
Neutrini

Leslie Camilleri

CERN

Ginevra, Svizzera

Incontri di Fisica
Frascati
16-18 Settembre 2002

SOMMARIO

I Introduzione storica

II Oscillazioni dei Neutrini

❖ Teoria.

III I Neutrini SOLARI

IV I Neutrini ATMOSFERICI

V Esperimenti con fasci di neutrini prodotti da acceleratori

❖ In Giappone.

❖ In America.

❖ In Europa.

BIBLIOGRAFIA:

Dai Quark al Cosmo.

L. Lederman e D. Schramm. Ed. Zanichelli.

Neutrino Oscillation Industry Web Page

<http://www.hep.anl.gov/ndk/hypertext/nuindustry.html>

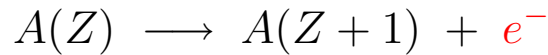
ULTIMI RISULTATI:

Neutrino 2002 Conference. Munich.

<http://neutrino2002.ph.tum.de/pages/transparencies2.html>

PERCHE INVENTARE UN NEUTRINO?

Idee negli anni 1910-1920: Il decadimento β^- è un decadimento a due corpi:



↓

Conservazione dell'energia e dell'impulso:
Elettroni dovrebbero essere **MONO-ENERGETICI**.

$$E_e = \frac{[M(A, Z)]^2 - [M(A, Z + 1)]^2 + m_e^2}{2M(A, Z)}$$

Nel 1914 Chadwick misura lo spettro dell'energia degli elettroni:

↓

SPETTRO CONTINUO !!!

Dopo molte teorie sbagliate

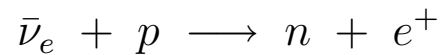
Nel 1930 PAULI suggerisce un decadimento a **3** corpi dovuto all'esistenza di una nuova particella:

Elettricamente neutra e di piccola massa:

Il Neutrone (più tardi chiamato: **NEUTRINO**).

RIVELAZIONE DEL NEUTRINO

1934: Calcolo della sezione d'urto per la reazione:



$$\sigma = 10^{-44} \text{cm}^2 \quad \text{per } E(\bar{\nu}_e) = 2 \text{ MeV}$$



Camino libero in acqua: 1600 anni-luce



Probabilità di interagire:
 6.7×10^{-20} per metro di acqua per $\bar{\nu}_e$ incidente.



Attraversano la TERRA senza problemi !!!



DIFFICILISSIMO rivelarli:

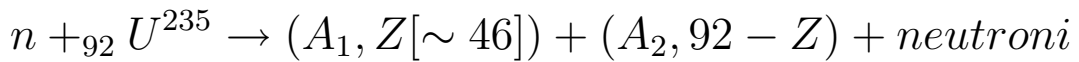
Pauli si è scusato di avere inventato questa
STRANISSIMA particella !!!

Necessità di sorgenti MOLTO INTENSI.

RIVELAZIONE DEL NEUTRINO

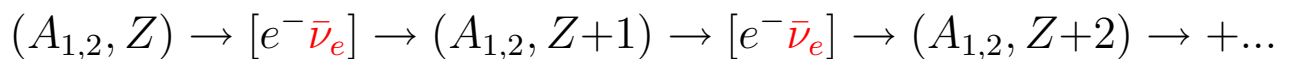
Solo nel 1953 è stata disponibile una sorgente abbastanza intensa:

REATTORE A FISSIONE



A_1 e A_2 decadono in cascata fino a raggiungere nuclei stabili

↓



↓

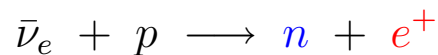
In MEDIA: 6 $\bar{\nu}_e$ per fissione

↓

$5.6 \times 10^{20} \bar{\nu}_e/\text{s}$ per una potenza termica di 3×10^9 Watt.

Reines e Cowan: Rivelatore installato presso il reattore di Savannah River (USA)

Antineutrini rivelati usando la reazione:



- ❖ Bersaglio di Acqua e Cadmio
- ❖ Rivelatore → Identificazione dei n e e^+ .
- ❖ **Segnale:** Numero di eventi con reattore **acceso**
meno

Numero di eventi con reattore **spento** → Fondo

$3.0 \pm 0.2 / \text{ora.}$

SCOPERTE SUCCESSIVE: ν_μ, ν_τ .

Nel 1960 il mesone π (PIONE) e il leptone carico $\mu^{+,-}$ (MUONE) erano già scoperti.

Si sapeva anche che

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

È stato determinato che:

Il ν associato a un **ELETRONE** nel decadimento β

$$A(Z) \longrightarrow A(Z + 1) + e^- + \nu$$

Il ν associato a un **MUONE** nel decadimento del **PIONE**

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

Sono stati dunque chiamati ν_e e ν_μ .

Più tardi è stato scoperto un terzo leptone carico : $\tau^{+,-}$ e il suo neutrino ν_τ .

Sappiamo ora, da misure fatte al CERN, che ci sono

$$3.00 \pm 0.06 \text{ tipi di } \nu$$

In accordo con quelli che conosciamo:

$$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau.$$

PROPRIETÀ DEI NEUTRINI.

Carica : ZERO, Massa: \sim ZERO, SPIN: 1/2.

NEUTRINO

ν

→ Impulso

⇐ Spin

ANTINEUTRINO

$\bar{\nu}$

→ Impulso

⇒ Spin

Le quattro FORZE fondamentali:
FORTE (nucleare), ELETTROMAGNETICA,
DEBOLE, GRAVITAZIONALE.

Tutte le interazioni dei NEUTRINI
sono dovute alla forza DEBOLE



Probabilità d'interazione PICCOLISSIMA.

Correnti CARICHE

Scambio $W^{+,-}$

Correnti NEUTRE

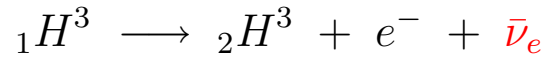
Scambio Z^0

Per le correnti CARICHE, l'energia del neutrino deve essere
abbastanza grande per produrre
elettroni ($M=0.5$ MeV), MUONI (105 MeV), TAU (1777 MeV)

MISURA DIRETTA DELLA MASSA DEI NEUTRINI.

❖ ν_e

Misura della massa del ν_e dallo spettro in energia degli **elettroni** di decadimento del **TRIZIO**.



Se la massa del $\bar{\nu}_e$ è **ZERO**

Energia massima degli elettroni:

$$E_0 = M({}_1H^3) - M({}_2H^3) - m_e.$$

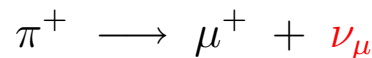
E_0 sarà più piccola se $M_{\nu_e} \neq 0$.

→ Misura di M_{ν_e} .

$$M_{\nu_e} < 2.5 \text{ eV}$$

❖ ν_μ

Misura della massa del ν_μ dalla misura precisa del impulso del μ^+ dal decadimento a riposo del π^+

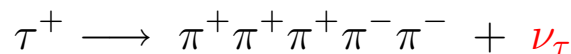


$$M_{\nu_\mu}^2 = m_\pi^2 + m_\mu^2 - 2m_\pi \sqrt{p_\mu^2 + m_\mu^2}$$

$$M_{\nu_\mu} < 0.16 \text{ MeV}$$

❖ ν_τ

Misura della massa del ν_τ dalla misura dell'energia e del impulso dei $\pi^+\pi^+\pi^+\pi^-\pi^-$ nel decadimento del leptone τ^+ :



(I τ sono stati prodotti al LEP, il grande collisore elettrone-positrone: $e^+e^- \longrightarrow \tau^+\tau^-$.)

$$M_{\nu_\tau} < 18.2 \text{ MeV}$$

MASSE

Questi limiti non possono essere molto migliorati.

L'unico modo di misurare
masse molto più piccole

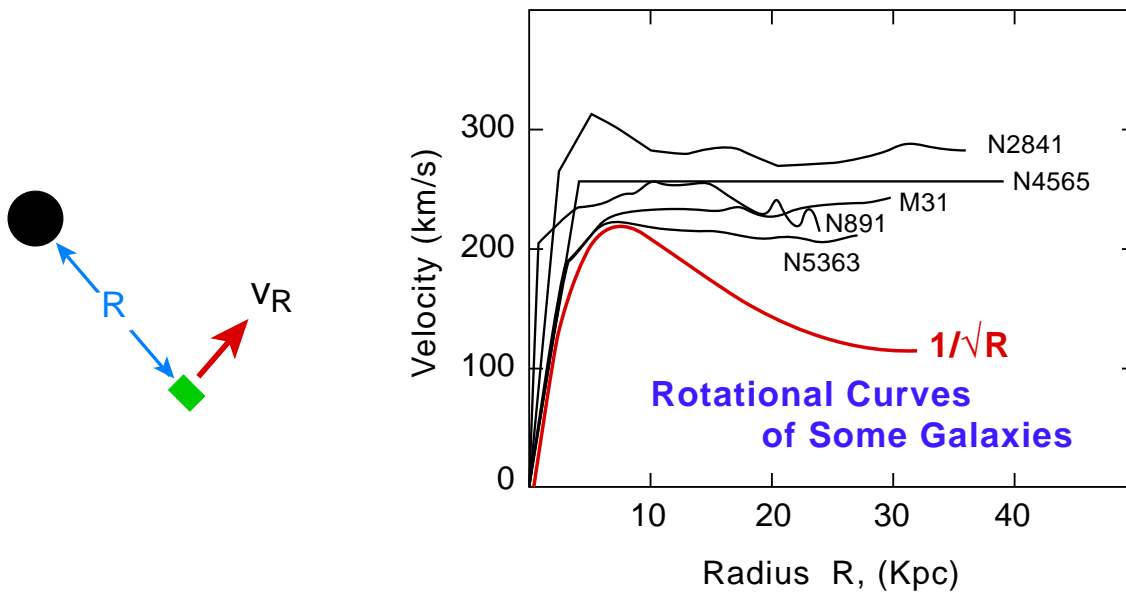


OSCILLAZIONI.

MA PERCHÉ FARLO ?

COSMOLOGIA

Curve di **Velocità Angolare** della materia nelle galassie.



In teoria a grandi R :

$$v_R = 1/\sqrt{R} \quad \text{Invece: } \implies \text{PIATTO} \implies \text{ANOMALIA.}$$

Per spiegarle: **10 volte** più materia di quella che è visibile.



MATERIA OSCURA

BIG BANG → RESIDUI → **FOTONI** → Osservati.

↓
NEUTRINI

↓
ABBONDANZA = $350/\text{cm}^3$

Se $M_\nu = 30\text{eV}/c^2$, **MATERIA OSCURA** → **NEUTRINI**

Ma anche con $M_\nu = \sim 1\text{eV}/c^2$.

Influenza sull' **ESPANSIONE** dell'UNIVERSO.

Misurare M_ν è IMPORTANTE!!!

OSCILLAZIONI DEI NEUTRINI: TEORIA.

IPOSTESI: Bruno PONTECORVO

- ❖ I Neutrini hanno una **MASSA**.
- ❖ I Neutrini si **MESCOLANO** → **MIXING**.

I tre tipi di neutrini ν_e, ν_μ, ν_τ non sono **AUTOSTATI** di massa. Sono combinazioni lineari di autostati di massa: ν_1, ν_2, ν_3 :

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k} |\nu_k\rangle \quad k = 1, 2, 3. \quad \alpha = e, \mu, \tau.$$

Al tempo **t=0**, è creato un fascio di tipo α e di impulso **p**:

Evoluzione al tempo **t=t**:

$$\begin{aligned} |\nu_\alpha(t)\rangle &= e^{ip \cdot r} \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k} e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle \\ &= e^{ip \cdot r} \sum_{k=1}^3 U_{\alpha k} e^{-i\sqrt{(p^2 + m_k^2)}t} |\nu_k\rangle \end{aligned}$$

Le tre $|\nu_k\rangle$ evolvono diversamente
causa le loro **DIVERSE** m_k .

(Se i neutrini non hanno massa → niente oscillazioni!)

CONSEGUENZA:

Al tempo **t=0** avevamo l'**ESATTA** "miscela" di ν_1, ν_2, ν_3 per darci solo lo stato α .

Più tardi, al tempo **t=t**, la miscela è **CAMBIATA**: e dunque tutti tre tipi di neutrini, ν_e, ν_μ, ν_τ saranno presente nel fascio.

MIXING CON SOLO DUE NEUTRINI.

Se ci limitiamo a **DUE NEUTRINI**
il **MIXING** può essere descritto con un solo parametro:
Un'angolo $\theta \Rightarrow$ AMPIEZZA dell'oscillazione.

Se, a l'inizio, abbiamo un fascio di puro tipo α , al tempo $t=t$

$$|\nu(t)\rangle = e^{ip.r} (\cos\theta e^{-i\sqrt{(p^2+m_1^2)}t} |\nu_1\rangle + \sin\theta e^{-i\sqrt{(p^2+m_2^2)}t} |\nu_2\rangle)$$

e la probabilità di trovare il tipo β nel fascio è:

$$P_{\alpha\beta}(t) = \sin^2 2\theta \sin^2 1.27 \frac{L(m)}{E(MeV)} \Delta m^2 (eV^2)$$

dove

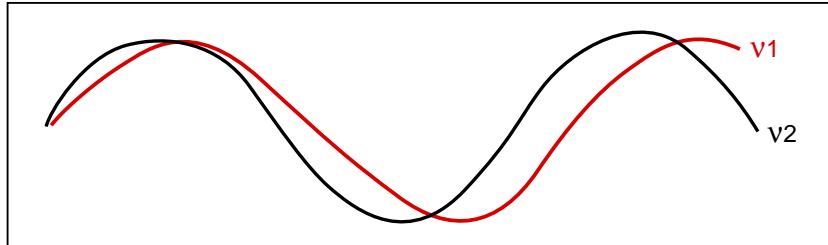
$$\Delta m^2 = (m_1^2 - m_2^2)$$

e

L=Distanza tra i punti
di produzione e di rivelazione dei neutrini.

