

# Il futuro degli esperimenti long-baseline

Perche' gli esperimenti long baseline avranno un ruolo cruciale nella fisica delle oscillazioni di neutrino ?

Ci sono prospettive specificatamente europee in questo settore?

Sommario:

- Long-baseline di prossima generazione
- CNGS
- Nuove sorgenti di neutrini ad alta intensita'
- Un approfondimento sui Betabeams

# Centralita' degli esperimenti long-baseline

Test delle predizioni dirette delle oscillazioni (pattern sinusoidale, osservazione in modo non-inclusivo dell'apparizione di nuovi flavors).

Flavor participation (neutrini sterili, accoppiamenti non standard)

Medium term

**Determinazione di precisione della matrice di mixing leptonica**

Long term

Alte energie (multi-GeV)  
[soglie cinematiche, sezioni d'urto, risoluzione in L e E]  
Necessita' di operare al "picco degli atmosferici" [ $\Delta m^2 = 10^{-3} \text{eV}^2$ ]

Conoscenza dettagliata degli stati iniziali

Baselines dell'ordine di  
 $L = O(1000 \text{km})$   
"long-baselines"

+

Neutrini artificiali  
(reattori, fasci tradizionali, n factories o betabeams)

# Il medio termine (<2010)

Tutti gli esperimenti in presa dati o in costruzione sono stati progettati per testare la mera esistenza delle oscillazioni di neutrino.

Ma le cose sono andate piu' rapidamente del previsto...

## Solar Scale

1968

Homestake:  
solar  $\nu$  puzzle

Gallex  
SAGE

2001 2002

SNO KamLAND

~2007

Borexino  
KL solar  $\nu$

## Atmospheric scale

1980

1985

Kamioka  
IMB

Atm.  $\nu$   
puzzle

1998

SK

2003

K2K

~2010

MINOS  
CNGS

## Other scales ?

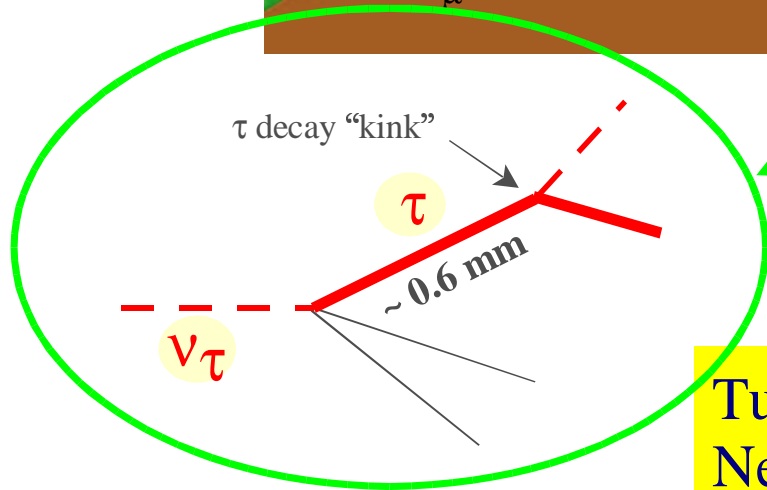
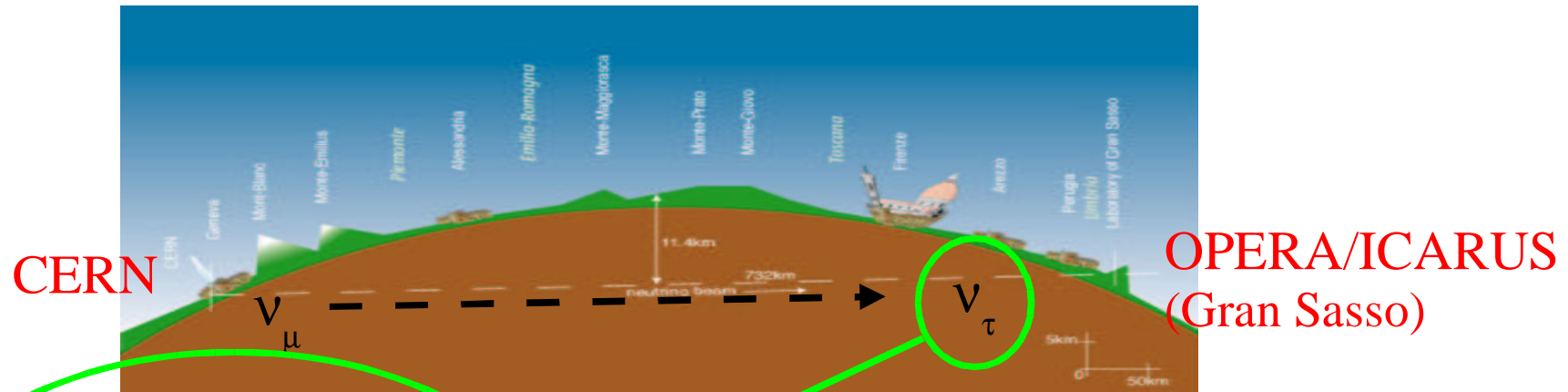
1995

LSND anomaly

~2006

MiniBOONE

# Il CNGS (Cern to Gran Sasso n beam)



Approvato nell'era della "smoking gun evidence": un canale inequivocabile di oscillazione

Tuttora mantiene gran parte del suo appealing: Nessuno ha mai testato in modo inequivocabile l'aperance di nuovi flavor (se non, in modo inclusivo con le NC) o il pattern sinusoidale (hints da SK)

