

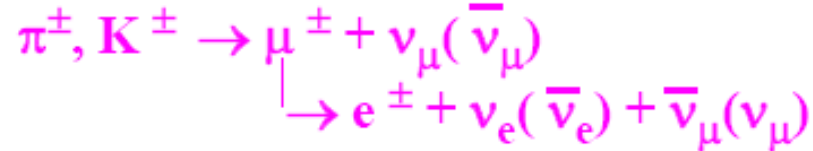
Neutrino 5

sommario

- L'anomalia dei neutrini atmosferici
- Interpretazione in termini di oscillazioni
- Esperimenti con neutrini artificiali
 - Reattori
 - Acceleratori long-baseline

Neutrini atmosferici

Sorgenti principali di neutrini atmosferici:



Ad energie $E < 2 \text{ GeV}$ la maggior parte dei pioni e muoni decade prima di raggiungere la Terra:

$$\frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} \approx 2$$

Ad energie più alte, la maggior parte dei muoni raggiunge la Terra prima di decadere:

$$\frac{\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu}{\nu_e + \bar{\nu}_e} > 2$$

(funzione crescente di E)

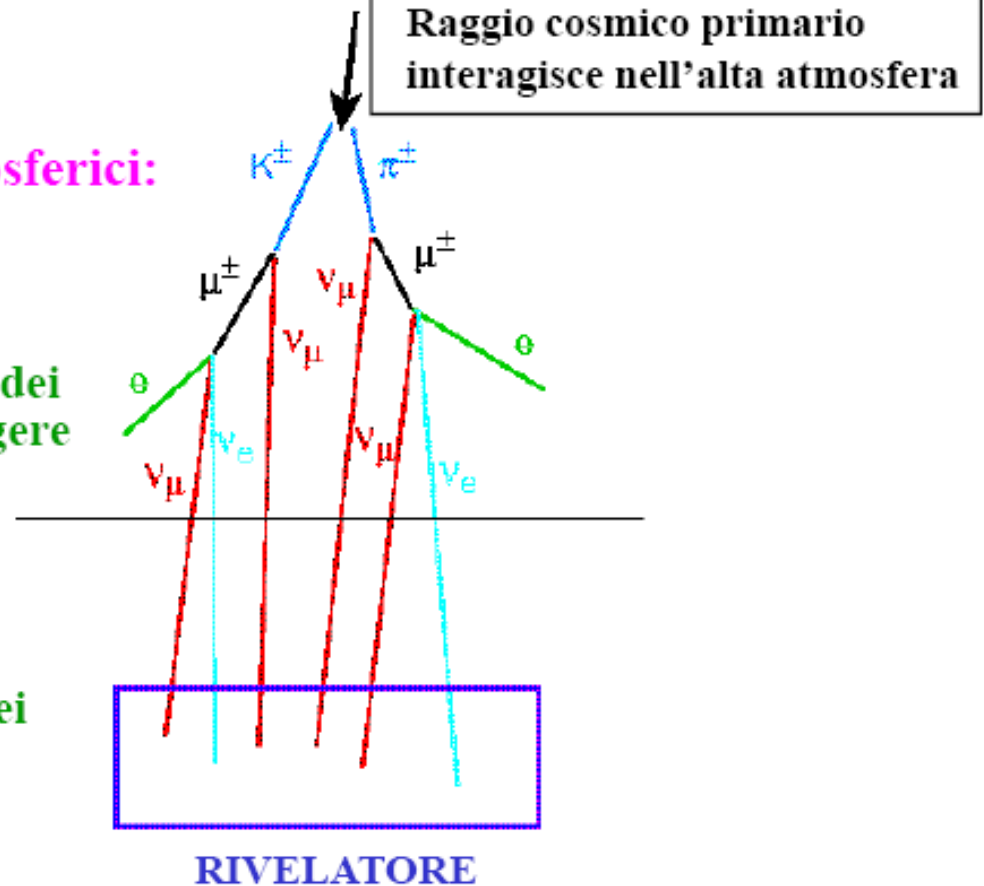
Intervallo di energie dei neutrini atmosferici: $0.1 - 100 \text{ GeV}$

Frequenza di eventi molto bassa: ~ 100 /anno per un rivelatore di 1000 ton .

Incertezza sui flussi dei neutrini atmosferici: tipicamente $\pm 30\%$

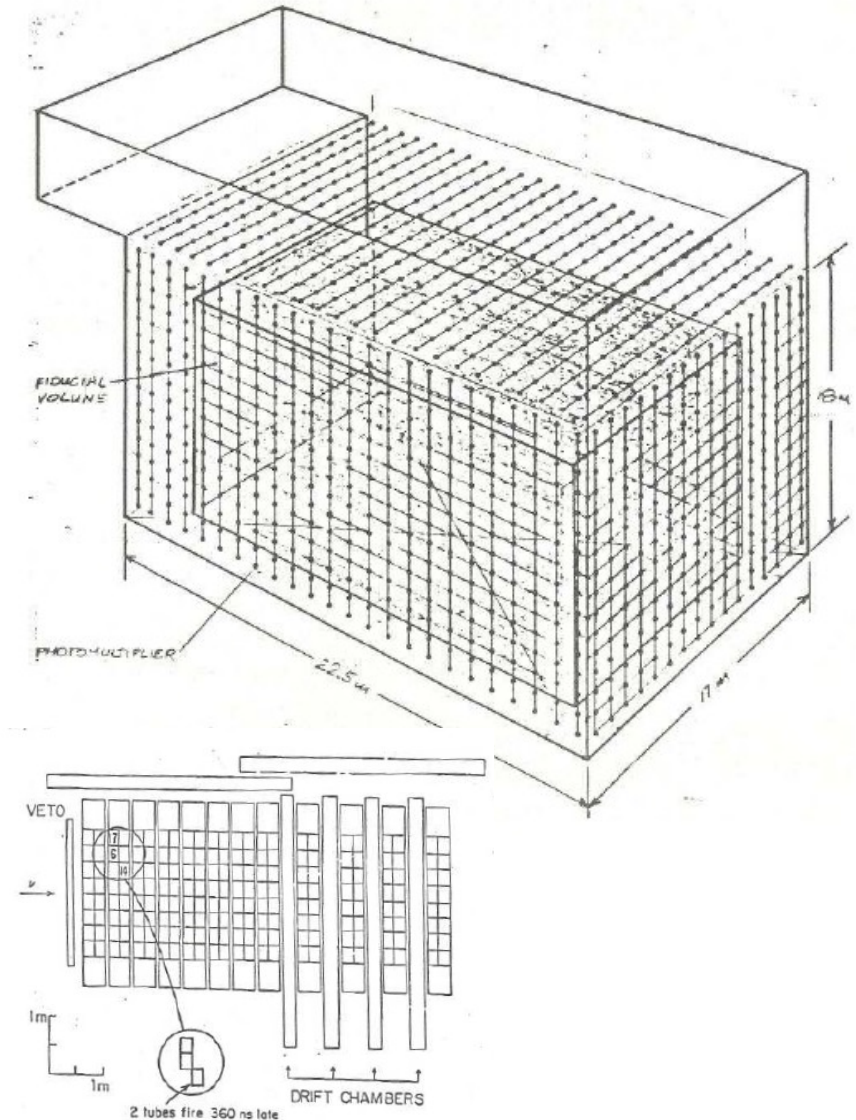
(da incertezze sullo spettro primario, sulla produzione di adroni, ecc.)

Incertezza sul rapporto ν_μ/ν_e : $\pm 5\%$



Irvine Michigan Brookhaven

- La collaborazione IMB si forma nel 1979 per studiare il decadimento del protone
- Le interazioni dei neutrini atmosferici dovevano essere identificate per eliminare questa componente importante del fondo
- Ma era stato effettuato anche uno studio sulla possibilità di rivelare oscillazioni di neutrino!



- 1985: 401 eventi completamente contenuti, nessuna traccia di decadimento del protone. 104 eventi con decadimento del muone, 3.5 sigma meno del numero atteso
- Questo deficit corrispondeva ad un rapporto tra neutrini elettronici e muonici pari a 1.3, in netto disaccordo coi risultati di Nusex e Kamiokande I, che sembravano confermare i flussi attesi
- 1988: anche Kamiokande pubblica un'anomalia.
- In questa fase nè IMB nè Kamiokande riescono ad evidenziare una modulazione in energia o in angolo dell'effetto

Rivelazione dei neutrini atmosferici

$\nu_\mu + \text{Nucleone} \rightarrow \mu + \text{adroni}$: presenza di una traccia lunga al minimo della ionizzazione (il muone)

$\nu_e + n \rightarrow e^- + p$, $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$: presenza di uno sciame elettromagnetico

(interazioni ν_e con produzione multipla di adroni in pratica indistinguibili dalle interazioni di Corrente Neutra)

Identificazione in contatori Čerenkov ad acqua

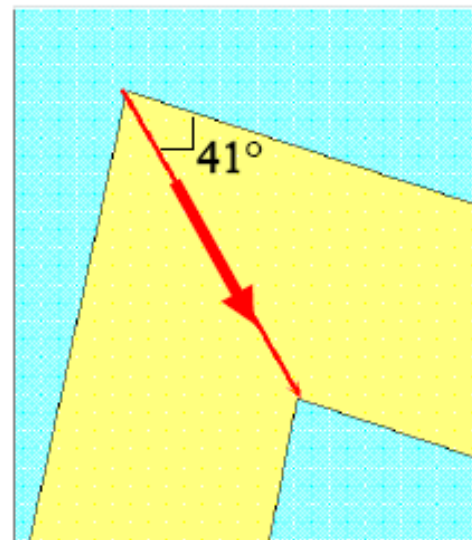
traccia muonica:

dE/dx compatibile col minimo della ionizzazione;
anello di luce Čerenkov con bordi ben definiti

sciame elettromagnetico:

dE/dx elevato (molti elettroni secondari);
bordi dell'anello di luce Čerenkov mal definiti

(dall'apertura angolare dello sciame)



Misura della discriminazione elettrone / muone in un contatore Čerenkov ad acqua di 1000 tonn. (copia ridotta di Super-K) esposto a fasci di elettroni e muoni presso acceleratori. Probabilità di identificazione erronea misurata $\sim 2\%$

ν_μ / ν_e : primi indizi di un fenomeno nuovo

Contatori Čerenkov ad acqua: Kamiokande (1988), IMB (1991), Super-K (1998)

Calorimetri convenzionali (lastre di ferro + tubi proporzionali): Soudan2 (1997)

$$R = \frac{(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{misurato}}}{(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{predetto}}} = 0.65 \pm 0.08$$

Neutrini atmosferici in Super-K

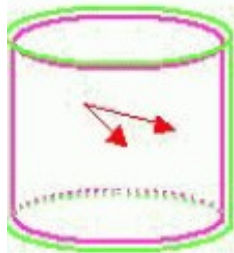
Distanza tra il punto di interazione e la parete del rivelatore interno ≥ 1 metro

1489 days of contained event data (April 96 – July 01)

Contained event
(sub-GeV, multi-GeV sample)

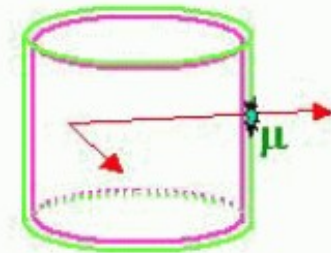
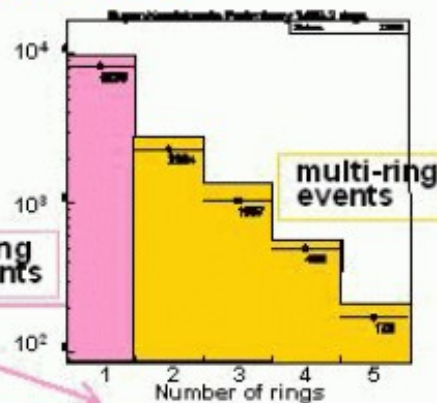
Fully Contained (FC)

Partially Contained (PC)



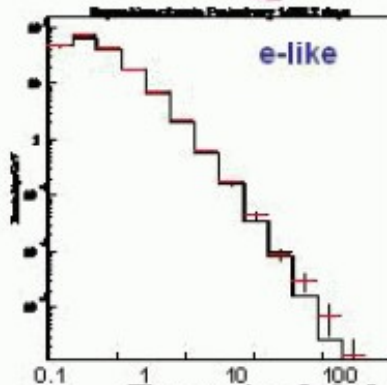
e/μ

1-ring events

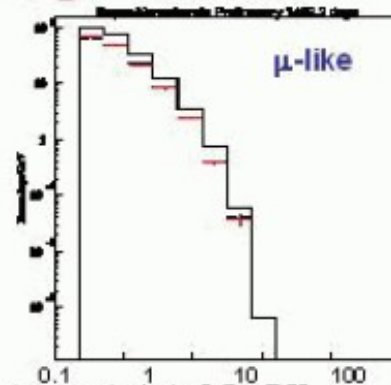


μ

All are assumed to be μ -like



e-like



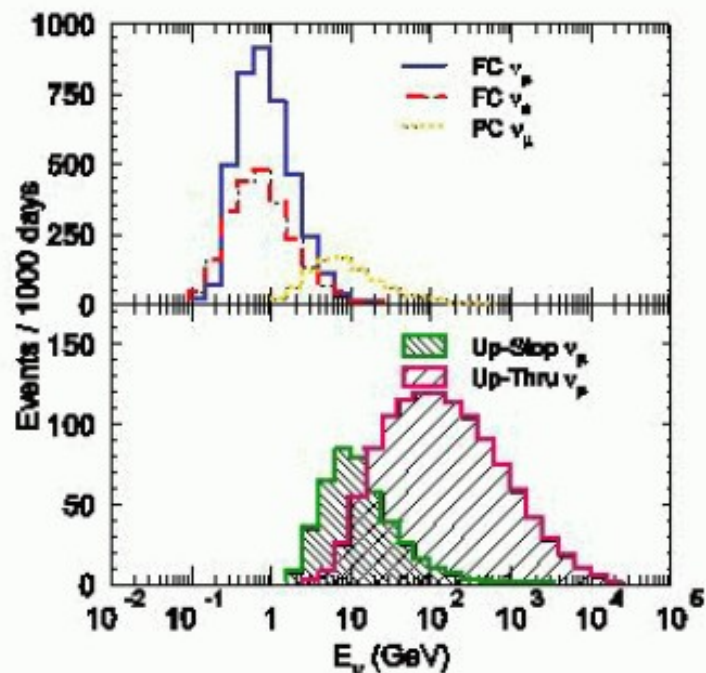
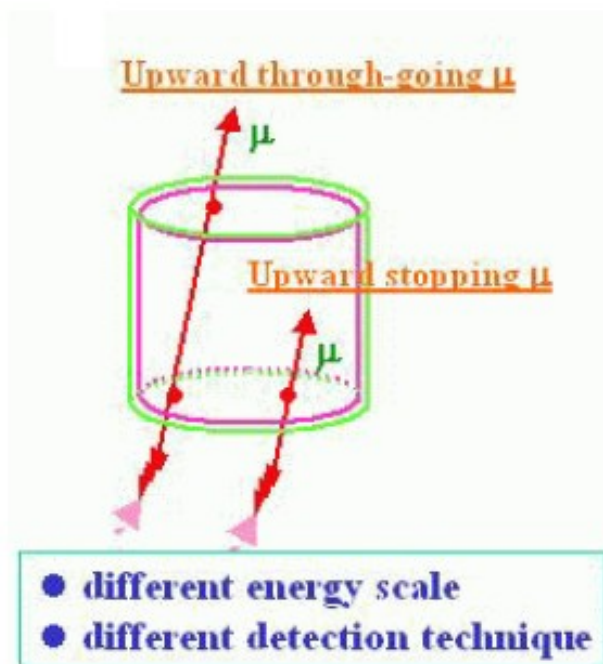
μ -like

Energia del leptone (e/μ) [GeV]

Lunghezza di radiazione $H_2O \approx 36$ cm
→ elettroni di parecchi GeV sono completamente assorbiti in ~ 8 m

Un altro campione di eventi:

Muoni diretti verso l'alto prodotti da interazioni di ν_μ nella roccia



Up through-going μ , 1678 days,

Obs. $1.7 \pm 0.04 \pm 0.02$ ($\times 10^{-13} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$)

Exp. 1.97 ± 0.44

Up stopping μ , 1657 days,

Obs. $0.41 \pm 0.02 \pm 0.02$ ($\times 10^{-13} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$)

Exp. 0.73 ± 0.16

Nota: i muoni diretti verso il basso sono principalmente muoni prodotti nel decadimento $\pi \rightarrow \mu$ che attraversano la montagna fino al rivelatore

Misura della distribuzione dell'angolo di zenith

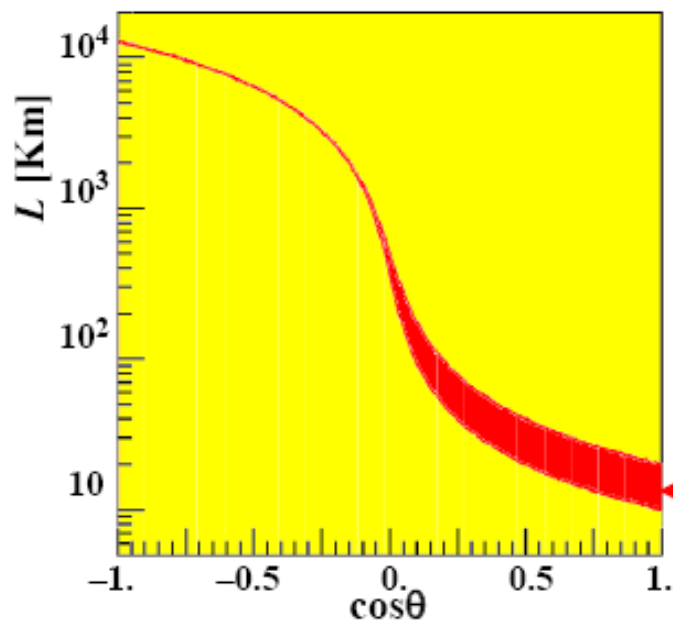
Definizione dell'angolo di zenith θ :
Asse polare parallelo alla verticale
locale, diretto verso il basso

Verso il basso: $\theta = 0^\circ$

Orizzontale: $\theta = 90^\circ$

Verso l'alto: $\theta = 180^\circ$

L (distanza tra il punto di produzione
del neutrino e il rivelatore) dipende
dall'angolo di zenith



$$\theta = 0^\circ \text{ — } 180^\circ$$

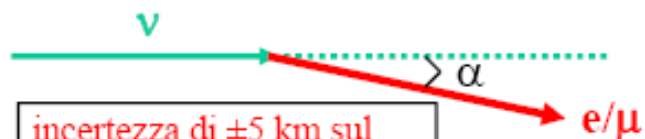
$$L = \sim 10 \text{ — } \sim 12800 \text{ km}$$



Ricerca di oscillazioni su distanza L variabile

Forte correlazione angolare tra neutrino incidente
ed elettrone/muone prodotto per $E > 1 \text{ GeV}$:

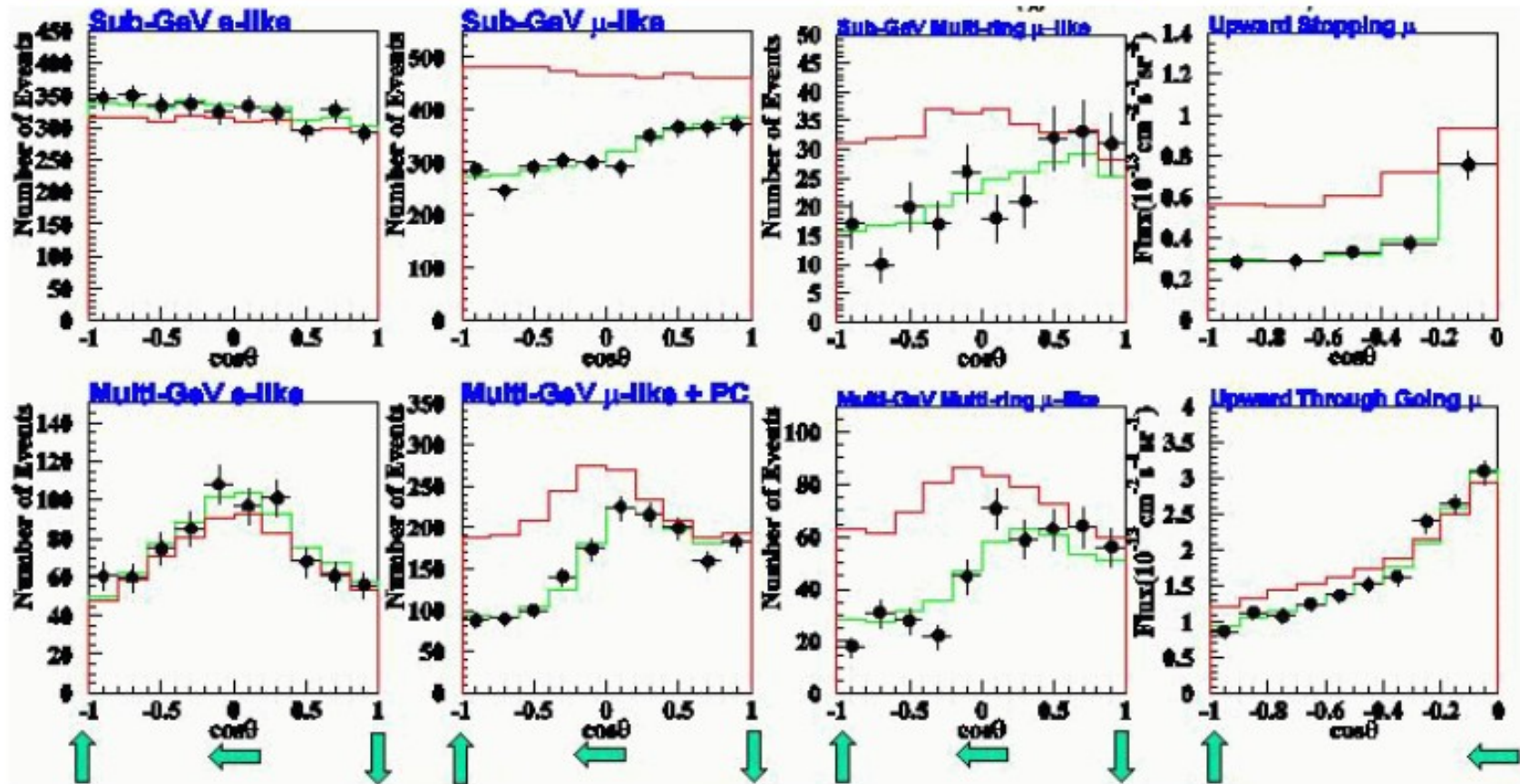
$\alpha \approx 25^\circ$ per $E = 1 \text{ GeV}$;
 $\alpha \rightarrow 0$ per E crescente



incertezza di $\pm 5 \text{ km}$ sul
punto di produzione del ν



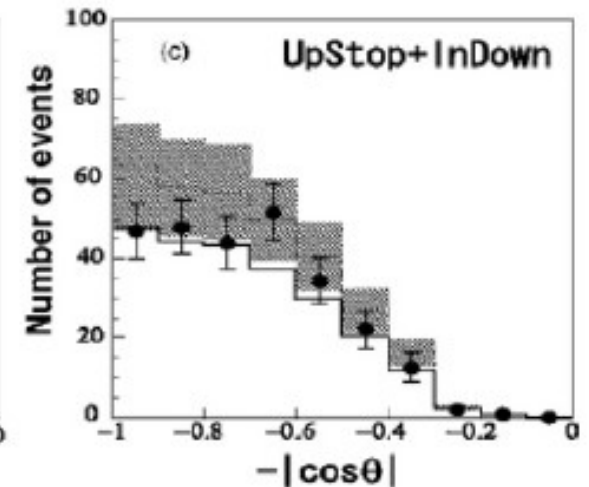
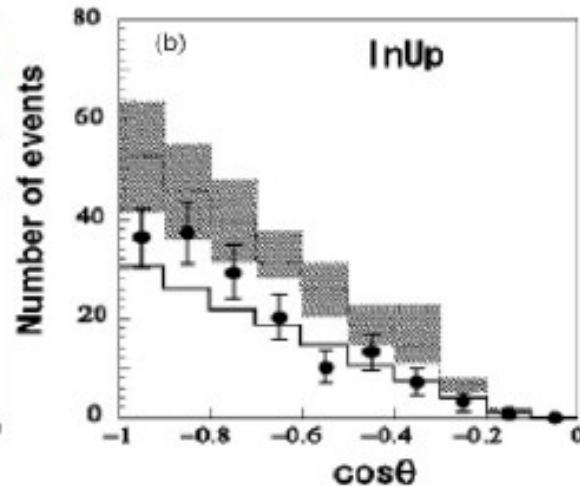
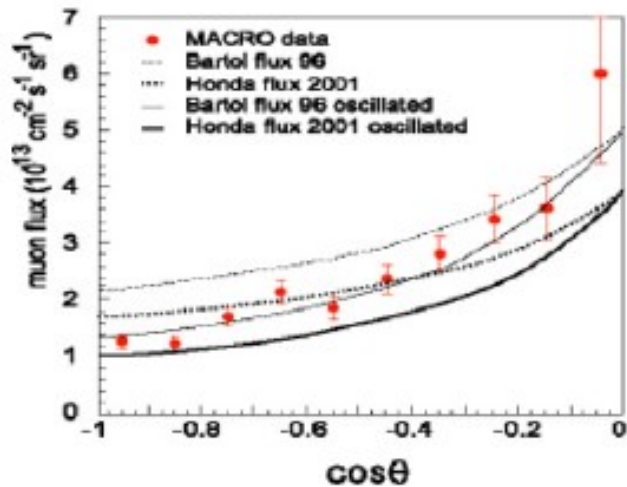
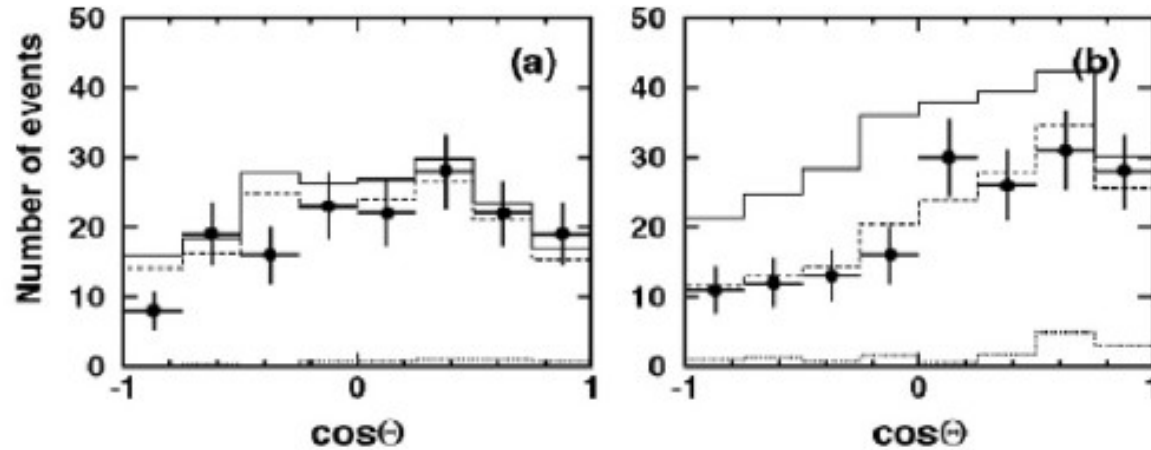
Distribuzioni dell'angolo di zenith in Super-K



— Assenza di oscillazioni ($\chi^2 = 456.5 / 172$ gradi di libert )

— Oscillazione $\nu_\mu - \nu_\tau$ (best fit): $\Delta m^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 1.0$
 $\chi^2 = 163.2 / 170$ gradi di libert 

- Sebbene i risultati più completi siano quelli di SK nello stesso periodo conferma dell'effetto è stata fornita anche da Soudan2 e da MACRO



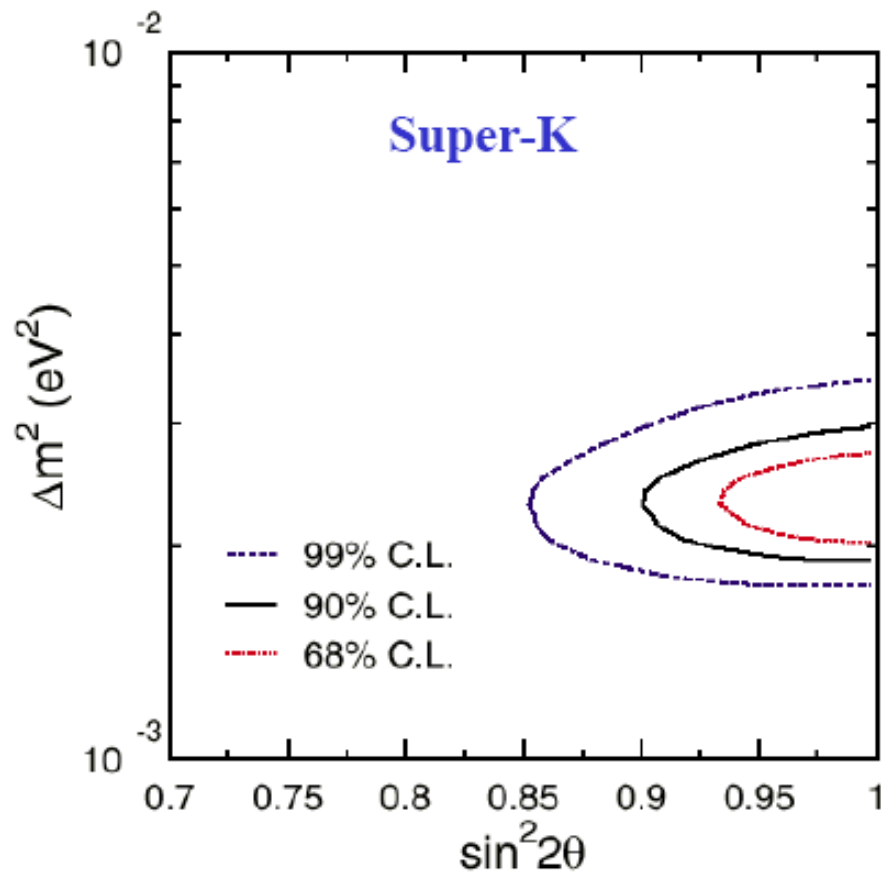
Distribuzioni dell'angolo di zenith in Super-K:

evidenza per scomparsa di ν_μ su distanze di $\sim 1000 - 10000$ km

L'oscillazione responsabile non è $\nu_\mu - \nu_e$:

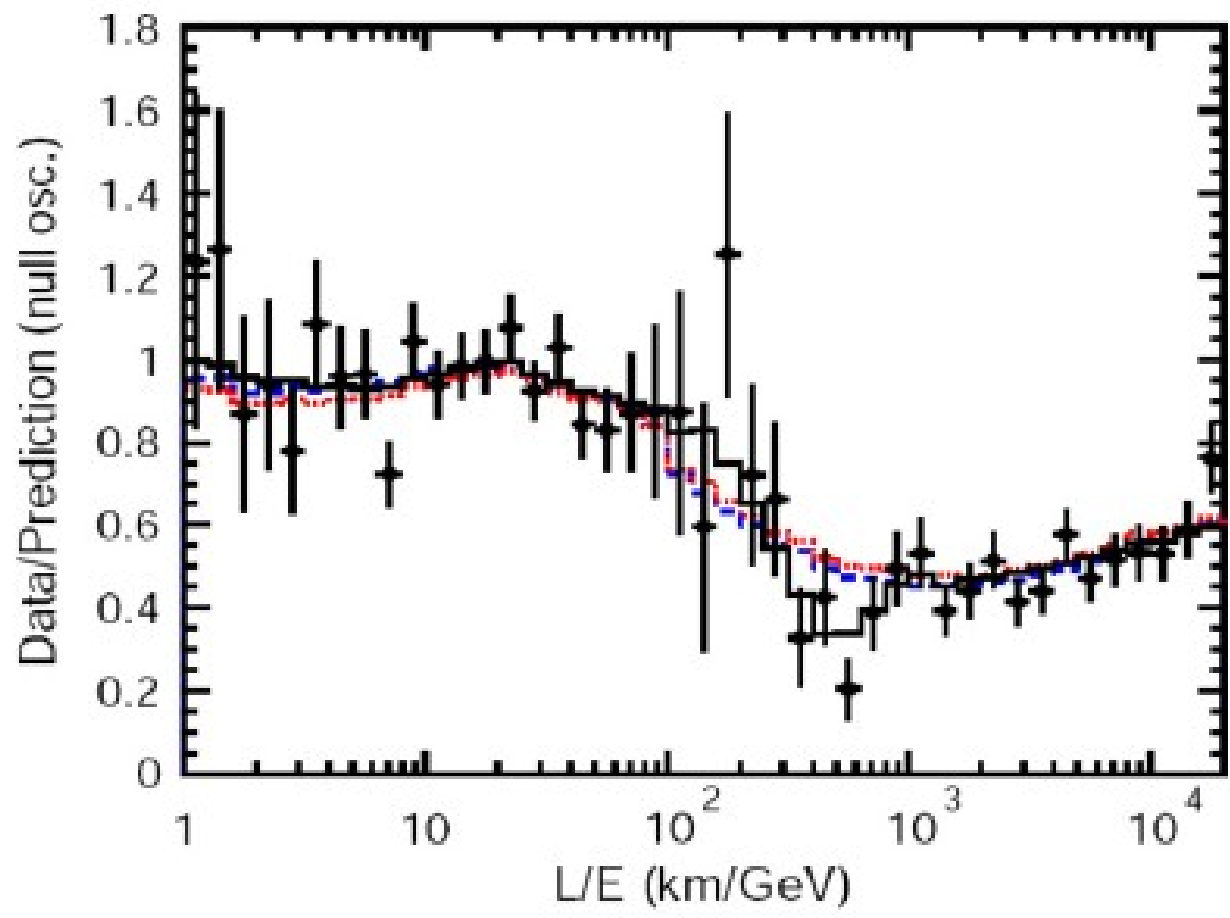
- Esclusa dall'esperimento CHOOZ con reattori nucleari (discusso in seguito)
- La distribuzione dell'angolo di zenith per eventi "e-like" dovrebbe mostrare un'asimmetria di segno opposto (eccesso di eventi "e-like" verso l'alto) perchè $\nu_\mu / \nu_e \geq 2$ alla produzione

➔ **L'ipotesi più plausibile: oscillazione $\nu_\mu - \nu_\tau$**



$\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X$ richiede $E(\nu_\tau) > 3.5$ GeV;
frazione di decadimenti $\tau \rightarrow \mu \approx 18\%$

➔ **Regione dei parametri di oscillazione (livello confidenza 90%):**
 $1.9 \times 10^{-3} < \Delta m^2 < 3.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
 $\sin^2 2\theta > 0.90$



Esperimenti con fasci artificiali

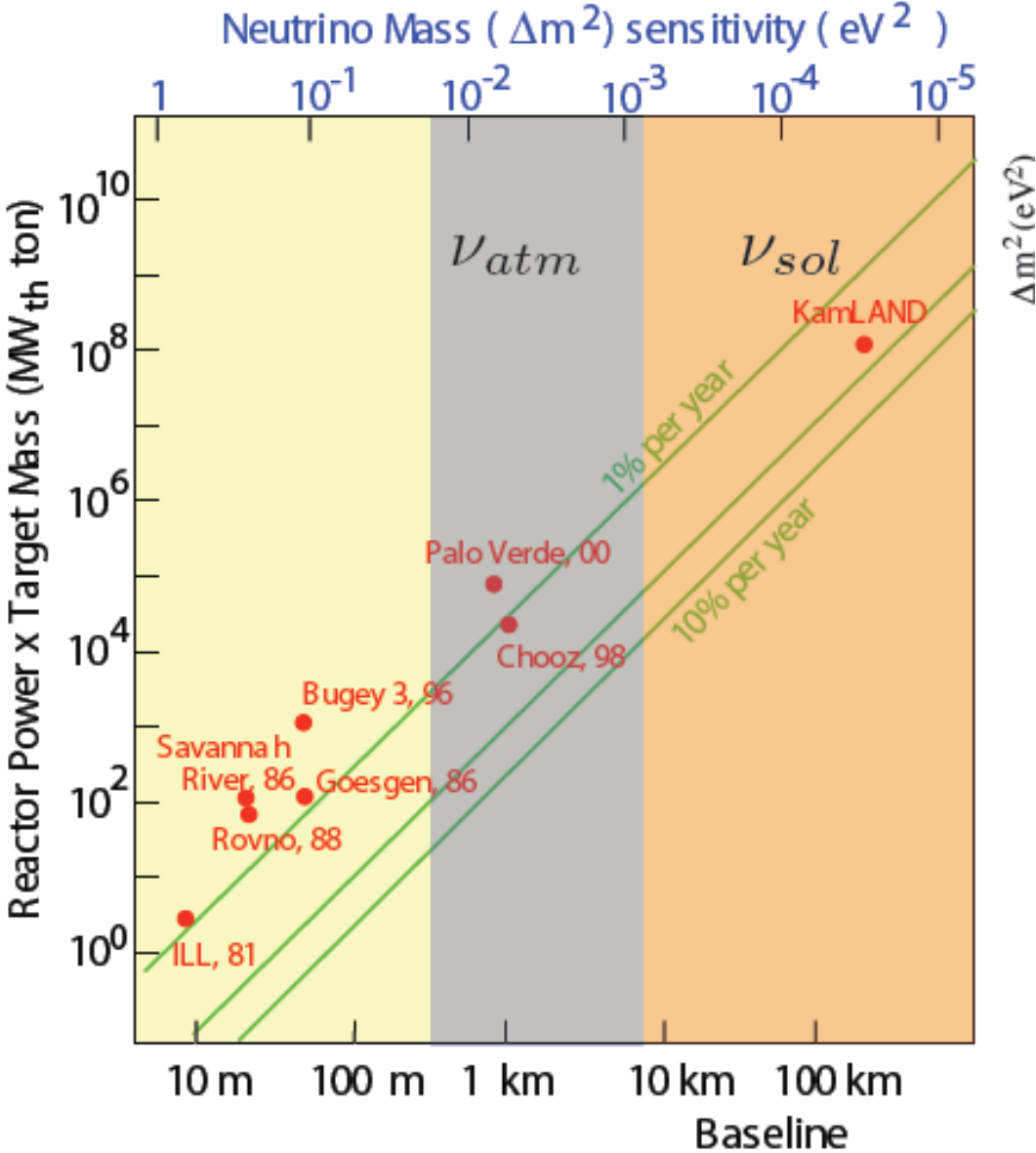
- Le due sorgenti artificiali di neutrini

- Acceleratori
- Reattori

sono state utilizzate fin dagli anni '70 per la ricerca di effetti di oscillazione

- Intensità elevate → possibilità di esplorare piccoli angoli di mescolamento
- Pregiudizi:
 - Angoli di mixing piccoli, come nel settore adronico
 - Masse non piccolissime (fino a metà degli anni '90 si riteneva che la materia oscura potesse essere tutta “calda” → eV)
- Questi, se osservati, avrebbero dovuto essere molto più facili da interpretare che non i dati dei solari o degli atmosferici
- Ma come abbiamo visto
 - Reattori: $E/L \sim 1\text{MeV}/10\text{m} \rightarrow \Delta m_{\min}^2 \sim 0.1 \text{ eV}^2$
 - Acceleratori: $E/L \sim 1\text{GeV}/0.1\text{Km} \rightarrow \Delta m_{\min}^2 \sim 10 \text{ eV}^2$
 - Mentre la natura ha scelto valori di $\Delta m^2 \sim 5 \times 10^{-5}$ e $3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

Reattori:

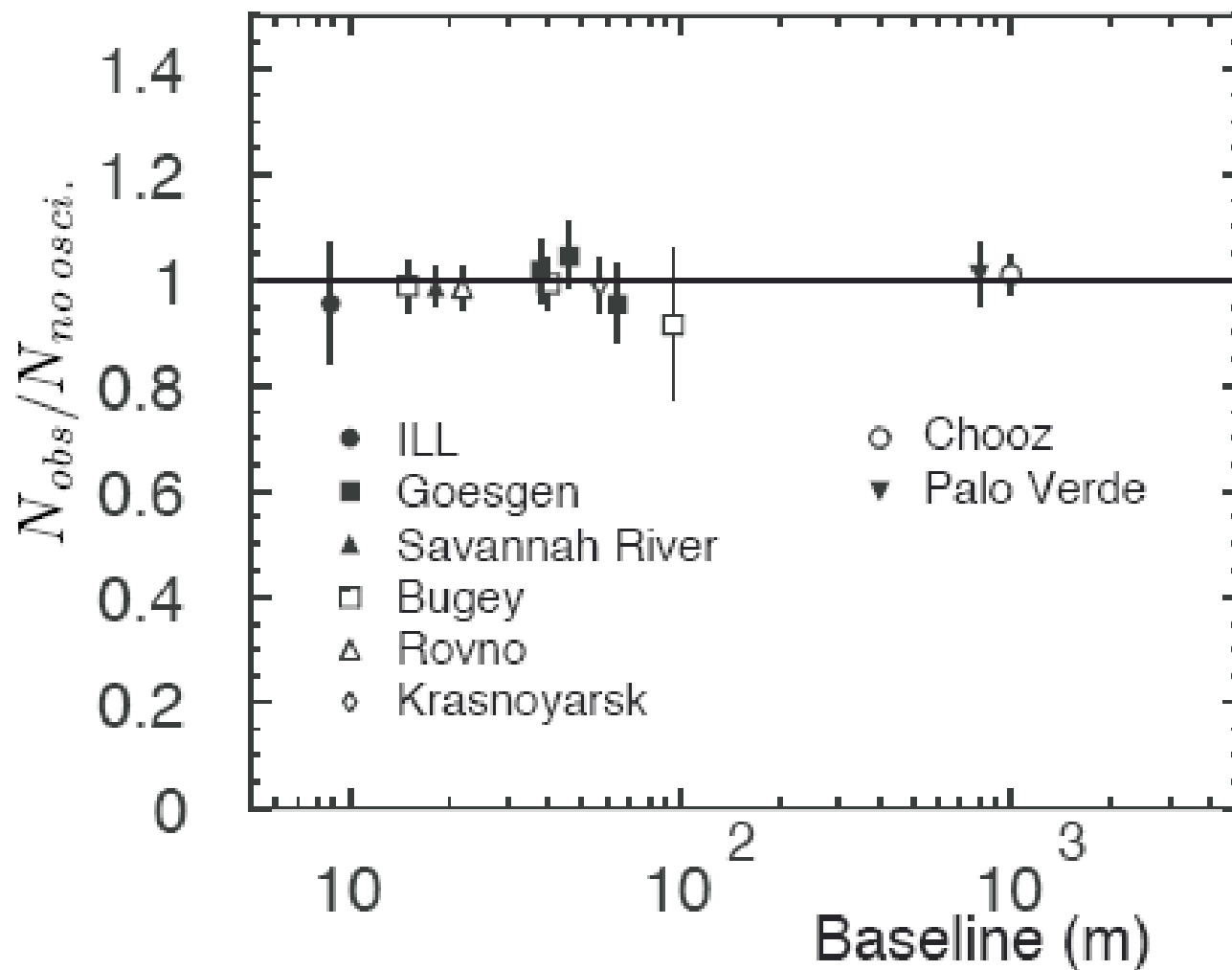


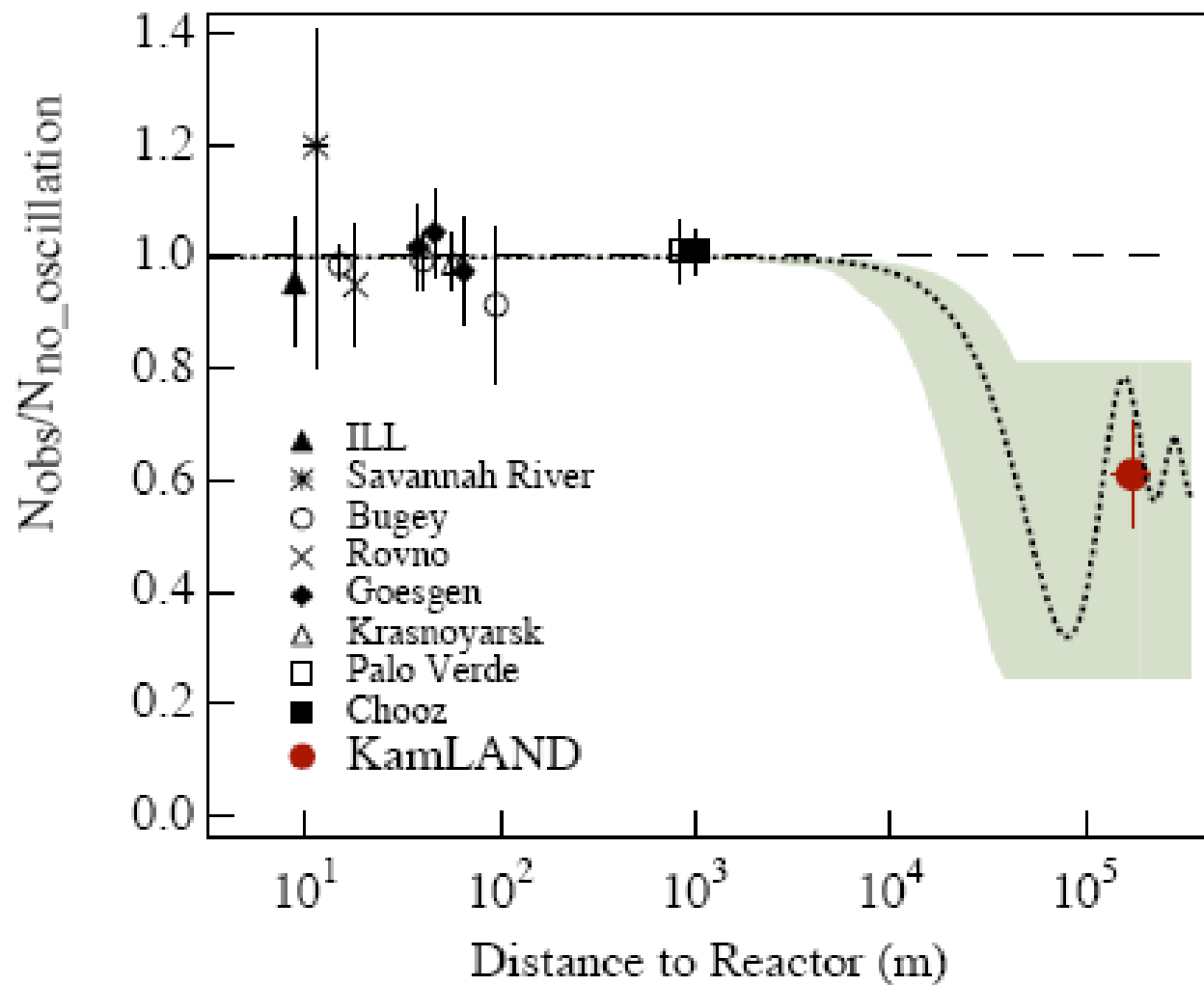
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2\left(1.27 \times \frac{\Delta m^2(eV^2)L(m)}{E(MeV)}\right)$$

$$E_{reactor} \sim 5MeV$$

Reattori:

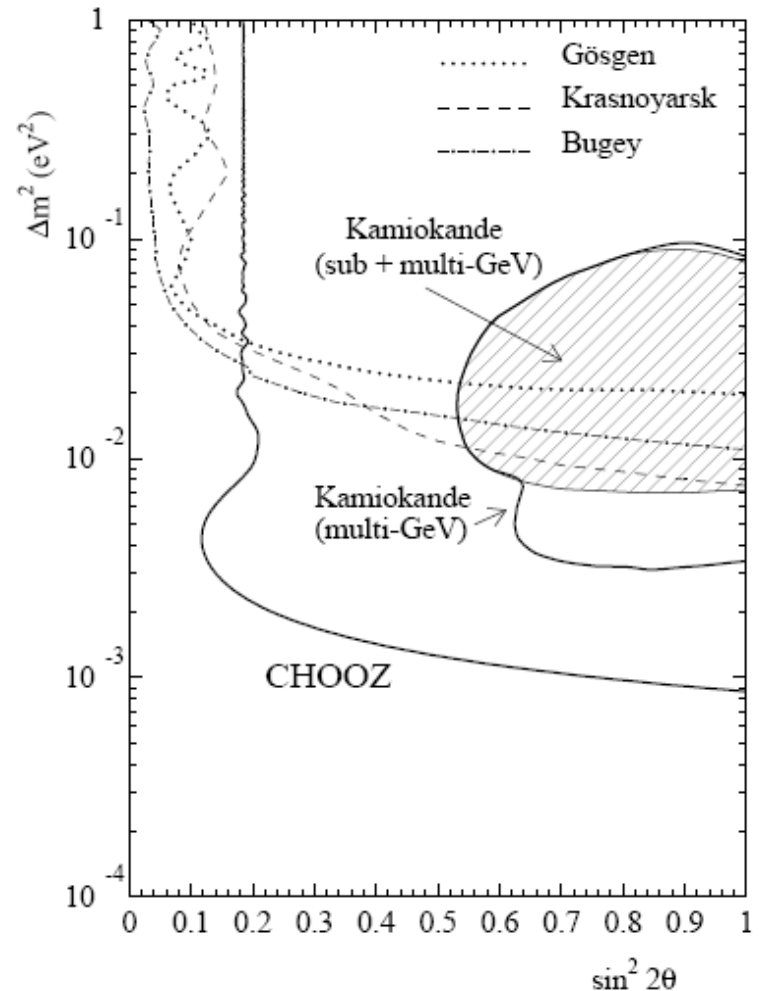
Oscillation Search up to 1 km baseline





Chooz

- Prima di KamLAND gli esperimenti ai reattori hanno permesso solo di stabilire delle regioni di esclusione nel piano dei parametri ($\Delta m^2, \sin^2 2\theta$)
- I risultati negativi non sono privi di interesse: nel caso di Chooz la non osservazione dell'oscillazione dell'antineutrino elettronico ad una distanza di 1km esclude che un'oscillazione con $\Delta m^2 \sim 2.5 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ possa coinvolgere neutrini elettronici → contribuisce all'interpretazione del risultato dei neutrini atmosferici!



CHOOZ

Esperimento di scomparsa di $\bar{\nu}_e$ su una distanza di ~ 1 km
Effetto osservabile per $\Delta m^2 > 7 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$

Due reattori presso la centrale elettrica di CHOOZ (EDF)
Potenza termica totale 8.5 GW
 $L = 998, 1114 \text{ m}$

Rivelatore:

5 tonn. di scintillatore liquido arricchito in Gadolinio

$n + \text{Gd} \rightarrow$ raggi γ
Energia totale 8.1 MeV

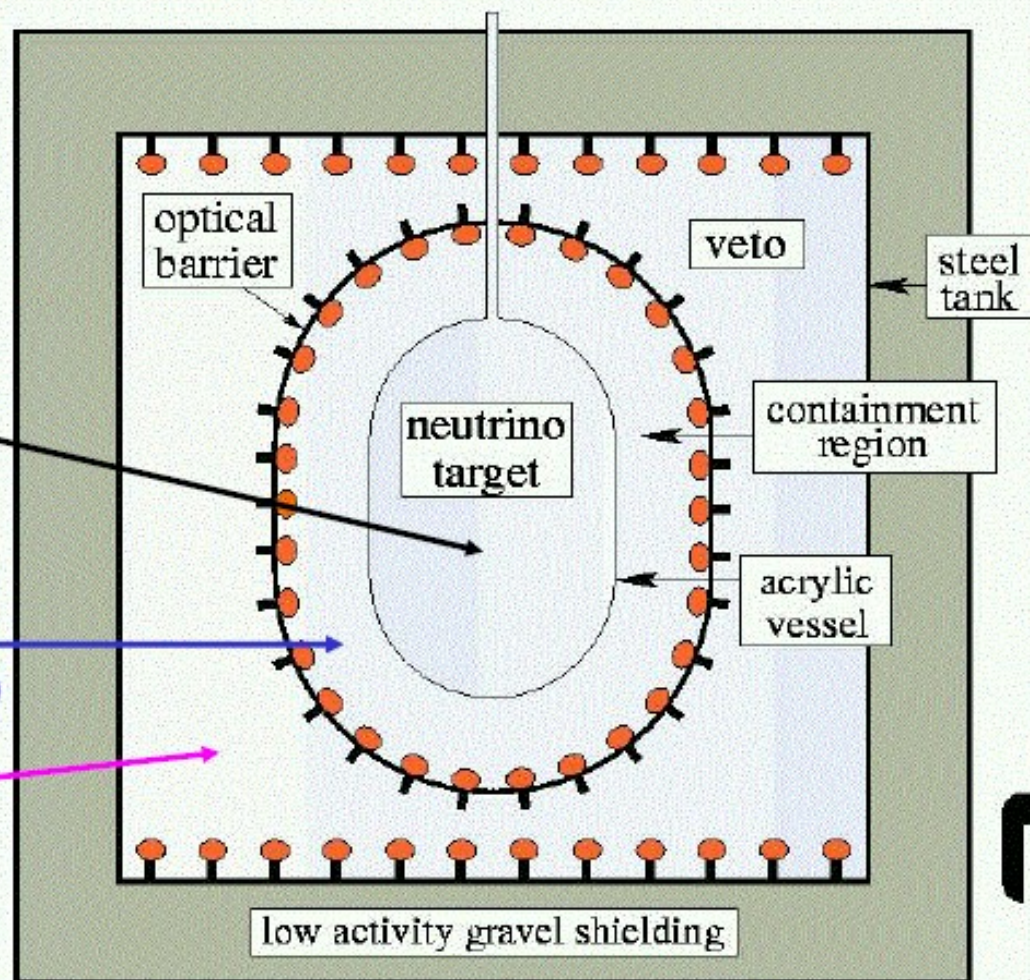
17 tonn. scintillatore liquido senza Gd (contenimento raggi γ)

90 tonn. scintillatore liquido (anticoincidenza raggi cosmici)

Sito sotterraneo:
profondità 300 m H_2O eq.

Presa-dati: 1997–98

Esperimento completato nel 1998



0 1 2 3 4 5 6 m

Frequenza eventi (potenza massima): 25 / giorno

Fondo (reattori spenti): 1.2 / giorno

Spettro d'energia di positroni

(segnale iniziale da $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$)

Confronto con lo spettro predetto in assenza di oscillazioni



Spettro misurato

Spettro predetto (senza oscillazione)

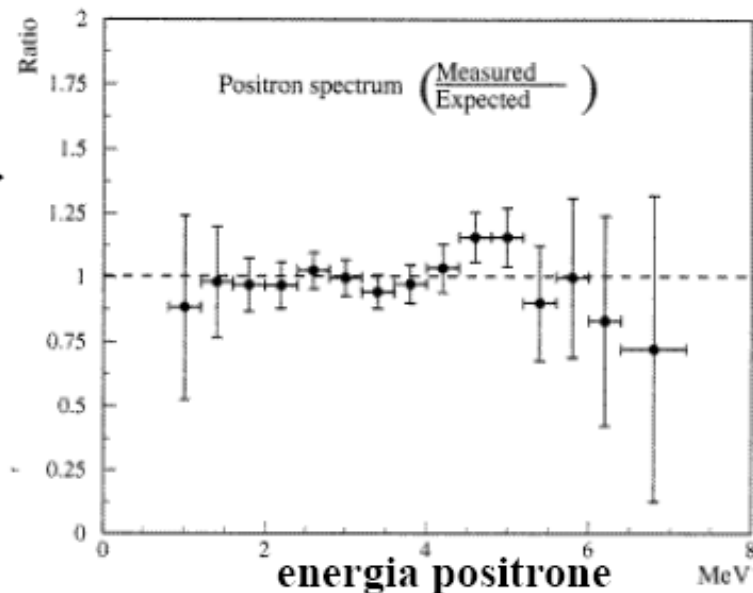
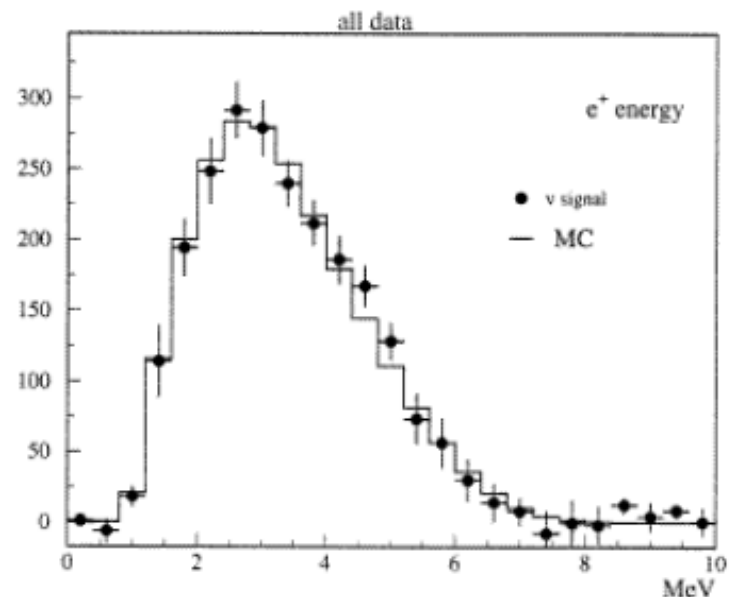


Rapporto integrato sullo spettro d'energia

= $1.010 \pm 0.028 \pm 0.027$



nessuna evidenza di scomparsa $\bar{\nu}_e$



Esperimento CHOOZ

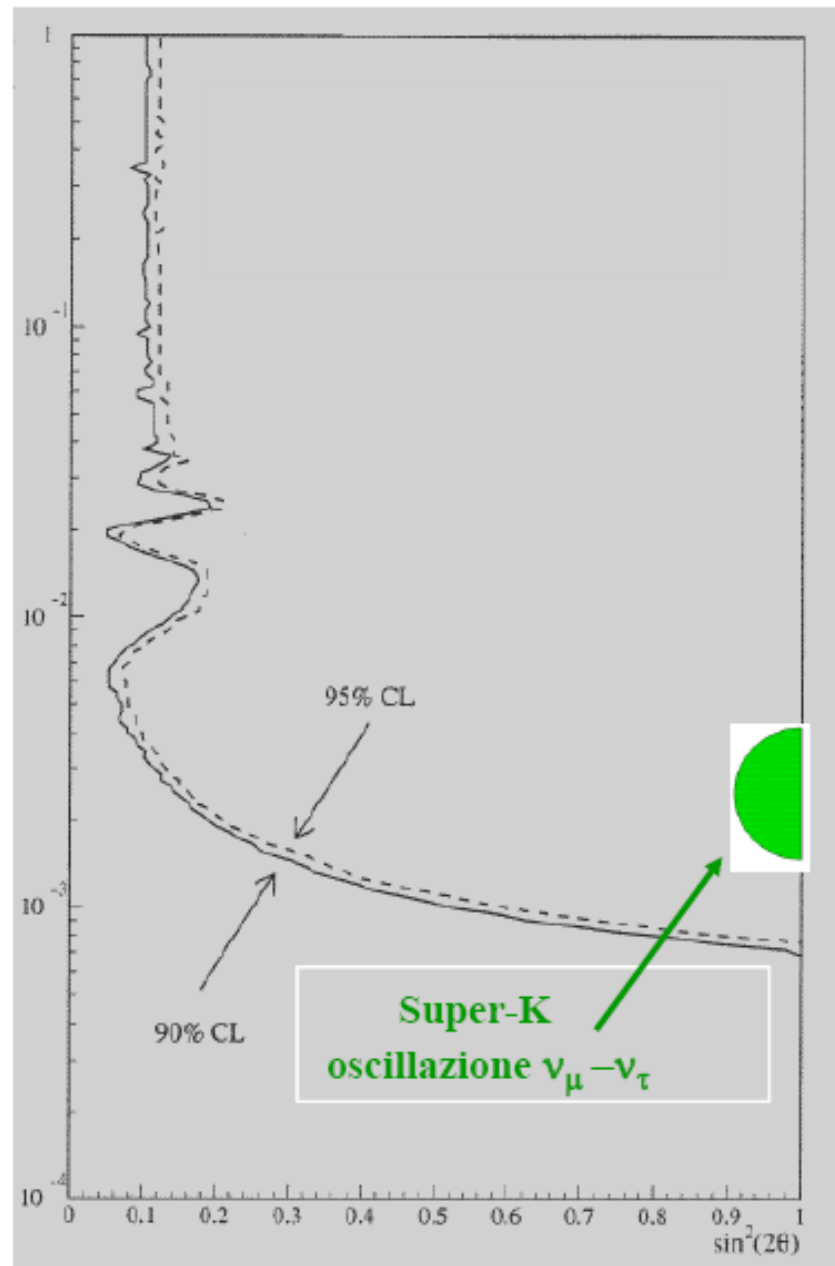
Oscillazioni $\bar{\nu}_e - \bar{\nu}_\mu$ ($\bar{\nu}_e - \bar{\nu}_\tau$):
regione esclusa

$$\Delta m^2$$

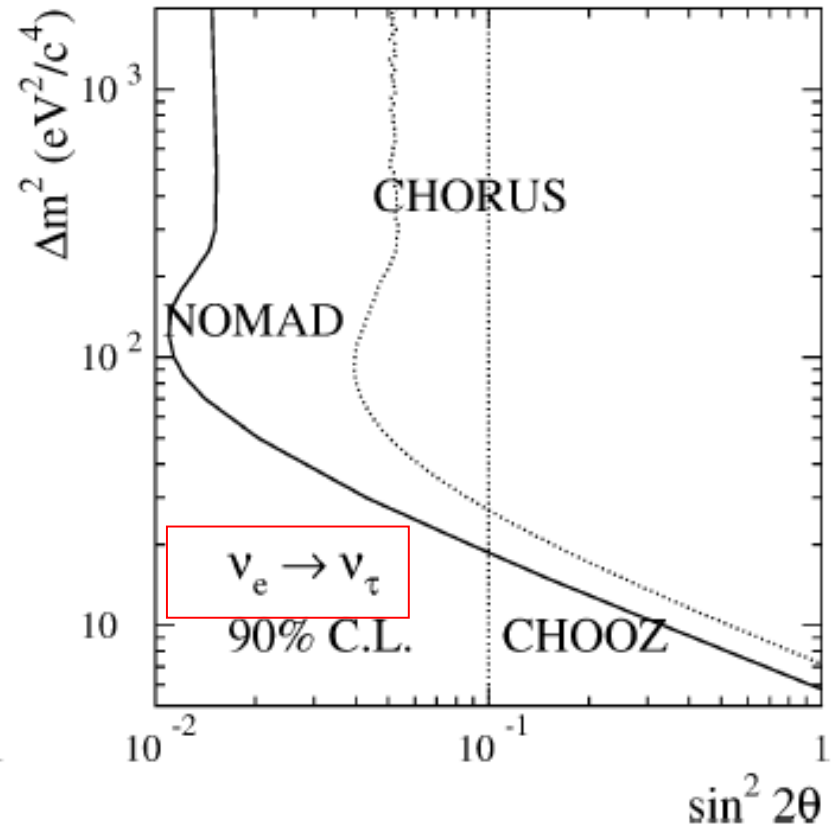
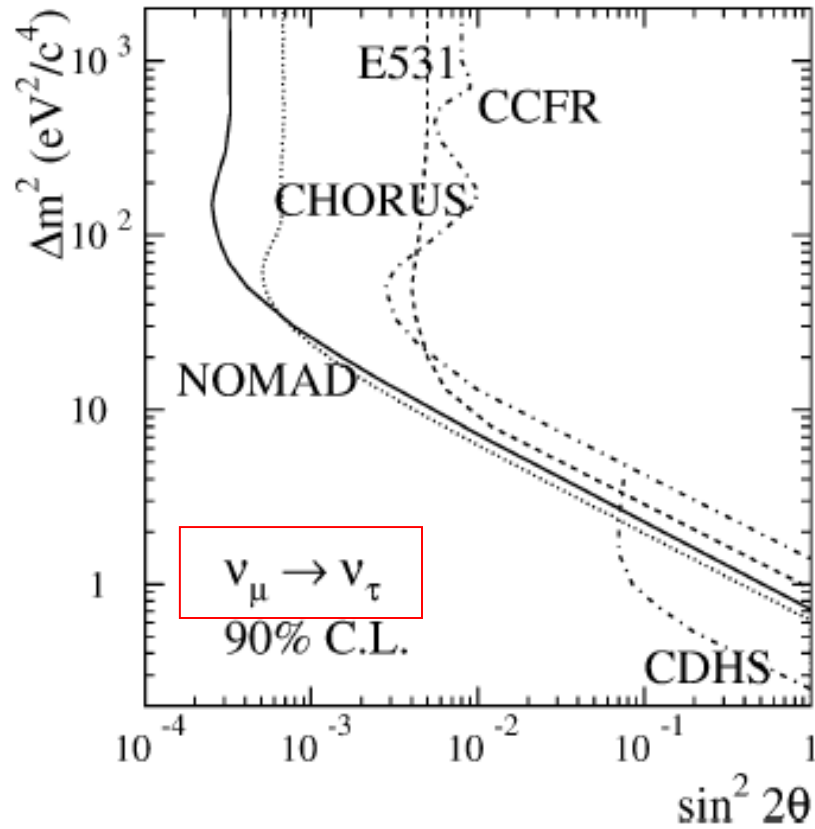
[eV²]