E=Energia dei neutrini.

$$|\nu(t)\rangle = e^{ip.r} \left(\cos\theta e^{-i\sqrt{(p^2+m_1^2)}t} |\nu_1\rangle + \sin\theta e^{-i\sqrt{(p^2+m_2^2)}t} |\nu_2\rangle \right)$$

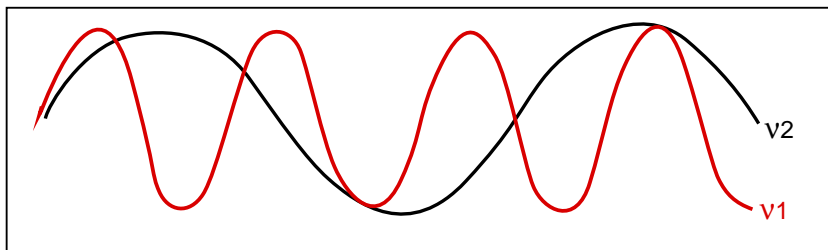


Per una **PICCOLA** differenza tra m_1 e m_2 , ν_1 e ν_2 si sposteranno quasi ugualmente e dunque la miscela iniziale cambierà **LENTAMENTE**.

→ I neutrini dovranno **“VIAGGARE LONTANO”** prima di avere una probabilità apprezzabile di oscillare in un altro tipo.

BISOGNA COMPENSARE LA PICCOLEZZA DI Δm^2 CON LUNGHE DISTANZE (BASE-LINE).

$$P_{\alpha\beta}(t) = \sin^2 2\theta \sin^2 1.27 \frac{L(m)}{E(MeV)} \Delta m^2 (eV^2)$$



Se, invece, la differenza di massa è **GRANDE** la miscela cambierà **PRESTO**.

SI POTRANNO OSSERVARE OSCILLAZIONI ANCHE A PICCOLE DISTANZE (BASE-LINE).

Con 3 autostati di massa, ν_1, ν_2, ν_3
Sono possibili 2 differenze di massa **INDIPENDENTI**.

$$\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$$

e

$$\Delta m_{23}^2 = m_2^2 - m_3^2$$

↓

Dunque 2 categorie d'OSCILLAZIONI
con Δm^2 diverse.

TERMINOLOGIA:

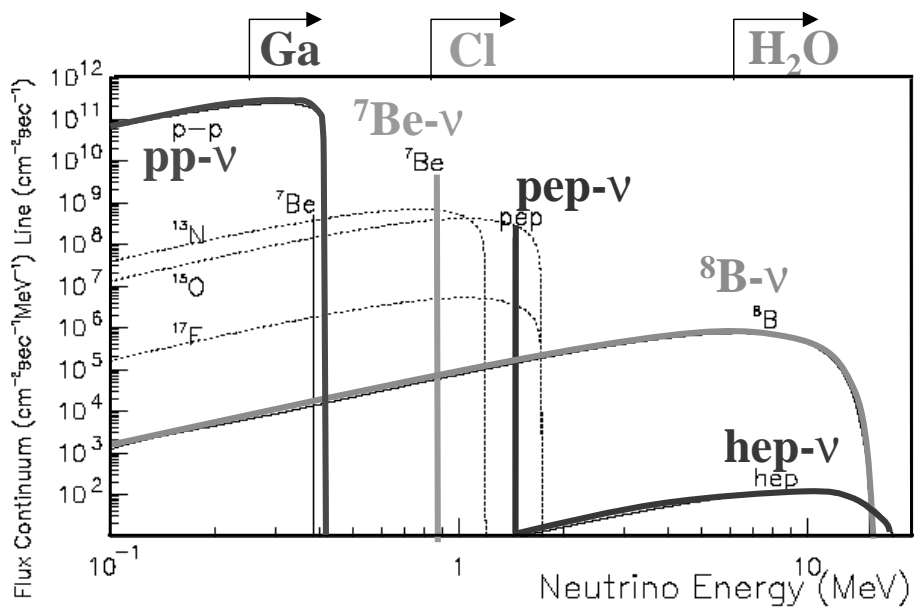
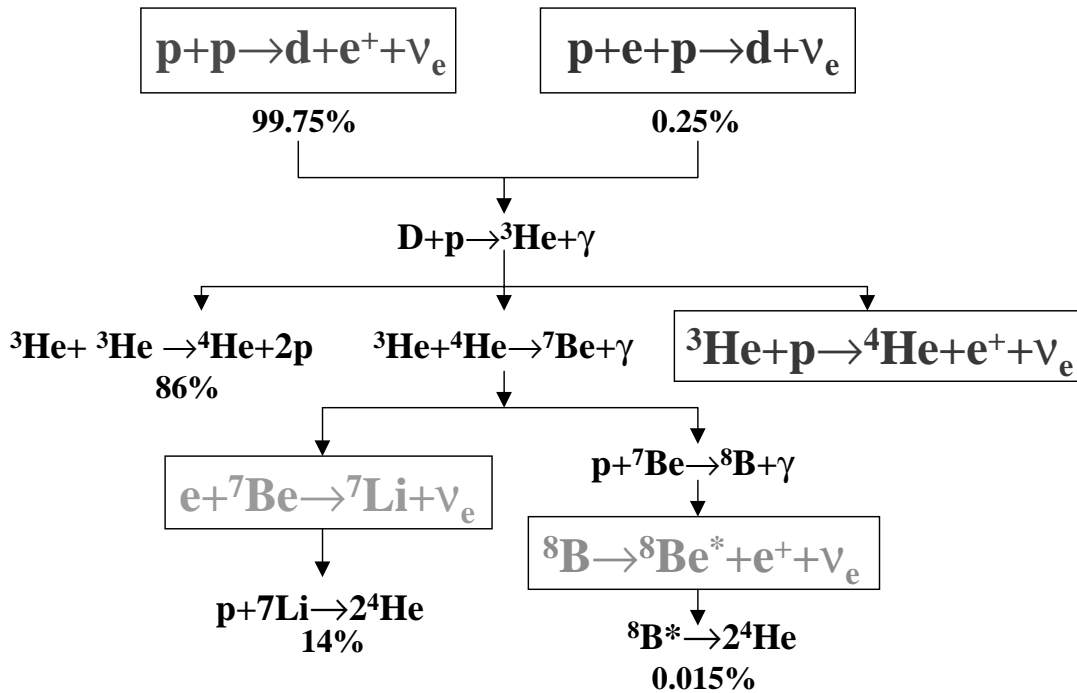
- ❖ Esperimento di **SCOMPARSA**:
Iniziare con un fascio di TIPO PURO;
Osservare una **RIDUZIONE** di questo **STESSO** TIPO.
dopo una distanza **L**.
- ❖ Esperimento di **APPARIZIONE**:
Iniziare con un fascio di TIPO PURO;
Osservare l'**APPARIZIONE** di un **ALTRO** tipo.
dopo una distanza **L**.
- ❖ **BASE-LINE**:
Distanza **L** tra i punti di PRODUZIONE e
OSSERVAZIONE dei NEUTRINI.
- ❖ **BASE-LINE CORTA**:
L = $O(100\text{m})$ misura di $\Delta m^2 \sim 1.0 \text{ eV}^2$
- ❖ **BASE-LINE LUNGA**:
L = $O(100\text{km})$ misura di $\Delta m^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

I NEUTRINI SOLARI

II CICLO SOLARE principale

Solar neutrinos

The pp-chain



FLUSSO SULLA TERRA: $6.4 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

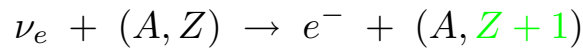
Calcolato accuratamente dal "STANDARD SOLAR MODEL" (SSM).

COME RIVELARLI?

DUE tecniche: RADIOCHIMICA e TEMPO REALE.

RADIOCHIMICA

- ◆ Si usa la reazione di cattura :



- ◆ Possibile solo per i ν_e .
- ◆ Chimicamente, estraggono i pochi atomi di $(A, Z + 1)$ prodotti.

	HOMESTAKE	GALLEX	SAGE
Dove	South Dakota	Gran Sasso	Baksan Mine
Materiale	C_2Cl_4	Gallium (Soluzione)	Gallium (Metallo)
Nucleo Iniziale	^{37}Cl	^{71}Ga	^{71}Ga
Nucleo Rivelato	^{37}Ar	^{71}Ge	^{71}Ge
Massa (ton)	615.0	30.3	57.0

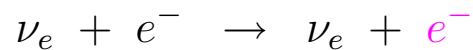
- ◆ **PROBLEMA DIFFICILE:**
Sono prodotti solo $\sim 2-3$ ATOMI/GIORNO!
- ◆ L'estrazione si fa ogni 2-3 mesi.

RIVELATORI A TEMPO REALE

ESPERIMENTI usando ELETTRONICA potendo misurare il tempo con una precisione di NANOSECONDI.

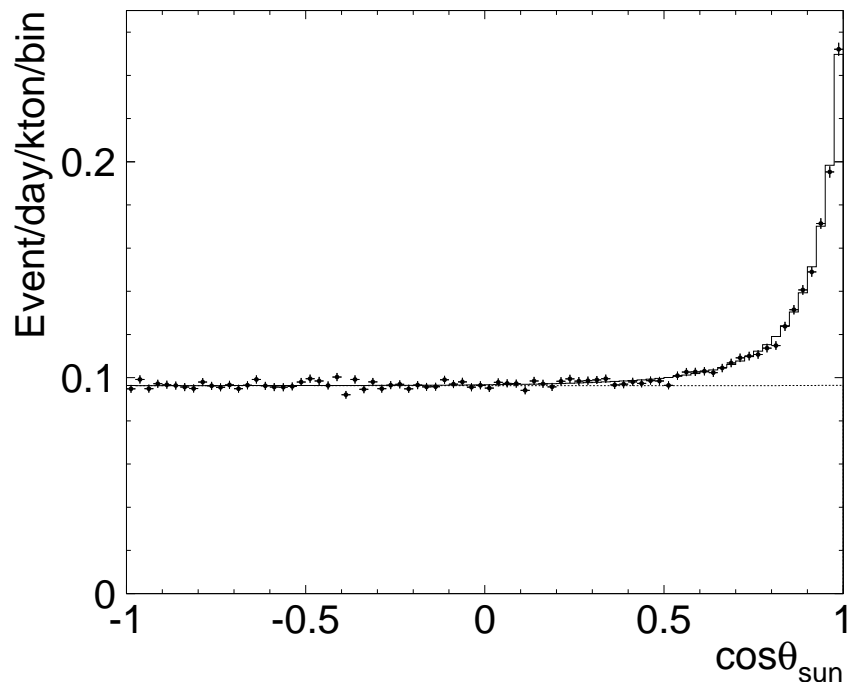
L'esperimento di SUPER KAMIOKANDE nella miniera di KAMIOKA (Giappone):

PRINCIPIO: DIFFUSIONE ELASTICA dei neutrini sugli elettroni dell'acqua: sensibile in maggior parte solo per i ν_e .



Direzione del e^- quasi uguale a quella del ν .

$\Theta_{sole} =$
Angolo tra l'elettrone
e la posizione del SOLE.



Gli elettroni "PUNTANO" verso il sole.

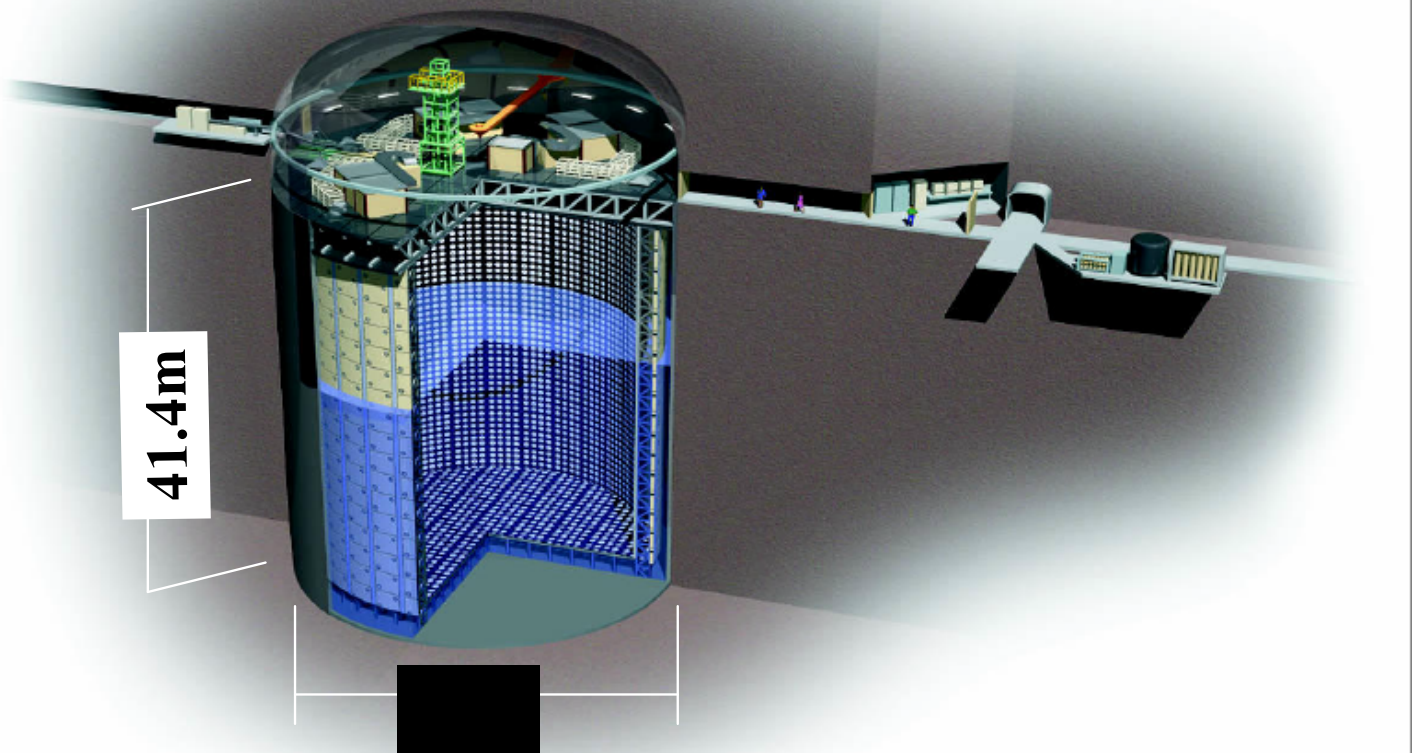


I neutrini sono provenienti dal sole.

