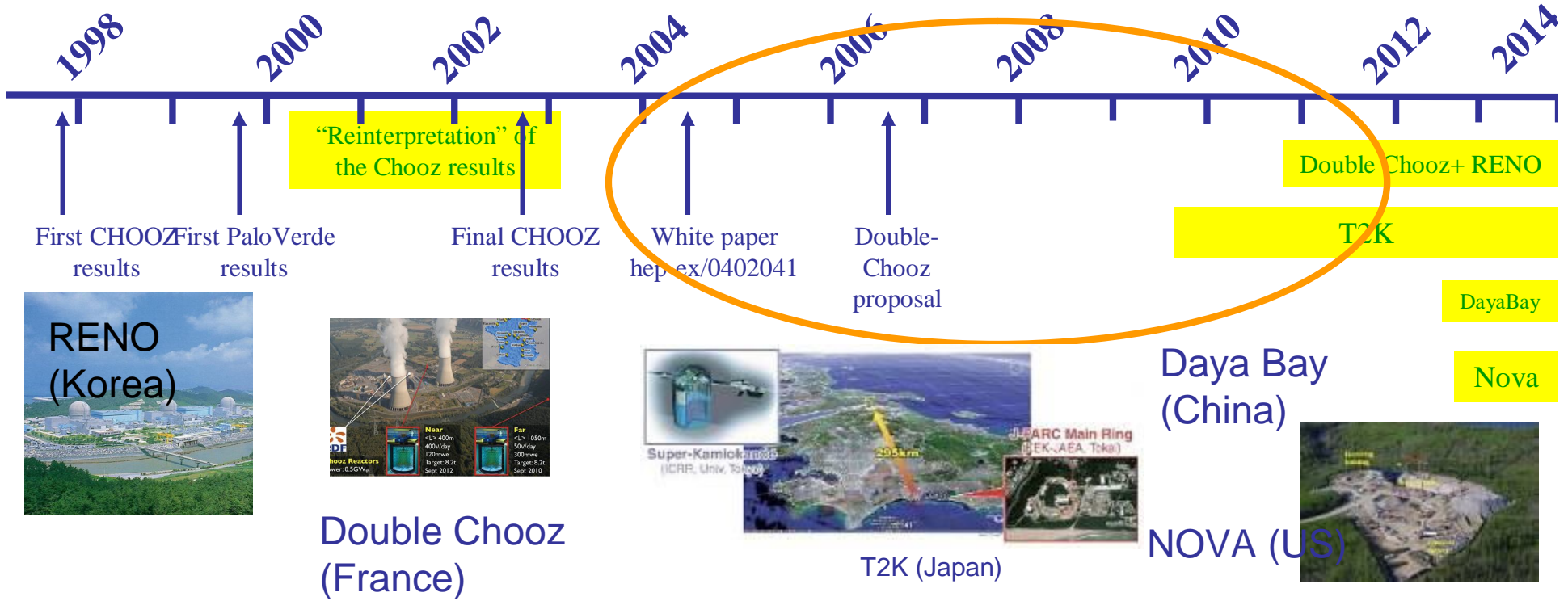
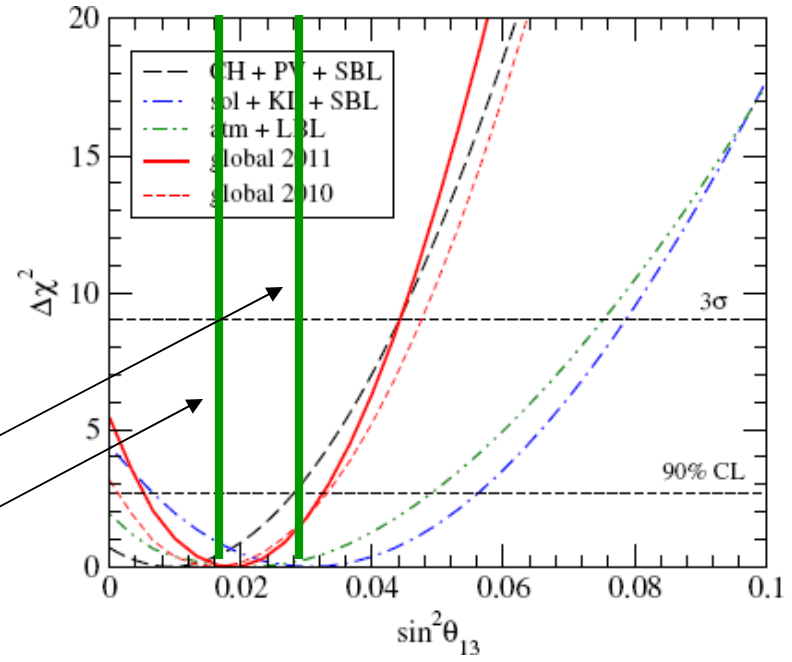