Riassunto

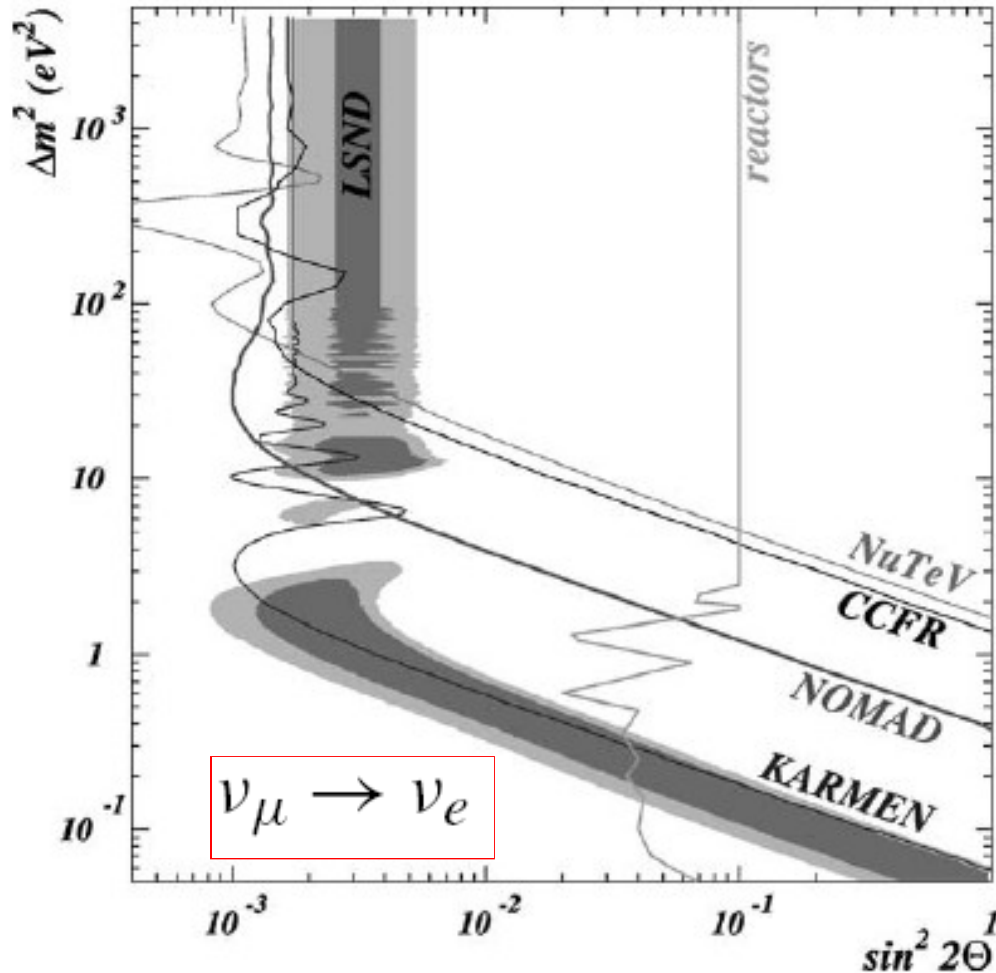
- Oscillazione di ν_e solari:
 $\Delta m^2 \approx 7.6 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$, $\theta \approx 34^\circ$
- Oscillazione di ν_μ atmosferici,
 $\Delta m^2 \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\theta \approx 45^\circ$
- Oscillazione di ν_e con $\Delta m^2 \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
non osservata: $\theta < 12^\circ$



Acceleratori:



Acceleratori:



(ma nello stesso plot anche anti- $\nu_\mu \rightarrow$ anti- ν_e e anti- $\nu_e \rightarrow$ altro)

Long baseline

- La via per la conferma delle oscillazioni in esperimenti con neutrini artificiali e l'aumento della distanza sorgente-rivelatore, come per KamLAND.
- Questa via è stata percorsa anche per cercare conferma delle oscillazioni osservate nei neutrini atmosferici:
 - K2K
 - Minos
 - CNGS

Ricerche di oscillazioni su lunga distanza con acceleratori

Scopo: dimostrazione conclusiva che il deficit di ν_μ atmosferici è dovuto a oscillazioni di neutrini mediante l'uso di fasci di ν_μ prodotti da acceleratori (Neutrini direzionali, spettro d'energia noto)

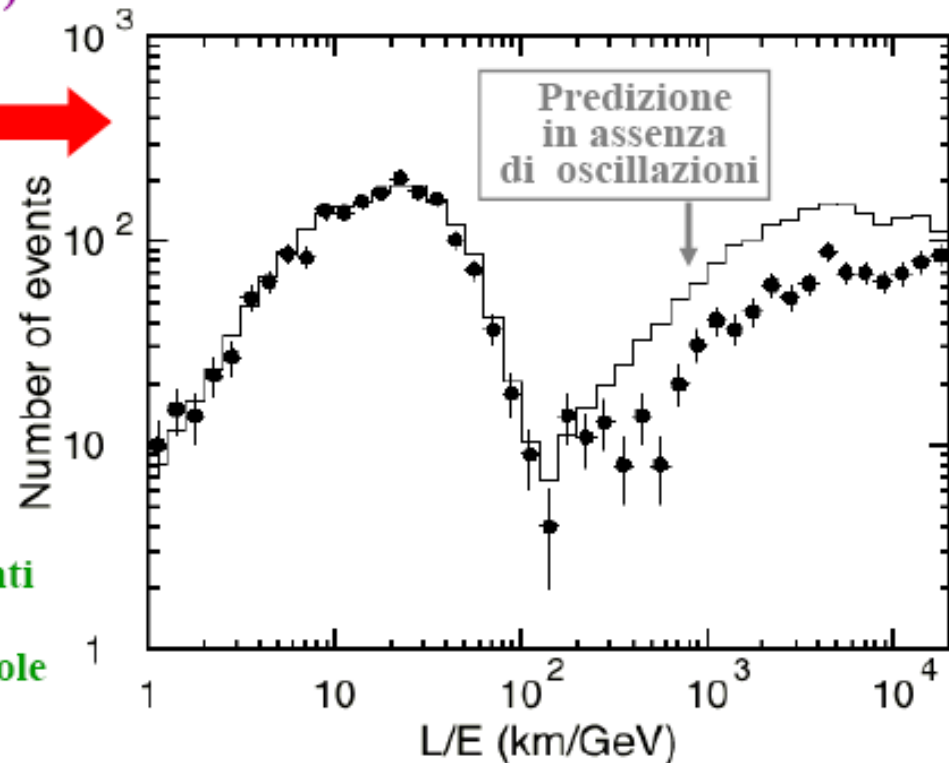
Distribuzione della variabile L/E nei dati Super-K sui neutrini atmosferici



Nel caso di risoluzione perfetta:

$$\frac{\text{Dati}}{\text{Predizione}} = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}\right)$$

Valore massimo di $L \approx 12800$ km \Rightarrow per studiare la regione $L/E > 10^4$ km/GeV sono necessari eventi con $E < 1$ GeV per cui la correlazione angolare tra il neutrino incidente e il muone uscente è debole \Rightarrow grande incertezza sperimentale su L/E



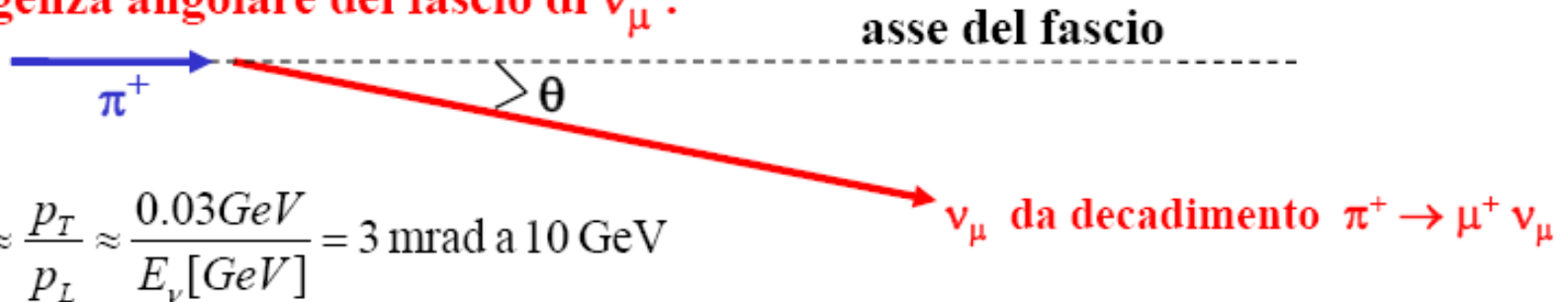
Misure in esperimenti di oscillazione su lunga distanza:

- Distorsioni dello spettro d'energia dei ν_μ (misura di Δm^2 , $\sin^2 2\theta$);
- Frequenza di interazioni di Corrente Neutra (per distinguere oscillazioni $\nu_\mu - \nu_\tau$ da oscillazioni in un neutrino "sterile" ν_s);
- Apparizione di ν_τ a grande distanza in un fascio privo di ν_τ alla produzione.

Esperimenti su lunga distanza con acceleratori
(completati, in corso o in preparazione)

Progetto	Distanza L	$\langle E_\nu \rangle$	Stato
K2K (KEK \Rightarrow KAMIOKA)	250 km	1.3 GeV	Esperimento completato
MINOS (Fermilab \Rightarrow Soudan)	735 km	qualche GeV	risultati pubblicati
CERN \Rightarrow Gran Sasso	732 km	17 GeV	presa-dati : 2008

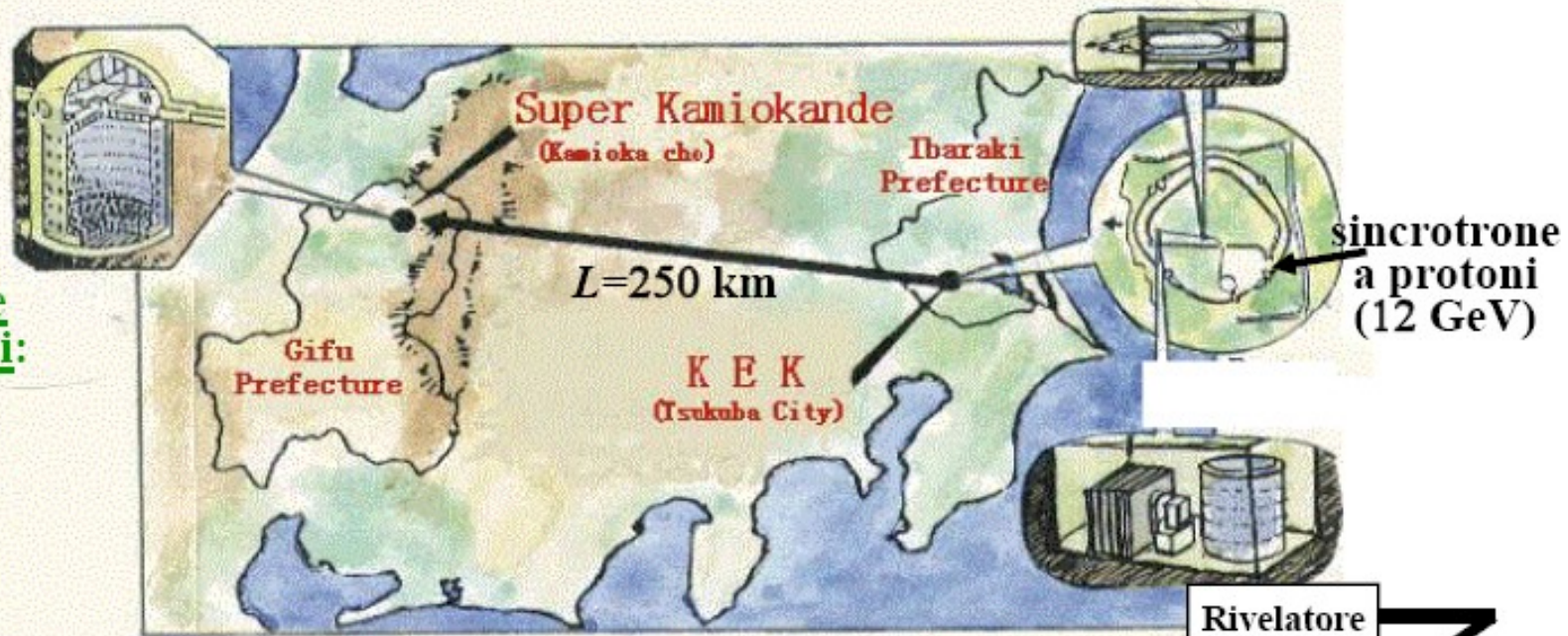
- Soglia d'energia per $\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$: $E_\nu > 3.5 \text{ GeV}$
- Frequenza eventi ~ 1 evento $\nu_\mu \rightarrow \mu^-$ / anno per tonn. di massa del rivelatore
 \rightarrow sono necessari rivelatori con masse di parecchie kilotonn.
- Divergenza angolare del fascio di ν_μ :



Dimensioni trasversali del fascio: 100 m – 1 km per $L > 100 \text{ km}$

\rightarrow **nessun problema per colpire il rivelatore.**

Il flusso dei neutrini decresce come L^{-2} per grandi valori di L



Composizione fascio neutrini:

95% ν_{μ}
4% $\bar{\nu}_{\mu}$
1% ν_e

Rivelatore vicino: misura del flusso ν_{μ} e misura della frequenza di interazioni ν_{μ} senza oscillazioni

Čerenkov ad acqua da 1 ktonn.:

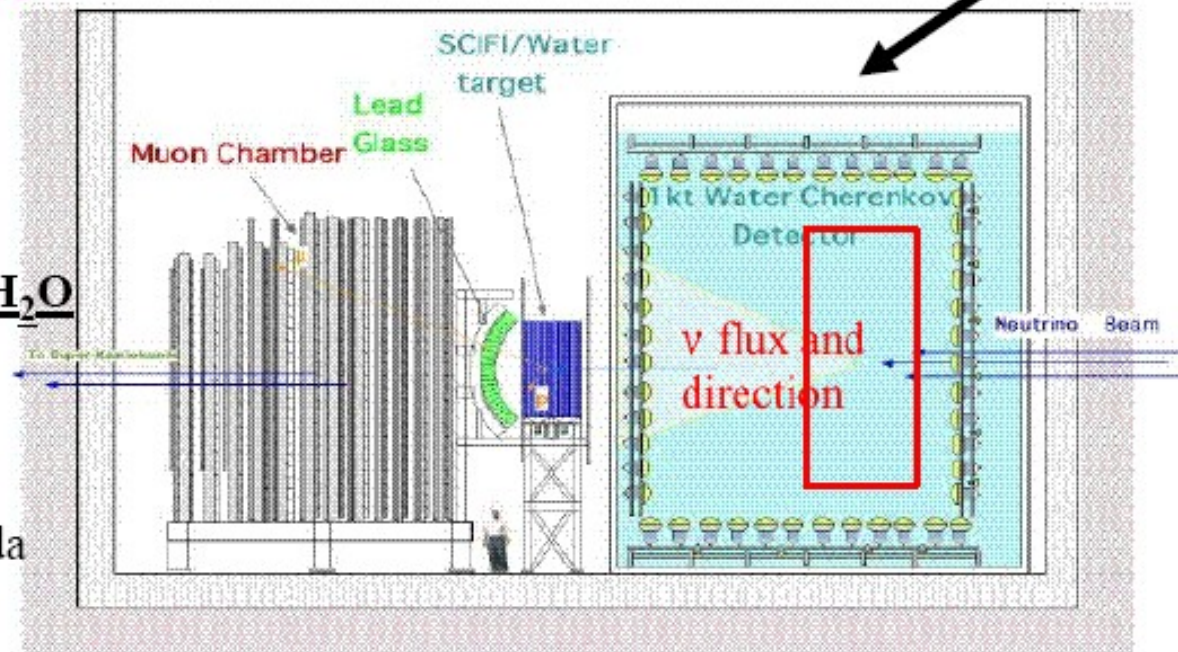
Simile a Super-K;
massa fiduciale 25 tonn.

Rivelatore a Fibre Scintillanti in H_2O (SciFi):

Eventi con tracce multiple;
massa fiduciale 6 tonn.

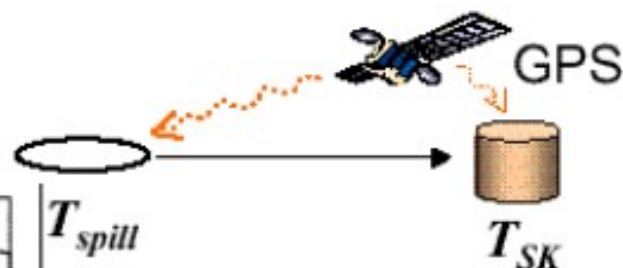
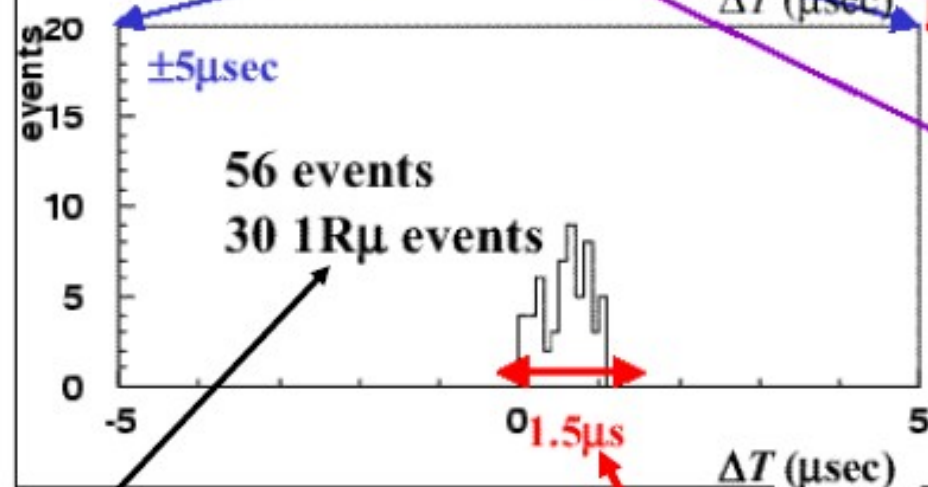
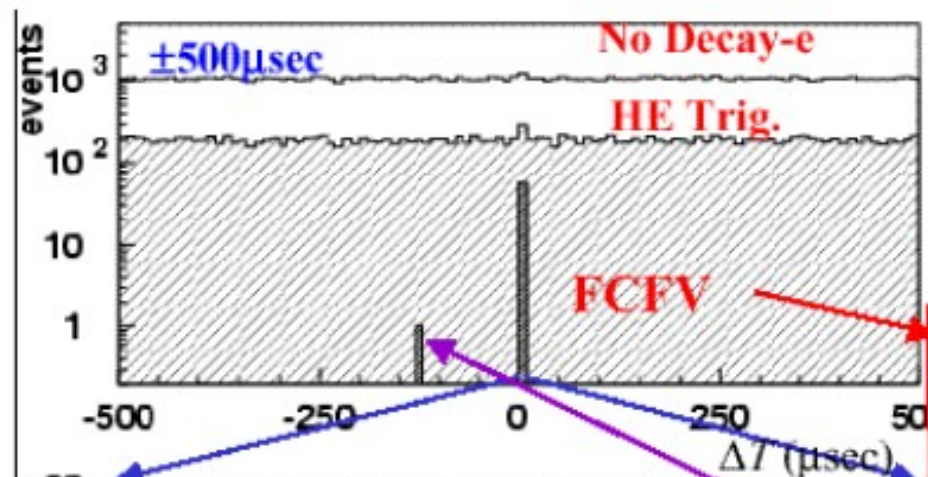
Camere a muoni:

Misura del percorso residuo dei μ da decadimento dei π ;
massa 700 tonn.; misura flusso ν_{μ}



Selezione eventi in Super-K

$$-0.2 \leq \Delta T \equiv T_{SK} - T_{Spill} - \text{TOF} \leq 1.3 \mu\text{sec}$$



T_{Spill} : Abs. time of spill start

T_{SK} : Abs. time of SK event

TOF: 0.83ms (KEK to Kamioka)

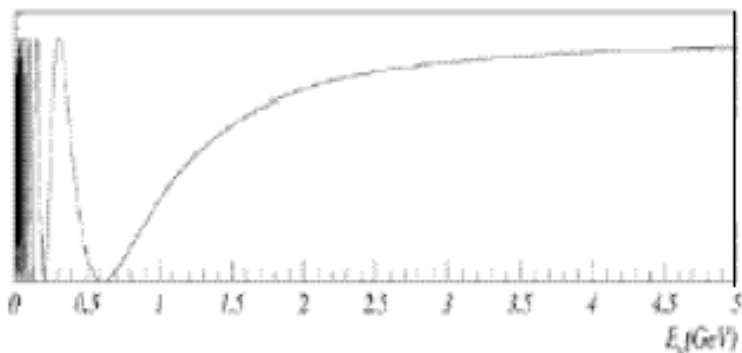
FC: fully contained
(No activity in Outer Detector)
FV: 22.5kt Fiducial Volume

Expected Atm. ν BG
 $< 10^{-3}$ within $1.5 \mu\text{s}$.