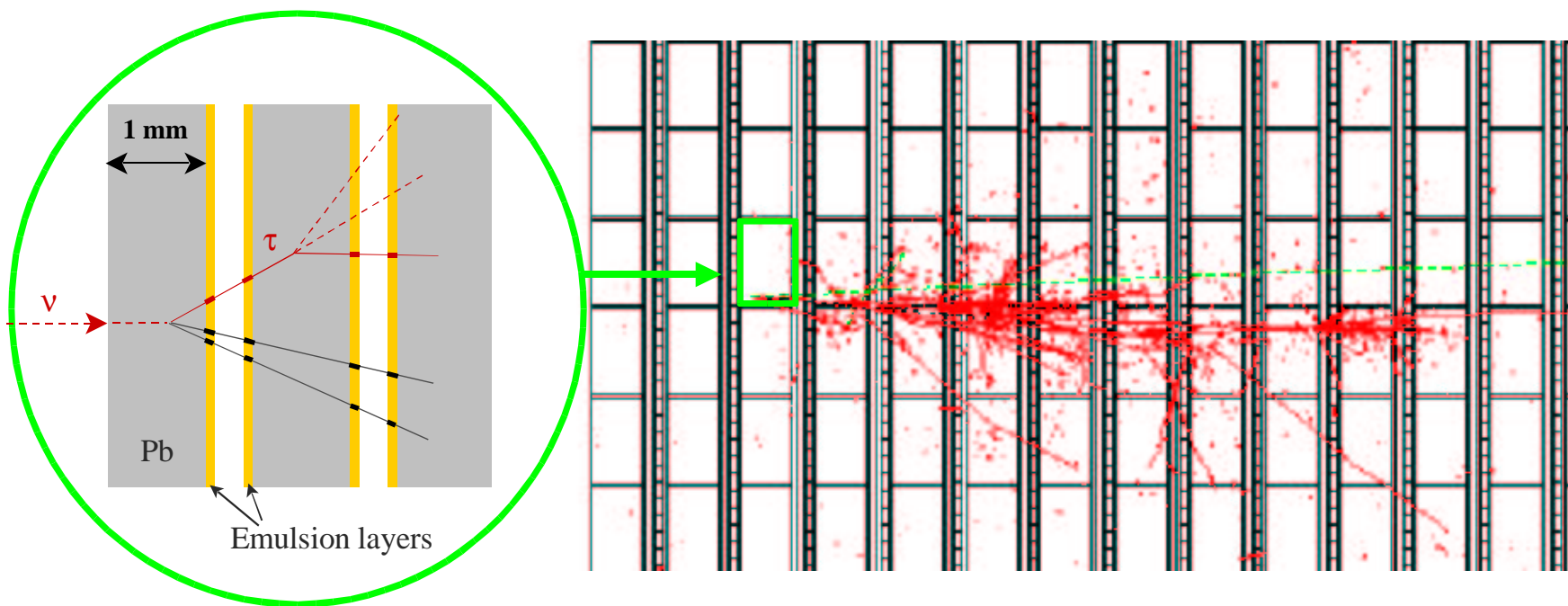
Difficolta': tunato per  $\Delta m^2$  piu' grandi di quelli stimati oggi (< statistica)

# L'esperimento OPERA

OPERA ha scelto il canale più diretto e pulito per dimostrare  
l'oscillazione  $\nu_{\mu} \Rightarrow \nu_{\tau}$   
il prezzo da pagare:

$\nu$  oscillation  $\rightarrow$  masse enormi      **AND**       $\tau$  decay  $\rightarrow$  risoluzioni al  $\mu\text{m}$

## Lead – nuclear emulsion sandwich

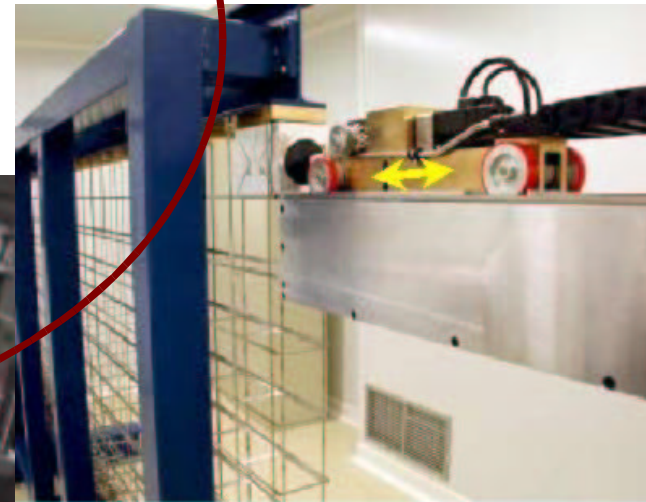
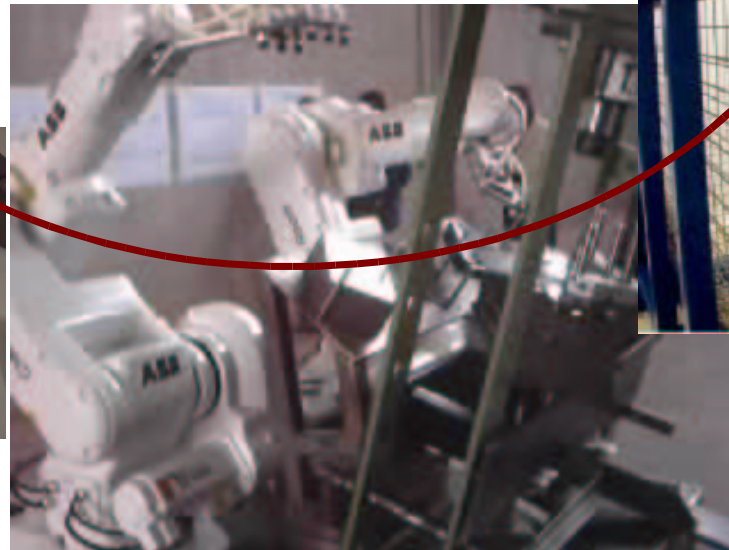
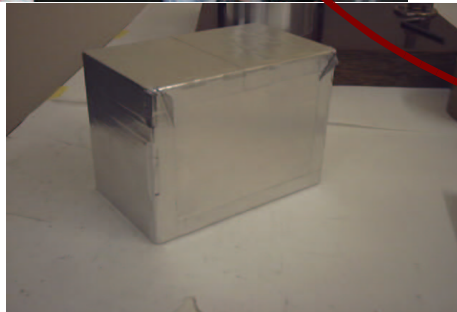
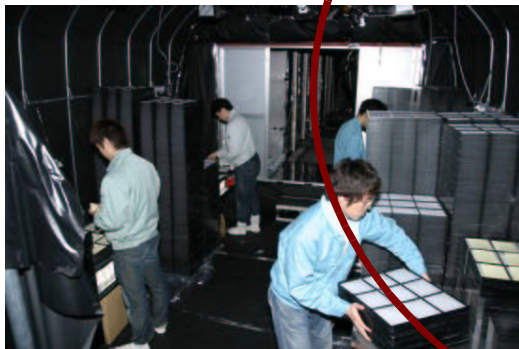
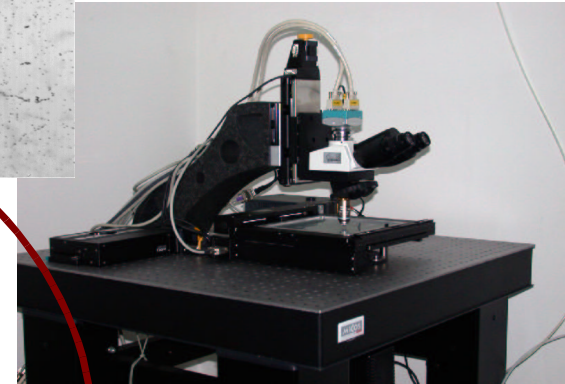