Super-Kamiokande

50,000 ton water Cherenkov detector (22.5 kton fiducial volume)

Optically separated **INNER** and **OUTER** detector



- ❖ Bersaglio ACQUA.
- ❖ Massa 50 000 ton.
- ❖ Energia e direzione del e^- misurate dalla luce emessa dall e^- e osservata in
- ❖ 11146 fototubi (50 cm di diametro)

RISULTATI

ESP.	GALLEX	SAGE	HOMESTAKE	SU-KAM
SOGLIA. (MeV)	0.235	0.235	0.817	5.0
DATI/SSM	0.59 ± 0.06	0.52 ± 0.07	0.33 ± 0.028	0.45 ± 0.015

SI OSSERVA UN DEFICIT RISPETTO ALLE
PREVISIONI DEL SSM

ANOMALIA !

- ❖ MANCANZA dovuta a **PROBLEMI** col SSM?
o pure
- ❖ Forse i ν_e hanno **OSCILLATO** in ν_μ o ν_τ ?
Tutti i esperimenti sono sensibili **SOLO** ai ν_e .
→ MANCANZA di eventi.

COME PROVARE CHE I NEUTRINI SOLARI OSCILLANO?

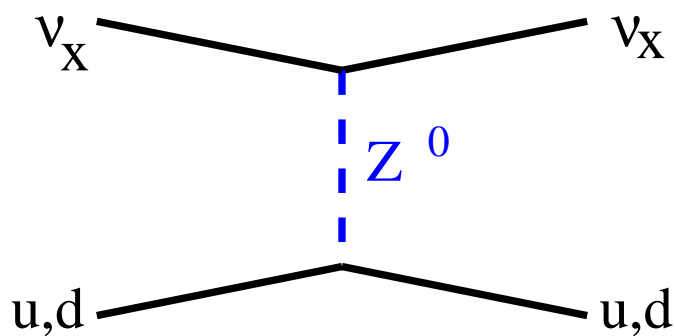
I rivelatori radiochimici e Super-Kamiokande sono solo sensibili ai ν_e .

Ma se i ν_e oscillano in ν_μ o in ν_τ , si dovrebbe cercare reazioni sensibili anche a ν_μ e a ν_τ .

◆ Correnti Neutre (NC) su nucleoni.

$$\nu_x + n \rightarrow n + \nu_x$$

Tutte le specie: ν_e, ν_μ, ν_τ .

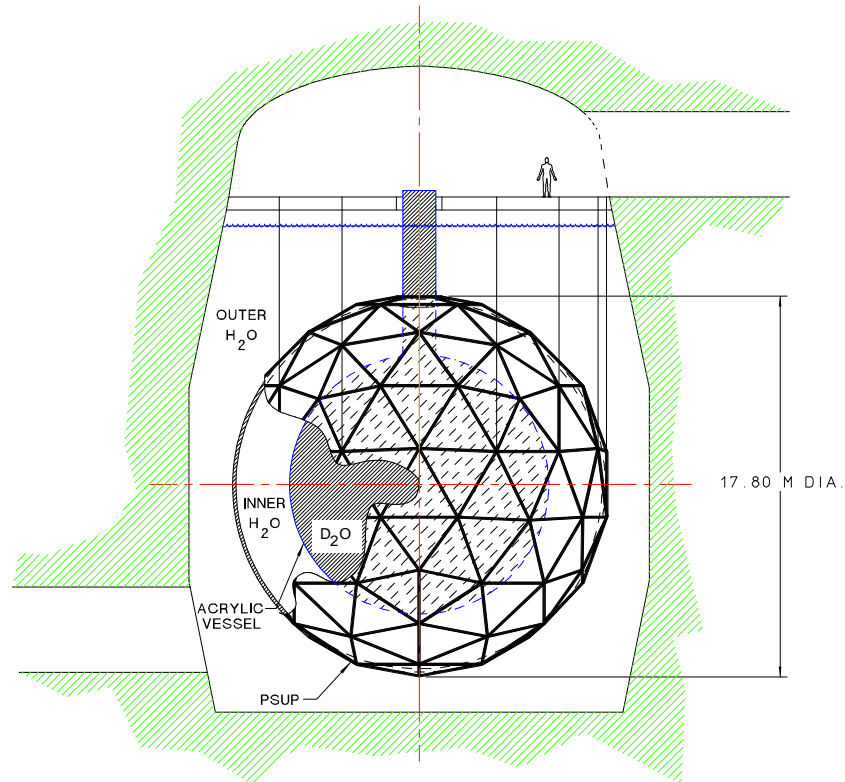


NC su nucleoni: trascurabili in ACQUA (H_2O):
Soli neutroni nell'acqua son quelli dell'ossigeno.
Ossigeno fortemente legato (>15 MeV).

Però in ACQUA PESANTE (D_2O):
Neutroni anche nel DEUTERIO
e per il deuterio bastano 2 MeV.

SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY (SNO)

2 km sotto terra in una miniera in Canada.
1000 ton. d' ACQUA PESANTE (D_2O).
9522 fototubi.



L'esperimento può misurare **SEPARATAMENTE**:

- ❖ Diffusione Elastica su elettroni,
- ❖ Correnti Cariche su nucleoni
- ❖ Correnti Neutre su nucleoni

I NEUTRINI SOLARI OSCILLANO: LA PROVA.

RISULTATO

- ❖ Flusso previsto dal SSM:

$$5.05 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

- ❖ Flusso misurato dalle Correnti Cariche su nucleoni:
(solo ν_e):

$$\phi_{SNO}^{CC}(\nu_e) = (1.76 \pm 0.11) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} :$$

Manca il 60%, come i altri esperimenti.

- ❖ Flusso misurato dalle Correnti Neutre su nucleoni:
(tutte le specie):

$$\phi_{SNO}^{CC}(\nu_{e,\mu,\tau}) = (5.09 \pm 0.64) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

NON MANCA NIENTE !!.

Il SSM **NON** è sbagliato: **NON** mancano Neutrini.

E solo che i Neutrini non sono più TUTTI ν_e .

2/3 hanno oscillato

e hanno cambiato IDENTITÀ:

sono diventati ν_μ e ν_τ .

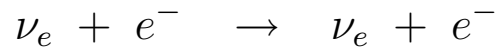
Con i parametri d'oscillazioni:

$$\sin^2 2\theta = 0.75 \text{ e } \Delta m^2 = 5.0 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

BOREXINO

Nel tunnel del Gran Sasso.

300 ton. di Scintillatore (più sensibile che l'acqua).

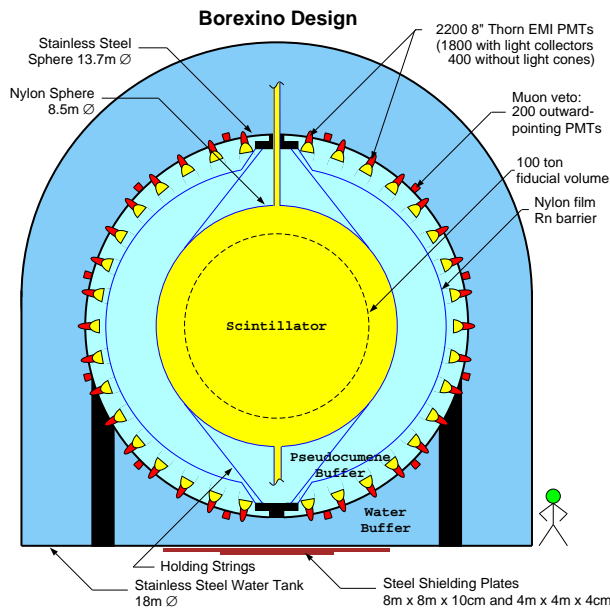


Come Super-Kamiokande

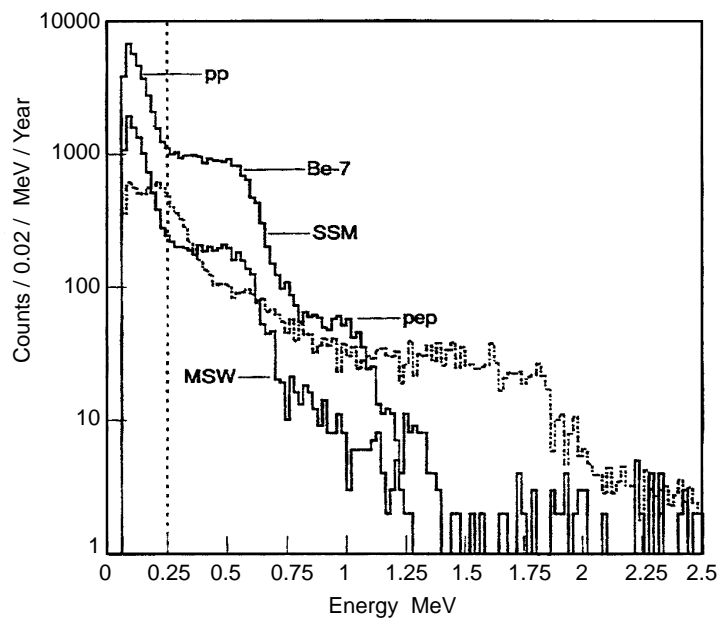
Ma con una soglia di 250 keV invece di 4 MeV.

Dunque sensibile ai neutrini del berillio.

Presi dati nel 2003.

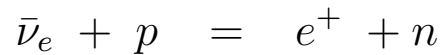


DISTORSIONI
della
distribuzione
d'energia
55 eventi/giorno
SENZA
oscillazioni.
↓
12/eventi/giorno
CON oscillazioni
(LMA).



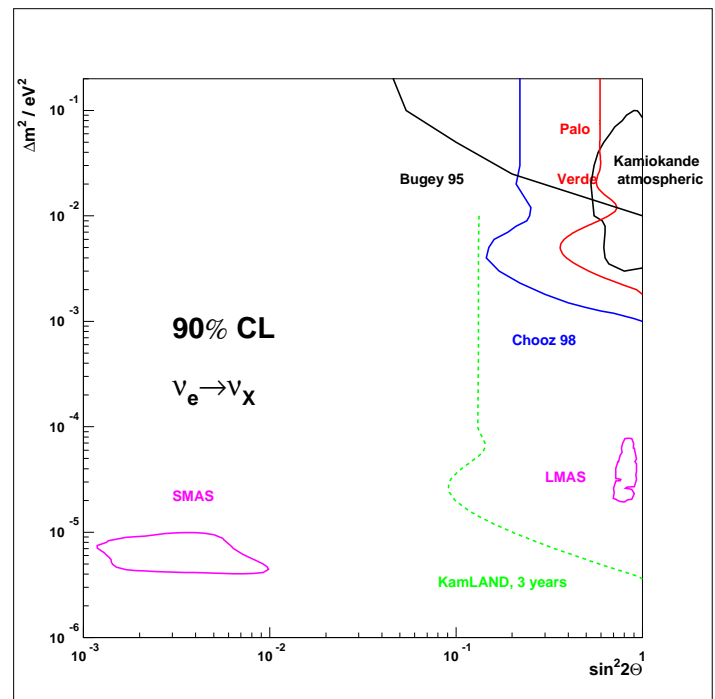
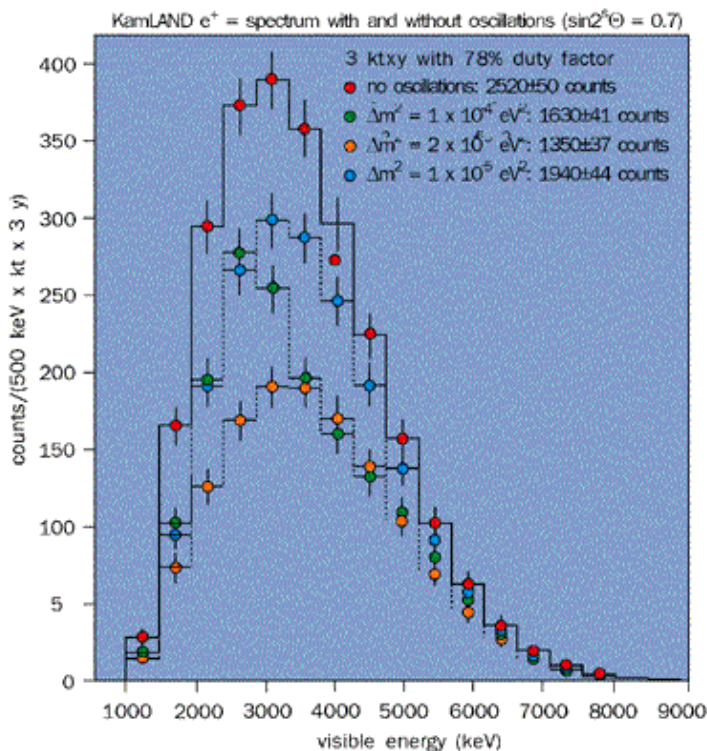
KAMioka Liquid scintillator ANtineutrino Detector

Conferma che la “**SCOMPARRA**” dei neutrini solari
 sia proprio dovuta ad oscillazioni,
 usando **ANTINEUTRINI** prodotti da reattori nucleari
 a 140-200 km di un rivelatore
 localizzato nella miniera di KAMIOKA.



