

Breve rassegna sulla fisica del neutrino

Cosa sono i neutrini ? Come si misurano?
Cosa possiamo imparare ?

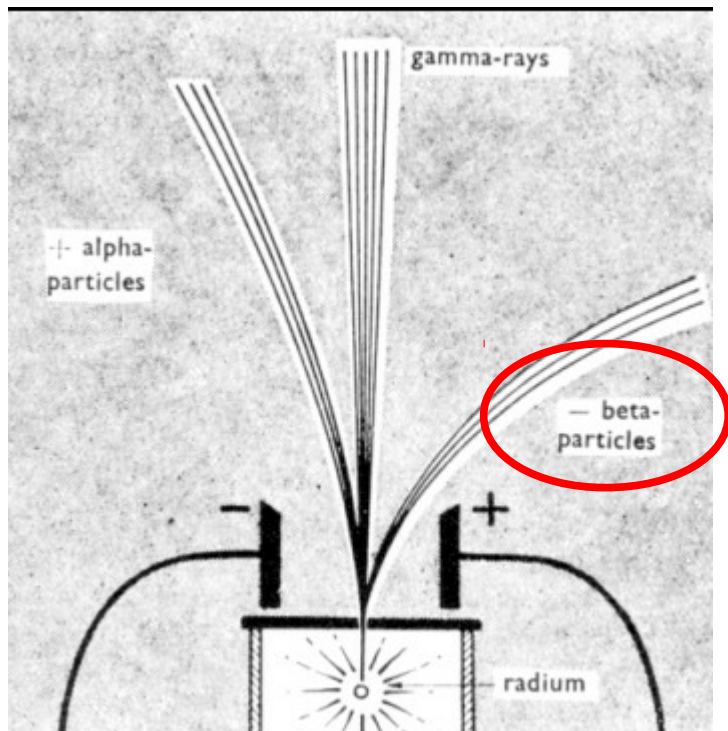
Andrea Longhin



Stages estivi per gli studenti delle scuole superiori

**INFN Laboratori Nazionali di Frascati
14 Giugno 2012**

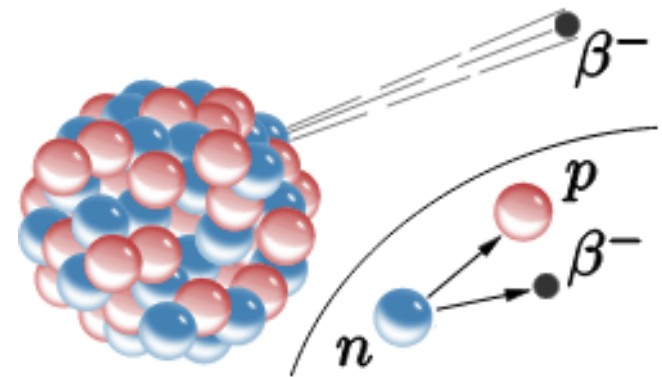
Radioattività: il decadimento β



un nucleo decade con emissione di un elettrone o di un positrone:



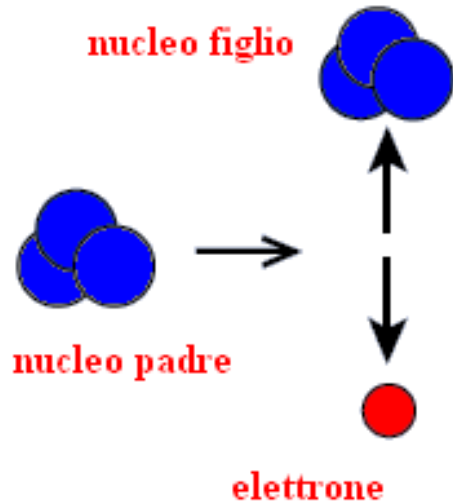
oppure



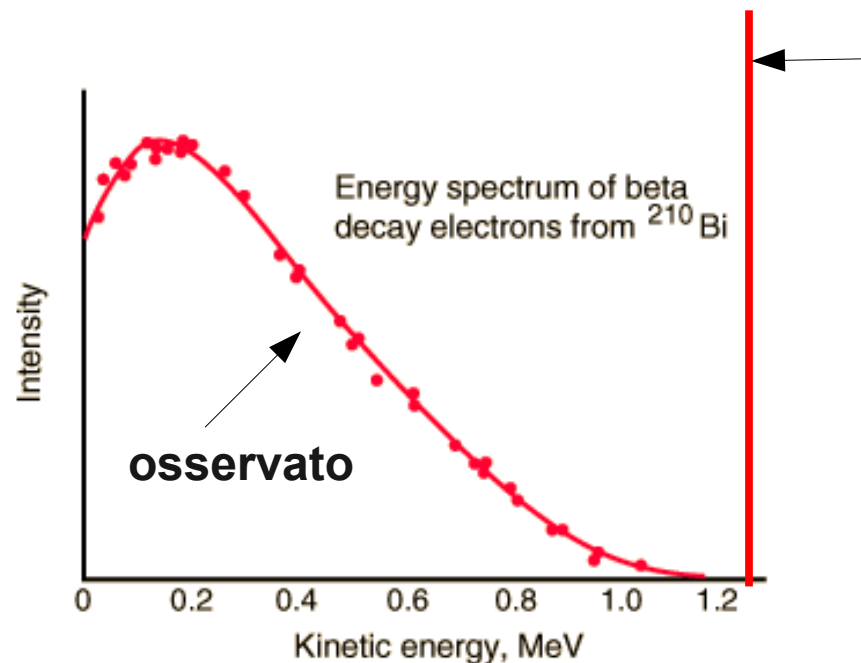
I processi all'interno del nucleo sono rispettivamente:



Il decadimento β : I conti non tornano, un attore mancante ?



Inizialmente si lavorava nell'ipotesi (piu' semplice) che il decadimento avvenisse con due corpi nello stato finale ...



Atteso in presenza di 2 corpi nello stato finale

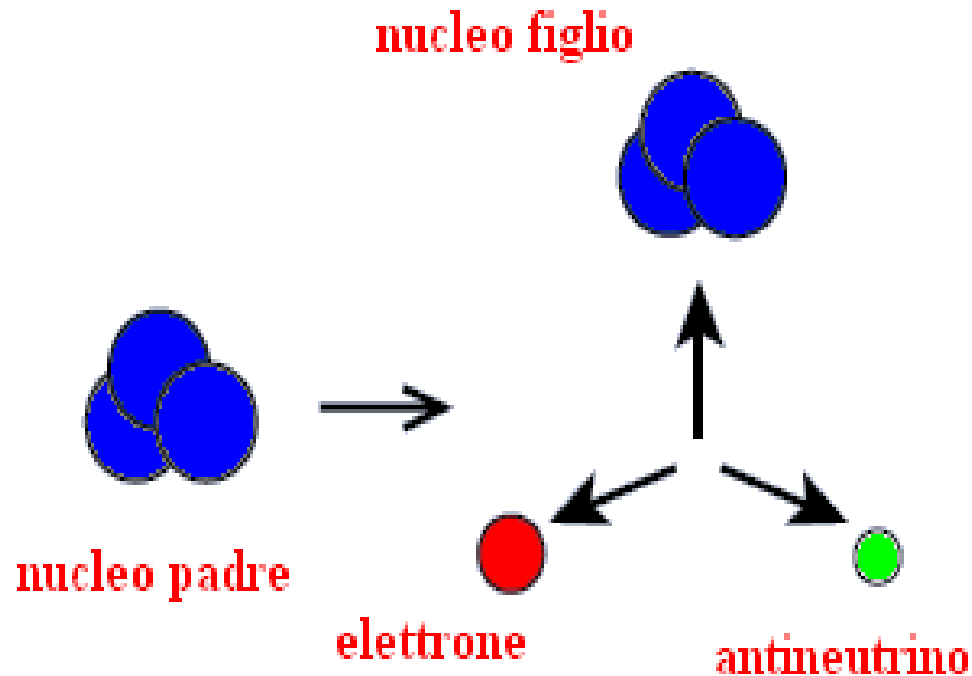
... ma questo era **in contrasto con i risultati sperimentali**, che mostravano come l'elettrone **non fosse monoenergetico**

Il decadimento β : l'ipotesi di Pauli



Pauli ipotizzò che il decadimento producesse **tre corpi** nello stato finale, uno dei quali è **una particella che non interagisce con il rivelatore**.

Deve essere pertanto **neutra** e di **piccola massa** (il punto finale dello spettro dell'elettrone è circa uguale all'energia che dovrebbe avere nel caso di decadimento a due corpi).



Un “disperato rimedio”

NB. Pauli li chiama neutroni. Nella terminologia moderna i neutroni (scoperti nel '32) sono i componenti dei nuclei assieme ai protoni.

W.Pauli il 4/12/1930 ai partecipanti al congresso di Tubinga *Liebe Radioaktive Damen und Herren,*

Cari Signore e Signori Radioattivi, a causa dello spettro continuo del decadimento beta, ho pensato a un possibile disperato rimedio per salvare le statistiche e il principio di conservazione dell'energia. Si tratta della possibilità che esista nel nucleo una particella elettricamente neutra, che chiamerò neutrone, con spin $1/2$, che rispetti il principio di esclusione, ma che sia diversa dai fotoni, in quanto non viaggia alla velocità della luce. La massa del neutrone dovrebbe essere simile a quella dell'elettrone e comunque non maggiore dell' 1% della massa del protone. Potremmo così spiegare lo spettro continuo assumendo che nel decadimento beta è emesso un neutrone assieme all'elettrone in maniera tale che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone sia costante...



Concordo sul fatto che tale rimedio possa sembrare incredibile poiché avremmo già dovuto osservare tali neutroni...

... Sfortunatamente non potrò raccontarvi personalmente le mie idee a Tubinga in quanto dovrò restare qui a Zurigo a causa di una festa da ballo la notte tra il 6 e il 7 Dicembre...

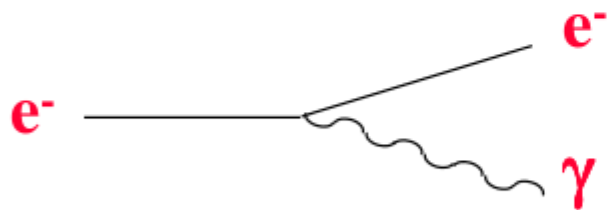
Anche I fisici hanno una vita sociale ?!

Il "Neutrino"

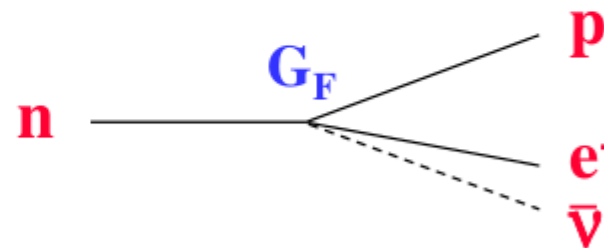
Oltre a coniare il nome successivamente Fermi (1934) ideò il primo modello teorico delle "interazioni deboli".



Sunto - Si propone una teoria quantitativa dell'emissione dei raggi β in cui si ammette l'esistenza del "neutrino" e si tratta l'emissione degli elettroni e dei neutrini da un nucleo all'atto della disintegrazione β con un procedimento simile a quello seguito nella teoria dell'irradiazione per descrivere l'emissione di un quanto di luce da un atomo eccitato. Vengono dedotte delle formule per la vita media e per la forma dello spettro continuo dei raggi β , e le si confrontano con i dati sperimentali.



**Interazione
Elettro-Magnetica**



Interazione Debole

con probabilità proporzionale a G_F^2
(molto più piccola che per interazioni e.m.)

Le Interazioni Fondamentali

negli anni '70
Unificazione
Elettro-Debole

	Mediatori	Intensità relativa
Forte (nucleare)	gluoni	1
Elettro-Magnetica	γ	10^{-2}
Debole	$W^{\pm}, Z^0$	10^{-6}
Gravitazionale	?	10^{-40}

... agiscono su

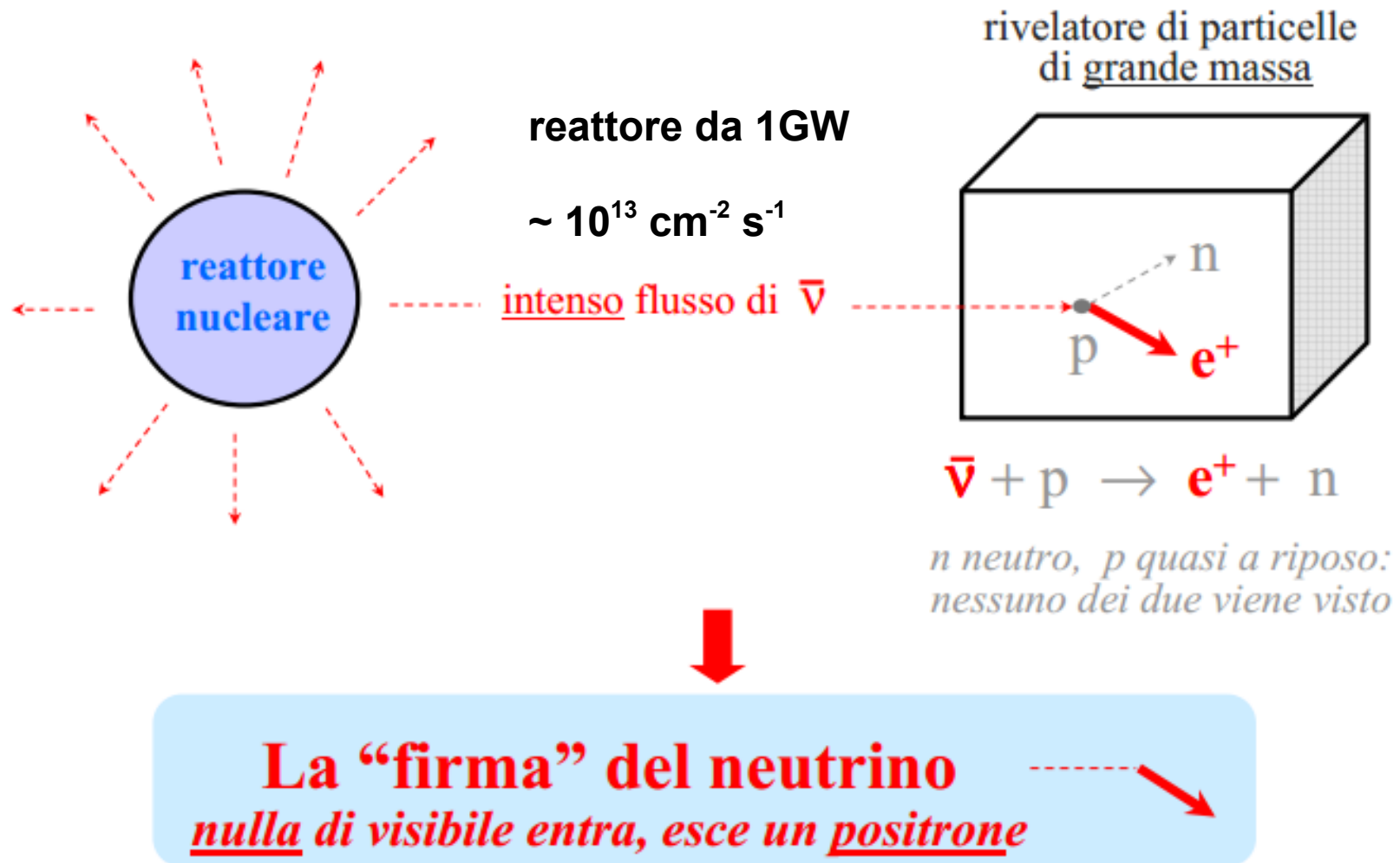
Quarks	Forte (+ e.m. + Debole)
e^{-}, μ^{-}, τ^{-}	e.m. (+ Debole)
Neutrini	<u>Debole</u>