# Emulsion Cloud chambers

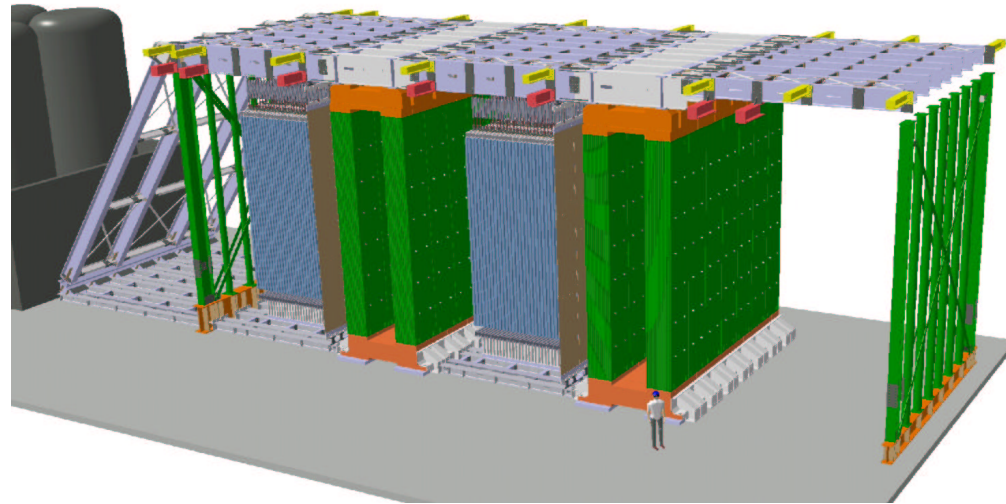
- Storicamente ben nota.
- Testata in condizioni simili a quelle di OPERA da DONUT.
- Raggiungera' masse gigantesche (1.8 kt) con OPERA



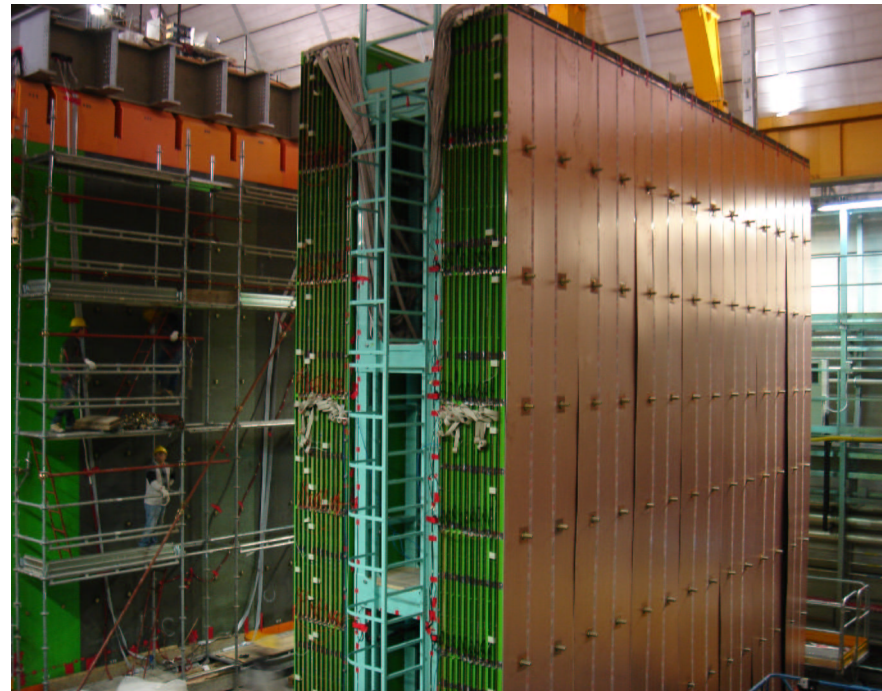
20 cm<sup>2</sup>/h !!  
(achieved  
in 2004)