Event type	Collected	Expected
ν_{μ} CC	94	98
ν NC	32	31
ν XC *	6	-
Total	132	129

* Events at edges, with μ track too short to be visually recognized: further analysis needed.



Una lezione interessante: pur essendo pensato completamente per il tau, OPERA ha l'opportunita' di testare l'hint di θ_{13} studiando le oscillazioni $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$



$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ transitions

In late '90, they were just “a risky way to test appearance”. Their discoveries, in fact, would be a major breakthrough in neutrino physics... for a very simple reason:

CKM:



Angle	CKM	PMNS
θ_{12}	12.96 ± 0.09	33 ± 1
θ_{23}	2.37 ± 0.09	45^{+4}_{-3}
θ_{23}	0.21 ± 0.03	< 11 (at 90% CL)
δ	60 ± 14	unknown

[Units are in degrees]

PMNS:



CP violating effects depends on the Jaskog invariant

$$J = \cos \theta_{13} \sin 2 \theta_{12} \sin 2 \theta_{23} \sin 2 \theta_{13} \sin \delta$$

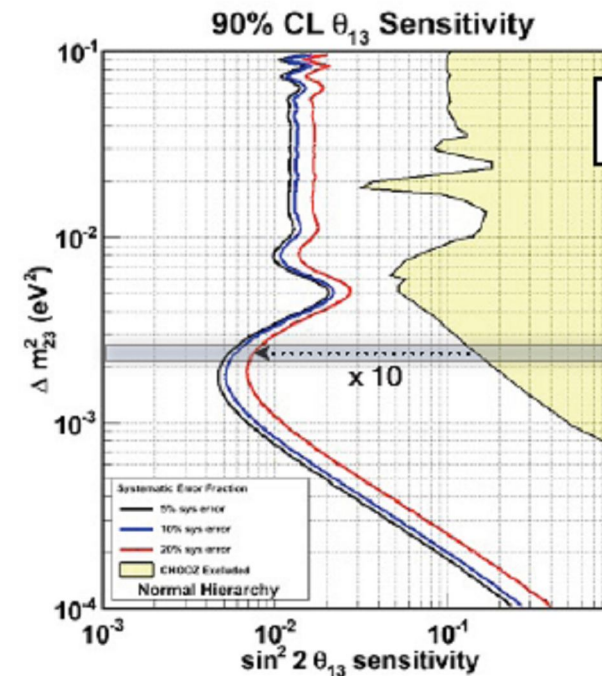
$$J_{\text{CKM}} = 3.05 \pm 0.20 \cdot 10^{-5}$$

In the leptonic sector, CPV might be an “easy” game:

Mixing is accessible though neutrinos: huge experimental challenges to be solved before measuring θ_{12} and θ_{23} (40 years!) But now, life might be easier because the angles are large and theory is nearly crystal-clear : no dominant QCD effects.

$$J_{\text{PMNS}} = \cos \theta_{13} \sin 2 \theta_{12} \sin 2 \theta_{23} \sin 2 \theta_{13} \sin \delta < \underline{0.31 \sin \delta}$$

The big player: Tokai-to-Superkamiokande (T2K)



Early results from T2K

(A. Rubbia @ NeutrinoTelescopes 2011)