Interazioni puramente deboli dei neutrini



Prima conferma sperimentale dell'Unificazione "Elettro-Debole" (CERN 1973)
poi coronata dall'osservazione di $W^{\pm}$ e Z^0 (CERN 1983)

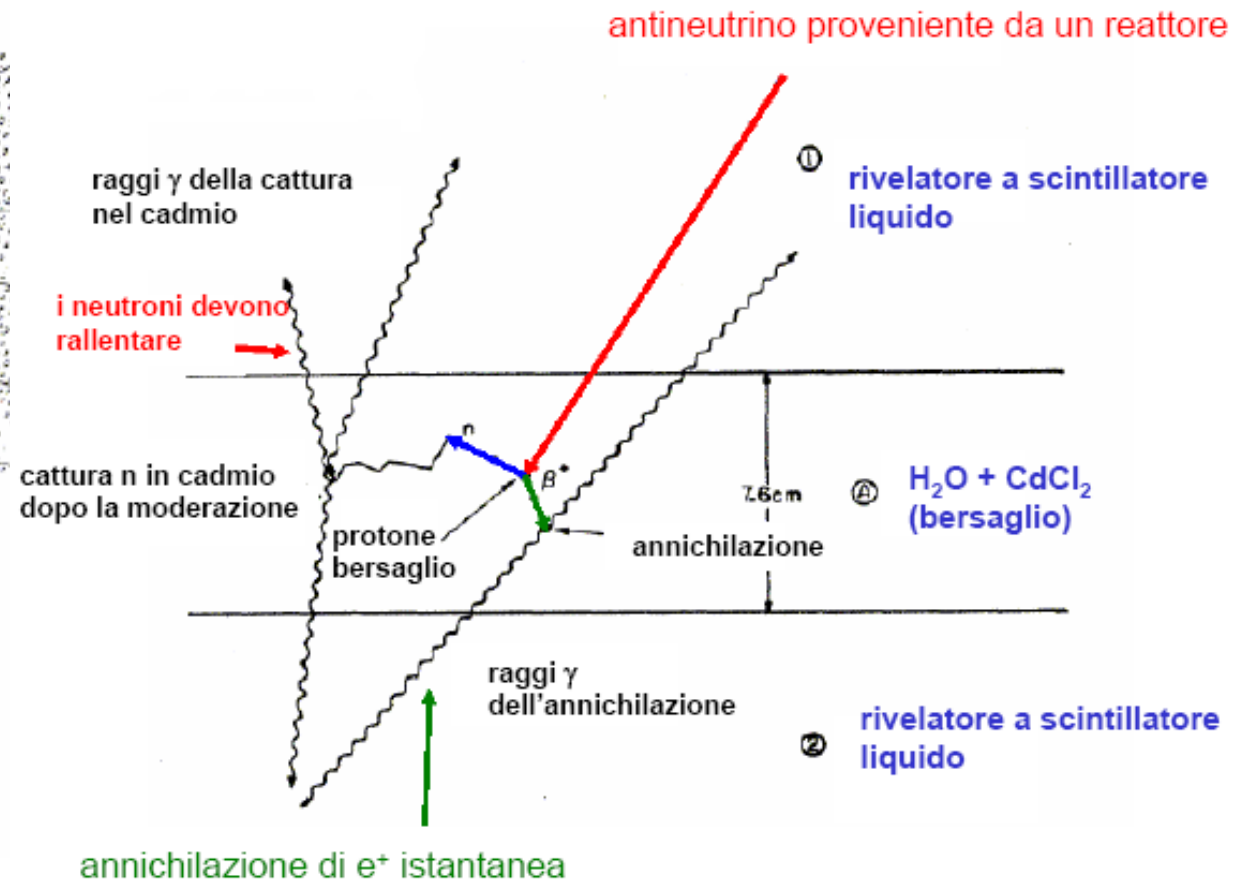
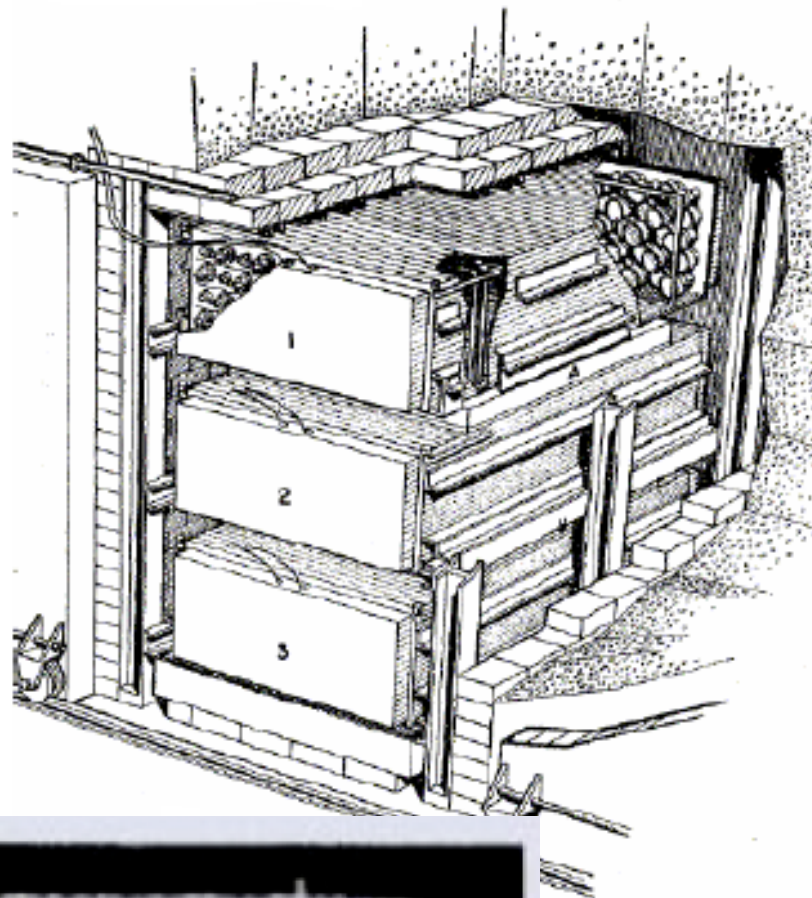
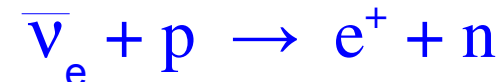
Una particella ... elusiva !



- Sola **interazione debole**: attraversano “indisturbati” la materia
- Il **cammino libero medio** di un ν di bassa E e' $\sim$ **migliaio di anni luce di Pb** ($10^{16}/10^{17}$ m!)
- Piu' sono energetici e piu' interagiscono
- Gli esperimenti con i neutrini sono “difficili”: richiedono **tempi lunghi e grossi rivelatori**

L'osservazione del neutrino (26 anni dopo Pauli!)

Reines e Cowan nel **1956** dimostrarono l'esistenza del neutrino osservando il flusso di anti-neutrini prodotti dalla fissione dell'Uranio in un reattore nucleare tramite il processo:

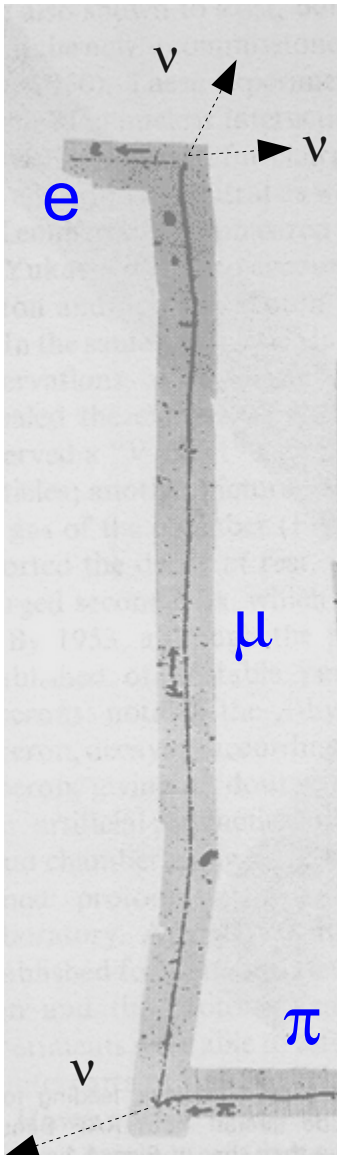


Il numero di interazioni osservate per unita' di tempo erano compatibili con le previsioni della teoria (~3 eventi/ora)

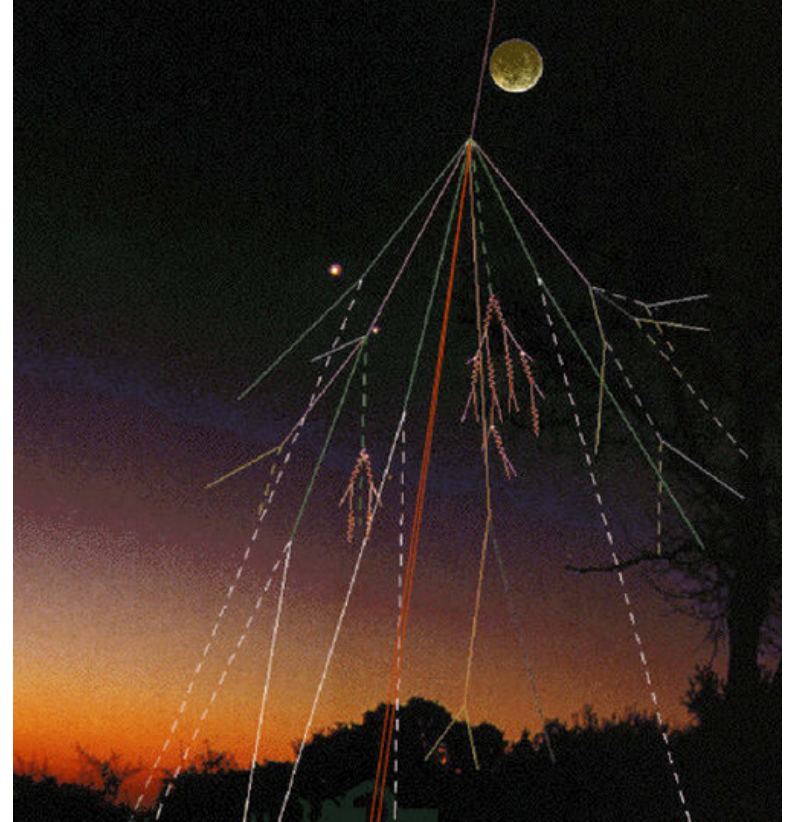


Un solo neutrino ?

Negli anni '50 erano stati scoperti studiando di **raggi cosmici** dei processi di decadimento governati dall'interazione debole tra cui il decadimento del mesone π



$$\pi \rightarrow \mu \nu$$
$$\mu \rightarrow e \nu \nu$$



Il **pione** (π , $273 m_e$) decade in 25 ns (interazione debole)
In muone e una particella invisibile con le proprietà del neutrino del decadimento beta

Il **muone** (μ , $207 m_e$) è un “elettrone” pesante. Decade in elettrone e due neutrini (interazione debole).

Nel 1959 si pensava che i neutrini del decadimento beta e i neutrini dei decadimenti di μ e π fossero la stessa “cosa”

Scoperta del neutrino “muonico” ν_μ

Fascio di neutrini dal decadimento del π

Gli **elettroni** producono una cascata di scintille in poco spazio (uno “**sciame**”) e vengono assorbiti, mentre i **muoni** lasciano una lunga sequenza di singole scintille e penetrano grosse quantità di materia senza essere fermati.

Gli eventi (qualche decina) osservati mostravano la **produzione di μ**

Esistono almeno due tipi di neutrini !!! ν_μ e ν_e

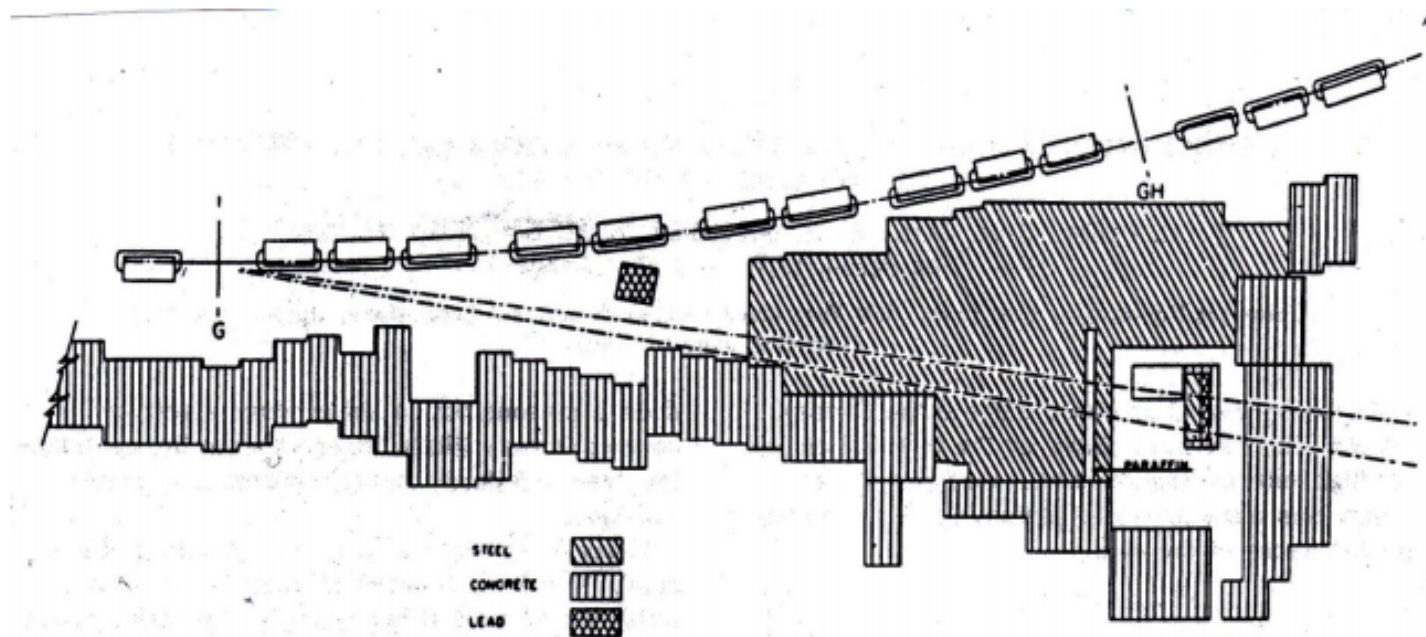
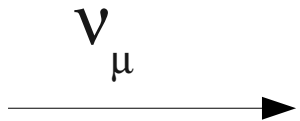
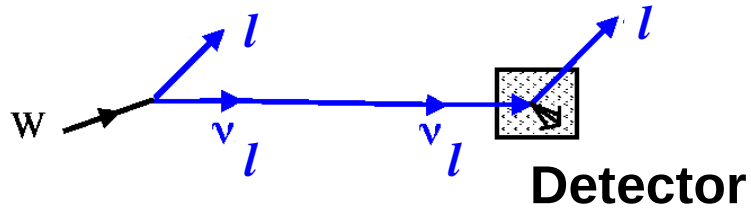