# Stato dell'esperimento



Oct 2004



Mar 2005

# Sensitivita' alle oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

Full mixing, 5 years run @  $4.5 \times 10^{19}$  ( $6.7 \times 10^{19}$ ) pot / year

	signal ( $\Delta m^2 = 1.9 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ )	signal ( $\Delta m^2 = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ )	signal ( $\Delta m^2 = 3.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ )	BKGD
<b>OPERA</b> 1.8 kton fiducial	<b>6.6 (10)</b>	<b>10.5 (15.8)</b>	<b>16.4 (24.6)</b>	<b>0.7 (1.1)</b>
+ brick finding + 3 prong decay	<b>8.0 (12.1)</b>	<b>12.8 (19.2)</b>	<b>19.9 (29.9)</b>	<b>1.0 (1.5)</b>

Background, 5 years run @  $4.5 \times 10^{19}$  pot / year

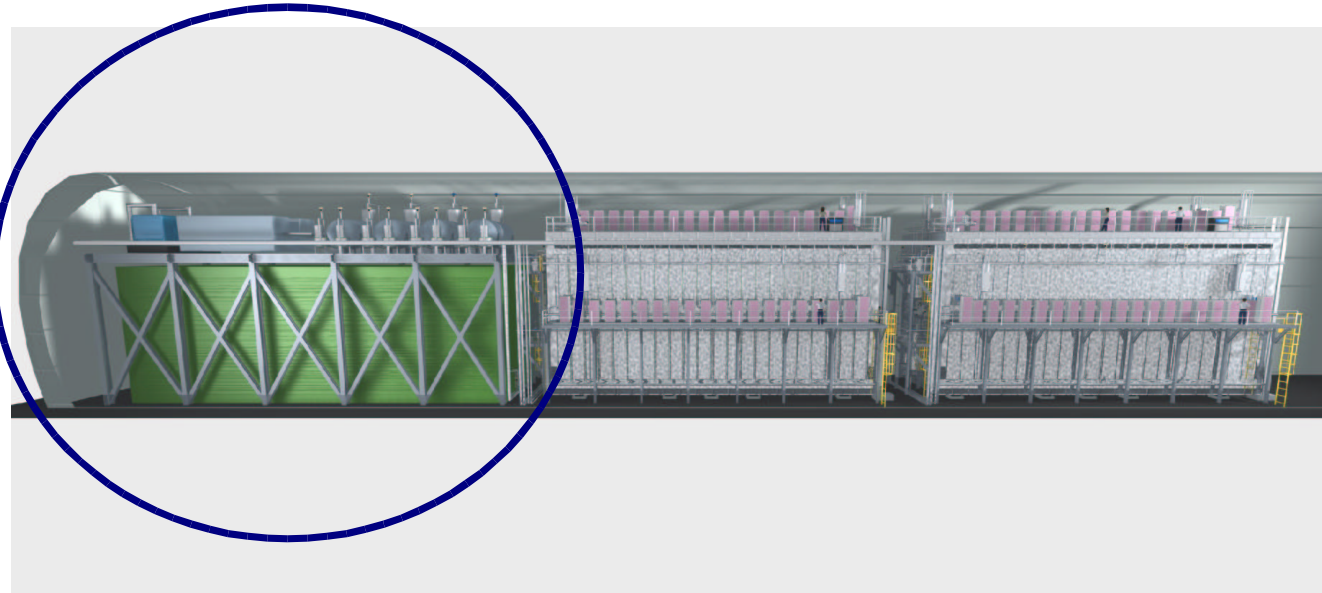
	$\rightarrow e$	$\rightarrow \mu$	$\rightarrow h$	total
Charm background	.210	.011	.162	.382
Large angle $\mu$ scattering		.116		.116
Hadronic background		.093	.116	.209
Total per channel	.210	.219	.278	.707



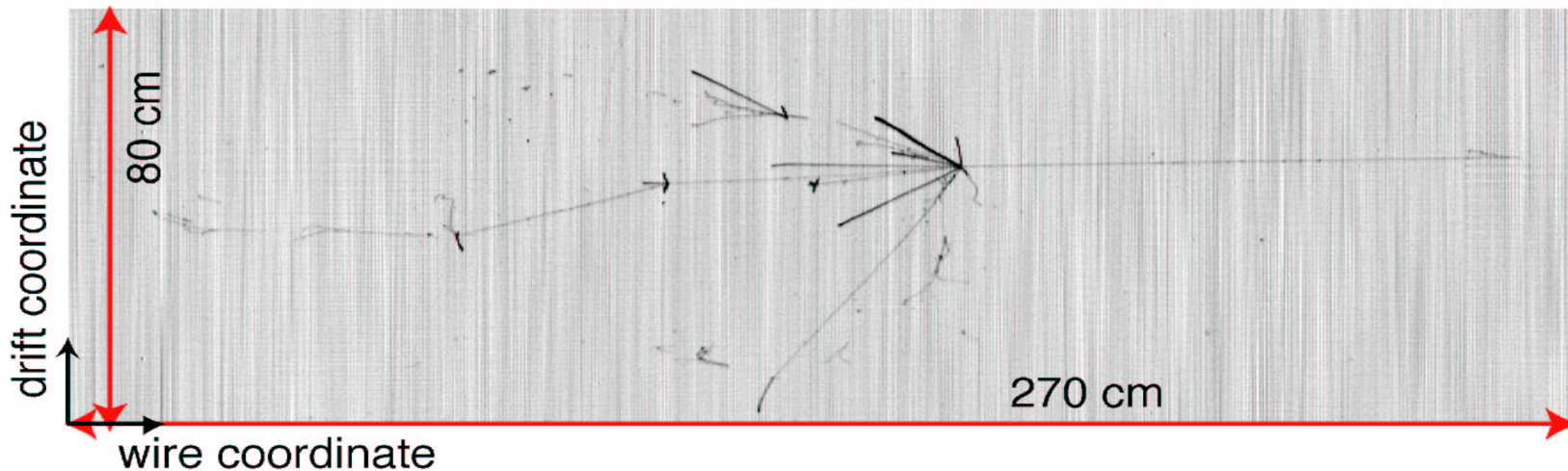
# L'esperimento ICARUS

Straordinaria granularita': criteri cinematici per l'identificazione del tau  
Sensitivita' simile a OPERA con 3kt