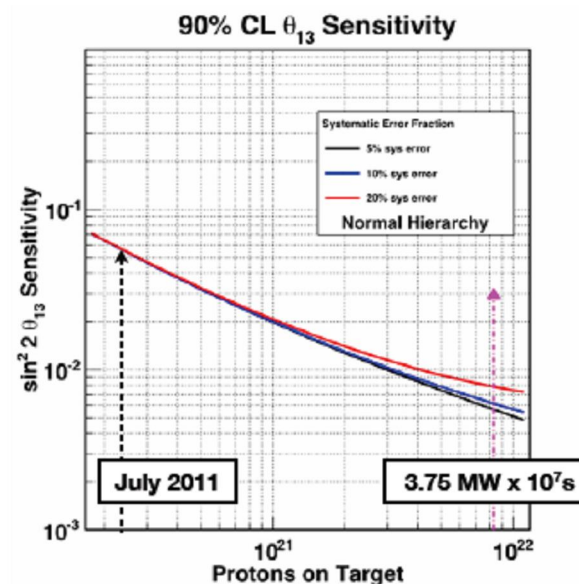
Assuming $\Delta m^2_{23} = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2$ and $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$, $\delta_{CP} = 0$:

Normal Hierarchy : $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.50$ (90% C.L.)

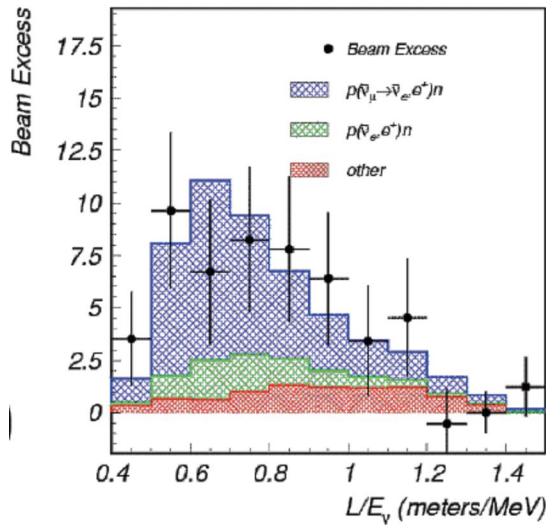
Inverted Hierarchy : $\sin^2(2\theta_{13}) < 0.59$ (90% C.L.)



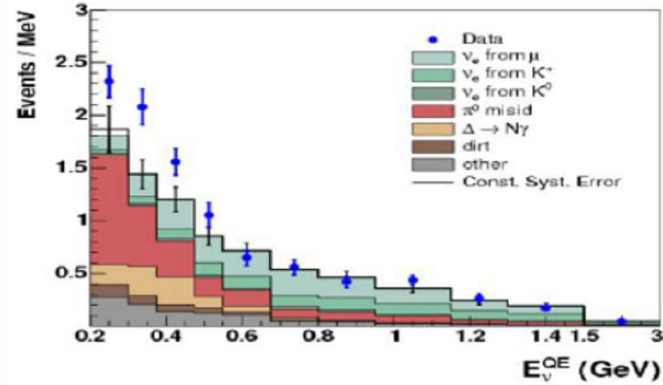
I risultati di T2K potrebbero rapidamente superare i reattori ma rimane da capire l'impatto su JPARC del terremoto in Giappone



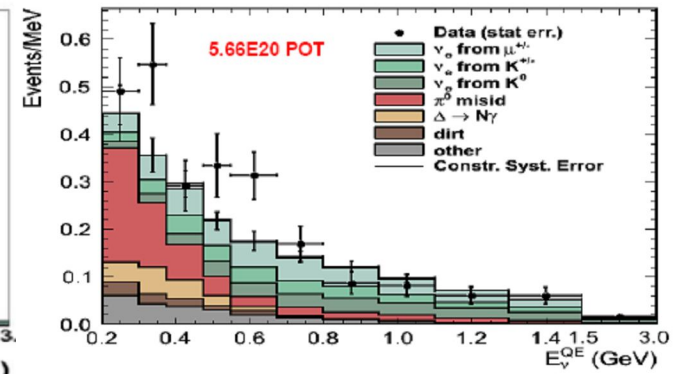
La stagione delle anomalie



LSND (1996)