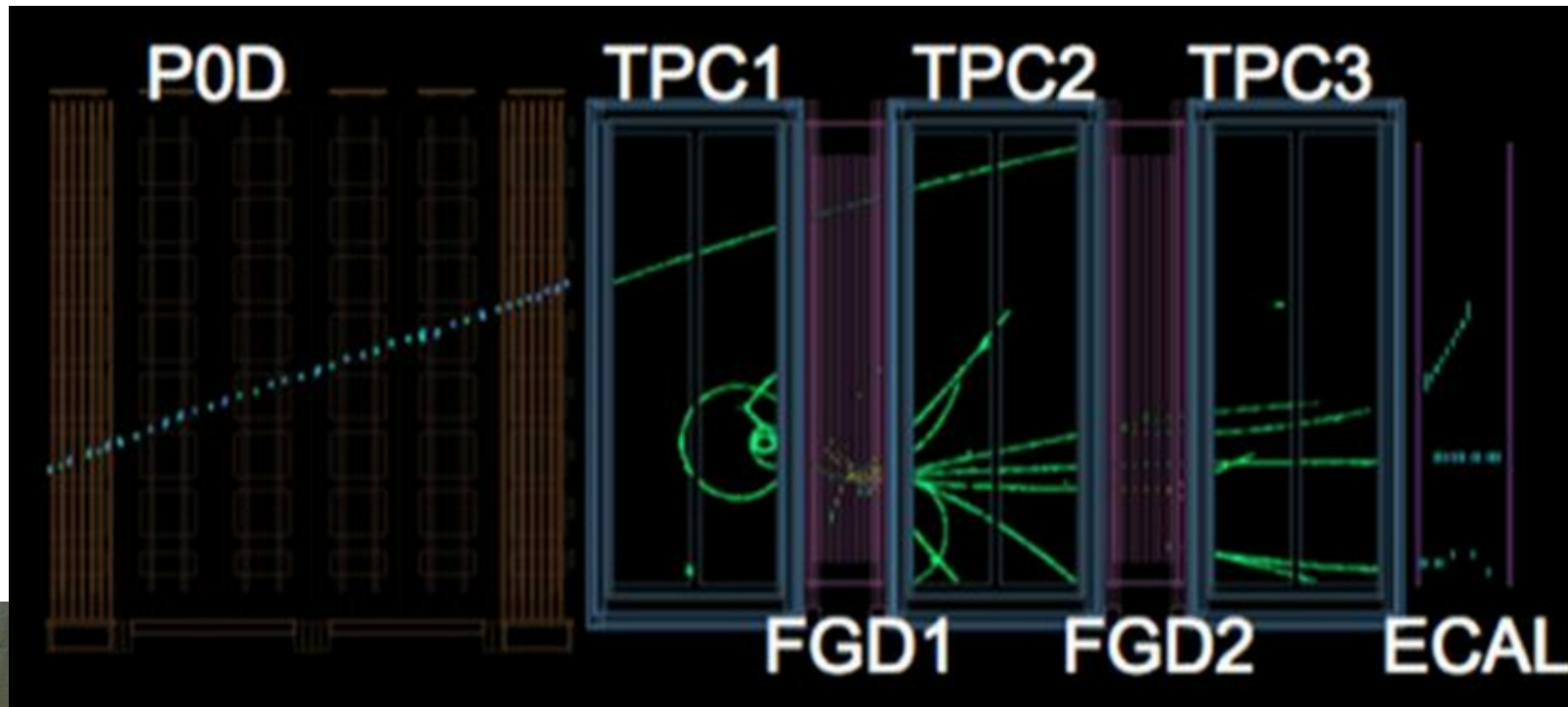
FIG. 1. Plan view of AGS neutrino experiment.

Le camere a scintilla sono costituite da elettrodi piani di alluminio ad alto potenziale separati da una miscela di gas nobili.



Event with penetrating muon and hadron shower

Interazione di neutrino in un rivelatore moderno



Nd280 detector in magnet

Rivelatore ND280, Giappone

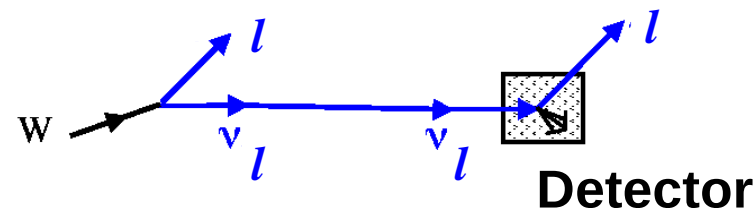
La presenza di campo magnetico permette di misurare la velocità delle particelle prodotte dalla curvatura e di ricavare l'energia del neutrino



Neutrini nel “modello standard”

Esistono **tre tipi diversi di neutrini** (“famiglie”), ciascuno associato ad un leptone carico massivo (**elettone**, **muone**, **tauone**)

Interazioni di “corrente carica” (mediate dal W),
viene prodotto il leptone corrispondente:



	tre “famiglie”		
Quarks	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$
Leptoni	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$ ← tre neutrini

Sono “elementari” in senso assoluto?
Emergerà una più profonda struttura della materia?

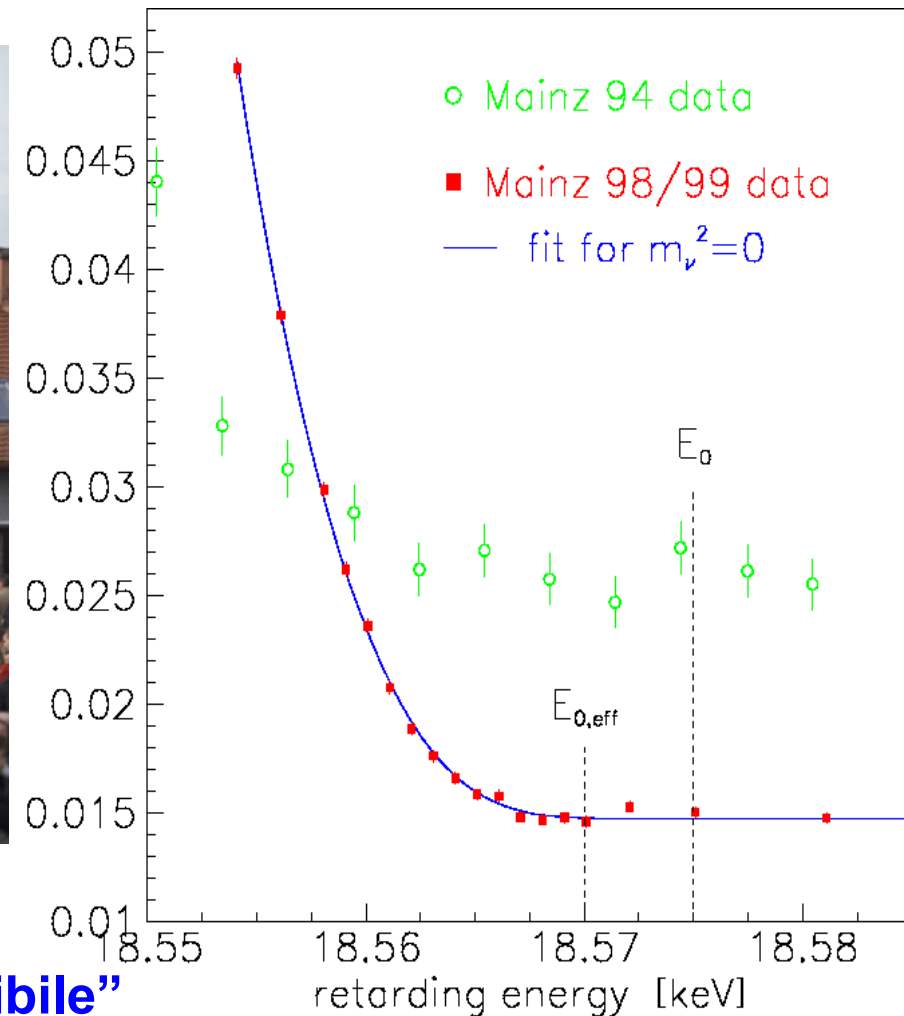
Il terzo tipo di neutrino (ν_τ) e' stato scoperto solo nel 2000 dall'esperimento DONUT al Fermilab vicino a Chicago

Leggeri si, ma quanto ?

Decadimento β del trizio (isotopo dell'idrogeno).

La presenza di un oggetto pesante crea una minuscola deformazione della distribuzione dell'energia dell'elettrone a energie alte.

Il limite piu' stringente dall'esperimento di Mainz : $m_{\nu e} < 2.2 \text{ eV}$



Grazie a questa specie di ingombrante “dirigibile” (KATRIN) nei prossimi anni si potra' arrivare a $m_{\nu e} < 0.2 \text{ eV}$

Per farsi un'idea...

Il neutrino piu' pesante



50 g

÷



50 meV

1 eV

Spiegheremo dopo come sappiamo che c'e' un neutrino che non puo' pesare meno di 50 meV !

L'elettrone
(il leptone piu' leggero)

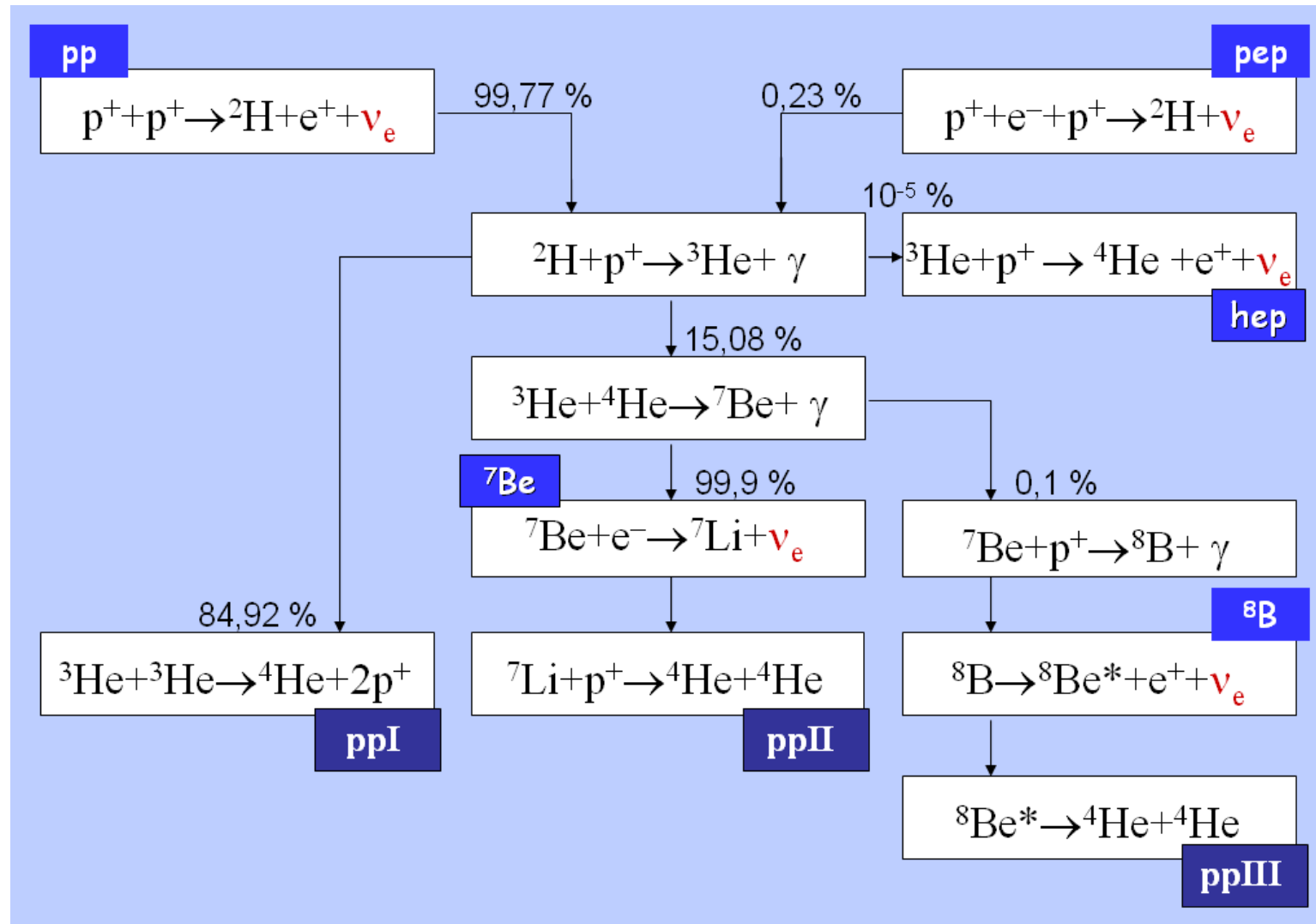
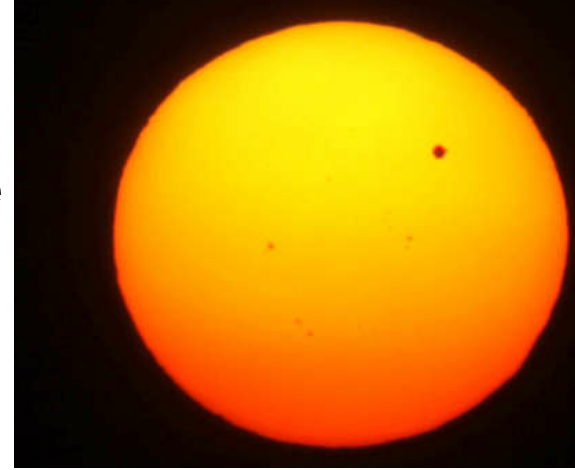


511 keV

I neutrini dal sole

Il Sole a seguito dei processi di fusione termonucleare che avvengono al suo interno e' una sorgente di neutrini molto intensa.

Flusso di ν : $60 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a 150 M km di distanza !