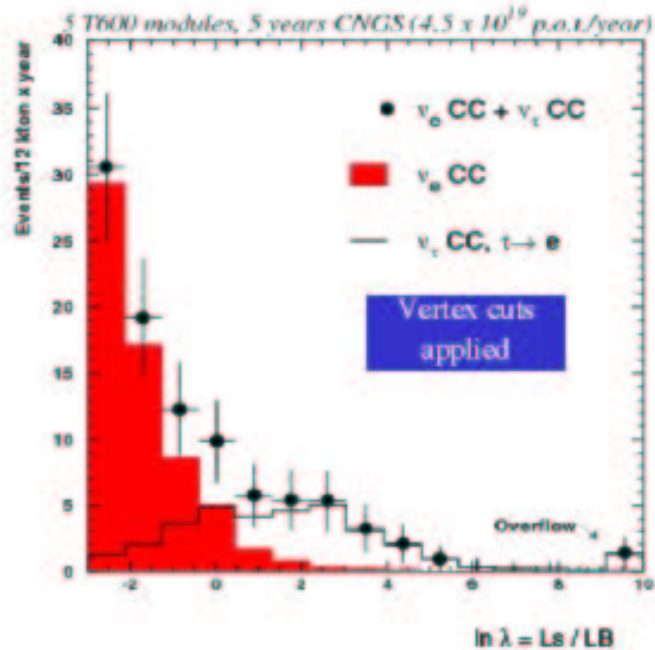
Gia installato in  
sala C (Dec 04)



Run 308 Event 160 Collection view



# CNGS $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance search



$\tau$ decay mode	Signal $\Delta m^2 =$ $1.6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	Signal $\Delta m^2 =$ $2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	Signal $\Delta m^2 =$ $3.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	Signal $\Delta m^2 =$ $4.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$	BG
$\tau \rightarrow e$	3.7	9	13	23	0.7
$\tau \rightarrow \rho \text{ DIS}$	0.6	1.5	2.2	3.9	< 0.1
$\tau \rightarrow \rho \text{ QE}$	0.6	1.4	2.0	3.6	< 0.1
<b>Total</b>	<b>4.9</b>	<b>11.9</b>	<b>17.2</b>	<b>30.5</b>	<b>0.7</b>

**T3000 detector (2.35 kton active, 1.5 kton fiducial) 5 years running**

# Lo scenario piu' conservativo nel 2010

LSND e' sbagliato e MiniBOONE lo falsifica

Le oscillazioni alla scala degli atmosferici sono prevalentemente  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

La scala dei solari e' "solo" 30 volte piu' piccola di quella degli atmosferici (LMA-I) KamLAND/SNO

Settore 1-3 osservabile come contaminazione dell'oscillazione  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  con oscillazioni  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  alle scale degli atmosferici

Generazione futura: misura di precisione della matrice di mixing leptonica

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

$\nu$  atmosferici

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  con esperimenti terrestri e acceleratori

$\nu$  solari

## Il dilemma di $\theta_{13}$

In teoria possiamo determinare con exp terrestri TUTTA la matrice di mixing leptonica e distinguere tra gerarchia diretta e inversa.

Tutto dipende dal valore di  $\vartheta_{13}$

Se  $\vartheta_{13} \approx 10^\circ$  (vicino ai limiti attuali) non e' necessaria la costruzione di nuovi rivelatori [ progetti con costi  $\approx 150$  M\$ ]

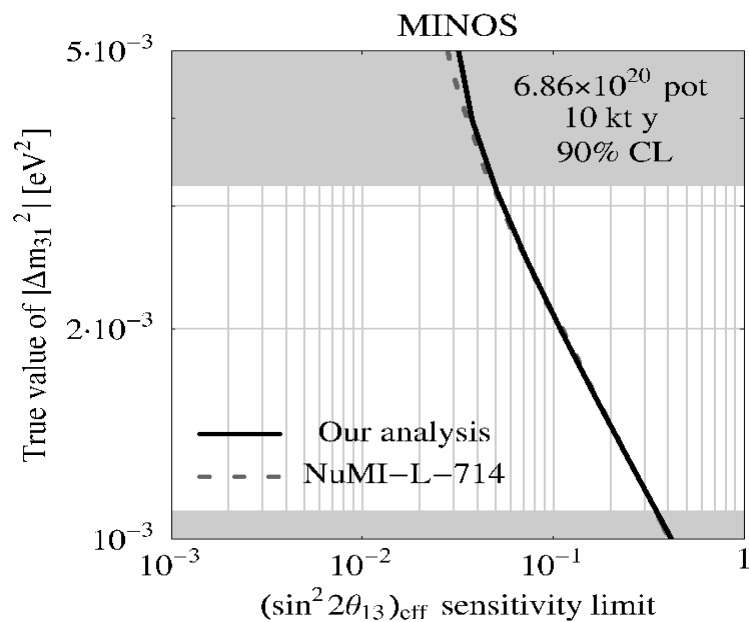
Se  $\vartheta_{13} > \approx 3^\circ$  e' necessaria la costruzione di nuovi rivelatori (e.g. 1 Mton water cherenkov) e fasci tradizionali ma piu' intensi (Superbeams) [ progetti dell'ordine di 0.5-1 G\$ ]