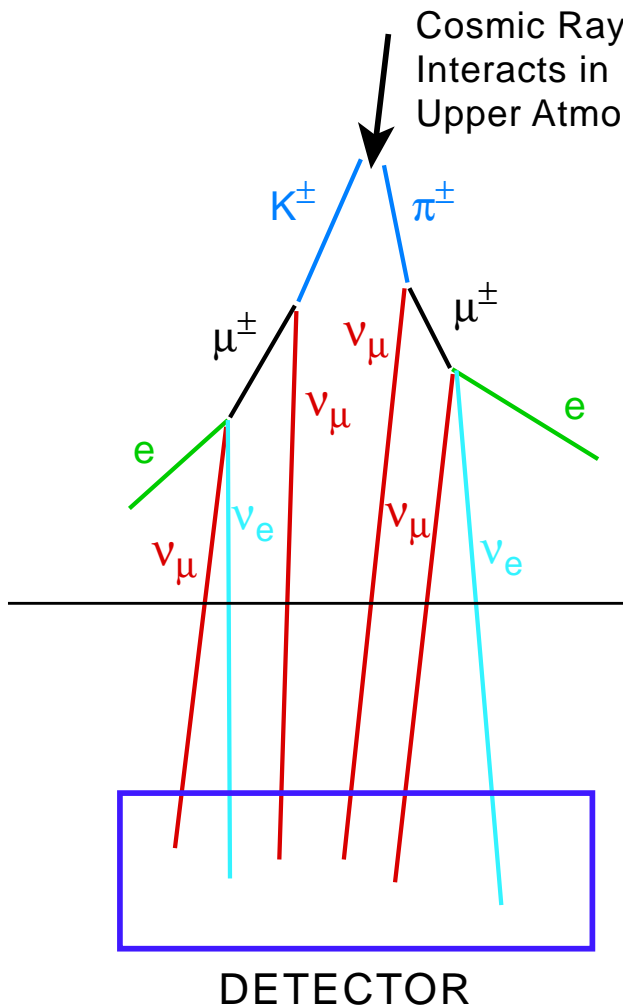
È la LMA la SOLUZIONE?

Cambia la FORMA della distribuzione in energia degli
 ANTINEUTRINI.



NEUTRINI ATMOSFERICI.

COSA SONO ?



- ❖ Raggi cosmici interagiscono nell'Alta Atmosfera.
- ❖ Producono π e K .
- ❖ $\pi, K \rightarrow \mu + \nu_\mu$.
- ❖ $\mu \rightarrow e + \nu_\mu + \nu_e$.
- ❖ RISULTATO: $2\nu_\mu + 1\nu_e$

E DUNQUE CI ASPETTIAMO:

$$R = N(\nu_\mu)/N(\nu_e) \sim 2$$

INVECE SI MISURA UN RAPORTO $R = 1$.



ANOMALIA

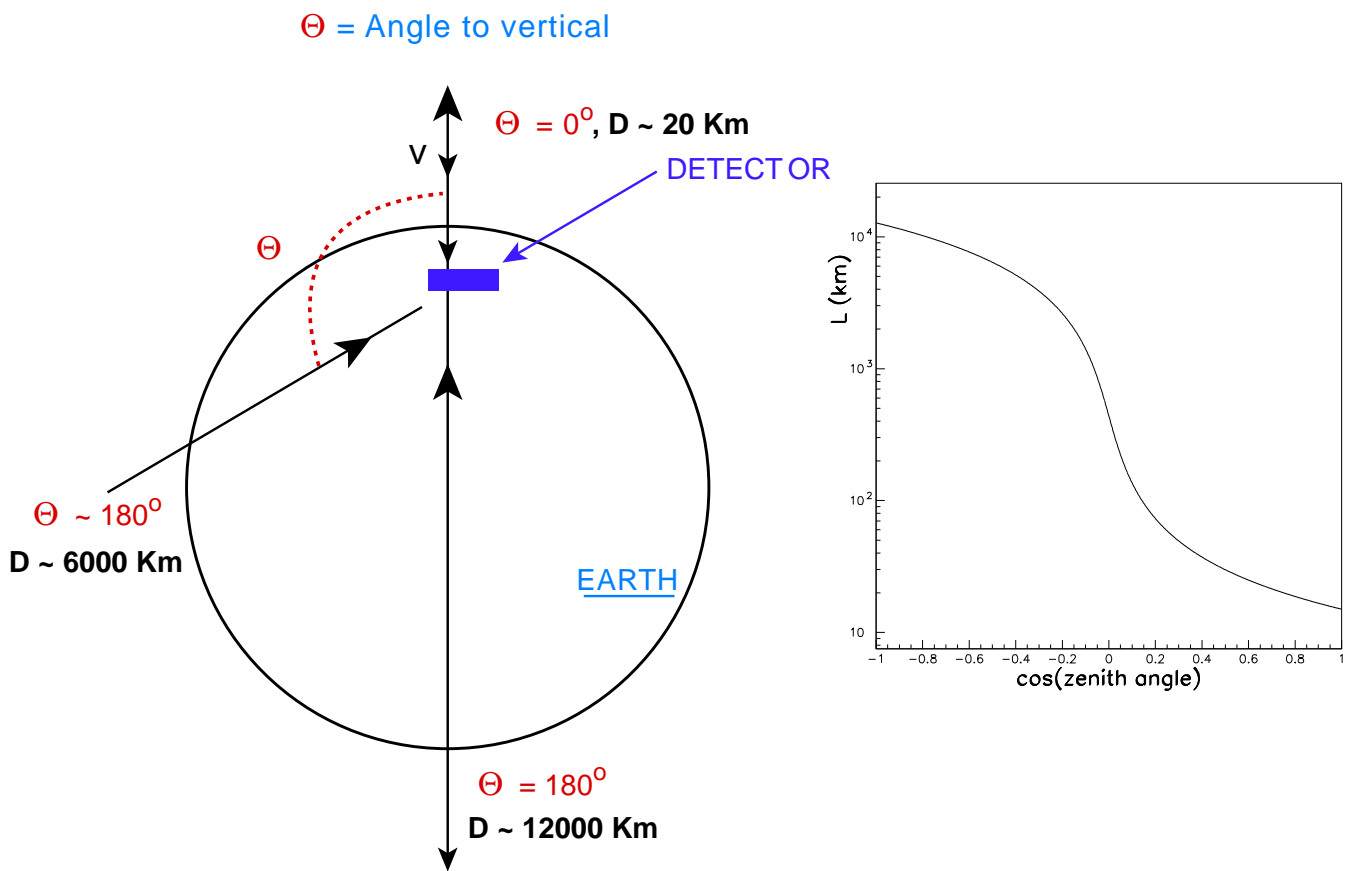
DIPENDENZA dall' ANGOLO DI ZENITH

DIREZIONE del NEUTRINO Angolo di Zenith: Θ .

MOLTO IMPORTANTE: Direttamente legato a L , il percorso del NEUTRINO:

Distanza tra i punti di produzione e di rivelazione del neutrino.

- ◆ Neutrini provenienti dall'ALTO: $L \sim 15\text{km}$, $\Theta = 0^\circ$
- ◆ Neutrini provenienti dal BASSO: $L \sim 12500\text{km}$, $\Theta = 180^\circ$,



“FASCI” IDENTICI PRODOTTI A VARI L .

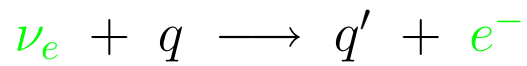
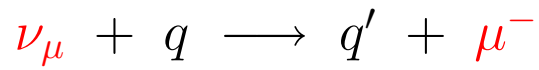


Studiare la DIPENDENZA di $N(\nu_\mu)$ e di $N(\nu_e)$ dalla DISTANZA L .

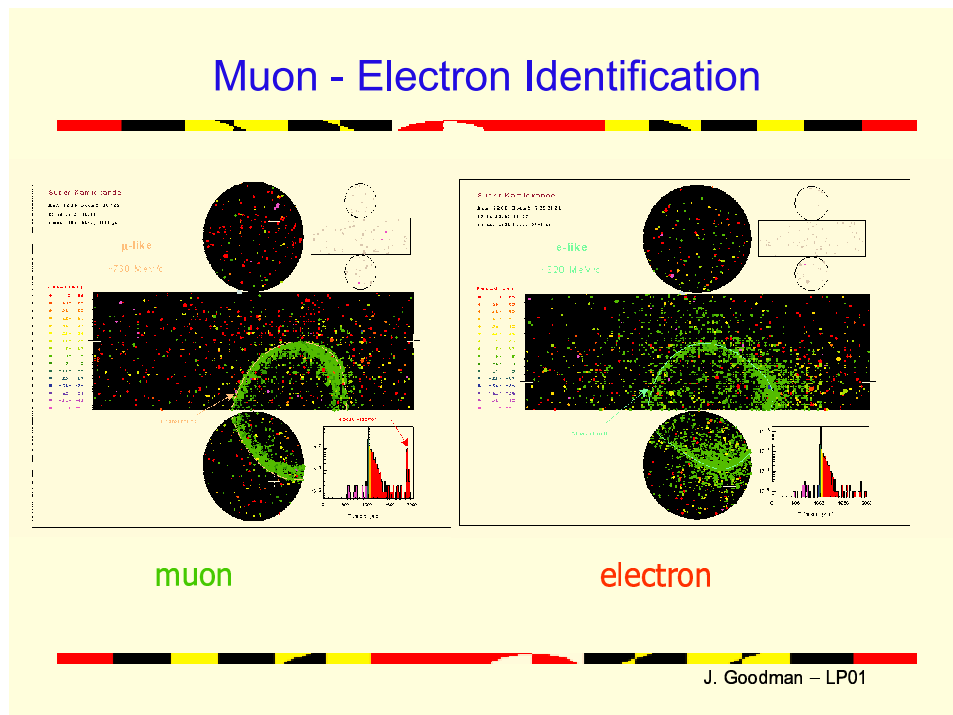
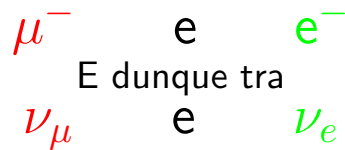
$$P = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{L}{E} \Delta m^2\right)$$

SUPER-KAMIOKANDE IDENTIFICAZIONE ELETTRONE/MUONE

I Neutrini Atmosferici si studiano osservando
le loro Interazioni **CARICHE**

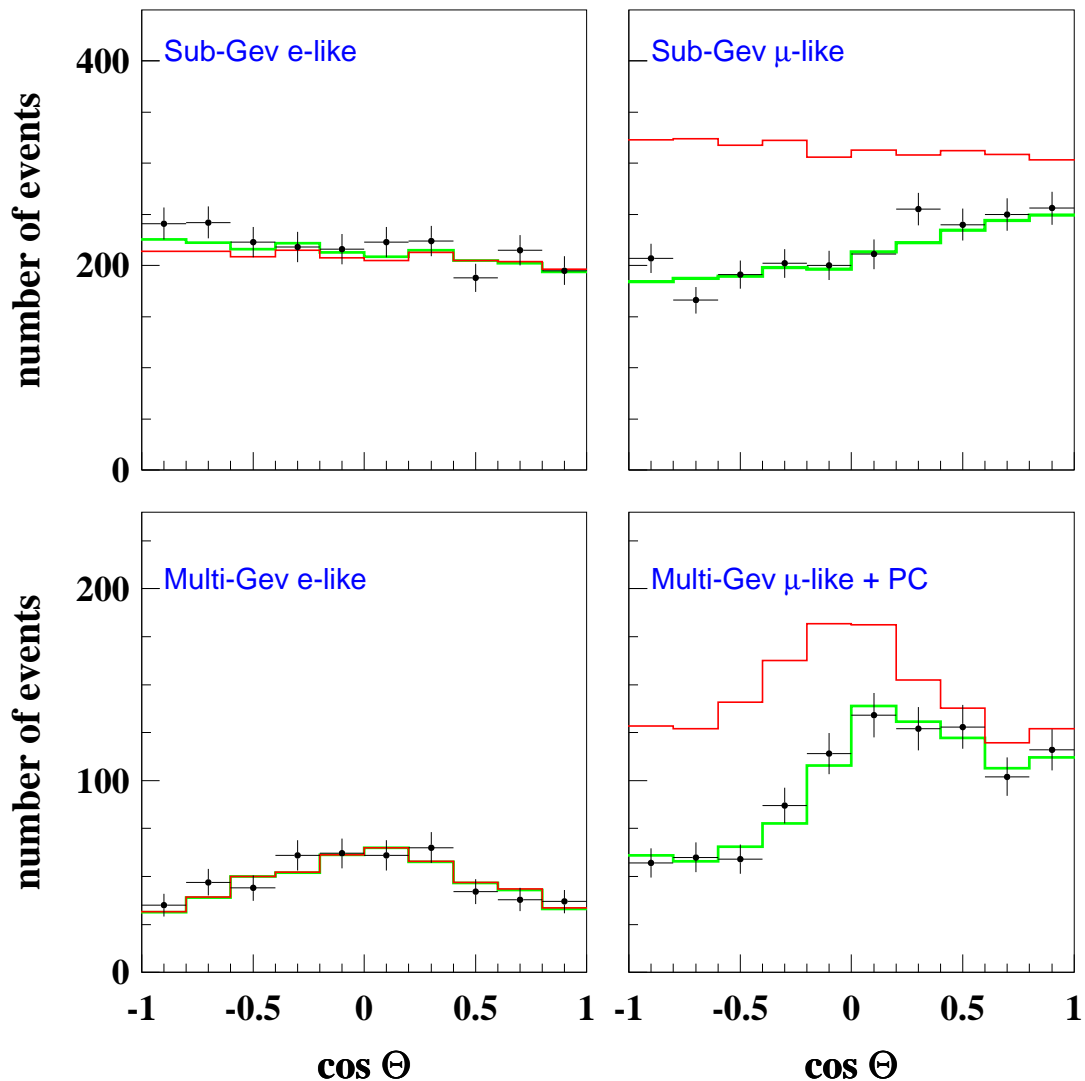


Il rivelatore di Super-Kamiokande può distinguere tra



SUPER-K: DIPENDENZA dall' ANGOLO DI ZENITH

Super-Kamiokande 990days(FC,PC) Preliminary



I ν_e SONO IN ACCORDO CON LA PREVISIONE
SENZA OSCILLAZIONI.