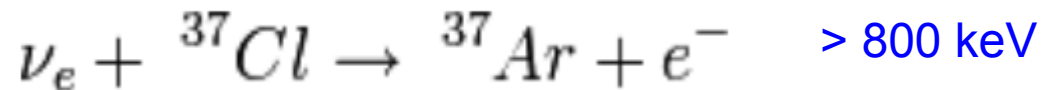


Come misurare i neutrini dal sole ?

Esperimenti Radiochimici.

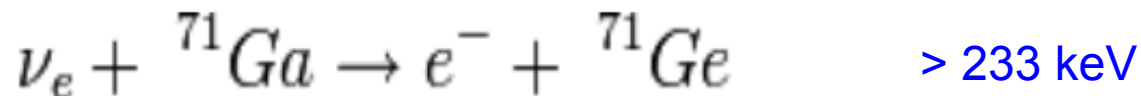
L'interazione del neutrino cambia la specie chimica del bersaglio.

Gli atomi “trasmutati” vengono estratti periodicamente con tecniche chimiche e contati con opportuni rivelatori. Non e' in tempo reale. Energia del neutrino non misurata.

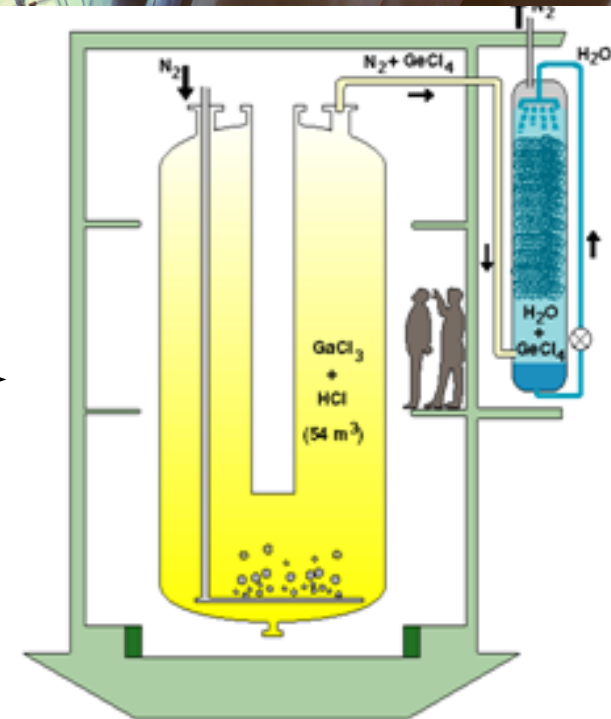


L'esperimento Homestake (R. Davis) negli Stati Uniti con il cloro aveva evidenziato già nei tardi anni '60 un flusso misurato di neutrini solari inferiore a quello previsto dai modelli teorici (J. Bahcall).

Successivamente questa “discrepanza” e' stata confermata da altri esperimenti, tra cui Gallex/GNO al Gran Sasso con il Gallio.



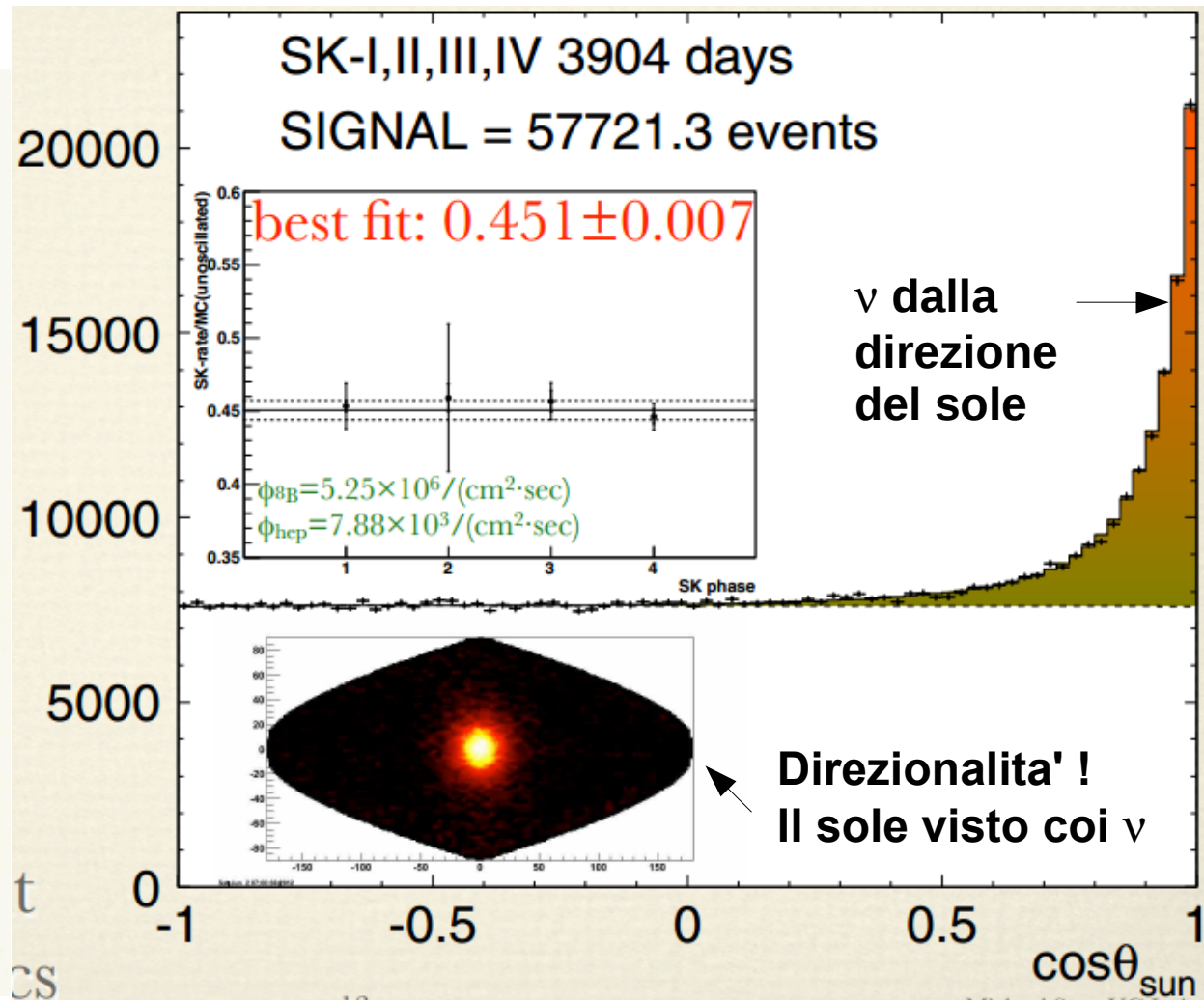
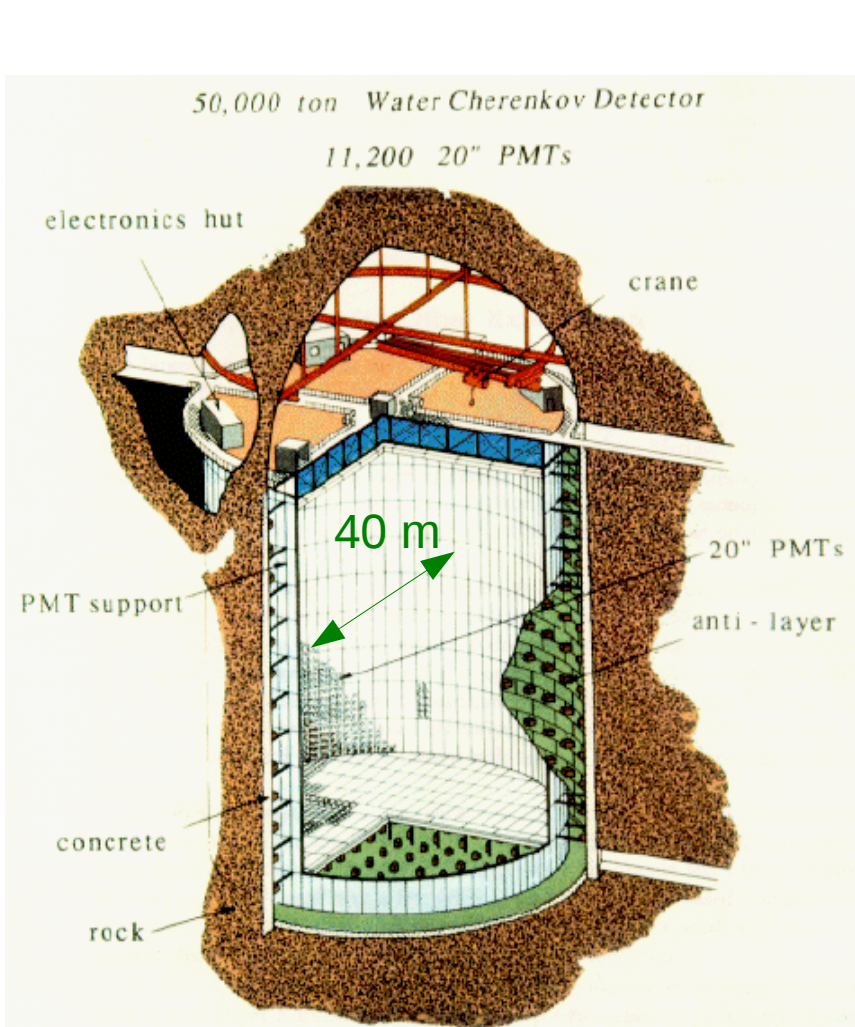
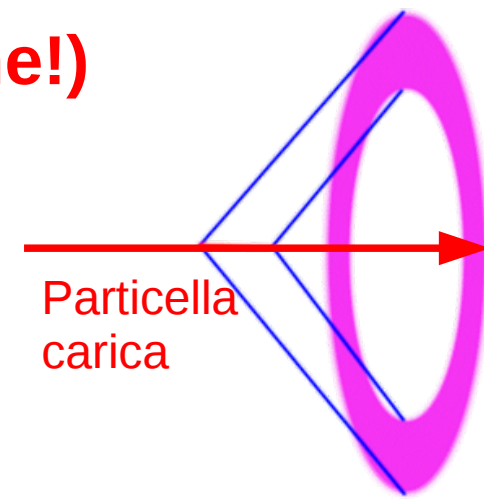
615 tonnellate
0.5 atomi/giorno!
Misura dal '70 al '94



Come misurare i neutrini solari (in real-time!)

1) Rivelatori water-Cerenkov

Quando una particella carica si muove in un mezzo ad una v superiore a quella della luce nel mezzo ($v > c/n$), emette coni di luce ad angolo fisso. La luce Cerenkov e' convertita in segnali elettrici da **fotomoltiplicatori**. Sensibili per $E > 5$ MeV.



2) Rivelatori a scintillatore liquido

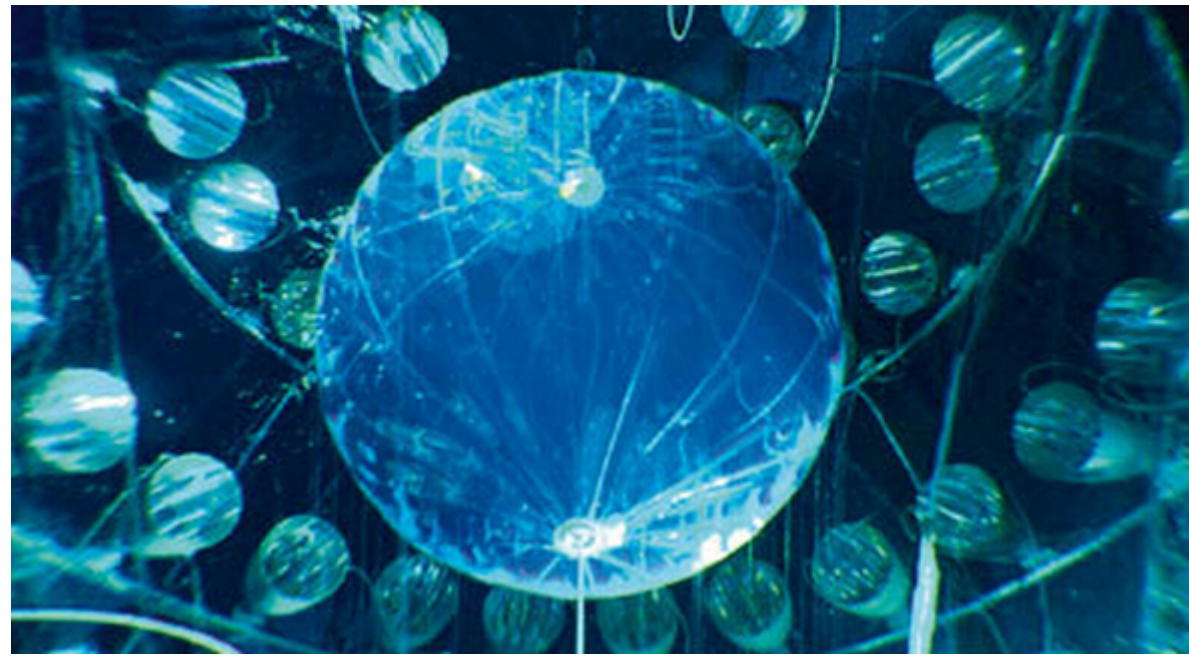
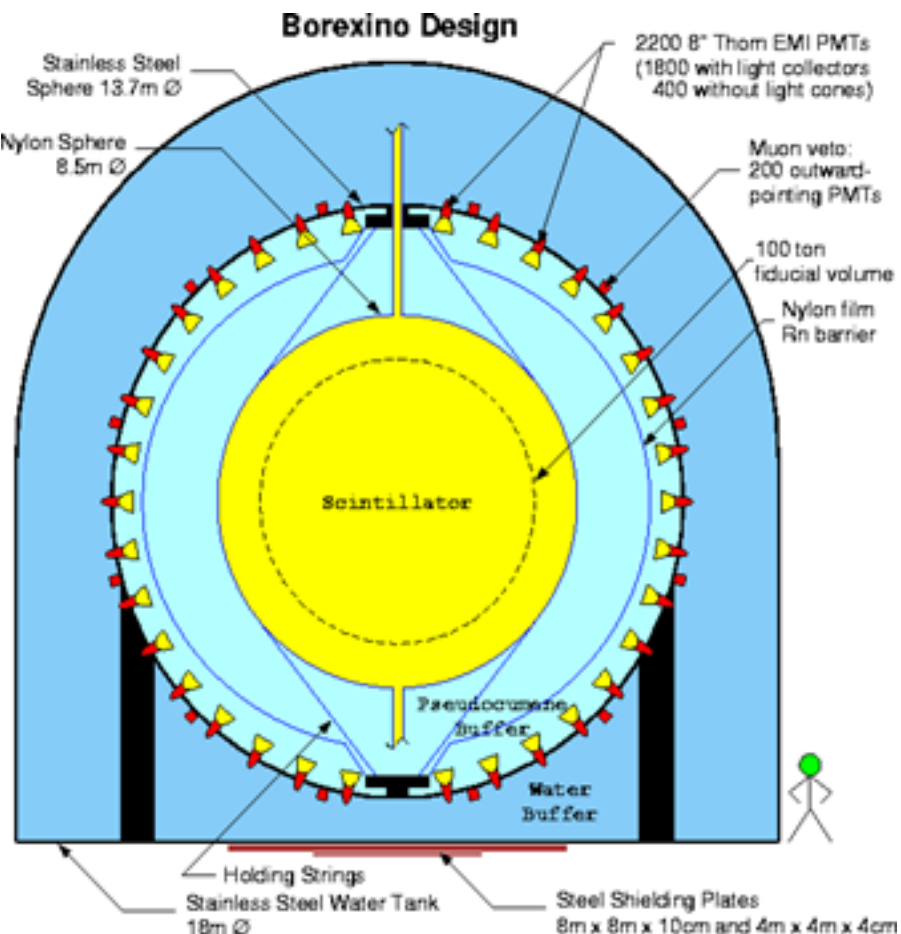
Impulsi luminosi quando viene attraversato da un fotone o da un particella carica.