Se  $\vartheta_{13} > \approx 1^\circ$  e' necessaria la costruzione di nuovi rivelatori (e.g. 1 Mton water cherenkov) e di fasci di nuova concezione (beta beams e neutrino factories) [ progetti dell'ordine di 1-2 G\$ ]

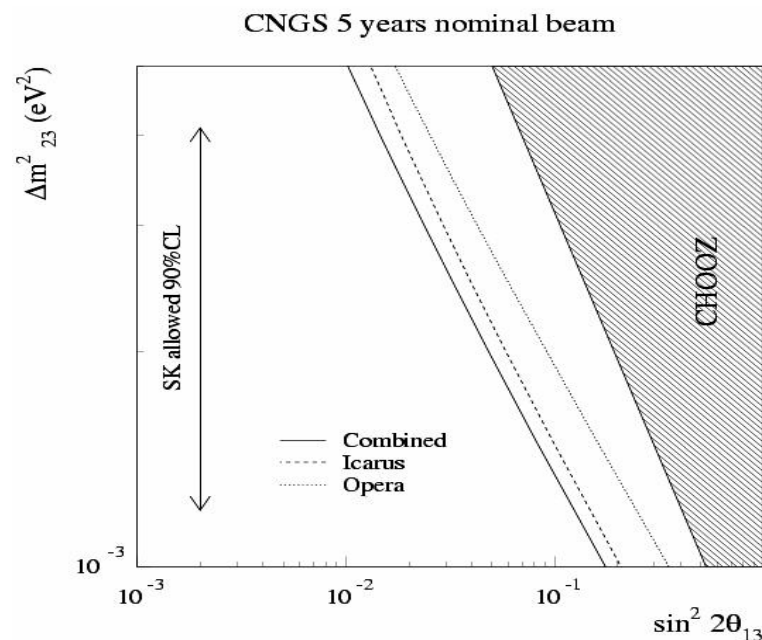
Se  $\vartheta_{13} < \approx 1^\circ$  la fase di CP non e' accessibile con esperimenti terrestri

# La situazione attorno al 2010

Gli esperimenti agli acceleratori come MINOS/ICARUS/OPERA hanno una certa sensibilita' alle oscillazioni  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$



M.Diwan et al., Numi-L-714 (2001)



M.Komatsu, P.Migliozzi, F.T.,  
J. Phys. G29 (2003) 443

Extra: esperimenti ai reattori  
di seconda generazione  
(DOUBLE CHOOZ) ?

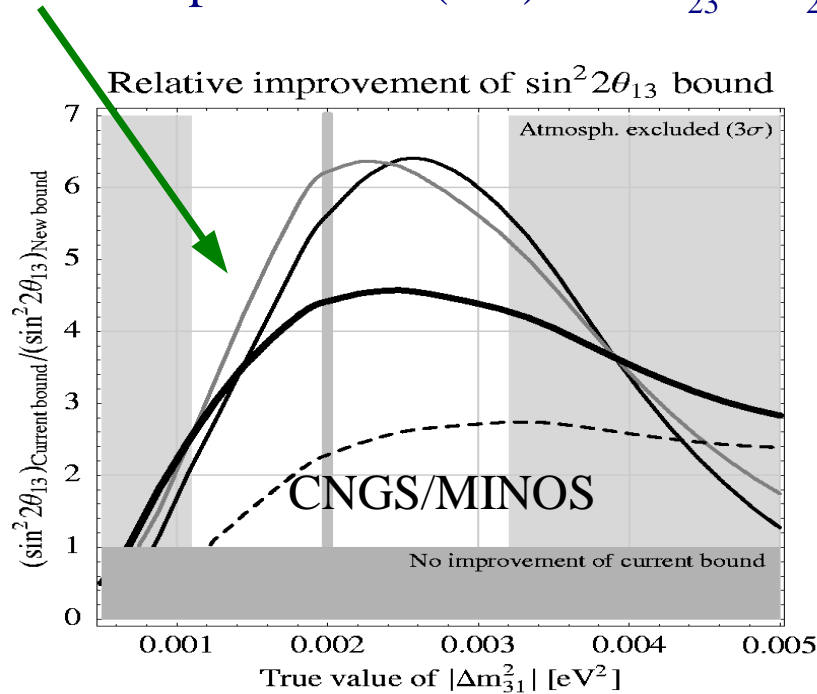
$$\sin^2 2\theta_{13} < 0.03$$

F.Ardellier et al. hep-ex/0405032

# La strategia piu' ovvia (possibile solo in Giappone!)

**Phase I:** un fascio tradizionale ma intenso con un rivelatore gia' esistente: testa che  $\vartheta_{13}$  non sia troppo piccolo ( $>2-3^\circ$ ) e fa una misura di precisione (1%) di  $\Delta m_{23}^2$  e  $\vartheta_{23}$

**Phase II:** In caso di risultato positivo, un nuovo enorme rivelatore (Hyper-K: 1Mton water) e un ulteriore incremento (x5) dell'intensita' per osservare CPV nel settore leptonic



P. Huber et al., PRD 70 (2004) 073014



T2K

$\theta_{13}$  discovery ?