MENTRE I ν_μ SONO SOPPRESSI,
E SONO IN ACCORDO CON UNA PREVISIONE
TENENDO CONTO D'OSCILLAZIONI.

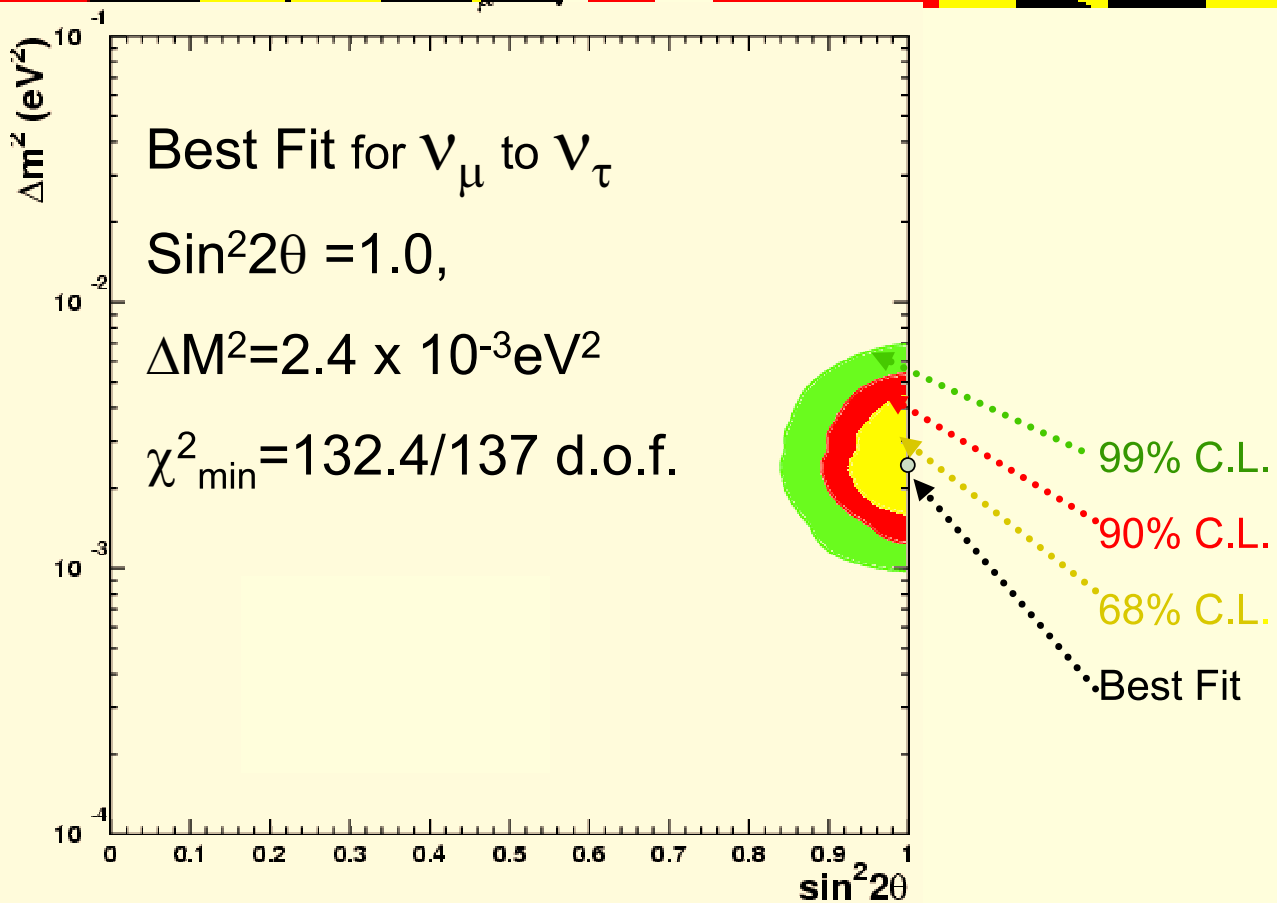
L'ANOMALIA PROVIENE DAI ν_μ

SUPER-K: RISULTATI

DAL LIVELLO E DALLA FORMA DELLA SOPPRESSIONIONE
SI PUÒ DEDURRE

$$\Delta m^2 \text{ E } \sin^2 2\theta.$$

Summary of Atmospheric Results



J. Goodman – LP01

COSA RIMANE DA CONTROLLARE?

I ν_μ spariscono.

I. Sono proprio oscillazioni che causano la scomparsa di ν_μ ?
E non semplicemente un problema di comprensione dei raggi cosmici?

II. In che tipo di neutrino oscillano i ν_μ ?

TRE possibilità:

- ❖ $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$. Escluso da Super-Kamiokande.
Non si vede un **ECCESSO** di ν_e .
- ❖ $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$
- ❖ $\nu_\mu \rightarrow \nu_s$. Un **"NUOVO"** NEUTRINO.

È dunque necessario studiare i ν_μ in
condizioni **"CONTROLLATE"**



Fascio di ν_μ prodotto con **ACCELERATORI**



Conferma delle oscillazioni, e dell'ipotesi $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

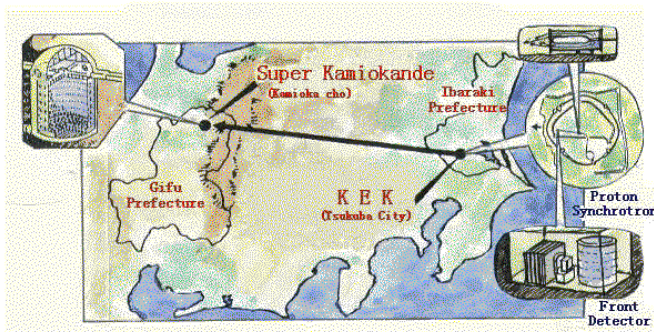
$$P = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{L}{E} \Delta m^2\right)$$

- ❖ Se $\Delta m^2 \sim 10^{-3} eV^2$
Per avere oscillazioni non trascurabili $\rightarrow \frac{L}{E} \sim 10^3$
Per energie del $\nu_\mu \sim 1 \text{ GeV} \rightarrow L \sim 1000 \text{ km}$



Una **LUNGA BASE-LINE**

ESPERIMENTI DI LUNGA BASE-LINE (FASCI DI ν_μ).



K2K

GIAPPONE

KEK → KAMIOKA

Distanza = 250 km

Rivelatori:

VICINO e LONTANO.

SCOMPARSA.

SCOPO: **CONFERMARE:**

oscillazioni sono l'origine della scomparsa dei ν_μ .



NUMI: MINOS

USA

Fermilab → SOUDAN

Distanza = 732 km

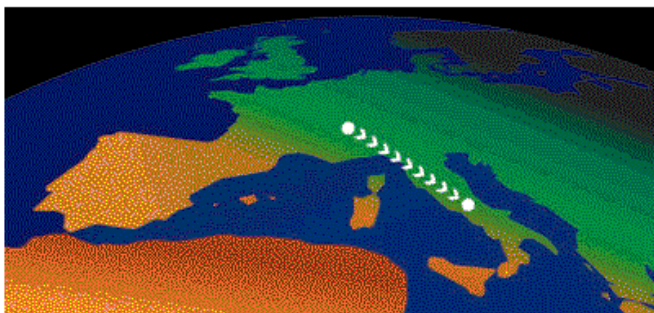
Rivelatori:

VICINO e LONTANO.

SCOMPARSA.

SCOPO: **MISURARE:**

i parametri dell'oscillazione.



CNGS: ICARUS, OPERA

ITALIA

CERN → GRAN SASSO

Distanza = 732 km

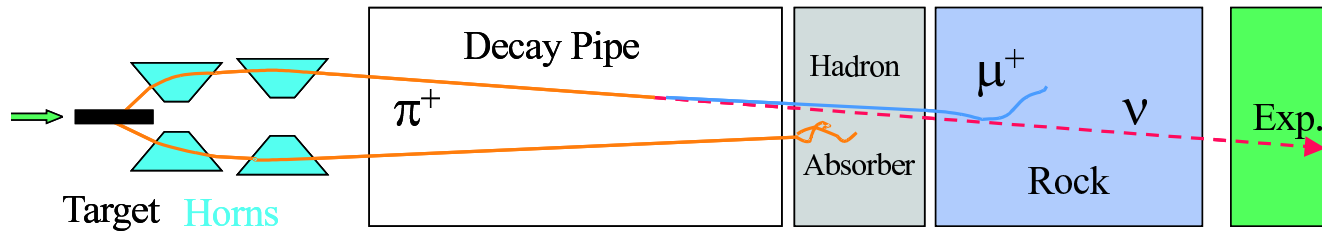
Rivelatore: LONTANO.

APPARIZIONE.

SCOPO: **STABILIRE**

ν_μ oscillano in ν_τ 's.

"RICETTA" PER PRODURRE UN FASCIO DI ν ?



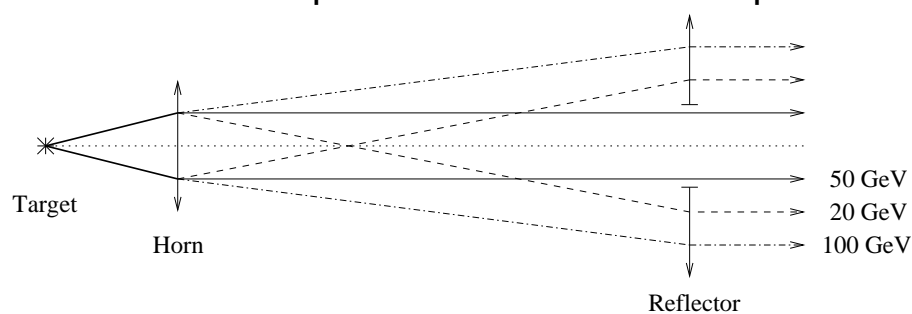
PRINCIPIO

- ◆ Accelerare i protoni ad alta energia (al CERN: 400 GeV).
 $\sim 3 \times 10^{13}$ ogni 1-15 secondi.
- ◆ Estrarli **RAPIDAMENTE**: \sim 1-20 microsecondi.
- ◆ Farli interagire in un bersaglio abbastanza spesso affinché $>90\%$ interagiscono.
- ◆ Interazioni producono mesoni π, K .
- ◆ Puntare i mesoni verso il rivelatore.
- ◆ Lasciarli decadere ($\rightarrow \nu_\mu + \mu$).
- ◆ Schermare tutte le particelle (adroni e muoni), tranne i ν_μ .

DUE CORNI (LENTI MAGNETICHE) DI FOCALIZZAZIONE.

Annullano la componente **TRASVERSA** dell'impulso delle particelle cariche.

- ❖ Simmetria cilindrica.
- ❖ Conduttore esterno cilindrico, Conduttore interno.
- ❖ La corrente, **I kA** (~ 200 kA) attraversa il conduttore interno, e ritorna lungo il conduttore esterno. E impulsato in coincidenza col passaggio del fascio.
- ❖ Campo magnetico: $B(\text{Tesla}) = 0.2 \times \frac{I(\text{kA})}{R(\text{mm})}$
- ❖ Con un conduttore interno **PARABOLICO**, la lunghezza di **B** attraversato da mesoni entranti nel corno a vari raggi (**R**), è tale di produrre all'uscita del corno un fascio parallelo.
- ❖ Un **SECONDO** corno permette di focalizzare più mesoni.

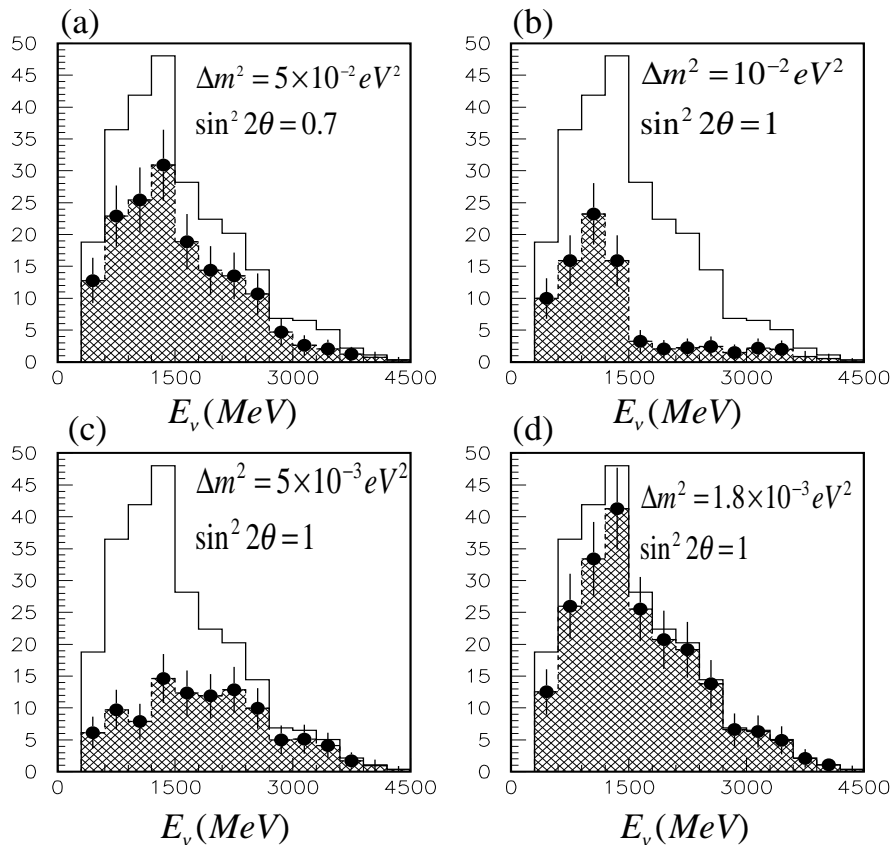


- ❖ Secondo il **SEGNO** del campo magnetico, si può scegliere di focalizzare:
 - Mesoni positivi $\rightarrow \nu_{\mu}$.
 - Mesoni negativi $\rightarrow \bar{\nu}_{\mu}$.