Lettura con fotomoltiplicatori.

Si rivela la luce prodotta dall'elettrone nello stato finale del processo:

$\nu_e e \rightarrow \nu_e e$ (scattering elastico)

Borexino al Gran Sasso (pseudomene)



Il “puzzle” dei neutrini solari

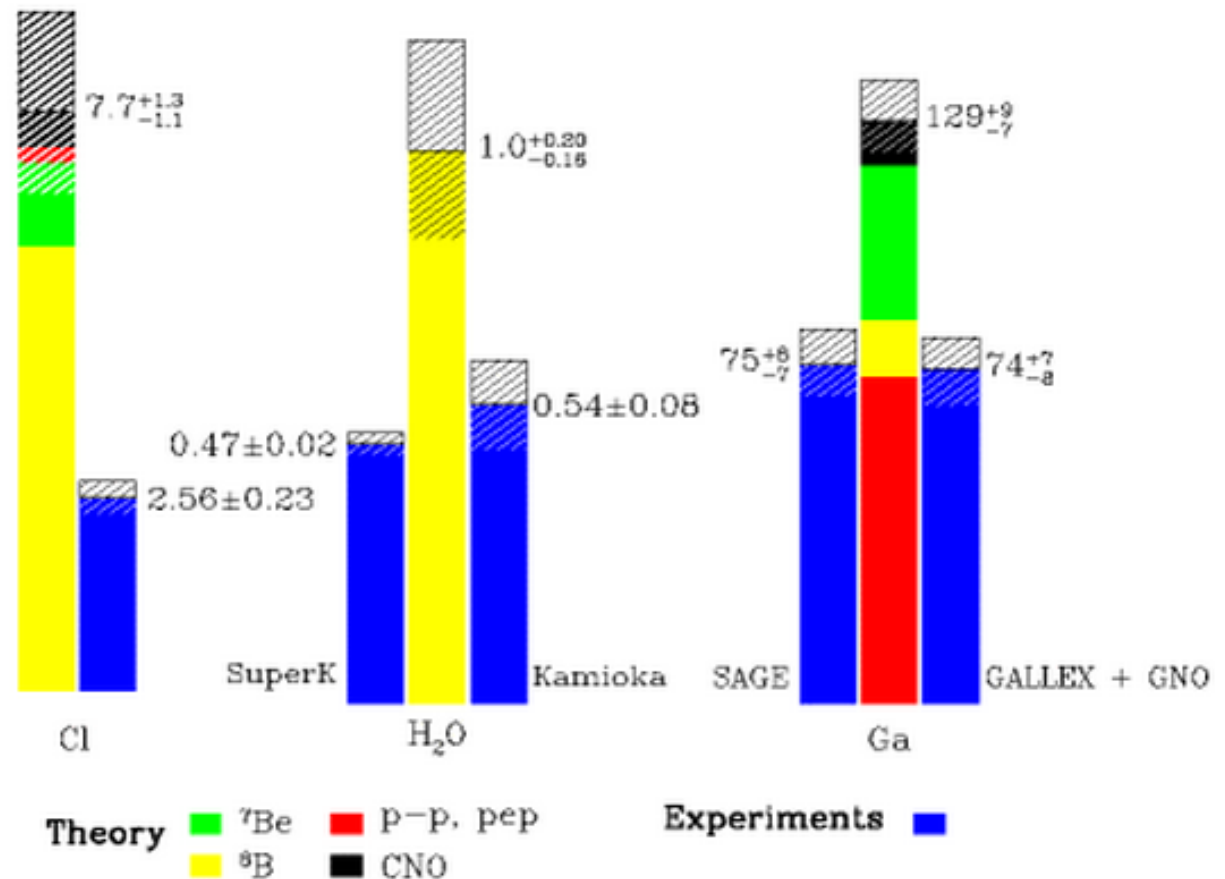
Si misura un **deficit** macroscopico rispetto alle attese del modello solare **nel corso di decenni di osservazioni** con tecniche sperimentali complementari

Il deficit dipende dall'energia

Si sospetta che sia il modello solare che non “funziona”

Ipotesi che il fenomeno abbia a che fare con la natura stessa dei neutrini stenta ad imporsi

Total Rates: Standard Model vs. Experiment
Bahcall-Pinsonneault 2000



L'intrigante “mescolamento” dei neutrini

$$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \leftrightarrow \nu_1, \nu_2, \nu_3$$

Distinguiamo ν_e, ν_μ, ν_τ perché

- sono prodotti in associazione con e, μ, τ
- interagendo in un apparato sperimentale producono e, μ, τ



Quando i neutrini viaggiano indisturbati

bisogna invece riferirsi agli stati a massa definita ν_1, ν_2, ν_3

ν_e, ν_μ, ν_τ ne sono “miscugli”, secondo la Meccanica Quantistica

Possono cambiare identità: “oscillazioni” di neutrino”

Un effetto di Meccanica Quantistica che si verifica se $m_\nu > 0$

(→ il metodo più sensibile per studiare la massa del neutrino)

L'acceleratore
di particelle
produce

ν_μ

miscuglio di
 ν_1, ν_2 e ν_3

La propagazione di ν_1, ν_2 e ν_3
dipende dalla loro massa

Se $m_\nu > 0$ il miscuglio cambia

L'esperimento
talvolta vede
ad esempio

ν_τ

miscuglio
“diverso” da ν_μ



$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E_\nu} \right)$$

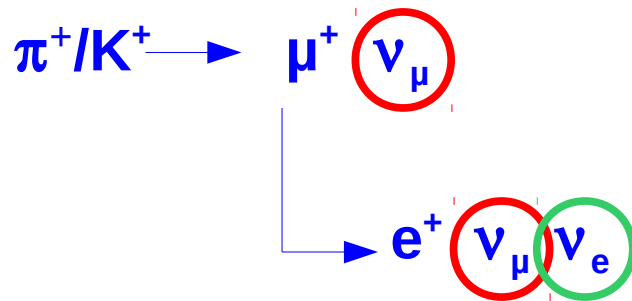
La probabilità di “cambiamento” di sapore
dipende in modo semplice da energia (E) e
lunghezza di propagazione (L)

Si misurano le differenze di masse quadrate dei
neutrini Δm^2 (non i valori assoluti!)

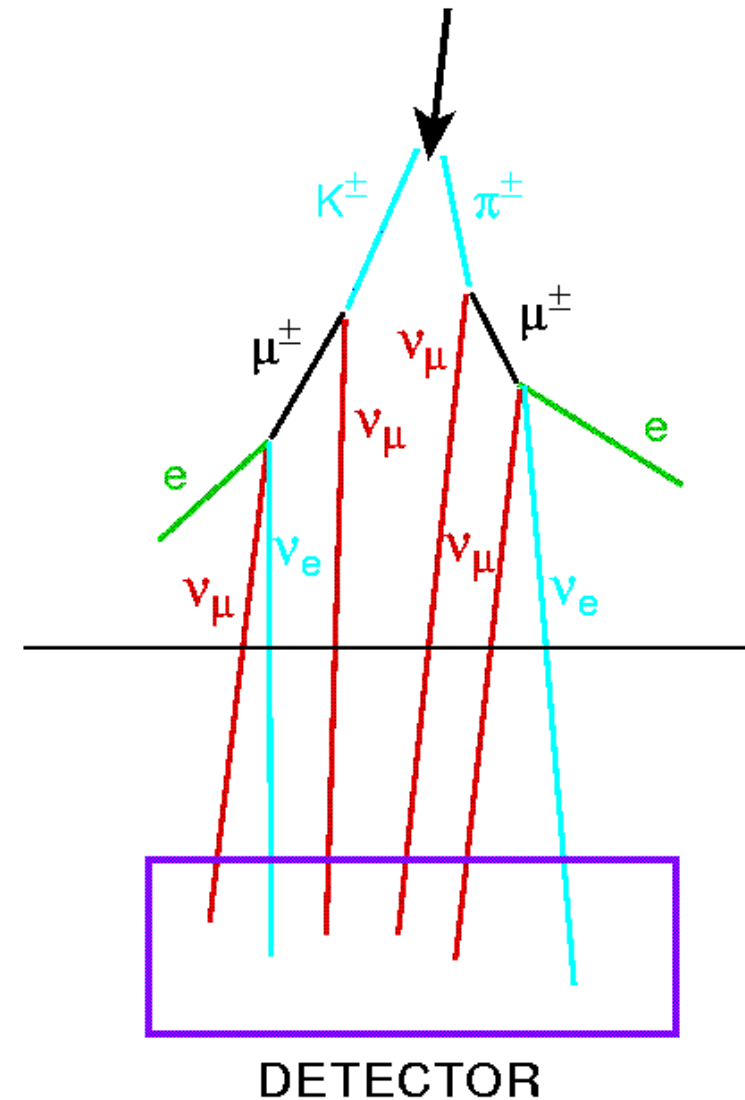
La “smoking gun” dell'oscillazione: i neutrini “atmosferici”

- Protoni, nuclei presenti nei raggi cosmici interagiscono con l'atmosfera originando sciami adronici contenenti mesoni π e K carichi.

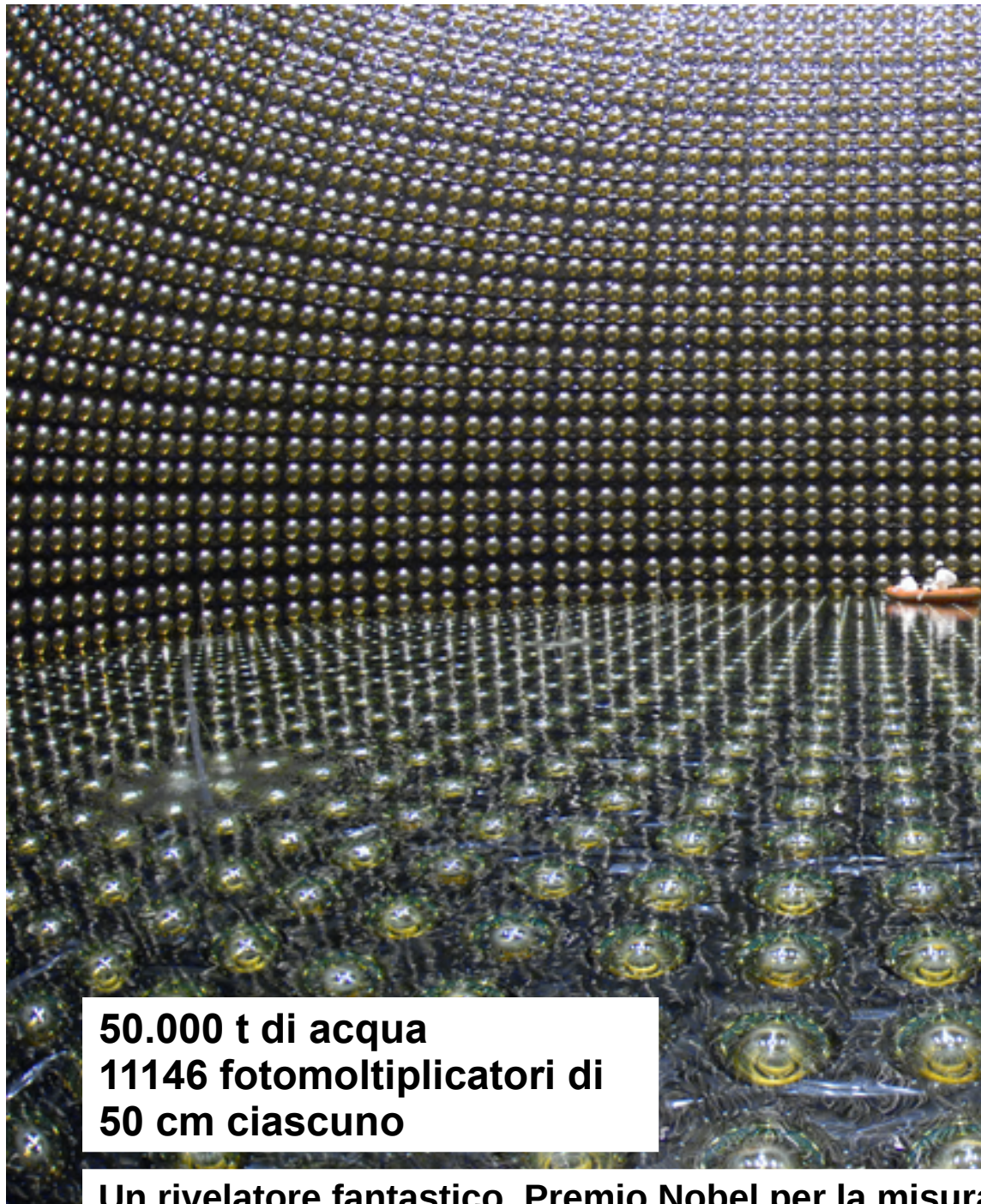
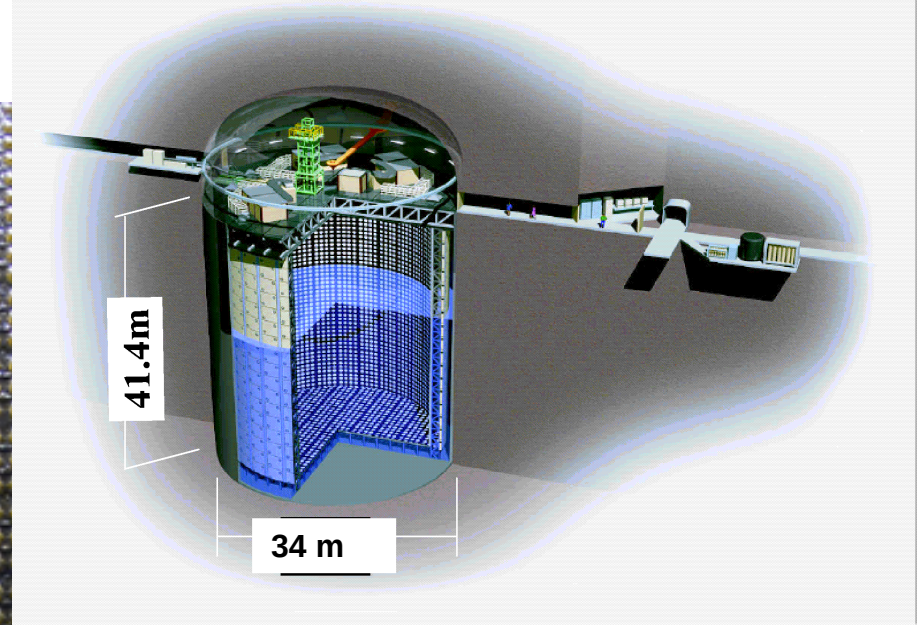
- Catena di decadimento:



- In teoria dunque dovrebbero arrivare sulla superficie **$2 \nu_\mu$ per ogni ν_e**
- MA in realta' la frazione e' minore.
- Chi scompare e come ?