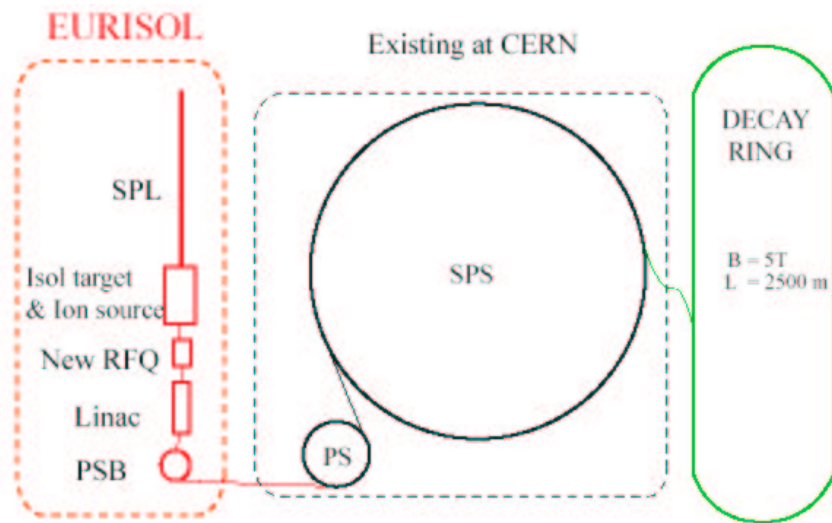
Beam upgrade and HK construction

Data taking...

# Una strategia europea?

- Non abbiamo un rivelatore di massa adeguata (SupeKamiokande)
- Abbiamo il complesso di accelerazione del CERN (v. il caso CNGS)
- Abbiamo un laboratorio sotterraneo (LNGS) troppo piccolo per lavorare in appearance di ne

## Ipotesi di lavoro: un Beta Beam europeo basato su facilities CERN



P.Zucchelli, PLB 532 (2002) 166

### Pro:

Fasci puri di  $\nu_e$  (appearance di nm senza fondi di fascio)

Parte del complesso già esistente

### Contro:

Piccole energie ( $<1\text{ GeV}$ )

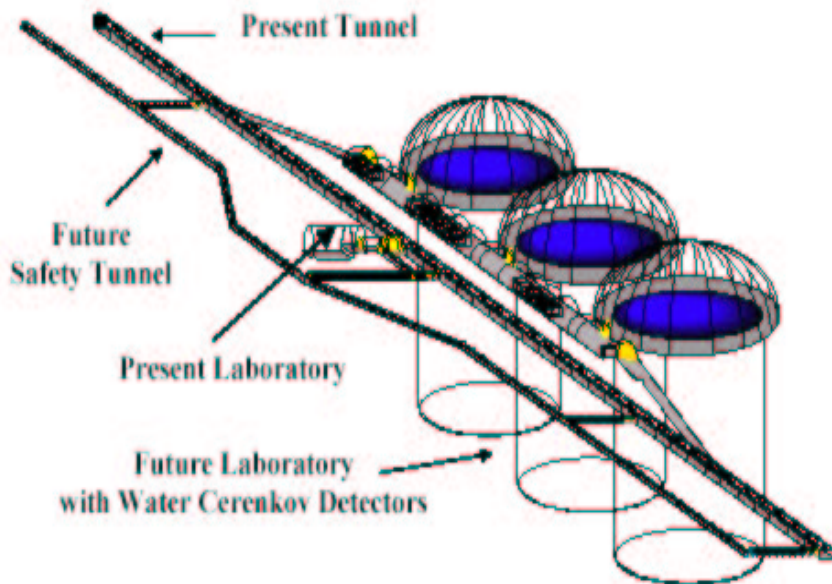
Enormi rivelatori

Decay ring

Fondi dagli atmosferici

# Una difficile ottimizzazione...

Massimo utilizzo delle facility  
CERN attuali (SPS)



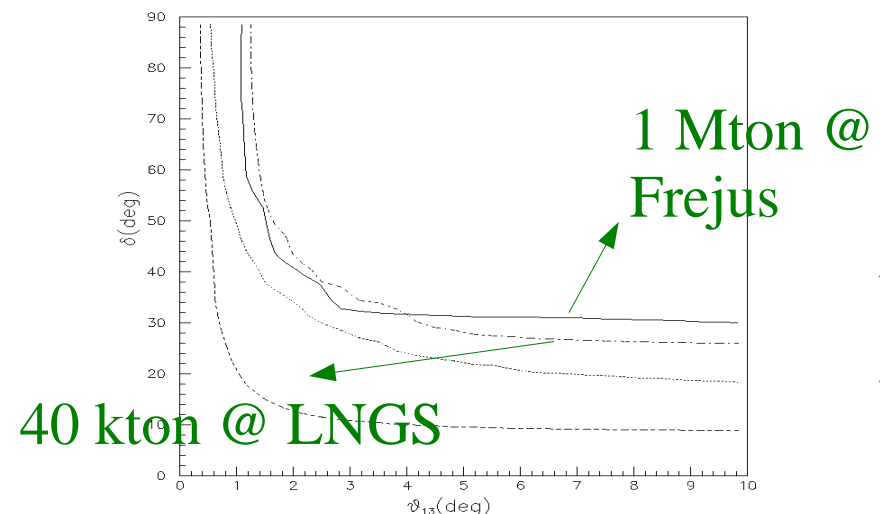
La fisica del neutrino e' vincolata  
alla costruzione del Mton water  
cherenkov in europa <2020  
Frejus?