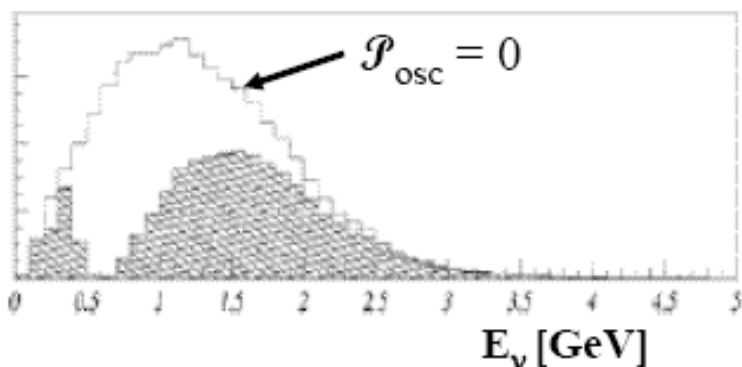
1Rμ: eventi μ, un solo anello di luce Čerenkov

durata estrazione fascio

Predizioni



← $\mathcal{P}_{\text{osc}}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$ in funzione di E_ν a $L = 250$ km
per $\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 1$



← Forma dello spettro ν_μ prevista in Super-K
con e senza scomparsa di ν_μ

DATI

Giugno 1999 – febbraio 2004 (8.9×10^{19} protoni su bersaglio)

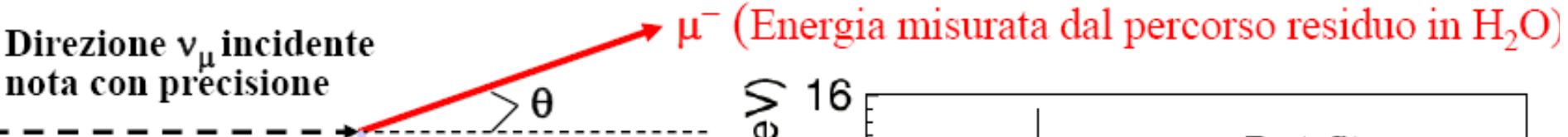
Eventi completamente contenuti, $E_{\text{vis}} > 30$ MeV: previsti ($\mathcal{P}_{\text{osc}} = 0$): 151^{+12}_{-10} eventi

osservati: 107 eventi

Eventi contenuti con un solo μ prodotto: 57

Misura dello spettro d'energia dei ν_μ in Super-K dal campione di 57 eventi 1μ nell'ipotesi di diffusione quasi-elastica $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$

Direzione ν_μ incidente nota con precisione

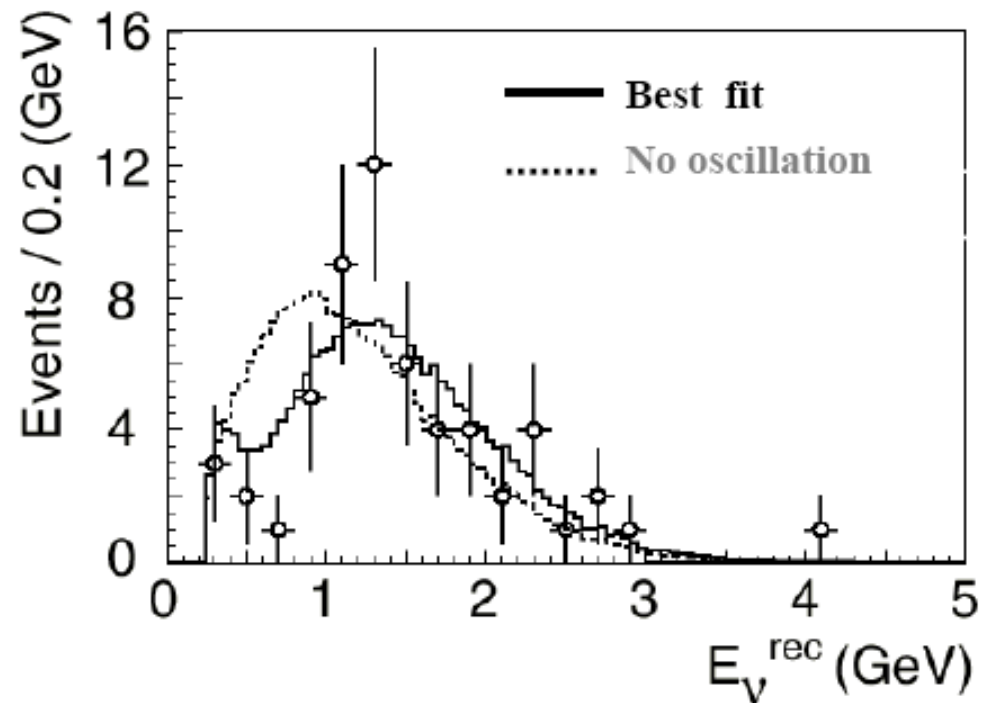


Protone uscente (non rivelato perché sotto soglia Čerenkov)

Ipotesi: neutrone iniziale a riposo, cinematica della diffusione quasi-elastica \Rightarrow determinazione dell'energia del ν_μ :

$$E_\nu = \frac{ME_\mu - 0.5m_\mu^2}{M - E_\mu + p_\mu \cos \theta}$$

($M \equiv$ nucleon mass)



Best fit: $\Delta m^2 = 2.2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

$\sin^2 2\theta = 1$

(in accordo con i dati sui ν_μ atmosferici)

Probabilità di assenza di oscillazioni 5×10^{-5}

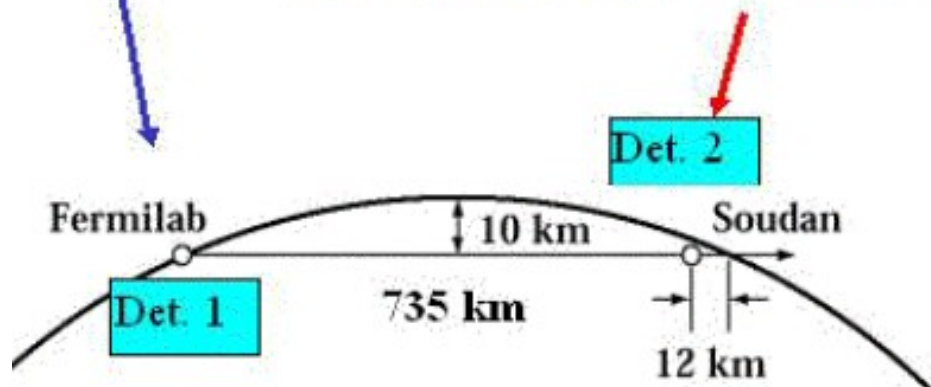
(equivalente a 4 deviazioni standard)

Esperimento MINOS

Fascio neutrini da Fermilab a Soudan
(miniera di ferro abbandonata
nel Minnesota): $L = 735$ km

Near Detector: 980 tons

Far Detector: 5400 tons



Acceleratore:

Fermilab Main Injector (MI)
Sincrotrone a protoni
120 GeV

Alta intensità (0.4 MW):

4×10^{13} protoni per ciclo

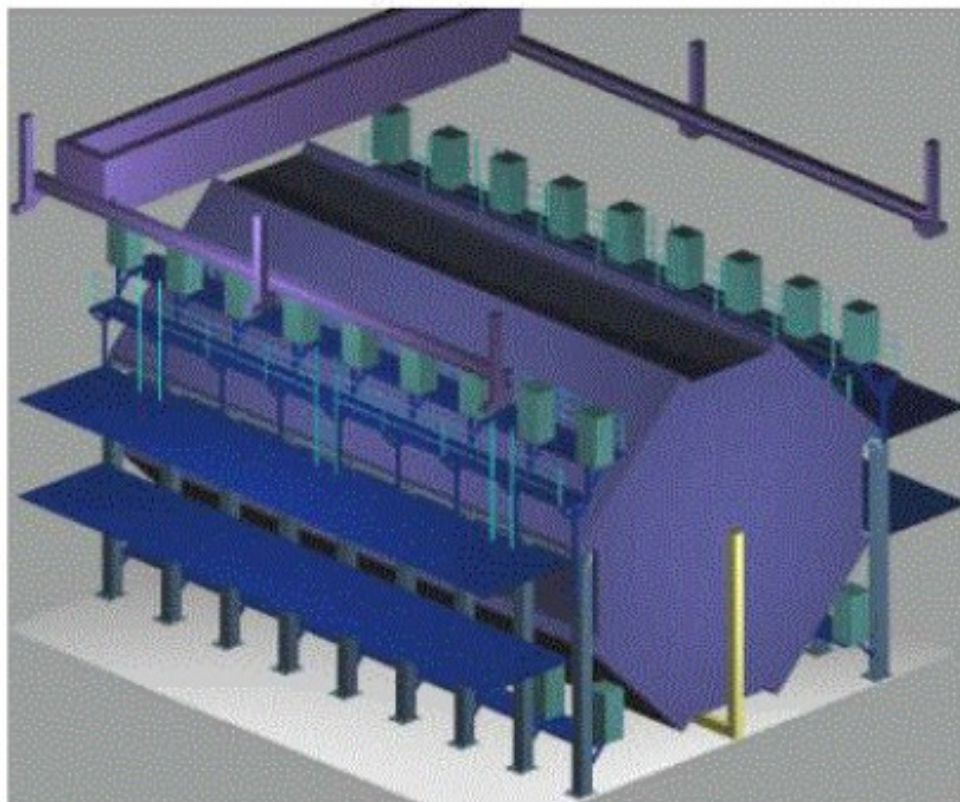
Durata del ciclo: 1.9 s

4×10^{20} protoni / anno

Tunnel di decadimento: 700 m

MINOS: Rivelatore lontano

- Calorimetro tracciatore ottagonale
diametro 8 m
 - Lastre di Ferro, spessore 2.54 cm
 - Strisce di scintillatore (larghezza 4 cm)
tra le piastre
 - 2 moduli, lunghezza di un modulo 15 m
 - Massa totale 5400 tonn., massa fiduciale
3300 tons.
 - 484 piani di scintillatore (26000 m²)
 - Le lastre di Ferro sono magnetizzate:
campo toroidale, $B = 1.5 \text{ T}$
- Costruzione completata nel giugno 2003**

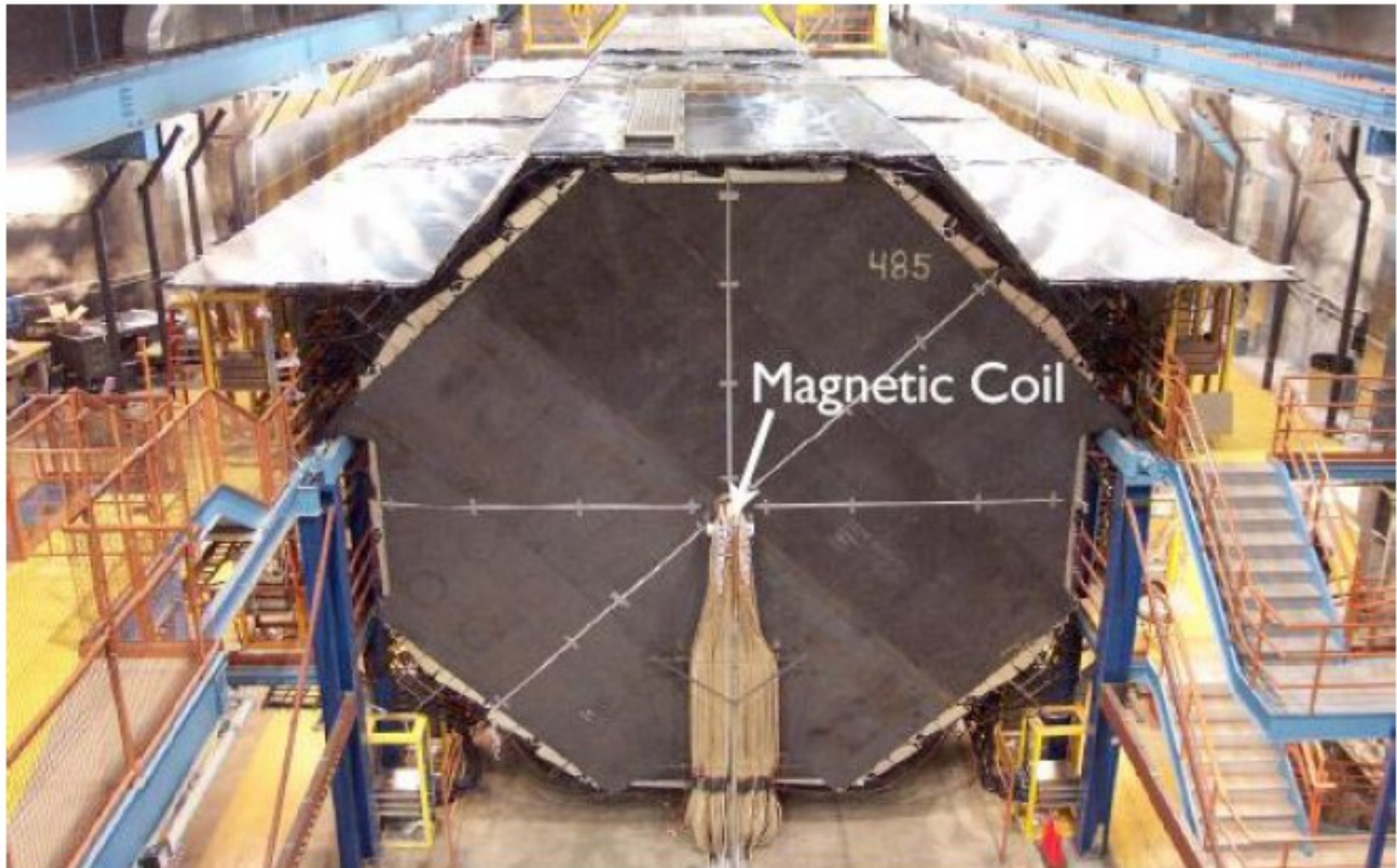


MINOS: Rivelatore vicino

- Calorimetro tracciatore “ottagonale” in Ferro, 3.8x4.8 m
- Costruzione identica a quella del rivelatore lontano
- 282 lastre di Ferro magnetizzato
- Massa totale 980 tonn. (massa fiduciale 100 tonn.)
- Installato a 250 m dalla fine del tunnel di decadimento

Inizio presa – dati: 2005

MINOS: rivelatore lontano

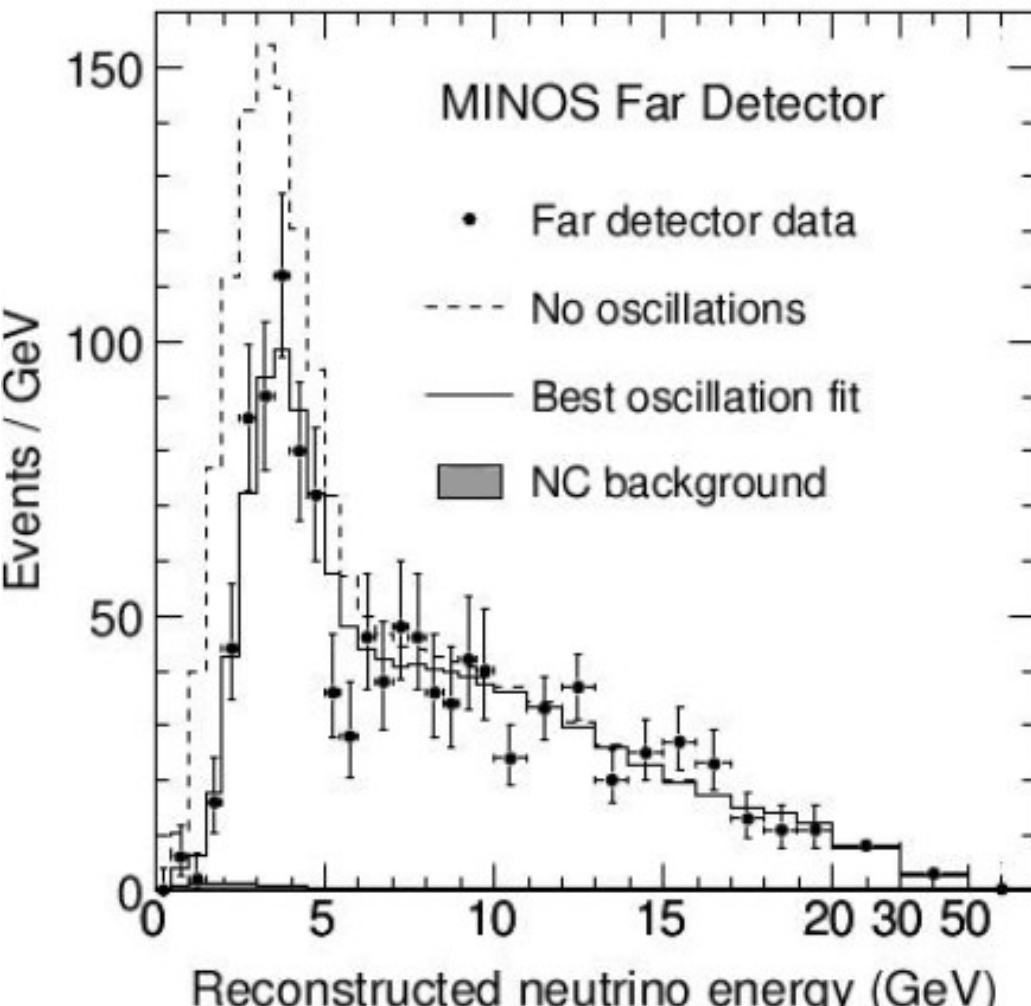


Risultati MINOS (giugno 2008)

3.36×10^{20} protoni su bersaglio (maggio 2005 → luglio 2007)

Due fasci di neutrini: bassa energia ($\langle E_\nu \rangle \approx 5$ GeV); alta energia ($\langle E_\nu \rangle \approx 13$ GeV)

Composizione tipica fascio ν : 93% ν_μ , 6% $\bar{\nu}_\mu$, 1.2% ν_e , 0.1% $\bar{\nu}_e$



Eventi $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X$

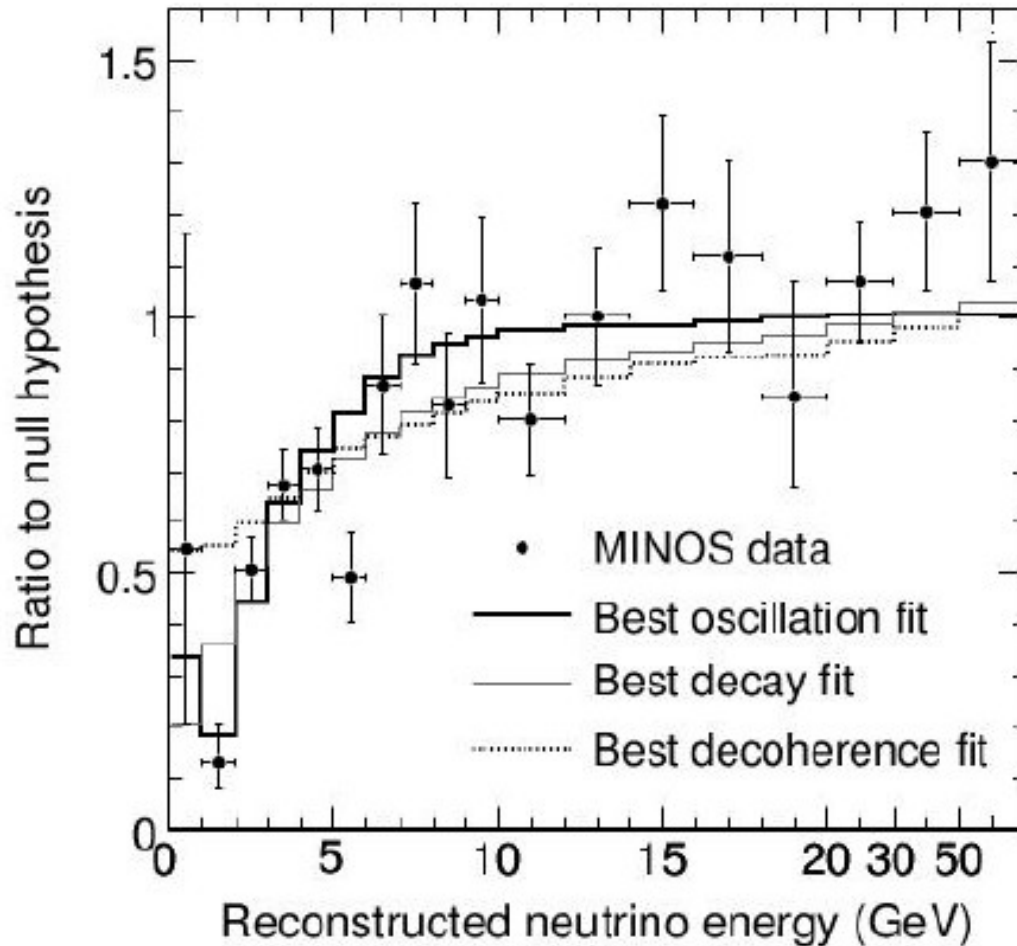
Fascio di bassa energia: 730 eventi;

Fascio di alta energia: 848 eventi

Rapporto

Dati

Predizione $\mathcal{P}_{osc} = 0$



Best fit :

$$\Delta m^2 = (2.43 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\sin^2(2\theta) > 0.95$$

(livello di confidenza 68%)

MINOS: discriminazione tra oscillazioni $\nu_\mu - \nu_\tau$ e $\nu_\mu - \nu_s$

Misura della frequenza di eventi di Corrente Neutra (NC)

$\nu + N \rightarrow \nu + \text{adroni}$
nel rivelatore lontano.

Slide complicata – spostare piu' avanti?