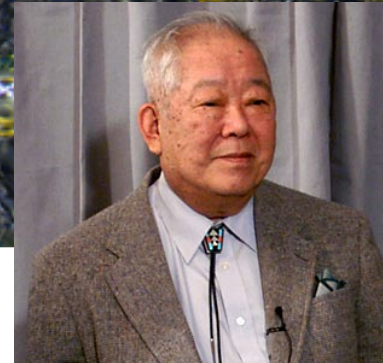


Super-Kamiokande!

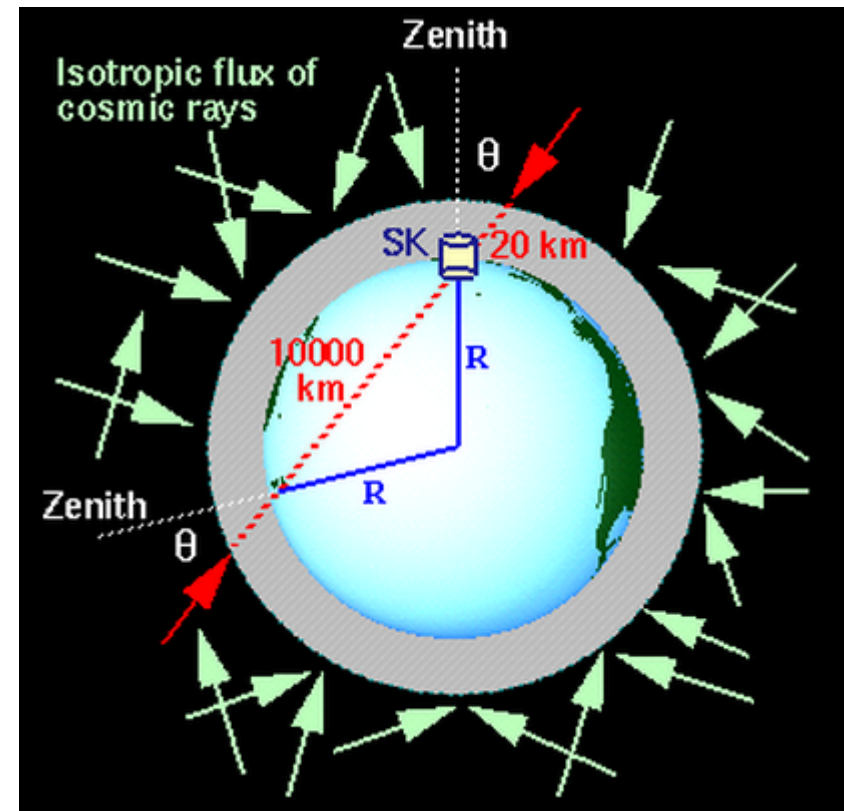
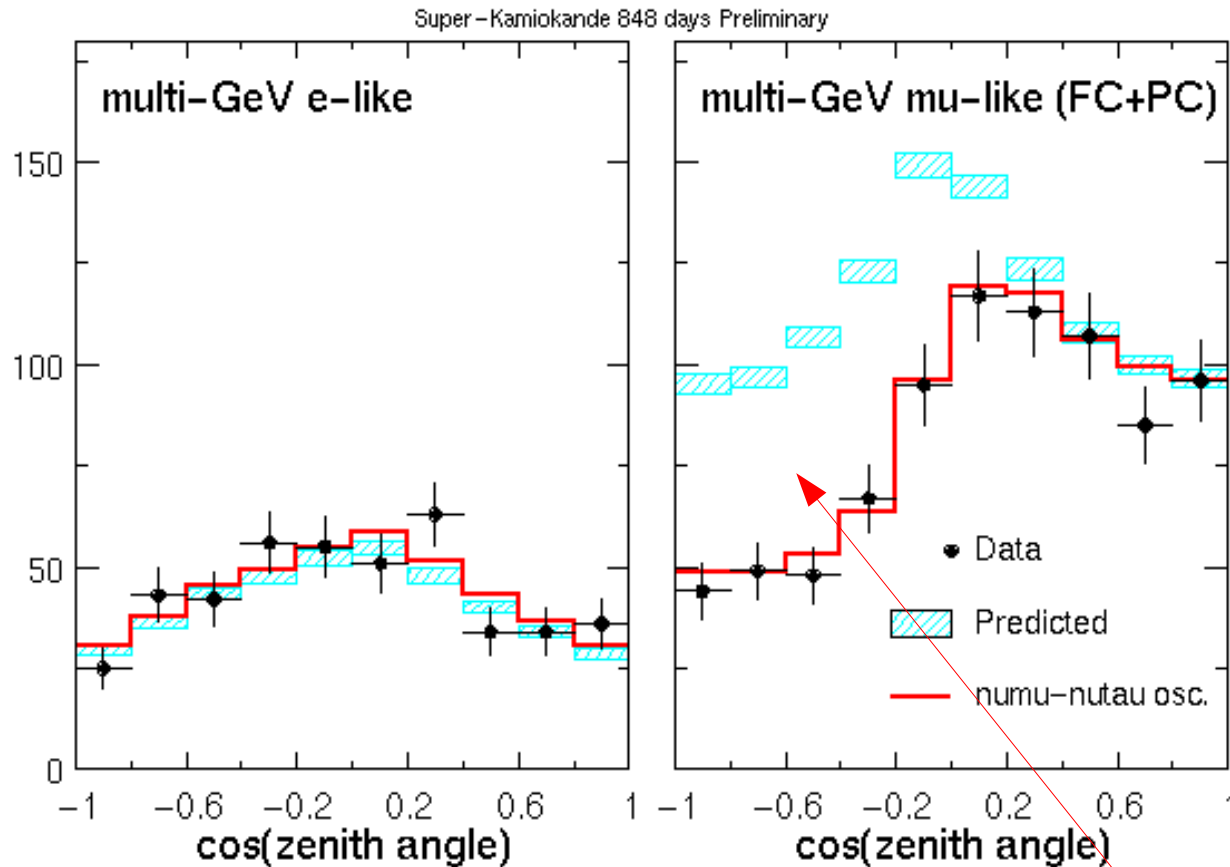


50.000 t di acqua
11146 fotomoltiplicatori di
50 cm ciascuno

Un rivelatore fantastico. Premio Nobel per la misura dei neutrini da SuperNova
(2002 Koshiba con Kamiokande, il precursore)



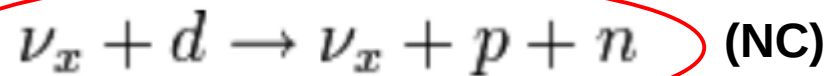
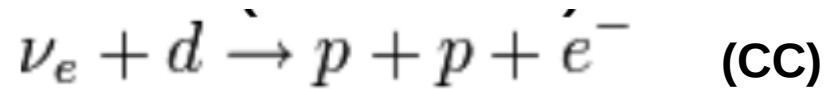
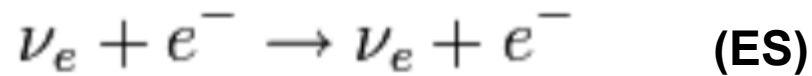
Oscillazioni di neutrini atmosferici



- I ν_μ che viaggiano su distanze lunghe (quelli che vengono dal basso $L \sim 13000$ km) scompaiono
- Su distanze corte invece no (il processo dipende dalla quantita' L/E)
- I ν_e invece non scompaiono mai
- Ipotesi: ν_μ diventano dei ν_τ (quasi sempre invisibili perche' il τ e' pesante ~ difficile da produrre data la poca energia a disposizione)

SNO e l'acqua pesante: la misura della componente oscillata

Esperimenti fatti finora sono sensibili solo alla “sparizione”, perché i neutrini dopo l'oscillazione non hanno energia sufficiente per produrre μ ($m=100$ MeV) o τ ($m=1.7$ GeV)



Deuterio d = stato legato protone-neutrone

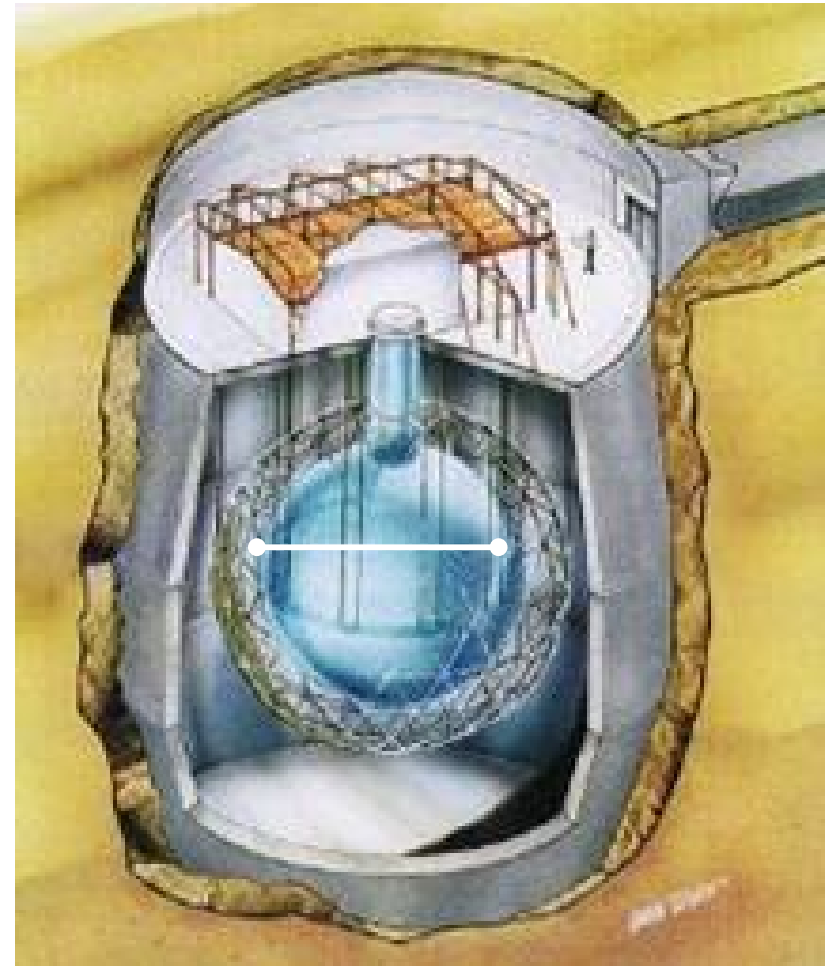
Sudbury Neutrino Observatory (CANADA)

Idea geniale: l'ultimo processo (NC) avviene indipendentemente dal sapore del neutrino (e, μ, τ) e quindi permette di avere un bilancio del flusso totale di neutrini dal sole.

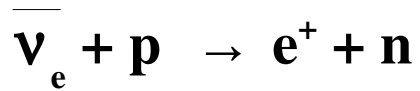
Col primo ed il secondo invece si misurano i ν_e

I ν_e iniziali cambiano di sapore e 'scompaiono' (ne rimane $\sim 1/3$) ma la somma dei tre sapori è in accordo con il flusso previsto!

Trionfo del modello solare e della teoria delle oscillazioni.



La verifica “terrestre” delle oscillazioni “solari”