Incremento dell'energie del  
neutrino (no SPS)

- Sensibilita' maggiori
- Rivelatori piu' piccoli
- Possibilita' di rimettere in gioco  
il CNGS

Tuttavia:

- Costo delle nuove macchine e  
del decay ting molto elevato

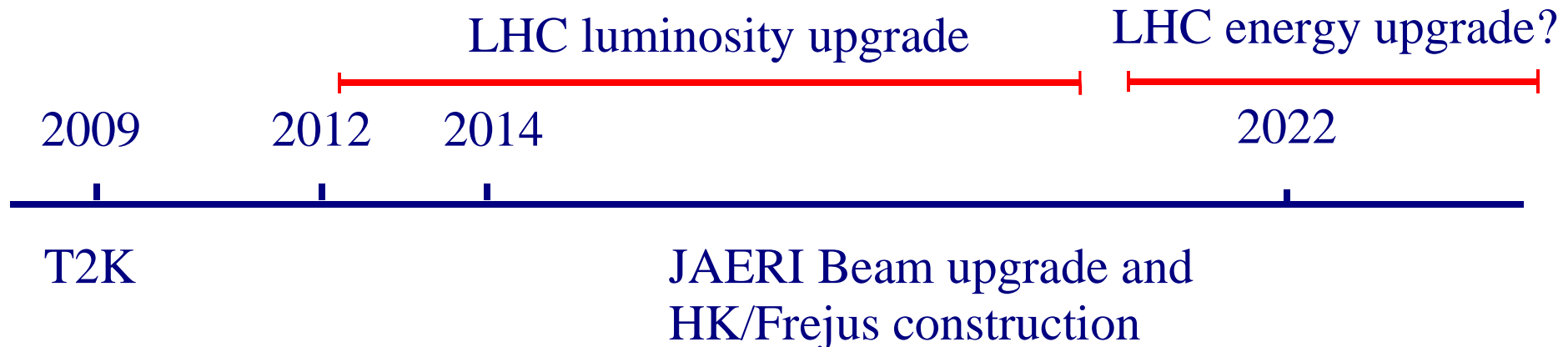




## La mia opinione

- L'LHC rimarra' il principale catalizzatore di risorse in Europa, soprattutto se si vede qualcosa di piu' dello SM Higgs
- La fisica del neutrino agli acceleratori e' a bassa priorita e i costi di cui parliamo sono difficilmente sostenibili.

Va studiata la possibilita' di agganciarci agli upgrade di macchina dell'LHC



Un Super-SPS (v. e.g. talk di Garoby a LaThuile) permetterebbe:

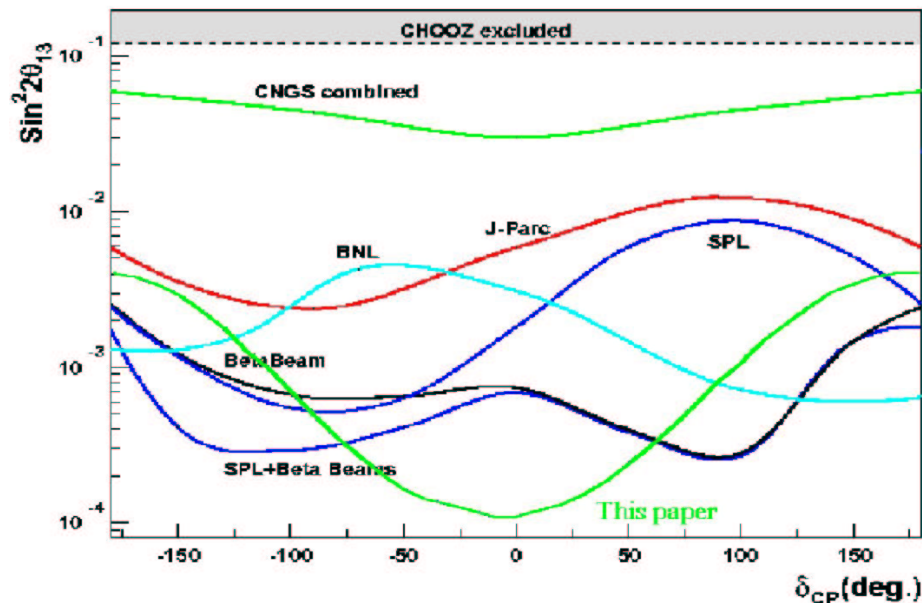
- Beta beams con energie adatte al LNGS (baseline 730km)
- Iniettare l'LHC? (gamma di ingresso piu' alto, perdite durante ramp-time ridotte, emittanza in ingresso piu' bassa: facilita trasferimento nel lattice dell'LHC)

# Il caso estremo: iniettare l'LHC

Utilizzare LHC per l'accelerazione e lo storing degli ioni con una breve sezione diritta (3km) verso il LNGS

$\gamma=4158/2488$  (fuori dal massimo delle oscillazioni per  $L=732$  km: sensibile a  $\theta_{13}$  e  $\cos \delta$ )

Ideale per la misura di  $\theta_{13}$  e per risolvere le ambiguita' nella determinazione dei parametri



Cosa avviene?

Flusso cresce come  $\gamma^2$  ma  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$  decresce come  $1/E^2$ : si compensa  
La statistica cresce come  $E$  (sezione d'urto). Inoltre:

$\nu_e \rightarrow \nu_\mu$  taggato come un  
eccesso di muoni dalla roccia

Volume efficace cresce come  $E$

Enorme statistica ( $\sim \gamma^2$ )  
Costo del rivelatore  
trascurabile

F.T. et al., EPJ C38 (2004) 69

# Conclusioni

Gli esperimenti long-baseline sono un ambiente ideale per la fisica di precisione delle oscillazioni di neutrino

## Sicuramente:

- Nei prossimi (<2010) anni impareremo ancora molto (test diretti di appearance, misure di precisione dei parametri alla scala degli atmosferici, flavor participation...)
- Non sappiamo ancora se il settore (1-3) della matrice di mixing sia accessibile con esperimenti terrestri.

## Probabilmente:

- i SuperBeam ci diranno se la strada dei long baseline e' percorribile
- i BetaBeams o le Neutrino Factories (o qualcosa di piu' smart che non ci e' ancora venuto in mente) ci condurranno alla meta