Eventi NC: assenza di traccia $\mu \Rightarrow$ eventi contenuti in un numero limitato di piani consecutivi

(contengono anche eventi $\nu_e + N \rightarrow e^- + \text{adroni}$)

Oscillazioni $\nu_\mu - \nu_\tau$:

Frequenza di eventi NC invariata
(identica per i tre tipi di neutrino)

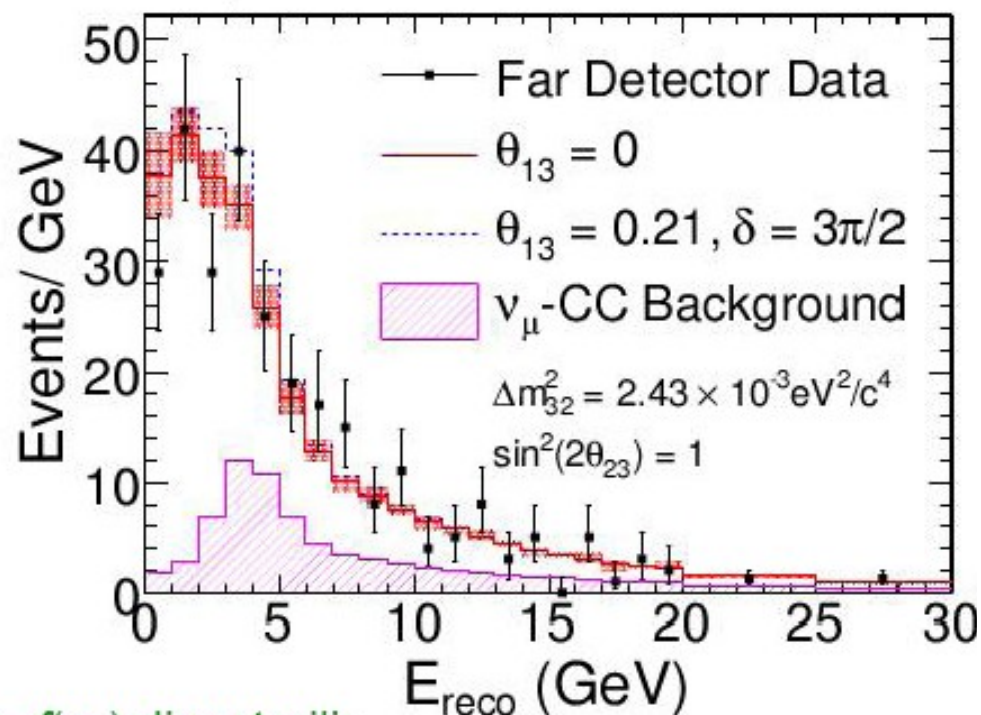
Oscillazioni $\nu_\mu - \nu_s$:

ν_s non interagisce con la materia
 \Rightarrow deficit di eventi NC

Distribuzione misurata compatibile
con assenza di deficit
 \Rightarrow nessuna evidenza per ν_s

Risultati di un fit che include una frazione $f(\nu_s)$ di ν sterili:

$f(\nu_s) = 0.28 \pm 0.28$; $f(\nu_s) < 0.68$ (livello di confidenza 90%)



CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso)

Ricerca di apparizione di ν_τ a $L = 732$ km

Numero previsto di eventi $\nu_\tau + N \rightarrow \tau^- + X$ (N_τ):

$$N_\tau = A \int_{3.5 \text{ GeV}}^{E_{\max}} \Phi_\mu(E) \mathcal{P}_{\mu\tau}(E) \sigma_\tau(E) dE$$

Normalizzazione:
dipende da massa rivelatore,
durata presa dati, efficienza
di rivelazione, ecc.


flusso ν_μ

sezione d'urto per
produzione di τ^-

Probabilità di oscillazione $\nu_\mu - \nu_\tau$ ($\mathcal{P}_{\mu\tau}$):

$$\mathcal{P}_{\mu\tau} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \Delta m^2 \frac{L}{E}\right) \approx 1.27^2 \sin^2(2\theta) (\Delta m^2)^2 \left(\frac{L}{E}\right)^2$$

Buona approssimazione per: $L = 732$ km, $E > 3.5$ GeV, $\Delta m^2 < 4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

 $N_\tau \approx 1.61 \sin^2(2\theta) (\Delta m^2)^2 L^2 \int_{3.5 \text{ GeV}}^{E_{\max}} \Phi_\mu(E) \frac{\sigma_\tau(E)}{E^2} dE$

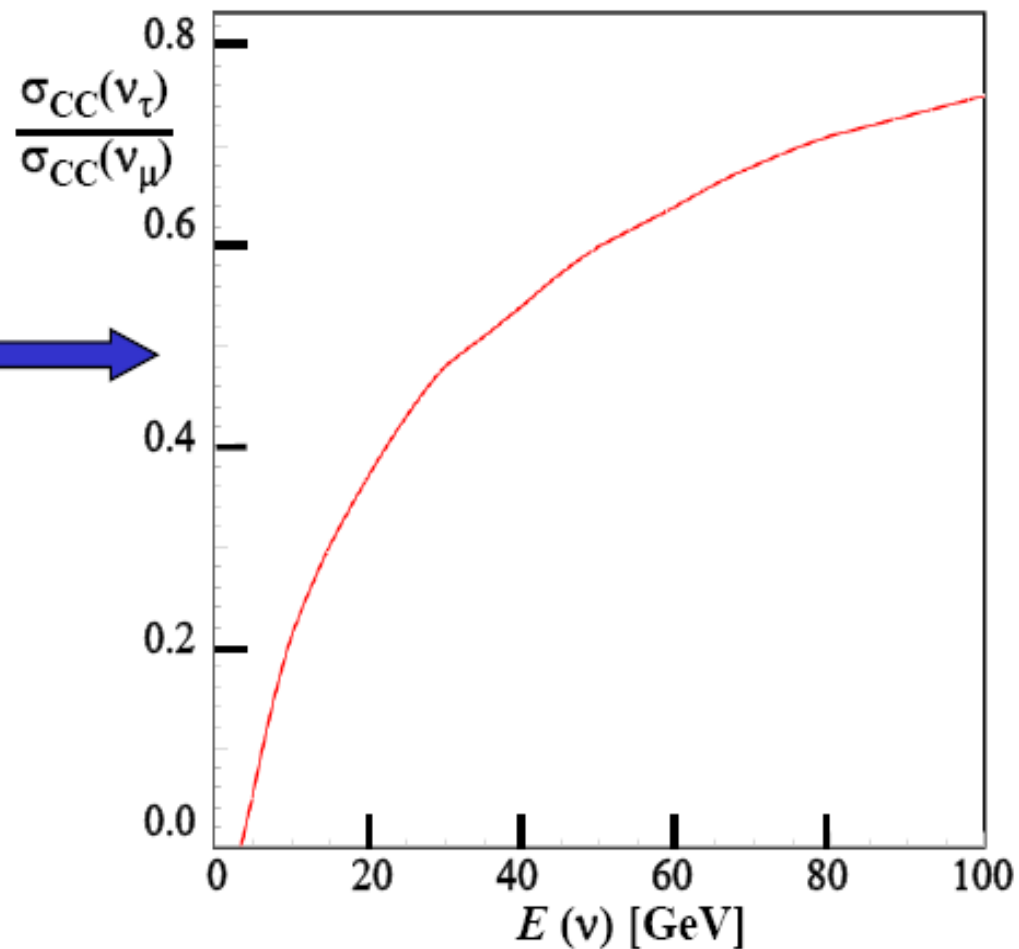
Svantaggi:

- $L = 732$ km: distanza \ll lunghezza d'oscillazione $\nu_\mu - \nu_\tau$
- N_τ dipende da $(\Delta m^2)^2 \Rightarrow$ frequenza eventi molto bassa per Δm^2 piccolo

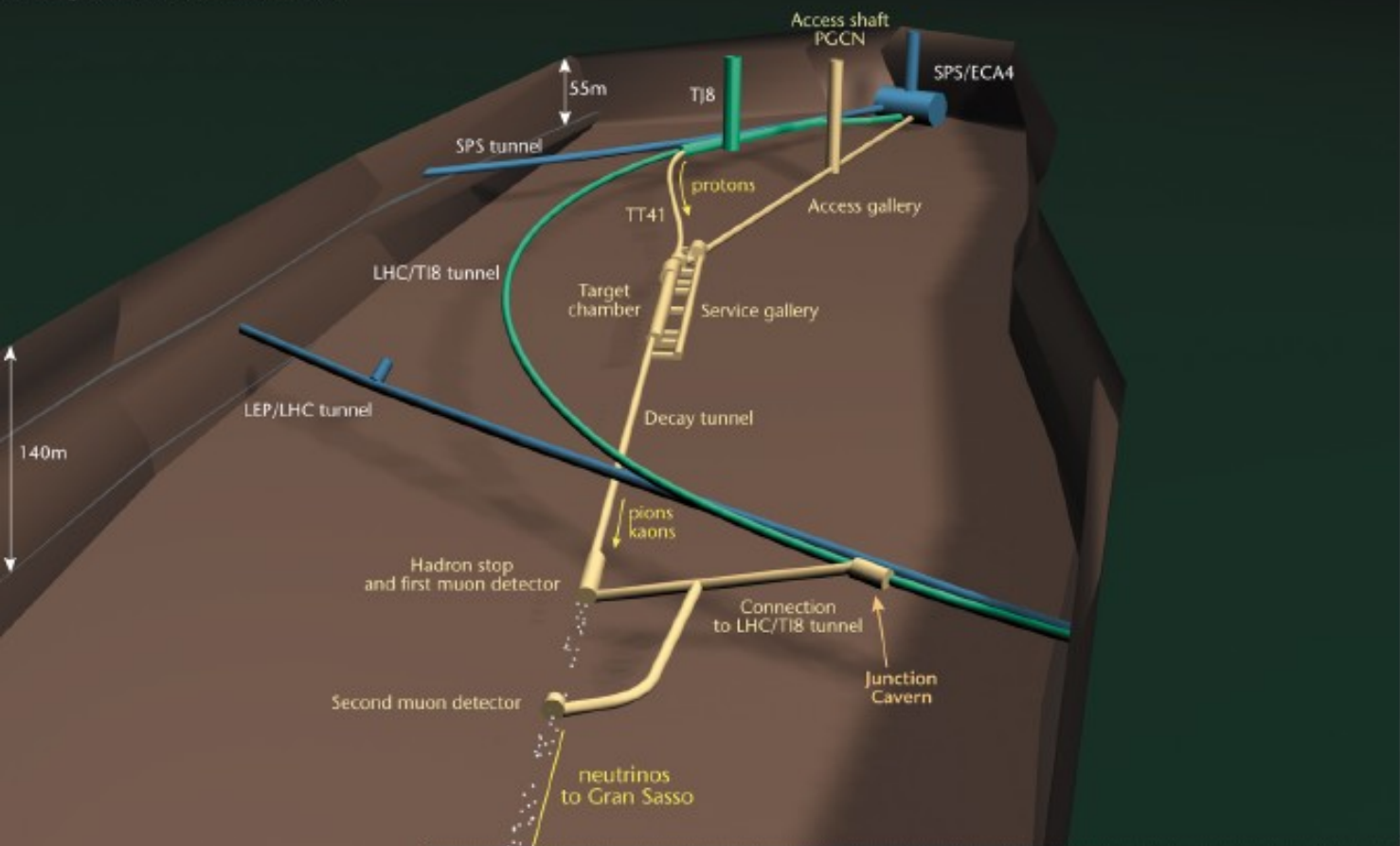
Vantaggi:

- L'ottimizzazione del fascio non dipende da Δm^2

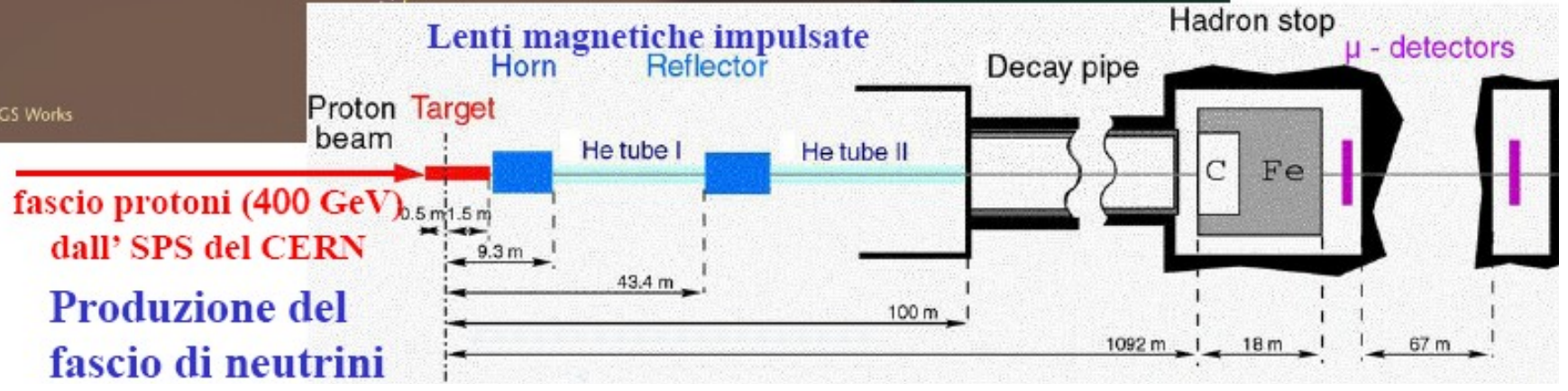
Produzione di τ da interazioni CC di ν_τ : fattore di riduzione rispetto a interazioni CC di ν_μ per effetto della massa del τ



CERN NEUTRINO TO GRAN SASSO
Underground structures at CERN



■ CNGS Works



Spettro d'energia del fascio e frequenza d'interazioni al Gran Sasso

Protoni primari:

400 GeV;

$4 \times 2.3 \times 10^{13}$ / ciclo SPS

Ciclo SPS : 26.4 s

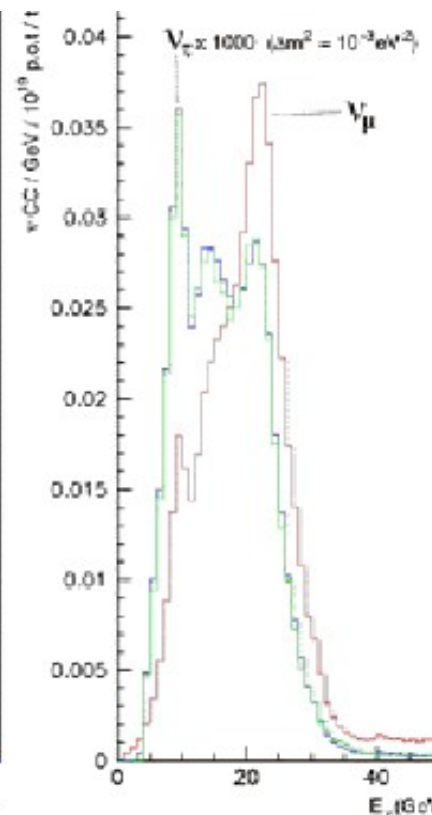
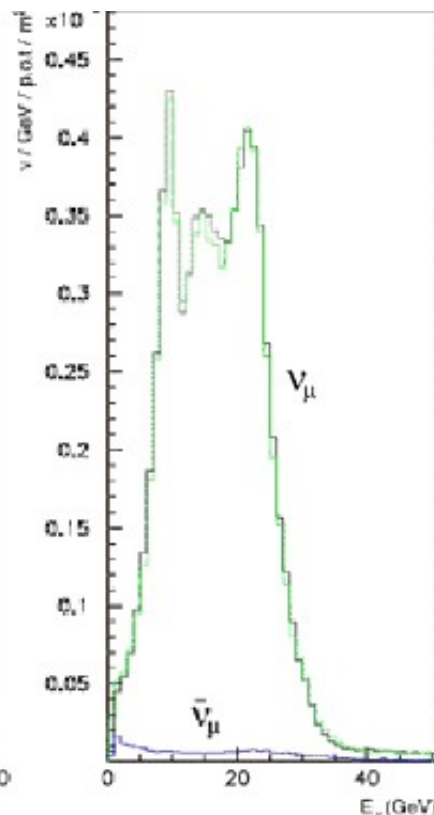
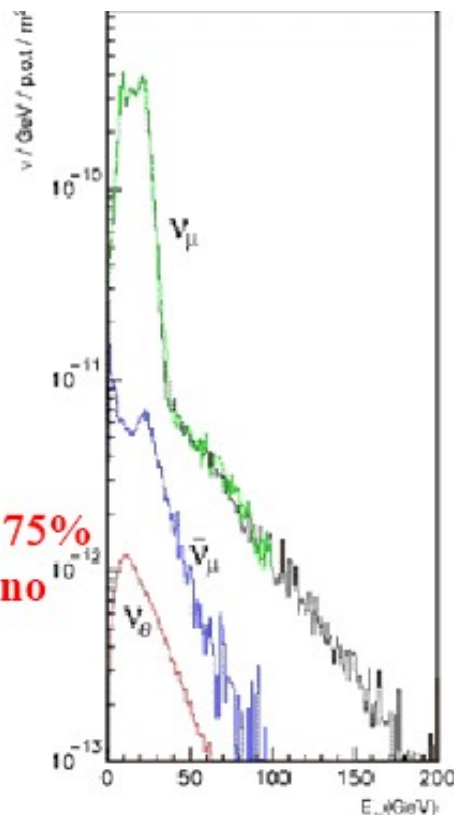
Efficienza d'operazione 75%

Presenza-dati 200 giorni/anno

Protoni su bersaglio:

4.5×10^{19} / anno

(in presenza di altri utenti SPS)



Process	Rates (events/kton/year)
ν_μ CC	2450
$\bar{\nu}_\mu$ CC	49
ν_e CC	20
$\bar{\nu}_e$ CC	1.2
ν NC	823
$\bar{\nu}$ NC	17

No oscillations

Δm^2 (eV ²)	Rates (events/kton/year)
1×10^{-3}	2.4
2.5×10^{-3}	15.1
3.5×10^{-3}	29.4
5×10^{-3}	58.6
1×10^{-2}	209.0

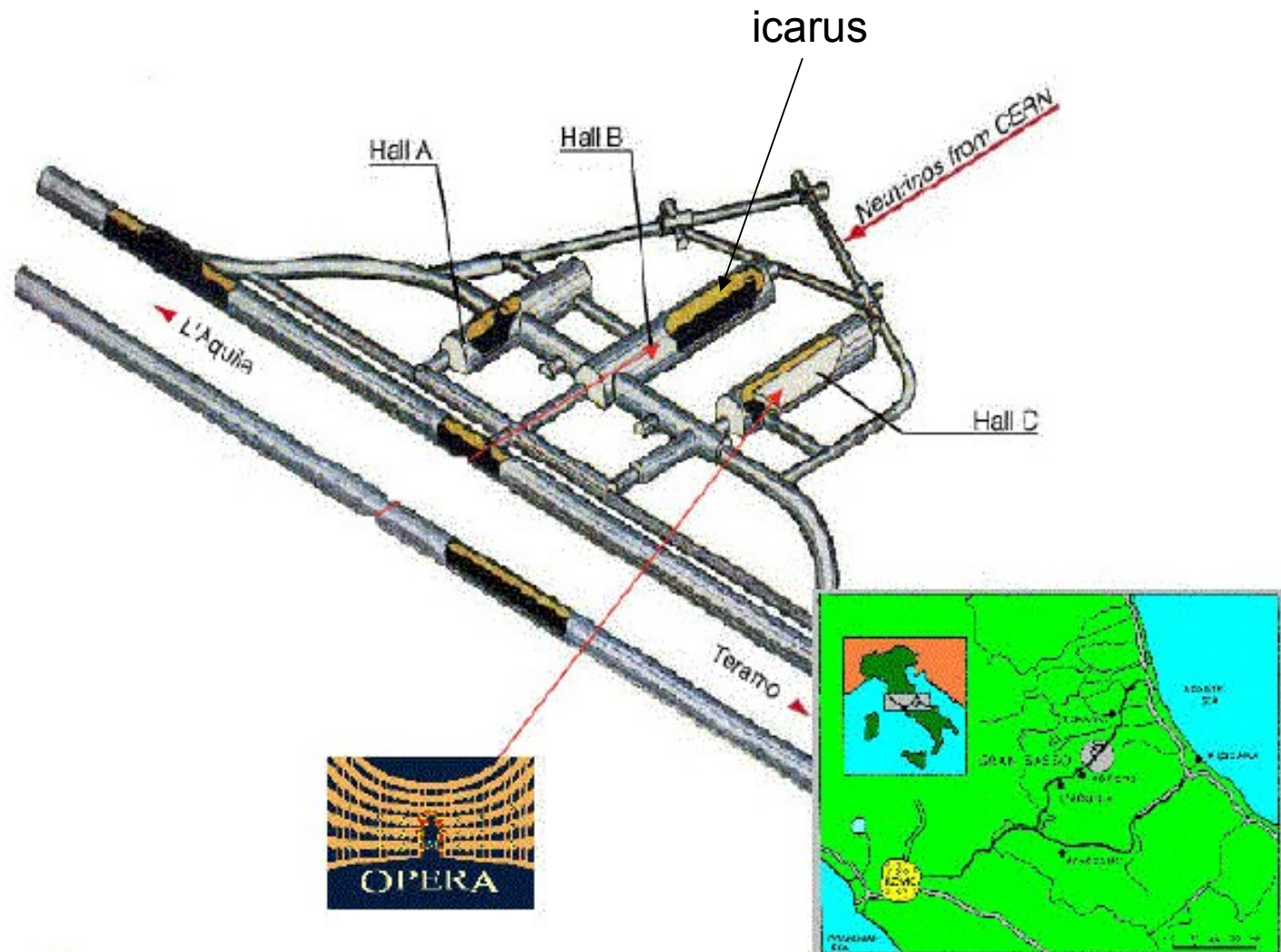
ν_i CC event rates

In assenza di altri utenti dell'SPS: 7.6×10^{19} protoni su bersaglio / anno

Ricerca di apparizione di ν_τ al Gran Sasso

Esperimento OPERA

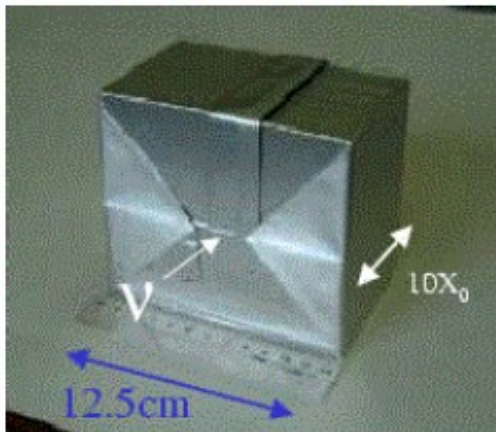
Nessun rivelatore vicino (produzione di ν_τ da protoni trascurabile)



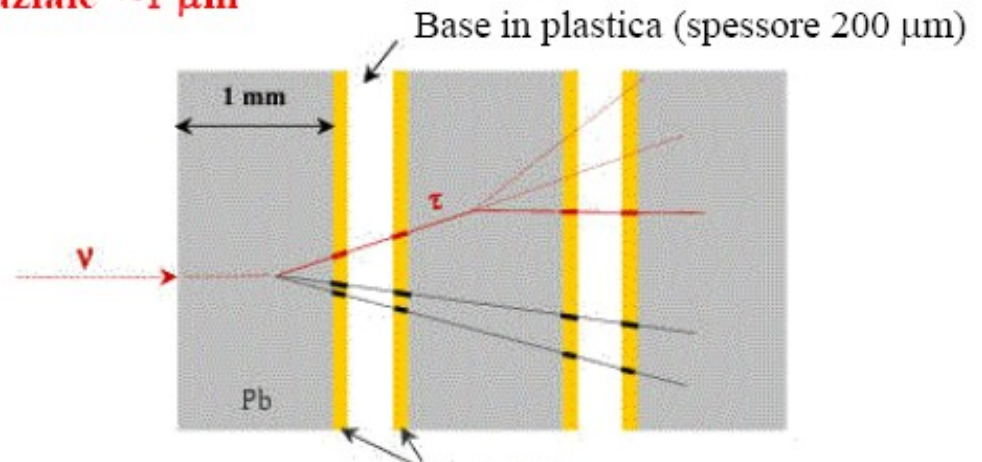
Esperimento OPERA: rivelazione di τ^- mediante osservazione dei decadimenti con un secondario carico (~85%)