ESPERIMENTI DI SCOMPARSA: COME FARLI ?

SEGNALE:

- ❖ MANCANZA di eventi,
- ❖ DISTORSIONE della loro distribuzione in energia.
- ❖ Dalla FORMA della DISTORSIONE $\rightarrow \sin^2 2\theta, \Delta m^2$



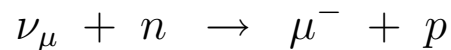
Se si osserva una DISTORSIONE, prima di attribuirlo a oscillazioni, bisogna essere sicuri di conoscere esattamente il flusso e la distribuzione in energia del fascio SENZA oscillazioni.

Si deve dunque MISURARE questa distribuzione PRIMA che i neutrini abbiano la possibilità di OSCILLARE.

Queste misure si fanno in un rivelatore VICINO alla sorgente di neutrini: \rightarrow 100-1000 metri.

SCOMPARSA DI ν_μ IN K2K

- ❖ Fascio di ν_μ prodotto a KEK.
- ❖ Interazioni dei neutrini osservati:
 - nel rivelatore **Super-Kamiokande**, distante di 250km.
 - e anche in un rivelatore **vicino** alla sorgente.
- ❖ Eventi con un MUONE



- ❖ Calcolare l'energia E_ν del neutrino incidente usando E_μ e θ_μ

$$E_\nu = \frac{m_N - m_\mu^2/2}{m_N - E_\mu + p_\mu \cos\theta_\mu}$$

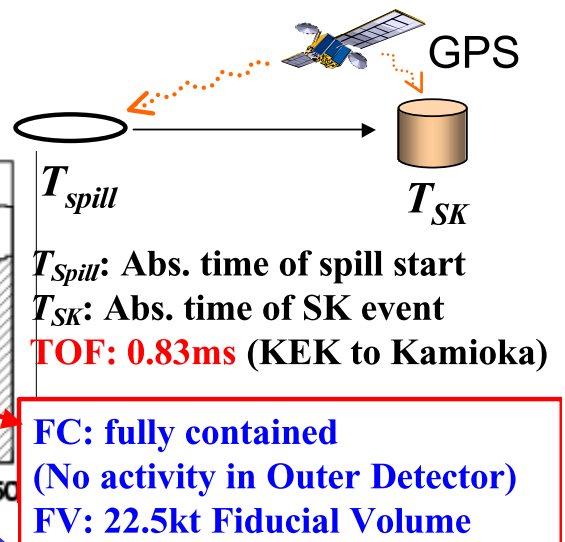
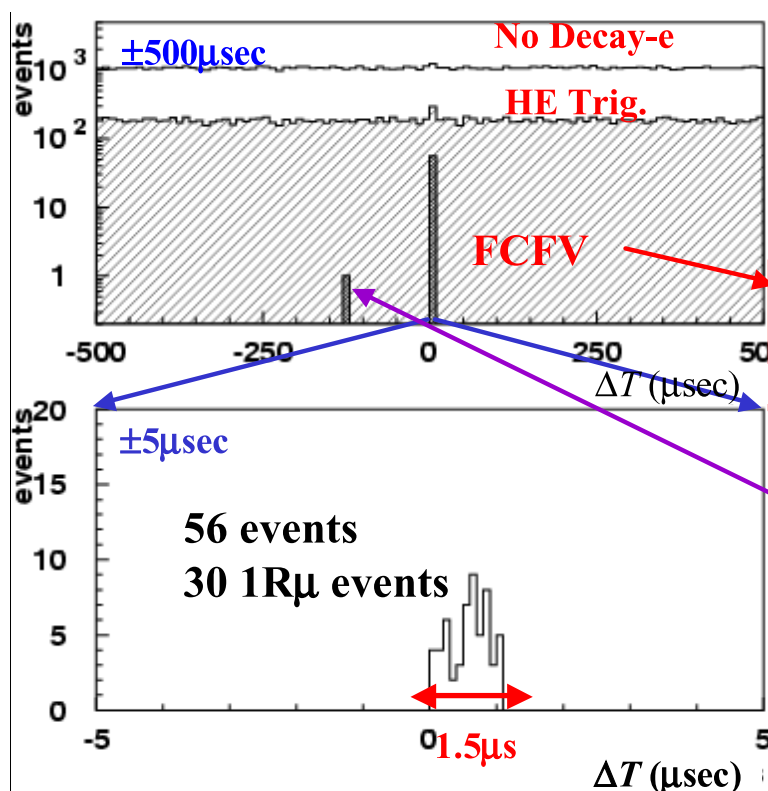
- ❖ **DIFFERENZE** tra le distribuzioni misurate nei due rivelatori: VICINO e LONTANO ?

DATI DI K2K.

- ◆ Il fascio di neutrini è prodotto a KEK ogni 2 secondi.
- ◆ A una larghezza temporale di $1.5 \mu s$.
- ◆ Il tempo di volo (TOF) tra KEK e Super-Kamiokande è di 0.83 ms.
- ◆ Eventi dovuti al fascio di neutrini proveniente da KEK devono essere in coincidenza col tempo di arrivo del fascio.

Super-K Event selection

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



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

11

Quando si impone che, negli eventi, non ci siano tracce entranti

dall'esterno (raggi cosmici), rimangono **57** eventi di cui **56** sono in **COINCIDENZA** col tempo di arrivo del fascio.

Senza oscillazioni erano previsti **81** eventi.

RISULTATI di K2K

57 eventi non sono dovuti a RAGGI COSMICI.

56 sono IN TEMPO col passaggio del fascio.

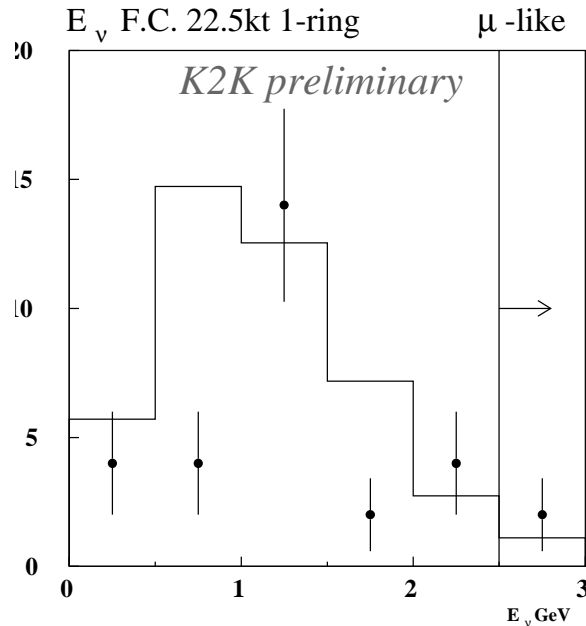
Dei 56 eventi 30 sono della categoria μ :

$$\nu_{\mu} + n \rightarrow \mu^{-} + p$$

Categoria	Osservati	Senza Oscillazioni	Oscillazioni ($5.0 \times 10^{-3} eV^2$)	Oscillazioni ($3.0 \times 10^{-3} eV^2$)
μ	30	44.0 ± 6.8	14.6 ± 2.4	24.3 ± 4.0

Calcolo dell'energia dei 30 neutrini:

$$E_{\nu} = \frac{m_N - m_{\mu}^2/2}{m_N - E_{\mu} + p_{\mu} \cos \theta_{\mu}}$$



MANCANZA di eventi e DISTORSIONE dello spettro



OSCILLAZIONI

CONFRONTO K2K-SK.

Parametri calcolati da K2K:

$$\sin^2 2\theta = 1.0, \quad \Delta m^2 = 2.8 \times 10^{-3} eV^2$$

Includendo le incertezze nelle misure:

$$\Delta m^2 = 1.5 \sim 3.9 \times 10^{-3} eV^2$$

I valori ottenuti da Super-K con Neutrini **ATMOSFERICI**:

$$\Delta m^2 = 2.4 \times 10^{-3} eV^2$$

I valori dei parametri dell'oscillazione ottenuti da K2K usando un **FASCIO** di neutrini sono in **OTTIMO** accordo con quelli ottenuti da Super-Kamiokande usando **Neutrini ATMOSFERICI**.

La SCOMPARSA di ν_μ ATMOSFERICI

È proprio dovuta a OSCILLAZIONI.

Rimane da confermare che l'oscillazione è

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$

LE MASSE DEI NEUTRINI.

Con **3** autostati di massa, ν_1, ν_2, ν_3

Sono possibili **2** differenze di massa

$$\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2 \quad \text{e} \quad \Delta m_{23}^2 = m_2^2 - m_3^2$$

Sembra che le abbiamo scoperte entrambe!

ANOMALIA
Neutrini **SOLARI**



Oscillazioni

$$\Delta m^2 = 5.0 \times 10^{-5} eV^2$$



$$\Delta m_{12}^2$$

ANOMALIA
Neutrini **ATMOSFERICI**

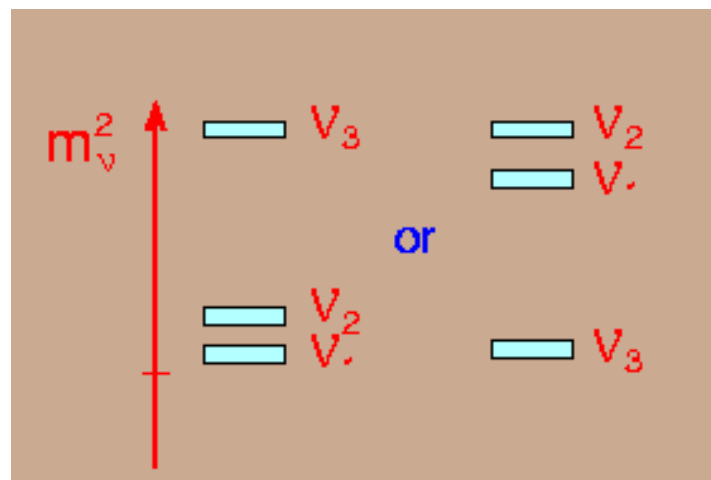


Oscillazioni

$$\Delta m^2 = 2.4 \times 10^{-3} eV^2$$



$$\Delta m_{23}^2$$



Scenario 1

Scenario 2

Il limite più piccolo sulla massa dei neutrini $\rightarrow M_{\nu_e} \leq 2.5 eV$

Le misure di Δm_{12}^2 e di Δm_{23}^2



Tutti i NEUTRINI hanno massa INFERIORE a 2.5 eV.

Per un secolo abbiamo pensato che la particella la più leggera era l'ELETTRONE con una massa di 511 000 eV

Abbiamo scoperto particelle **100 000** volte più leggere!

Lavoro per i teorici!!!

ESPERIMENTI AL GRAN SASSO

SCOPO: Dimostrare che la SCOMPARSA di ν_μ è dovuta all'oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

❖ Esperimenti di **APPARIZIONE**.

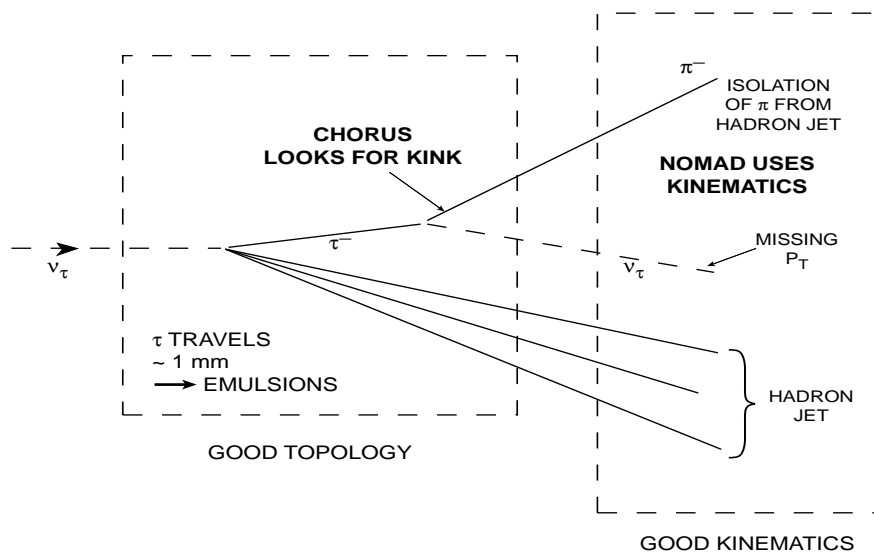
Il ν_τ è rivelato dalle sue interazioni con Correnti Cariche (CC)

$$\nu_\tau + N \longrightarrow \tau^- + X$$

Il τ^- è riconosciuto da i suoi

❖ **DECADIMENTI**

$$\tau^- \longrightarrow \begin{cases} e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau & 17.8\% \\ \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau & 17.4\% \\ h^- (n\pi^0) \nu_\tau & 49.8\% \\ \pi^- \pi^- \pi^+ (n\pi^0) \nu_\tau & 15.2\% \end{cases}$$

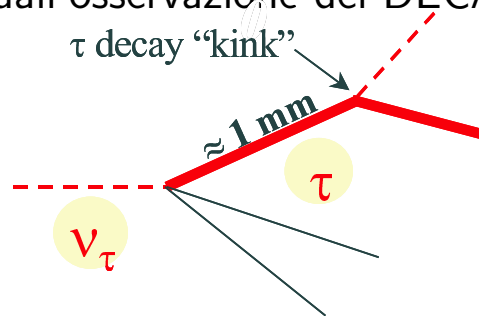


OPERA → **ANGOLO DI DECADIMENTO**.