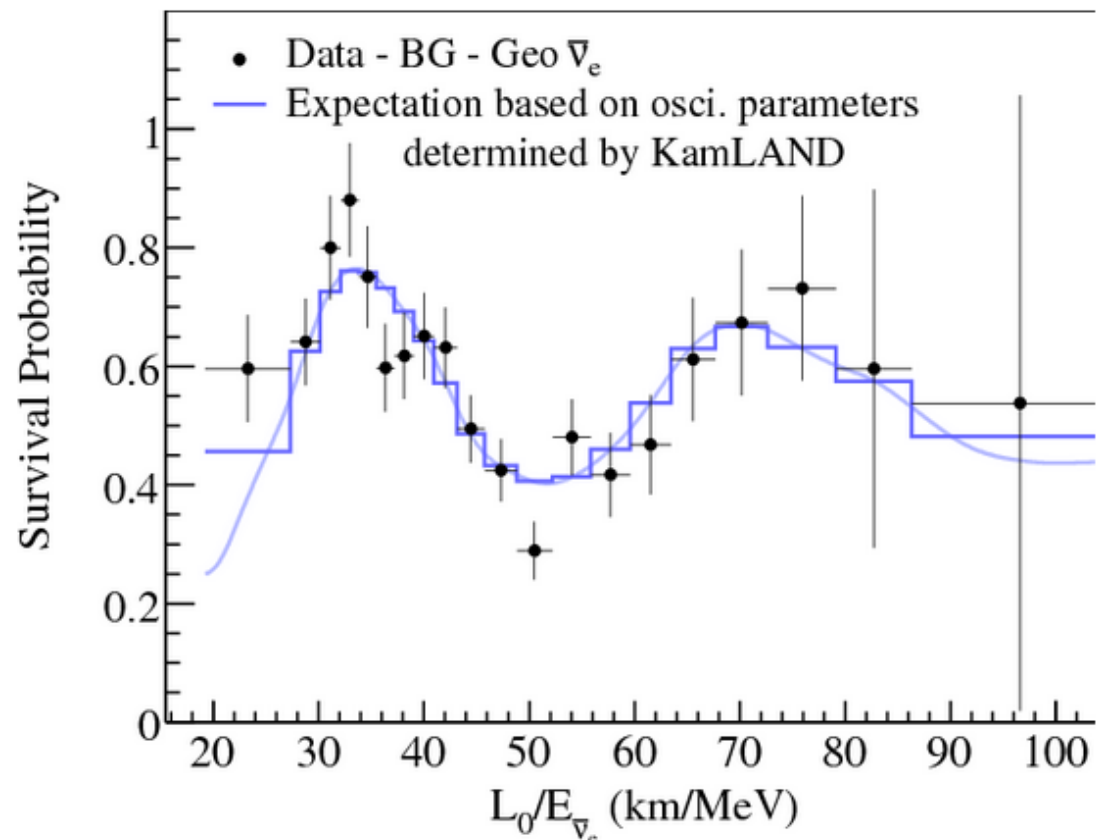
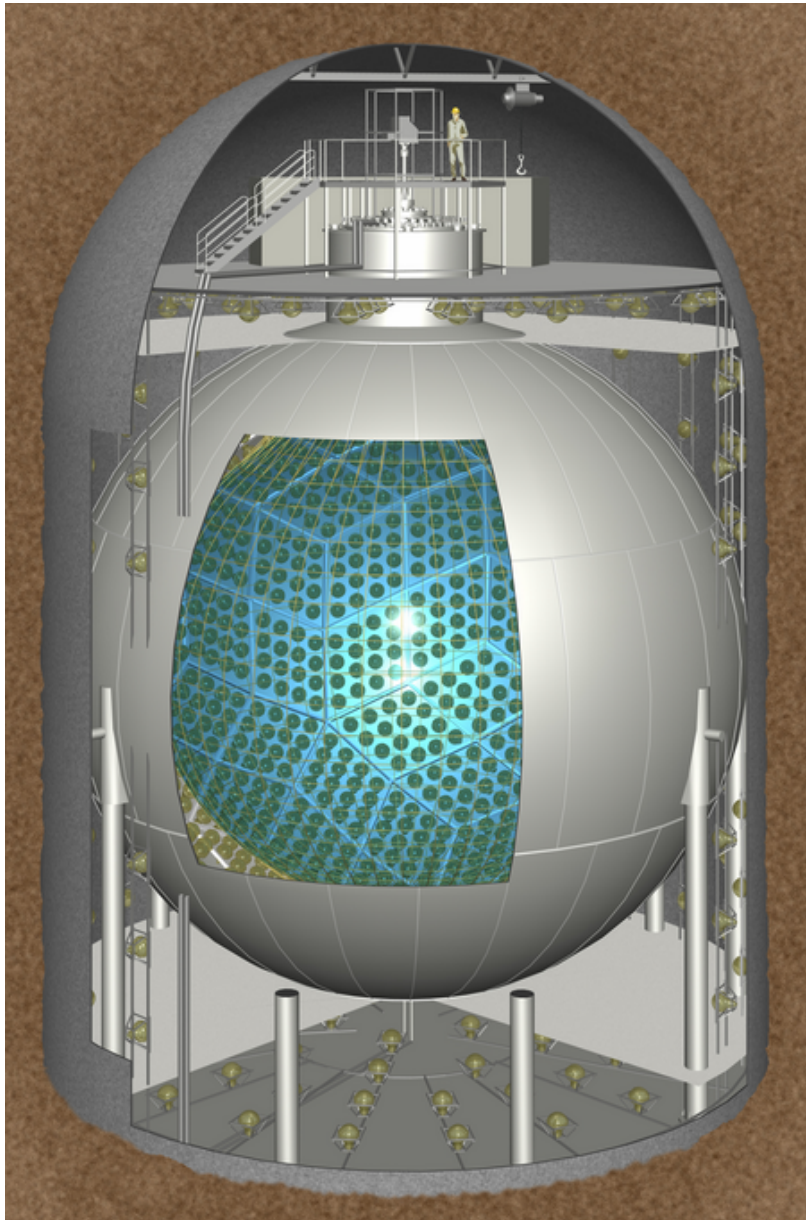
KAMLAND (Giappone)

Sorgenti: le centrali nucleari giapponesi e coreane

Verificata la sparizione di anti-nue a una distanza di
~ 180 km

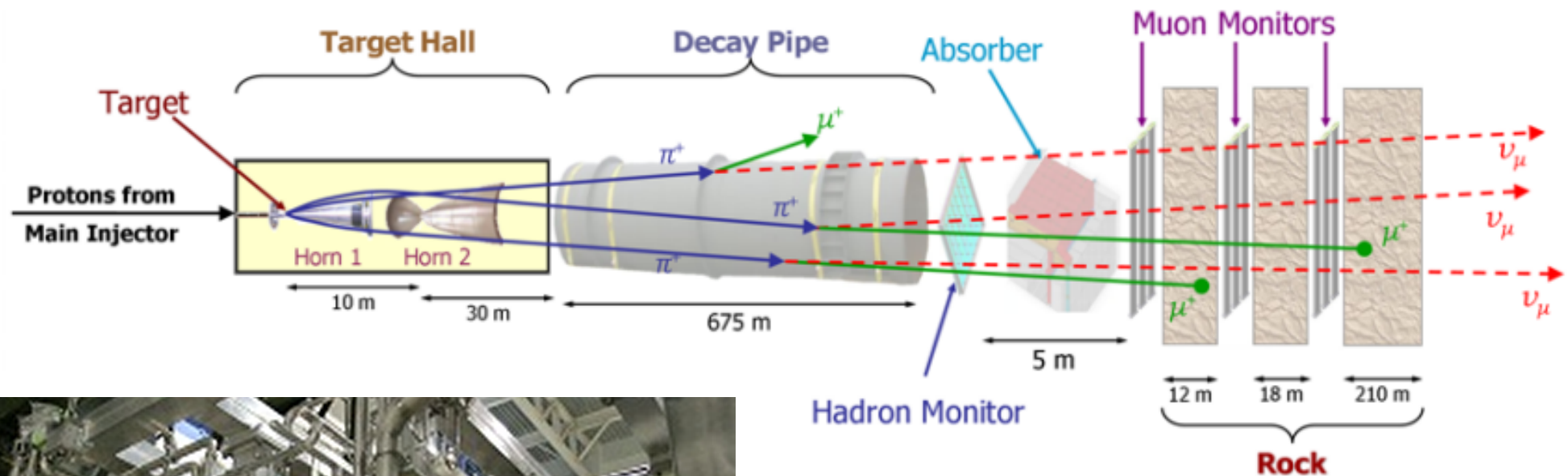
Spiegabile con lo stesso meccanismo di oscillazione
che spiega il deficit di neutrini solari !

Una coppia di neutrini ha una differenza di masse
quadrate di 8 meV



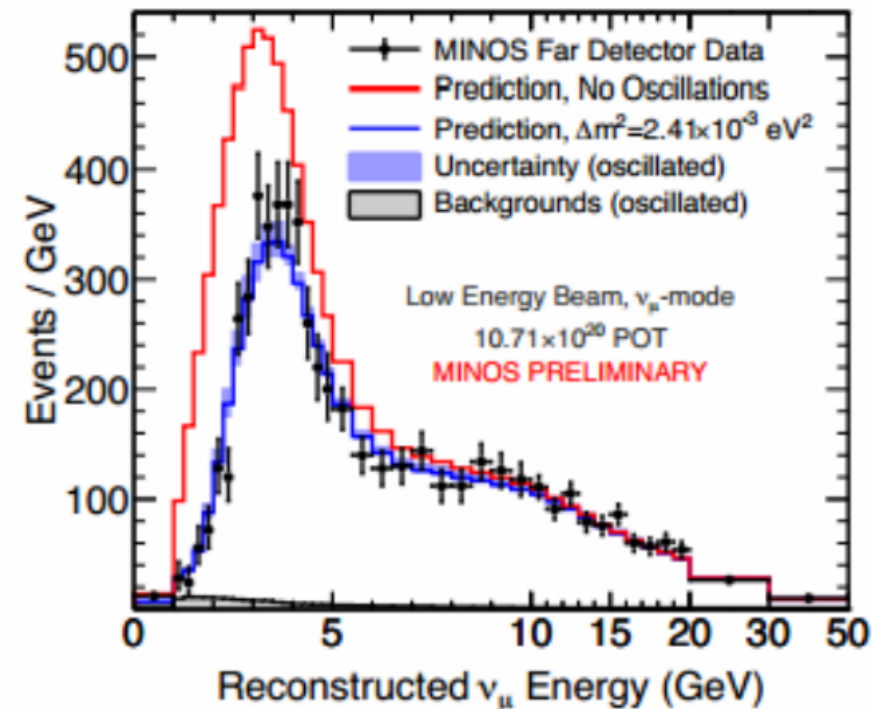
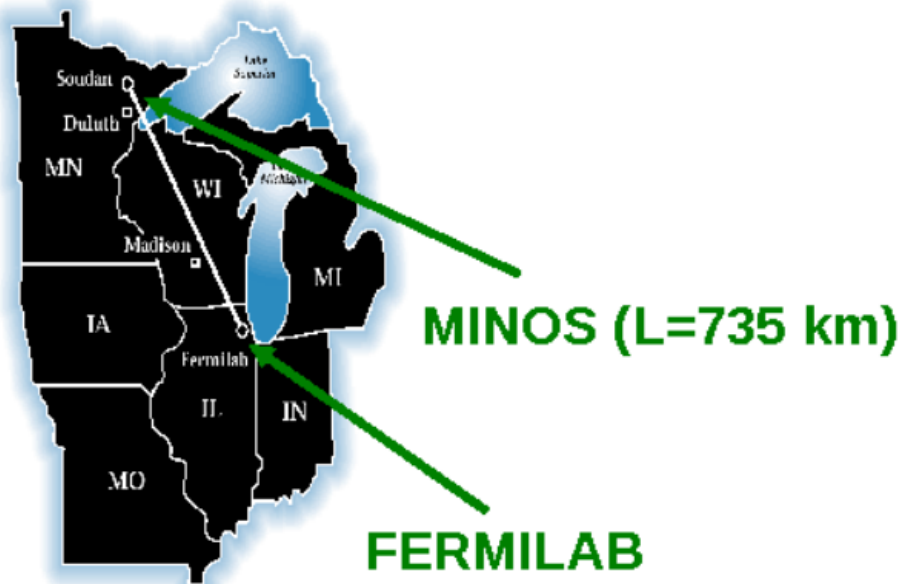
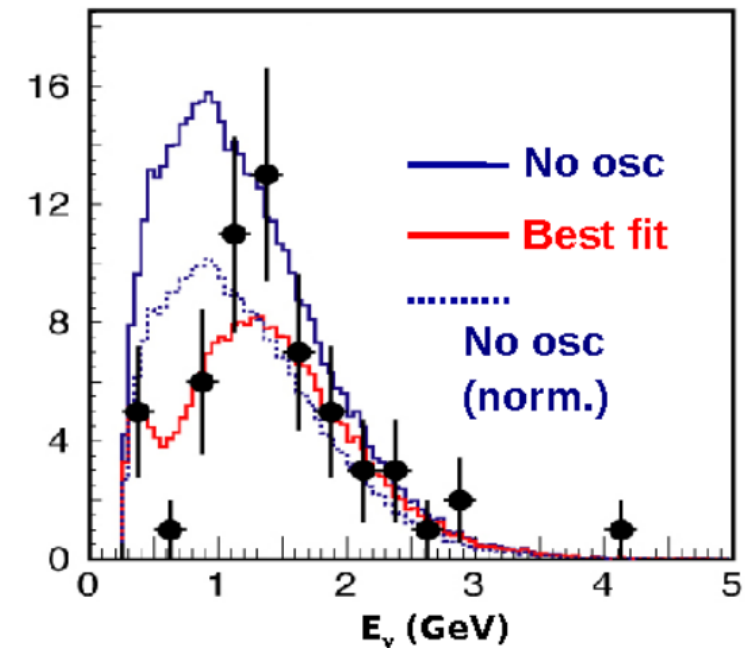
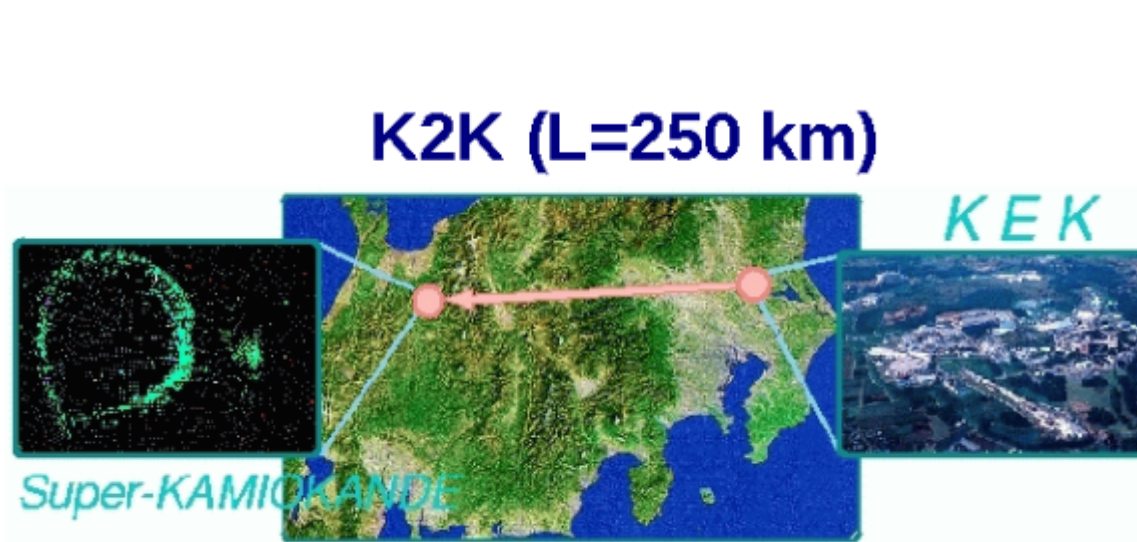
Come produrre dei fasci “artificiali” di neutrini

La scoperta delle oscillazioni e' venuta utilizzando le sorgenti naturali (il sole, le interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera) ma da subito si e' sentita la necessita' di utilizzare delle sorgenti artificiali che permettono un migliore controllo da parte dello sperimentatore



← Una lente magnetica detta anche “corno”