Percorso medio di decadimento del $\tau \approx 1$ mm \Rightarrow alta risoluzione spaziale

Emulsione fotografica: risoluzione spaziale ~ 1 μ m



“Mattoni”: 56 pellicole separate da lastre di Pb (spessore 1 mm) impaccettate sotto pressione



strati di emulsione fotografica, (spessore 50 μ m)
Struttura interna di un mattone

“Mattoni”: disposti in “muri” di 52 x 64 mattoni

“Muri”: disposti in “super-moduli”: 31 muri / super-modulo

Due supermoduli, uno spettrometro magnetico dopo ogni super-modulo

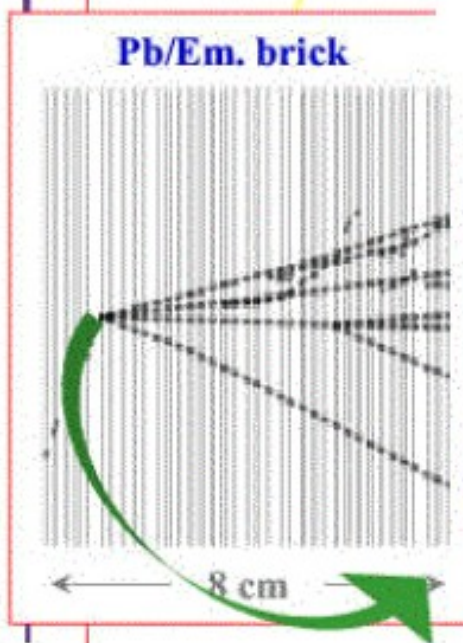
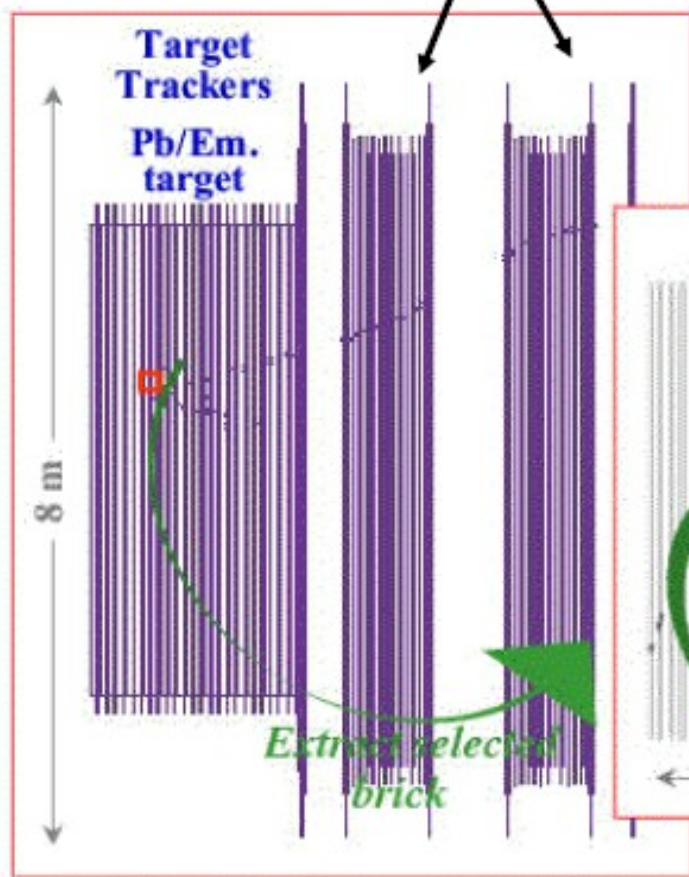
206 336 mattoni, massa totale 1800 tonn.

Tracciatori (piani ortogonali di strisce scintillanti) inseriti tra i muri per fornire il trigger e per identificare il mattone dove il neutrino ha interagito.

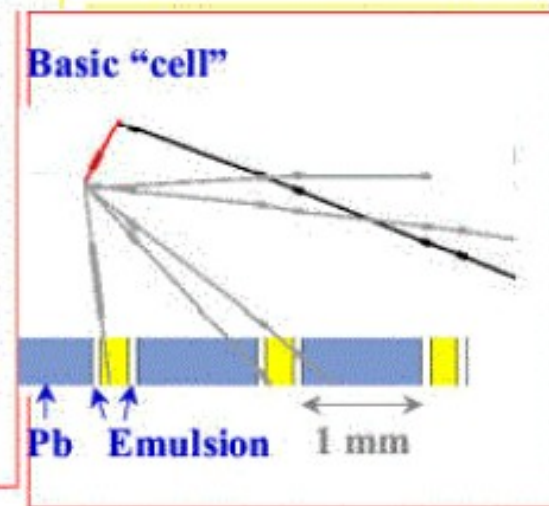
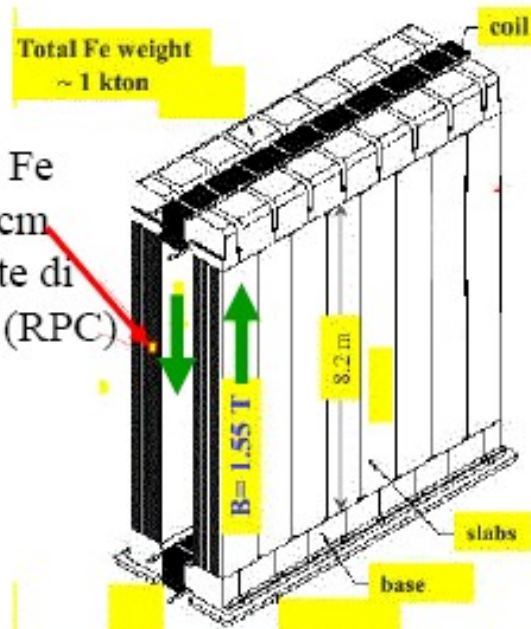
Rimozione immediata del mattone, sviluppo dell' emulsione, analisi e misure automatiche mediante microscopi controllati da calcolatori

Super-modulo OPERA

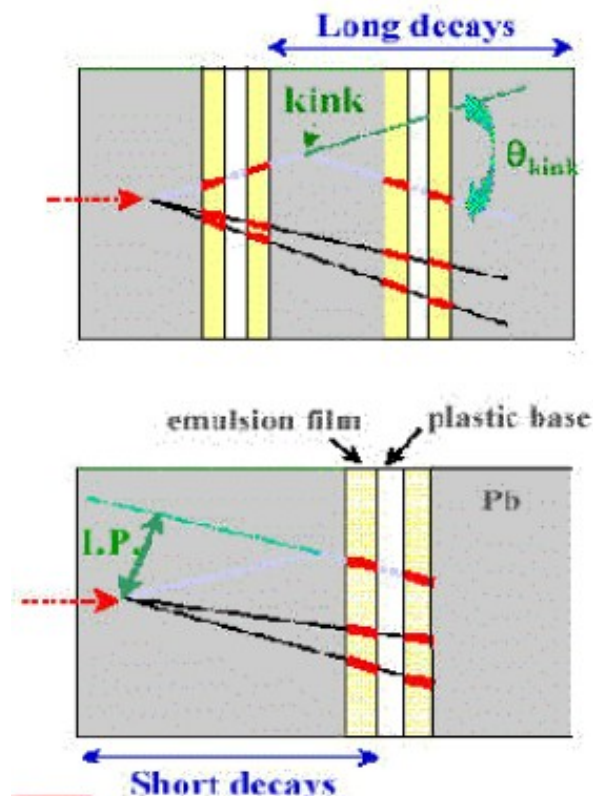
Spettrometro magnetico:
dipolo di ferro magnetizzato



12 lastre di Fe
spessore 5 cm
equipaggiate di
tracciatori (RPC)



OPERA: fondi e segnale



$\nu_\mu - \nu_\tau$ oscillation signal

Decay mode	Signal $1.2 \cdot 10^{-3}$	Signal $2.4 \cdot 10^{-3}$	Signal $5.4 \cdot 10^{-3}$	Bkgnd.
$\tau \rightarrow e$ long	0.8	3.1	15.4	0.15
$\tau \rightarrow \mu$ long	0.7	2.9	14.5	0.29
$\tau \rightarrow h$ long	0.9	3.4	16.8	0.24
$\tau \rightarrow e$ short	0.2	0.9	4.5	0.03
$\tau \rightarrow \mu$ short	0.1	0.5	2.3	0.04
Total	2.7	10.8	53.5	0.75

Presi-dati: 5 anni
 Massa 1800 tonn.
 $2.25 \cdot 10^{20}$ protoni

Expected background events (5 year run with 1.8kton average target mass)

	$\tau \rightarrow e$	$\tau \rightarrow \mu$	$\tau \rightarrow h$	Total
LONG DECAYS				
Charm production	0.14	0.03	0.14	0.31
ν_e CC and π^0	0.01	-	-	0.01
Large angle μ scattering	-	0.10	-	0.10
Hadron reinteractions	-	-	0.10	0.10
ν_μ CC	-	0.06	-	0.06
ν_μ NC	-	0.10	-	0.10
Total	0.15	0.29	0.24	0.67
SHORT DECAYS				
Charm production	0.03	0.02	-	0.05
Large angle μ scattering	-	0.02	-	0.02
ν_e CC and π^0	$\ll 0.01$	-	-	$\ll 0.01$
Total	0.03	0.04	-	0.07
Total	0.18	0.33	0.24	0.75

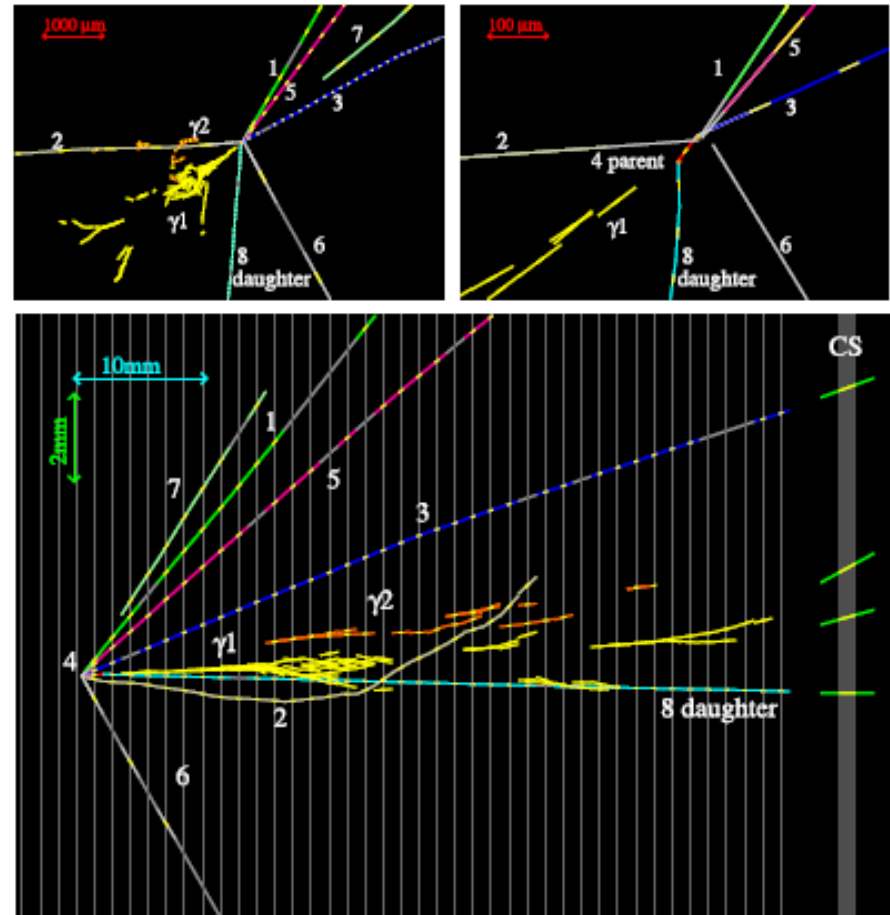




Observation of a first ν_τ candidate event in the OPERA experiment in the CNGS beam

Primo evento candidato osservato in OPERA in un campione corrispondente a 1.9×10^{19} pot

$$\tau \rightarrow h^-(n\pi^0)n_\tau$$



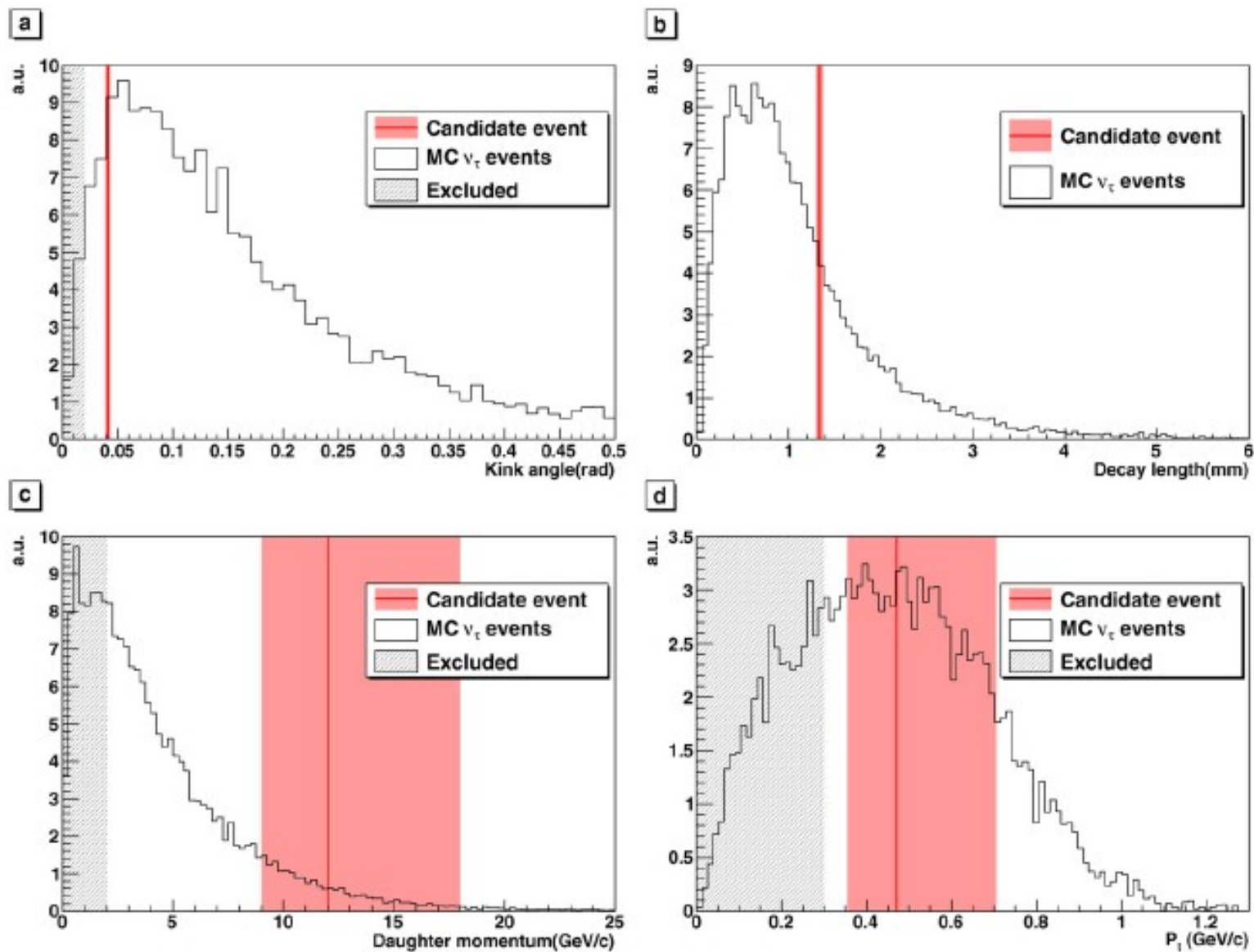


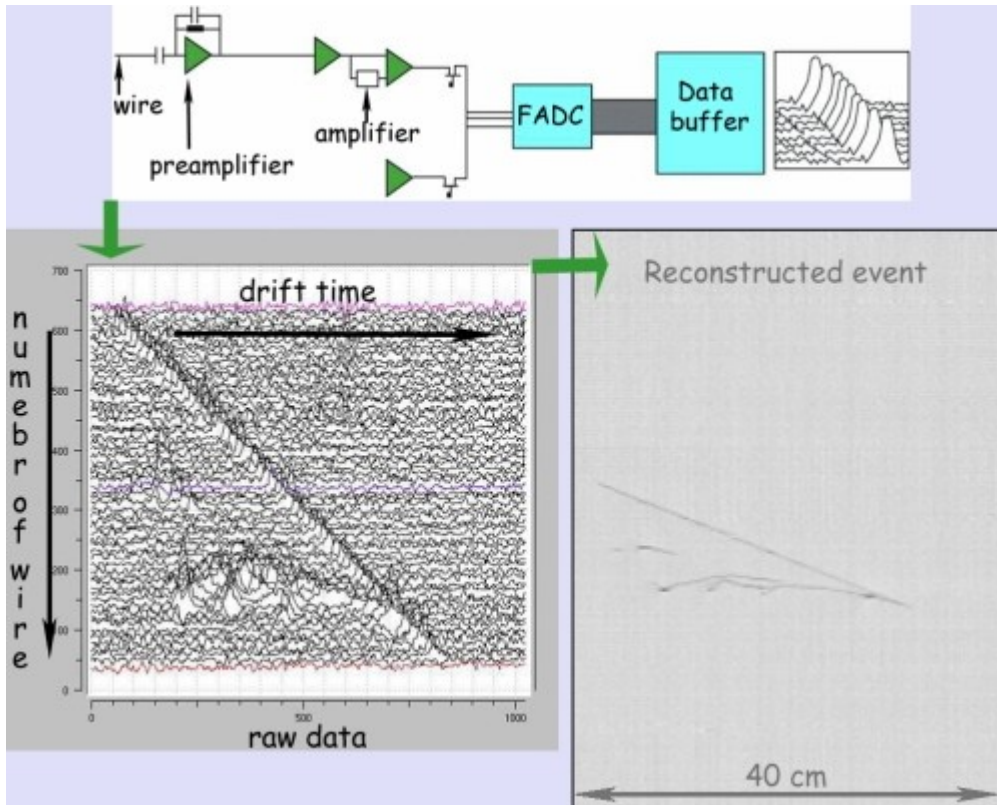
Fig. 2. Monte Carlo distribution of: (a) the kink angle for τ decays, (b) the path length of the τ , (c) the momentum of the decay daughter, (d) the total transverse momentum P_T of the detected daughter particles of τ decays with respect to the parent track. The red band shows the 68.3% domain of values allowed for the candidate event and the dark red line the most probable value. The dark shaded area represents the excluded region corresponding to the a priori tau selection cuts. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the web version of this Letter.)