ICARUS → **CRITERI CINEMATCI**

OPERA

RICERCA di eventi ν_τ .
IDENTIFICATI dall'osservazione dei DECADIMENTI del τ .



È necessario un rivelatore con un'OTTIMA risoluzione spaziale.

Lastre di EMULSIONE fotografica:

Risoluzione spaziale $\sim 1 \mu\text{m}$.

Effetto del passaggio di una particella carica = Effetto della luce.

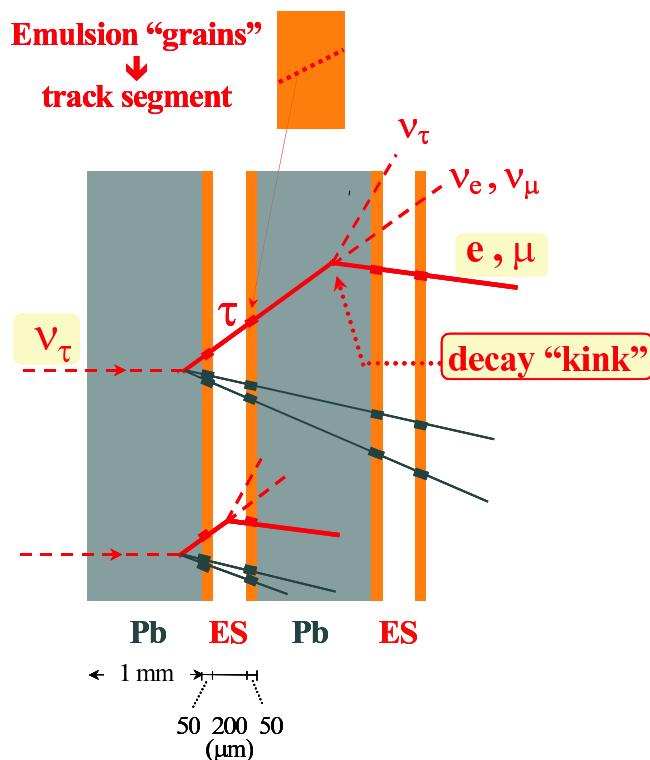
Dopo un evento \rightarrow Emulsione sviluppate \rightarrow Tracce misurate.

~ 2000 tonnellate: troppo caro usare solo emulsioni.

Invece sono INTERFOGLIATE con lastre di PIOMBO.

Neutrini interagiscono nel piombo.

Le traiettorie del τ e dei suoi prodotti di DECADIMENTO sono osservate nelle emulsioni.



$\tau \Rightarrow e, \mu, \text{adroni}$

1 CELLA

1mm Pb +

2 lastre d'emulsione

di $50 \mu\text{m}$

separate da un

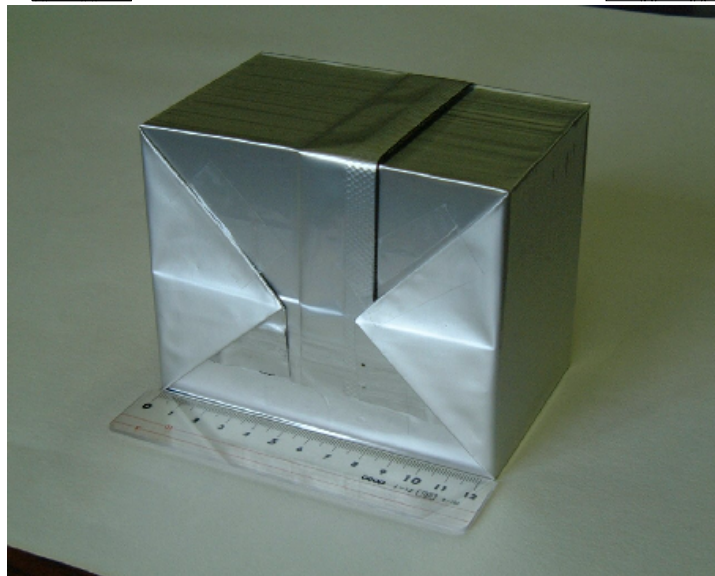
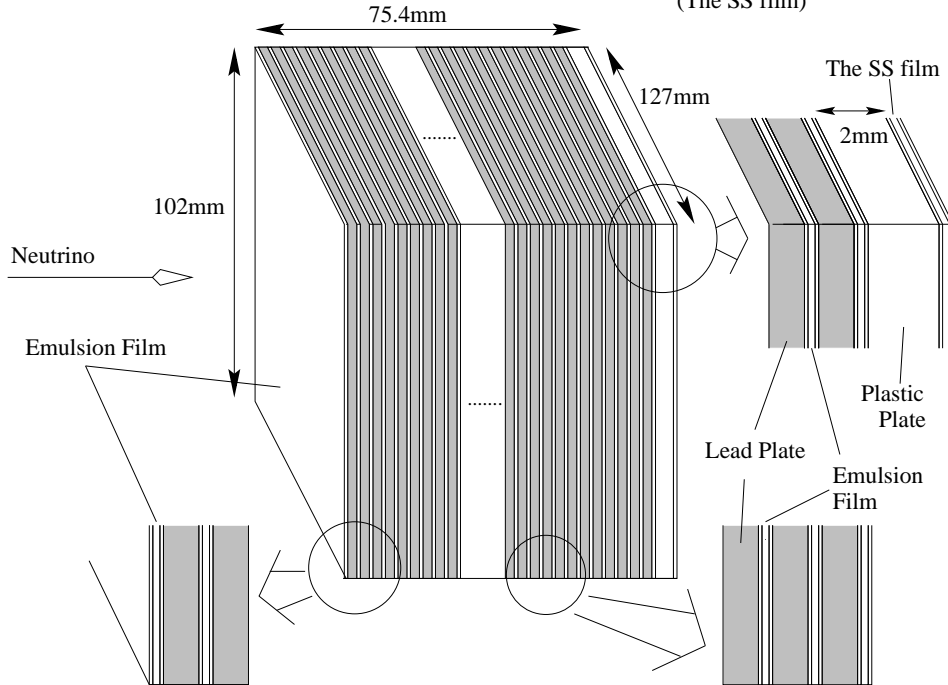
spacer di $200 \mu\text{m}$.

IL MATTONE DI OPERA

1 CELLA: 1mm Pb + 2 x 50 μ m lastre d'emulsione: 10x13 cm²

1 MATTONE: spesso 56 celle.

Emulsion Film + 56 (Lead + Emulsion Film) + Plastic plate + Emulsion Film
(The SS film)

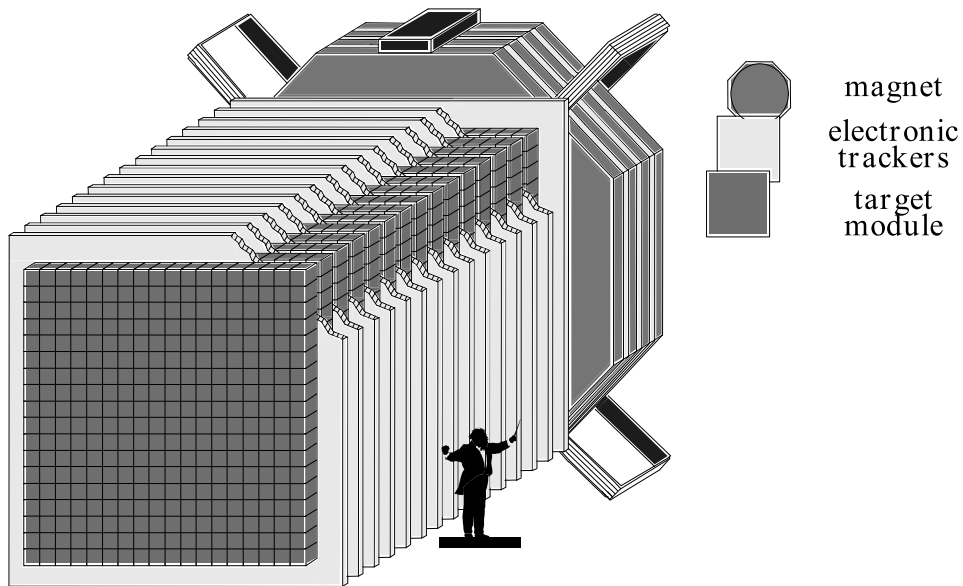


Impachettati in carta alluminizzata, vuoto e luce: ORIGAMI

Massa totale: 1800 ton. (206336 mattoni).



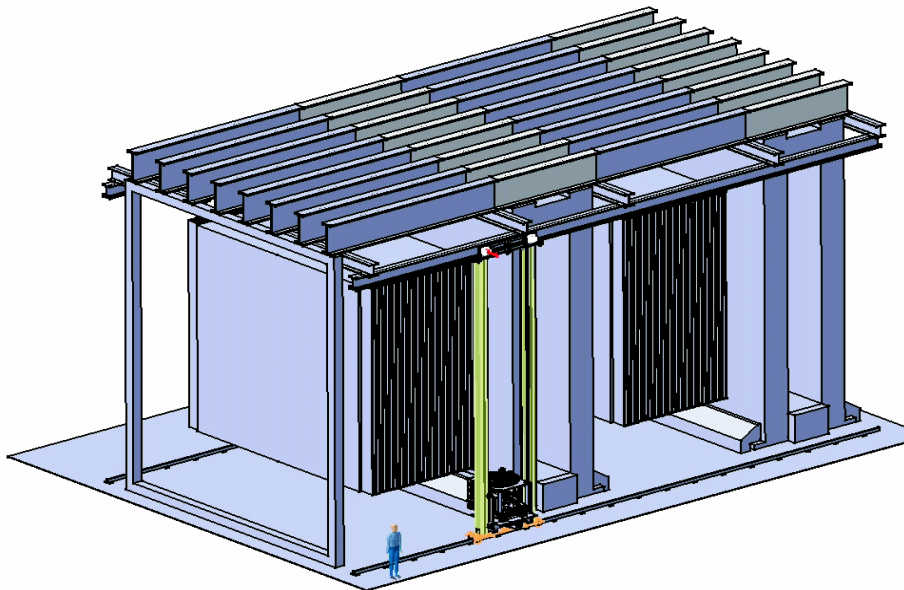
30 eventi ν_{μ} CC al giorno. Ma pochi ν_{τ} CC



1 MODULO: Muro di 3328 mattoni.

1 SUPER-MODULO 31 moduli + un MAGNETE

OPERA: 2 SUPER-MODULI.



Massa totale: 1800 ton. (206336 mattoni).

⇓
30 eventi al giorno

MISURA DELLE TRACCE NELLE EMULSIONI

- ❖ Evento.
- ❖ Mattone contenendo l'interazione è tolto.
- ❖ Lastre d'emulsione sono sviluppate.
- ❖ Tracce interessanti sono misurate con un microscopio.

Le lastre d'emulsioni sono PERPENDICOLARI al fascio



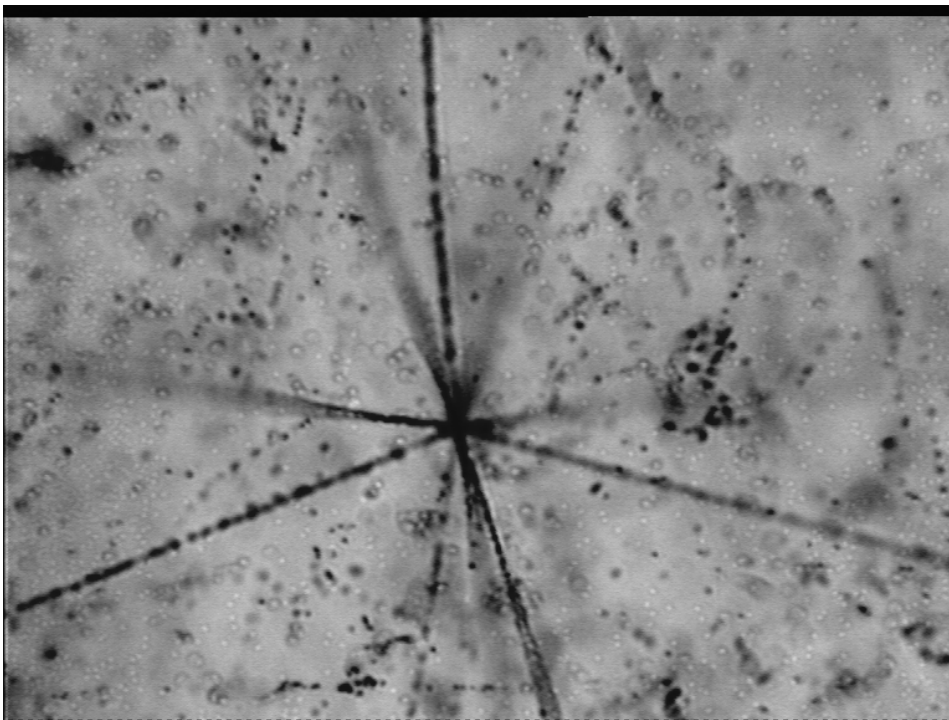
Le tracce interessanti appaiono come PUNTI



Per misurare la direzione di una traccia



Connettere i PUNTI in STRATI successivi di una lastra



Osservazione con un microscopio del vertice di un'interazione
($120\mu m \times 150\mu m$)

OPERA: SCOPERTA

In 5 anni: 2006-2010
(2.25×10^{20} protoni sul bersaglio)

Se la SCOMPARSA di ν_μ
È dovuta a $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

Per $\sin^2 2\theta = 1$ e $\Delta m^2 = 2.4 \times 10^{-3} eV^2$

Segnale	Fondo
10.8	0.46

POCHI eventi MA anche il fondo è PICCOLO.