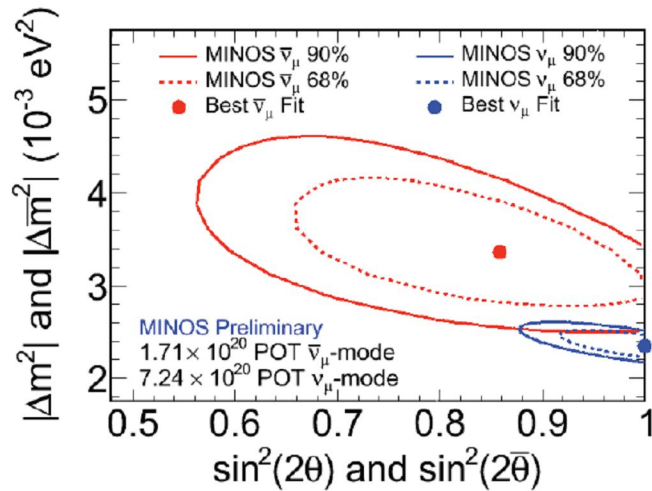
Miniboone neutrino (2008)



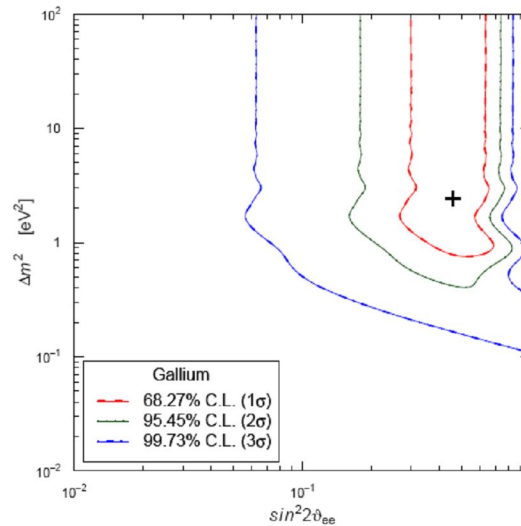
Miniboone antineutrino (2010)

Gallium Anomaly

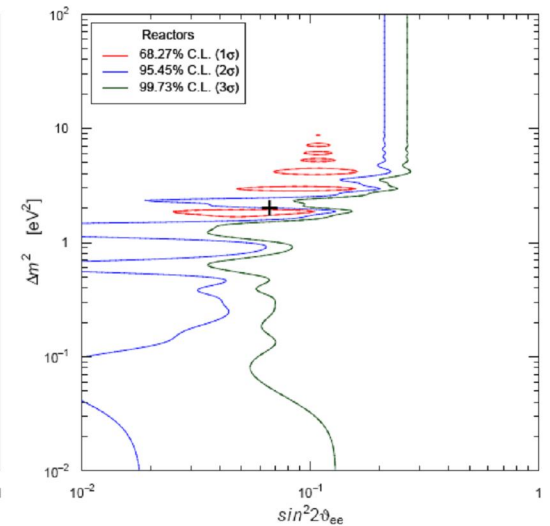
Reactor Anomaly



Minos antineutrino (2010)



Gallex-Sage (1996-2006)



New reactor fluxes (2011)

La stagione delle anomalie

Non esiste un quadro consistente che le spieghi tutte (v. talk di Carlo Giunti) e, inoltre, nessuna di loro e' pienamente convincente:

- dal punto di vista statistico (GALLEX, Miniboone antineutrinos)
- dal punto di vista delle sistematiche sperimentali (Miniboone neutrinos)
- dal punto di vista delle sistematiche teoriche (anomalia dei reattori)

Le tecniche sperimentali hanno fatto un salto di qualita' nelle zone in cui si sperava seriamente di ottenere risultati al leading order (e.g. il puzzle dei solari).

Lo stesso salto di qualita' non e' stato fatto altrove ne' gli esperimenti attuali sono pensati per studio di componenti subdominanti.

Si e' fatta anche qualche ingenuita' sperimentale (e.g. posporre il near detector di Boone in una seconda fase).

La prima priorita' dovrebbe essere la conclusione definitiva della saga LSND.

Prima di costruire facilities nuove, si puo' pensare a campagne di misure ancillari per testare le altre anomalie, magari usando facilities esistenti (Boone, SNS, misure di fisica nucleare ai reattori, Borexino+sorgenti etc.)