Il progetto ICARUS per il Gran Sasso: detector ad Argon liquido per neutrini

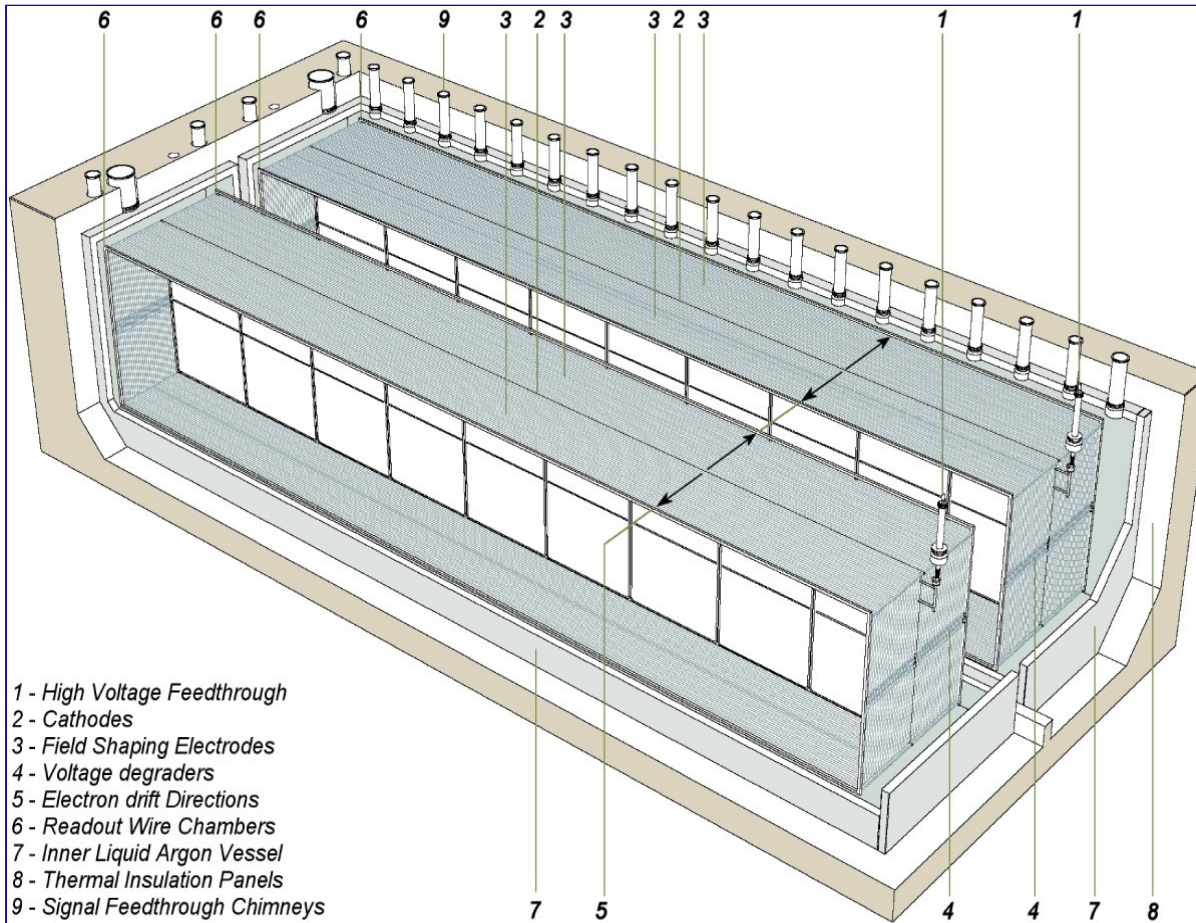


ICARUS

- Inaugurato a Marzo 2011
- LAr TPC: da un'idea di Rubbia del 1977
- 600t di Argon liquido



The ICARUS T600 Module

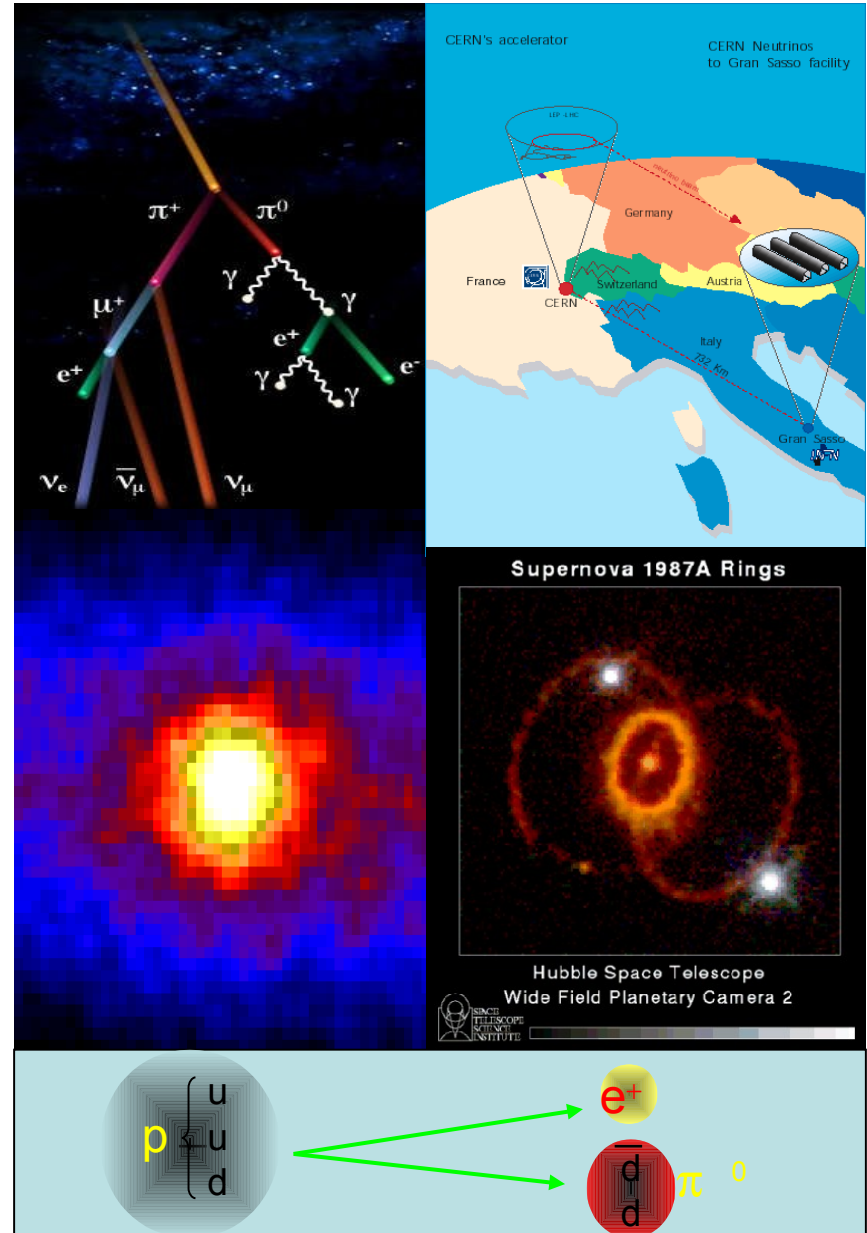


- Two separate containers
 - inner volume/cont. = $3.6 \times 3.9 \times 19.6 \text{ m}^3$
- Sensitive mass = **476 ton**
- 4 wire chambers with 3 readout planes at $0^\circ, \pm 60^\circ$ (two chambers / container)
 - ≈ 54000 wires
 - None broke during test
- Maximum drift = 1.5 m
 - HV = -75 kV @ 0.5 kV/cm
- Scintillation light readout with 8" VUV sensitive PMTs

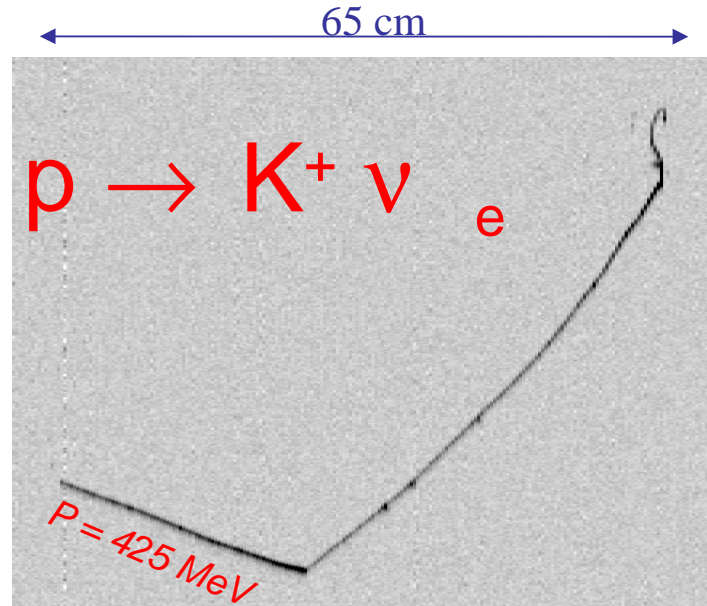
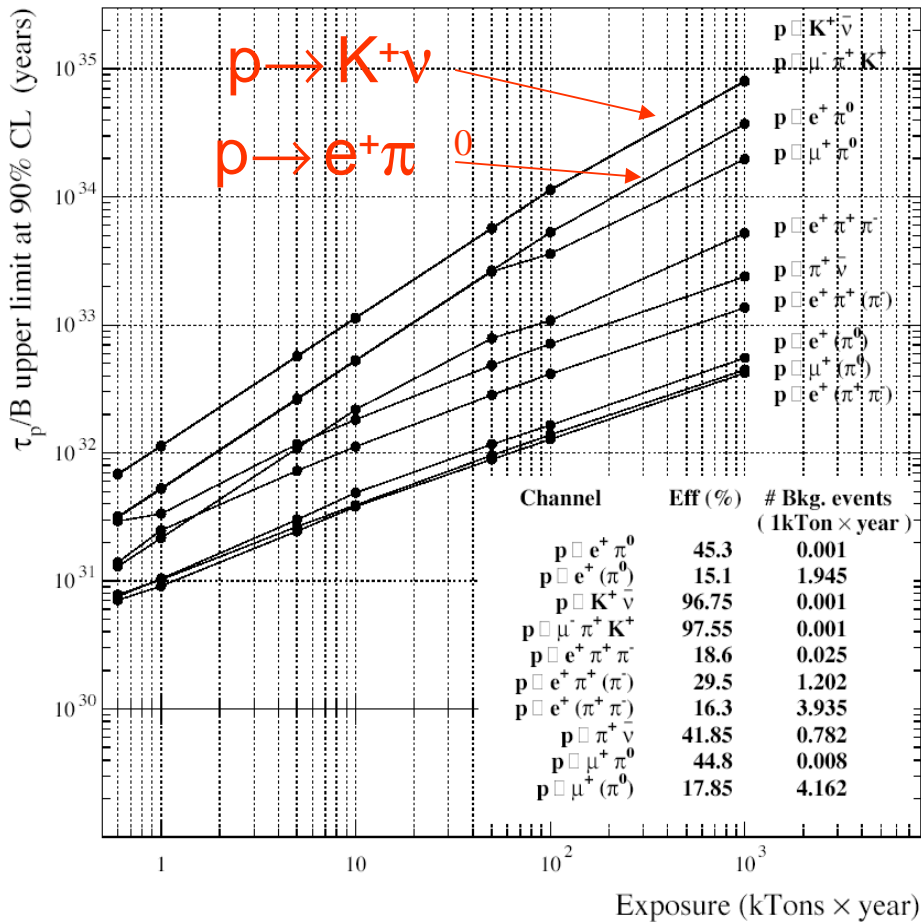


Gli obiettivi di fisica di Icarus

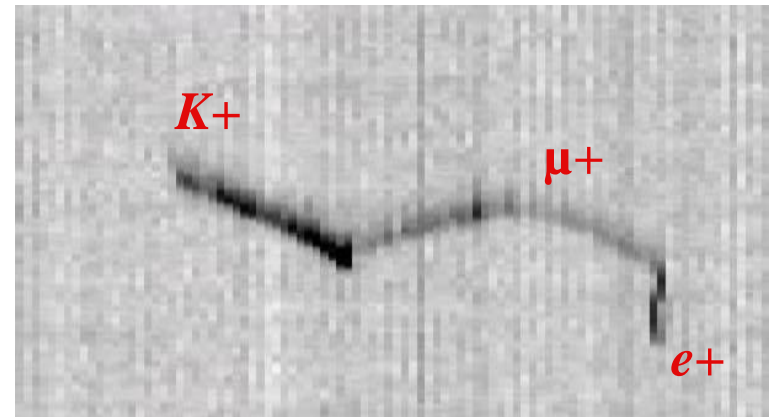
- Neutrini atmosferici e da Supernova
- Oscillazioni di neutrino con il fascio dal CERN
- Ricerca di segnali del decadimento del protone



Il decadimento del protone e' l'obiettivo originale del progetto ICARUS Molto competitivo sul canale $K\nu$



“Single” event detection



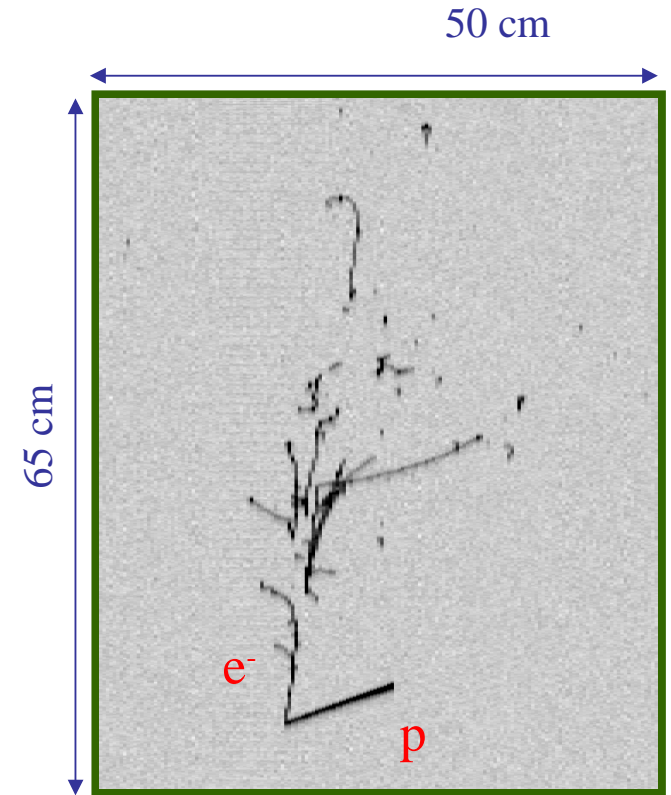
$p \rightarrow K^+ \bar{\nu}_e$: efficiency=97% 0.001 bg events in 1kt x year exposure: results after few kt year

Caratteristiche importanti di ICARUS per la fisica del neutrino (atmosferico e da fascio)

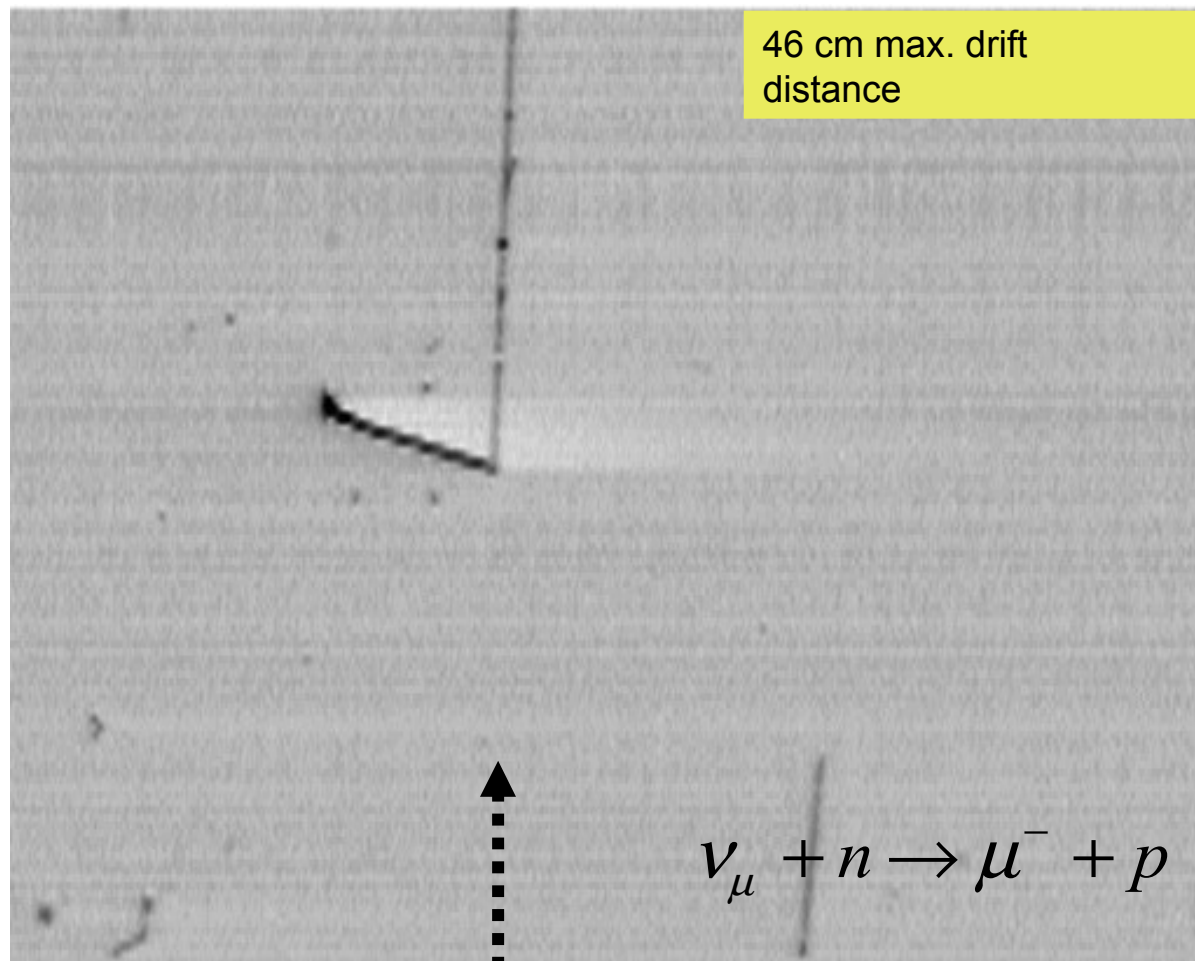
Bassa soglia (~ 50 MeV), separazione netta e/μ

Ricostruzione completa degli eventi

Correnti Neutre: buona discriminazione e/π^0



Una interazione di neutrino in Argon Liquido

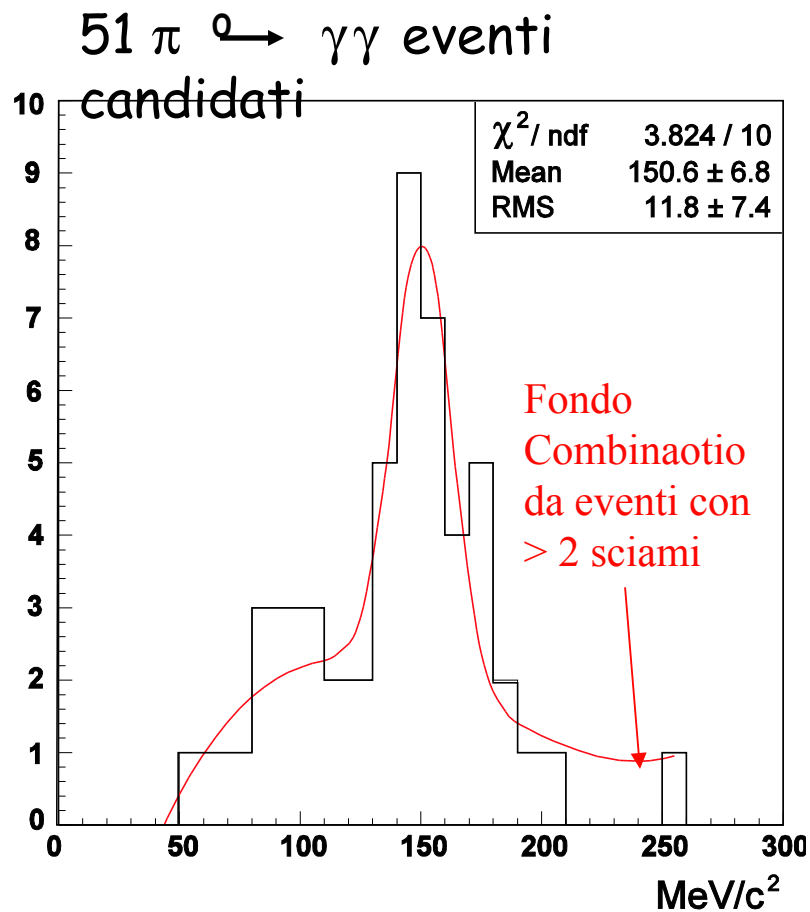
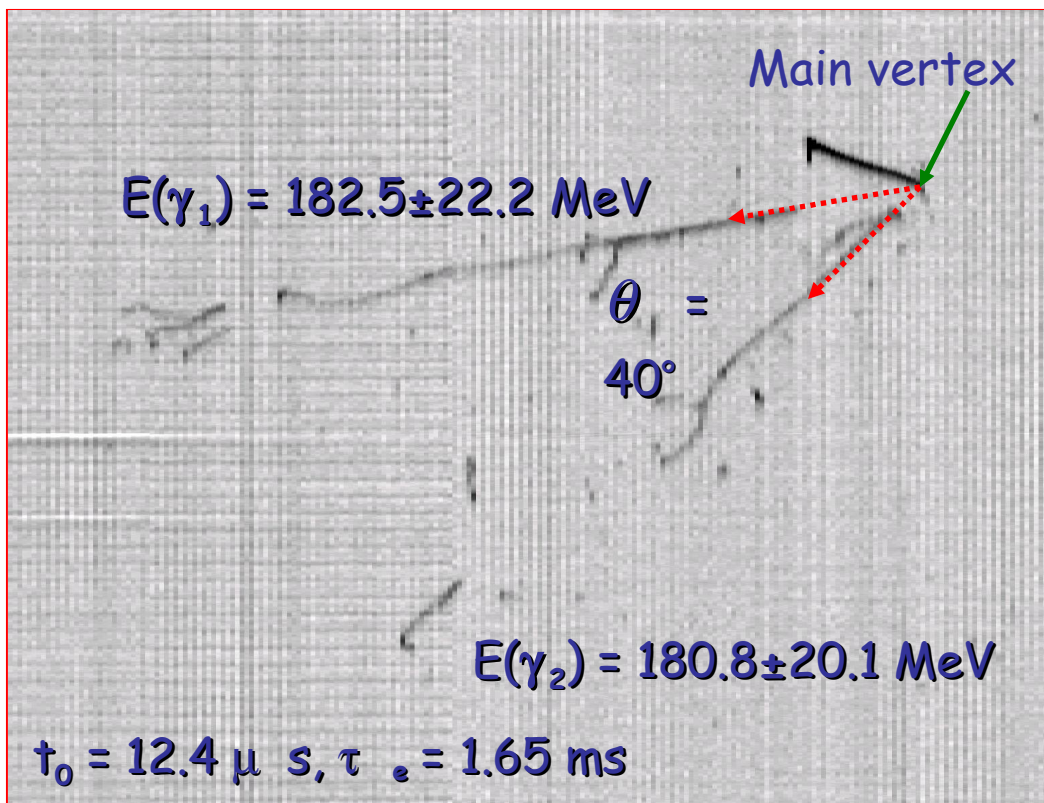


ICARUS-CERN-Milano

CERN ν -beam

Ricostruzione della massa del π^0

Run 712 Evt 7 (Left Collection View)



$$M_{\gamma\gamma} = 150.6 \pm 11.8 \text{ MeV}/c^2$$

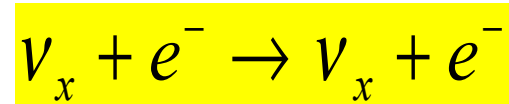
In accordo con la risoluzione in energia e.m. attesa

neutrini dalle Supernovae

Interazioni di bassa energia rivelabili in Argon

- Scattering elastico dei ν (ES)

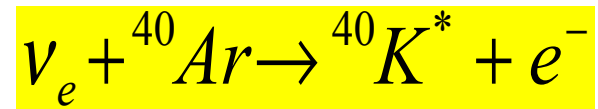
$$\phi(\nu_e) + 0.15 \phi(\nu_\mu +$$



- Assorbimento del ν_e (CC)

$$\phi(\nu_e)$$

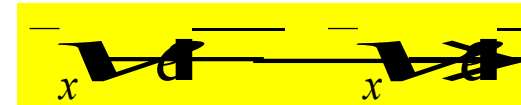
$$Q = 5.885 \text{ MeV}$$



- Scattering elastico degli anti- ν (ES)

$$\phi(\bar{\nu}_e) + 0.34 \phi(\bar{\nu}_\mu +$$

$$\bar{\nu}_\tau)$$



- Assorbimento dell'anti- ν_e (CC)

$$\phi(\bar{\nu}_e)$$

$$Q = 8 \text{ MeV}$$