ICARUS

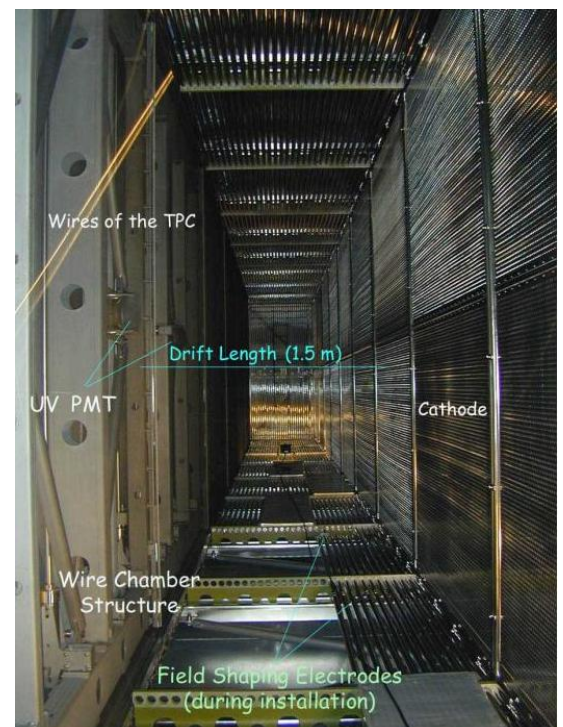
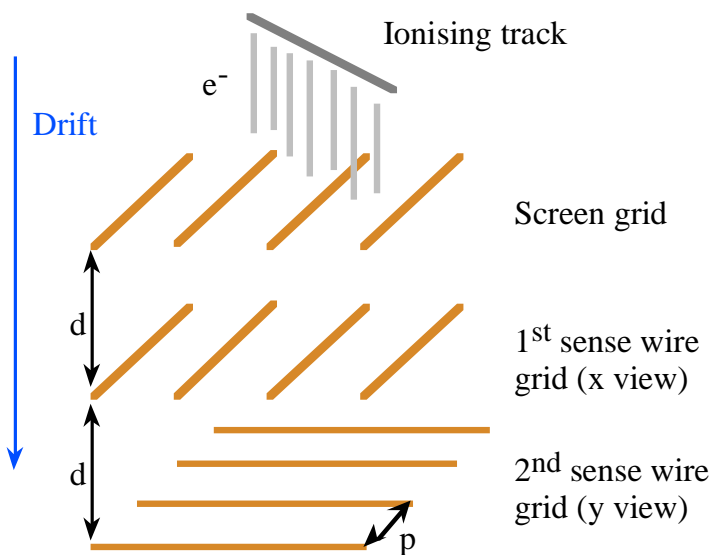
RICERCA di eventi ν_τ .
IDENTIFICATI CON CRITERI CINEMATICI

Necessita \sim kilotons

Uso di una Camera a Proiezione Temporale (TPC)

Come bersaglio per i neutrini
e anche per ricostruire i prodotti delle interazioni.

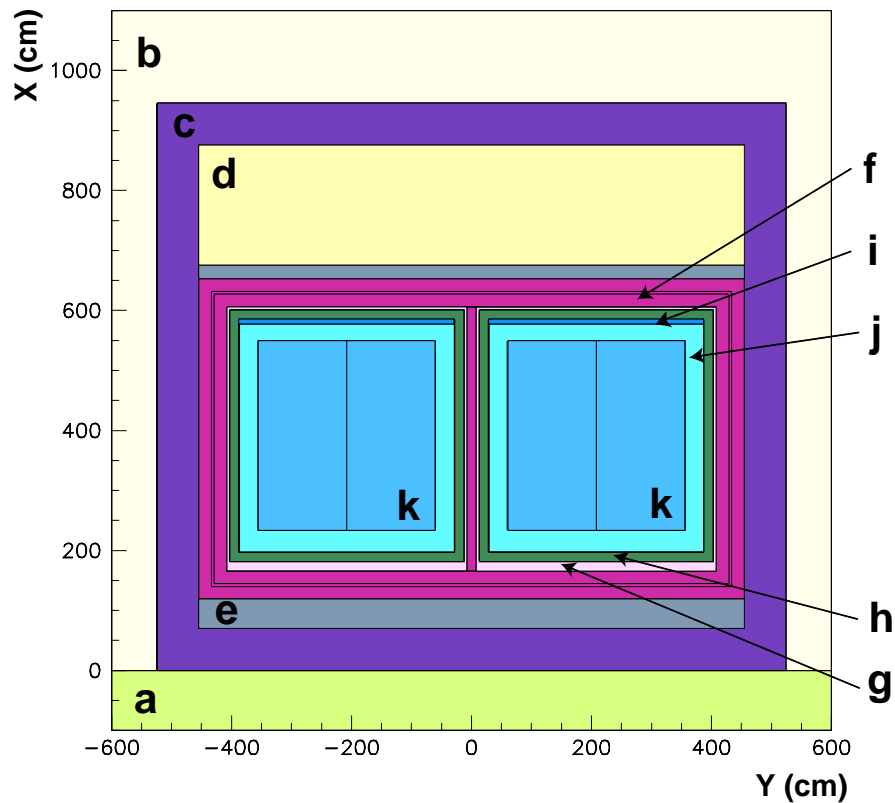
- ❖ Per avere abbastanza MASSA:
Reimpire la TPC con **ARGON liquido** $\rho = 1.4 \text{ gm.cm}^{-3}$.
- ❖ Le particelle cariche ionizzano l'argon, e gli elettroni prodotti **DERIVANO** lungo un campo elettrico, fino a elettrodi.
- ❖ I segnali sugli elettrodi danno la posizione e dunque la direzione della particella (x,y).
- ❖ Il tempo di deriva \Rightarrow posizione lungo il campo elettrico (z).



ICARUS MODULO DI 600 ton.

Ha funzionato a Pavia un modulo di **600 ton.**
DUE sub-moduli di **300 ton.**
Sarà spostato al GRAN SASSO.

ICARUS T600



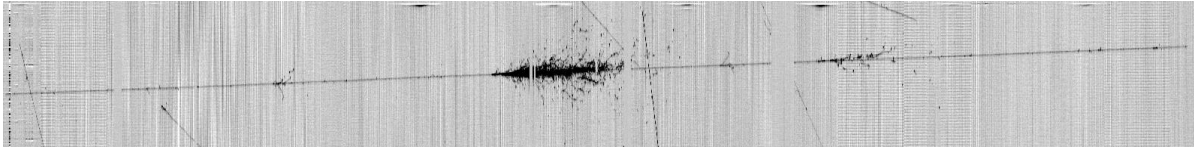
- | | |
|-----------------------|-----------------|
| a) rock | g) gap |
| b) hall B | h) container |
| c) neutron shield | i) gas phase Ar |
| d) cables-electronics | j) inactive LAr |
| e) platforms | k) active LAr |
| f) insulation | |

AI GRAN SASSO ICARUS metterà
CINQUE moduli di 600 ton.

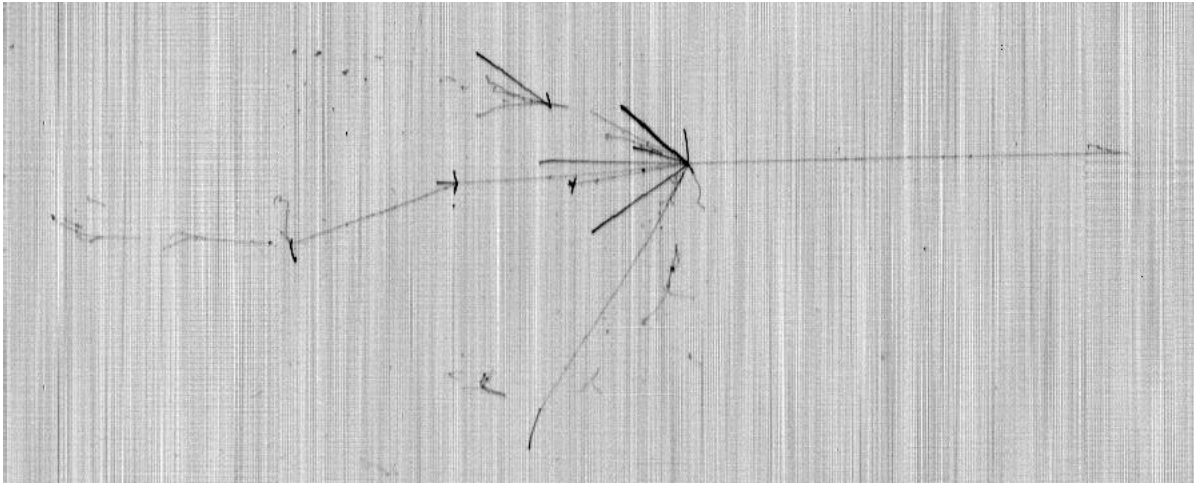
↓
3000 ton.

ICARUS: ESEMPI DI EVENTI

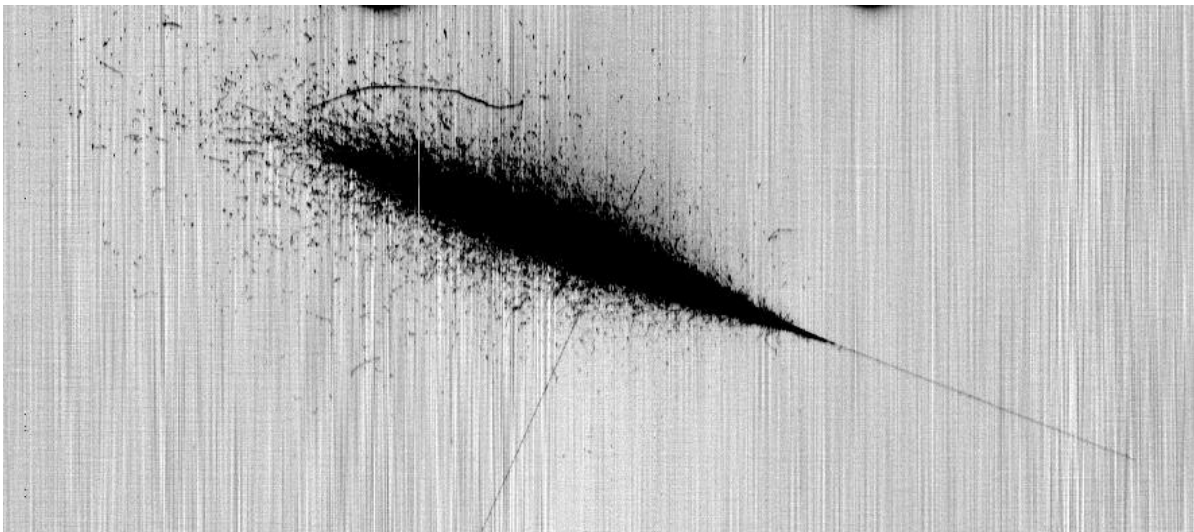
Traccia LUNGA di 18m



Interazione ADRONICA

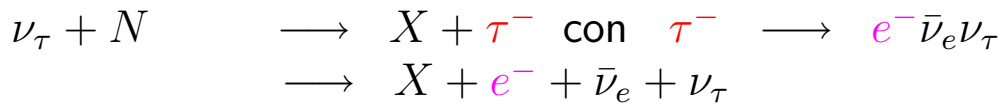


SCIAME



ICARUS ANALISI DEL $\tau^- \rightarrow e^- \nu_\tau \bar{\nu}_e$

II SEGNALE



ELIMINARE IL FONDO.

- ❖ **1 %** dei neutrini nel fascio NON sono ν_μ , invece sono ν_e
- ❖ $\nu_e + N \longrightarrow e^- + X$
- ❖ **ELETTRONI** negli eventi di segnale **MA ANCHE** negli eventi di fondo.
- ❖ Nel SEGNALE ci sono 2 NEUTRINI nello stato finale. E questi dunque non vengono misurati.
- ❖ Nel FONDO TUTTE le particelle vengono misurate.
- ❖ Per sfruttare questa differenza, analizzare gli eventi **nel PIANO TRASVERSO AL FASCIO**
- ❖ In questo piano la componente dell'impulso del neutrino incidente è **ZERO**.
- ❖ Dunque, la somma dell'impulso trasverso di tutte le particelle prodotte nell'interazione deve anche essere **ZERO** (Conservazione dell'impulso).
- ❖ Per il FONDO, misurando tutte le particelle, la somma sarà **~ZERO**.
- ❖ Per il SEGNALE, poiché non si misurano i 2 NEUTRINI, l'impulso sarà sbilanciato e la somma **≠ ZERO**.
- ❖ Imporre che la somma **≠ ZERO** permetterà di eliminare il FONDO.

ICARUS: RISULTATI

Segnale 2.5×10^{-3}	Fondo
11.9	0.7

Anche in ICARUS:
POCHI eventi MA il fondo è anche PICCOLO.
Inizio presa dati: 2006.

ICARUS può anche studiare neutrini atmosferici e solari.

IL FUTURO.

- ❖ Misurare le differenze di masse con più **PRECISIONE**
- ❖ Determinare se $M_{\nu_3} > M_{\nu_1}, M_{\nu_2}$ o vice versa.
- ❖ Misurare le **MASSE** e non solo le loro differenze.
- ❖ Determinare se i parametri dell'oscillazione dei **NEUTRINI**
sono uguali
a quelli dell'oscillazione degli **ANTINEUTRINI**.

COSMOLOGIA e ASTRONOMIA (Neutrini usati come strumenti di studio)

- ❖ Dei neutrini sono emessi durante l'esplosione di una **SUPER-NOVA**
12 eventi sono stati osservati per SN1987A con i piccoli rivelatori dell'epoca.
Oggi abbiamo rivelatori molto più grandi.
- ❖ Neutrini di altissima energia provenienti da.....???
Non sono deflessi da campi magnetici.
Rivelatori di grandissima massa nel mare e nel ghiaccio del Polo Sud sono in preparazione.

CONCLUSIONE

Abbiamo fatto molti passi in avanti
ma rimangono **TANTE SCOPERTE** e **MOLTO LAVORO**
da fare coi **NEUTRINI**.