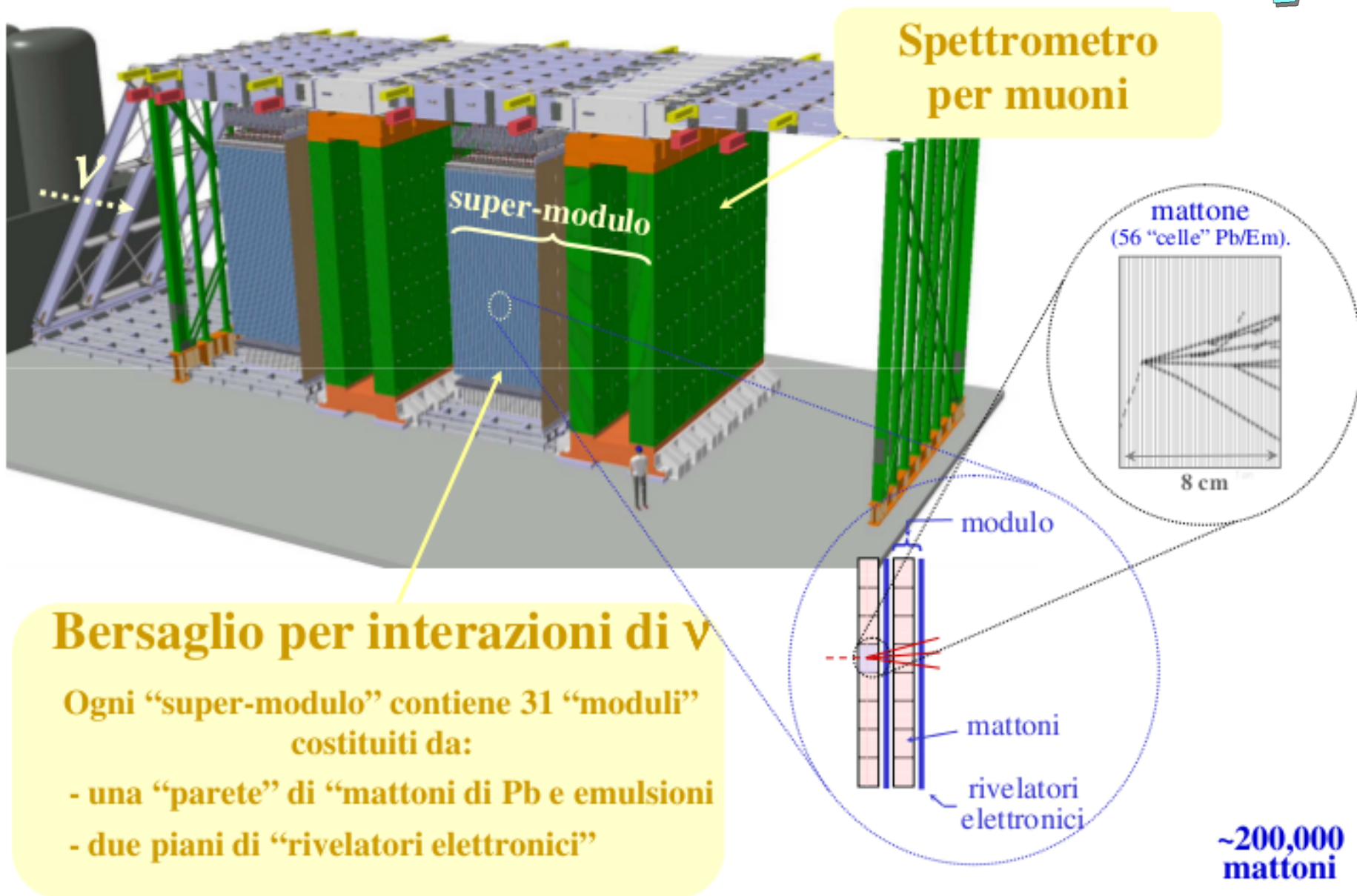
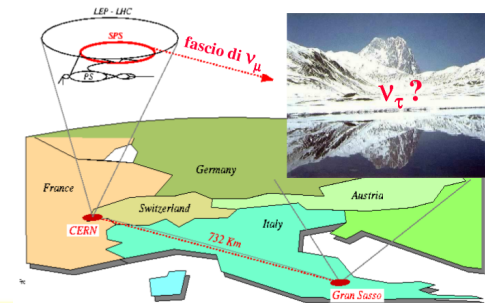
Esperimenti long-baseline di scomparsa: verifica di “laboratorio” dell'oscillazione atmosferica

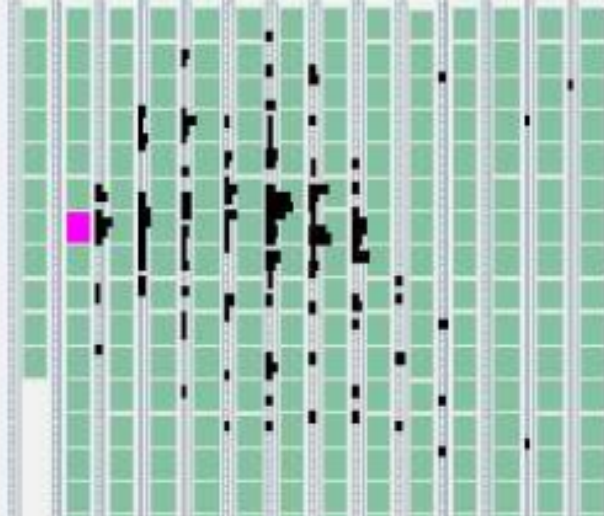


Esistono due neutrini con una differenza di masse quadrate di $2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$

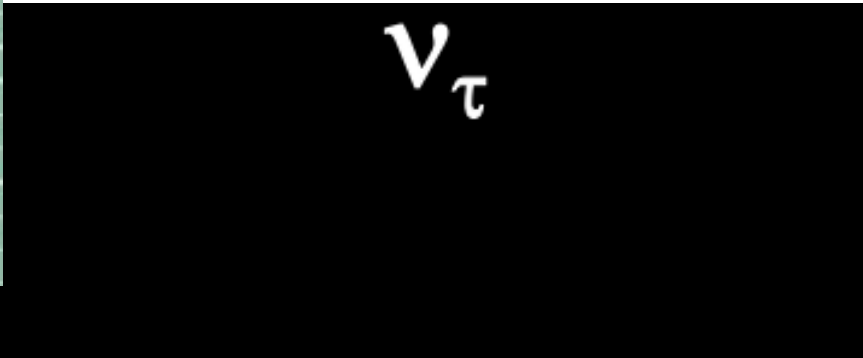
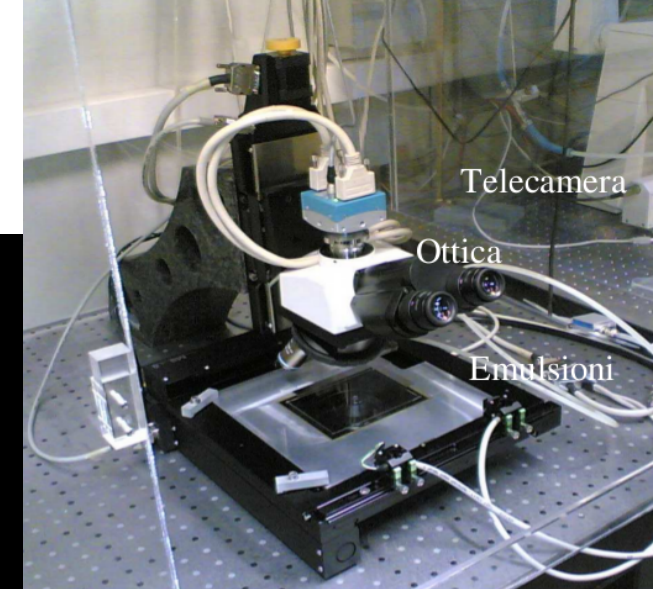
Esperimenti long-baseline di apparizione: misura diretta della transizione $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

OPERA L = 730 km, CERN → Gran Sasso

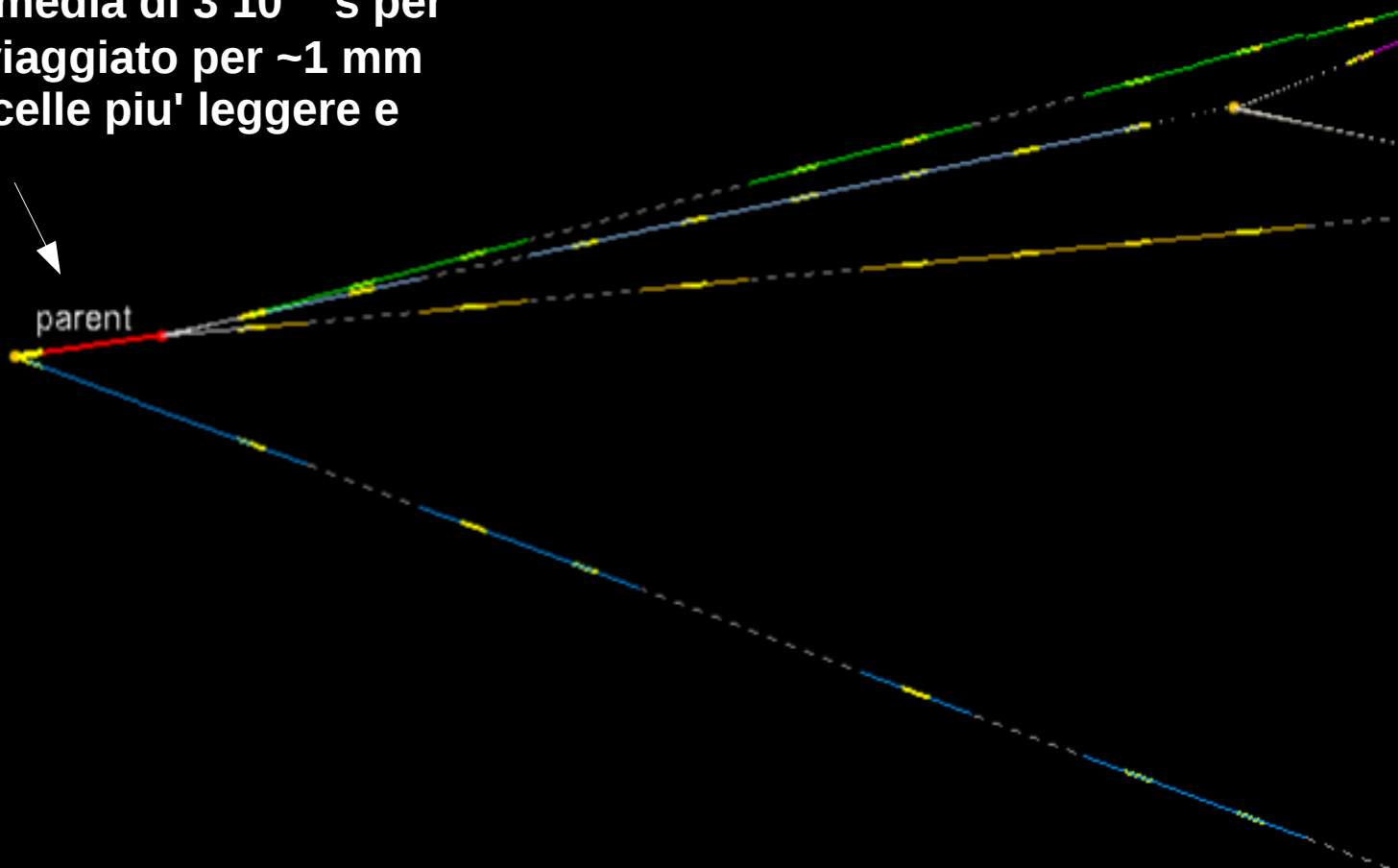




L'analisi delle emulsioni nucleari viene fatta anche in questi laboratori!



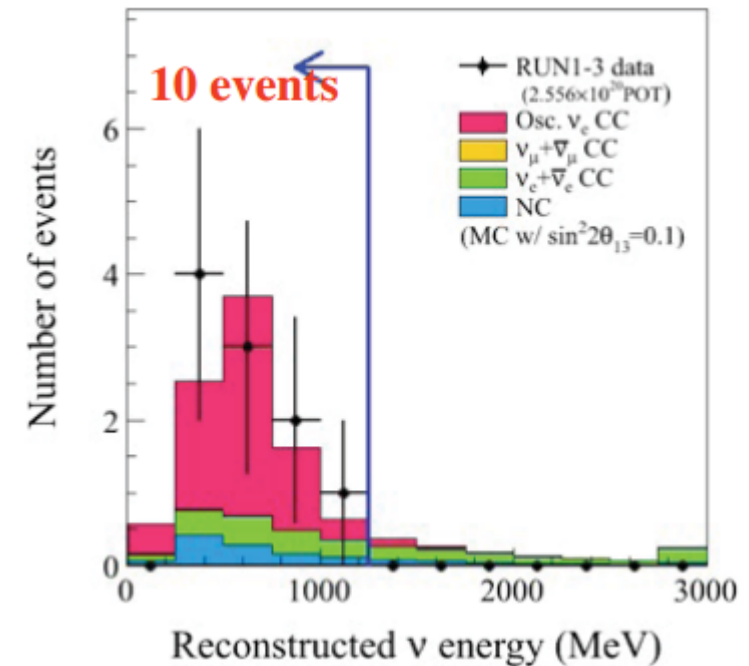
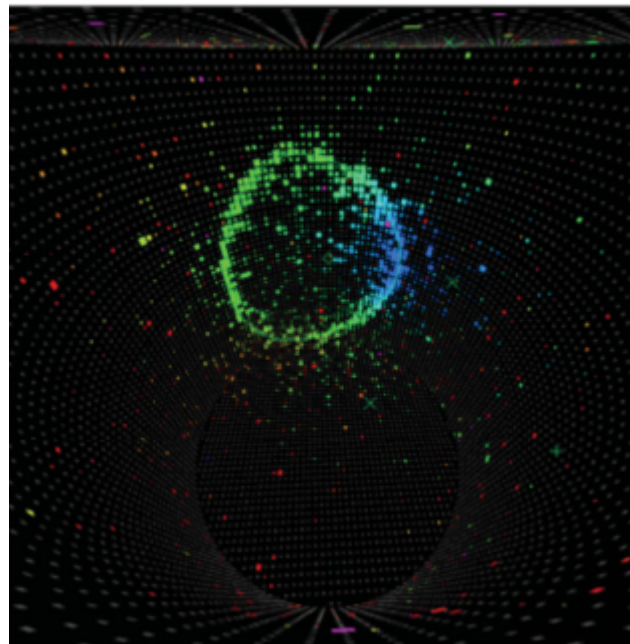
Il τ ha una vita media di $3 \cdot 10^{-13}$ s per cui dopo aver viaggiato per ~ 1 mm decade in particelle piu' leggere e piu' stabili



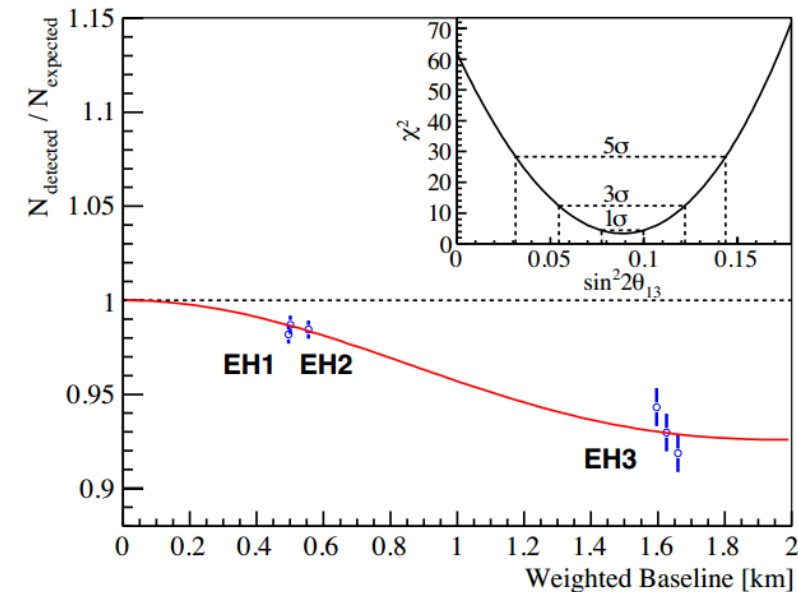
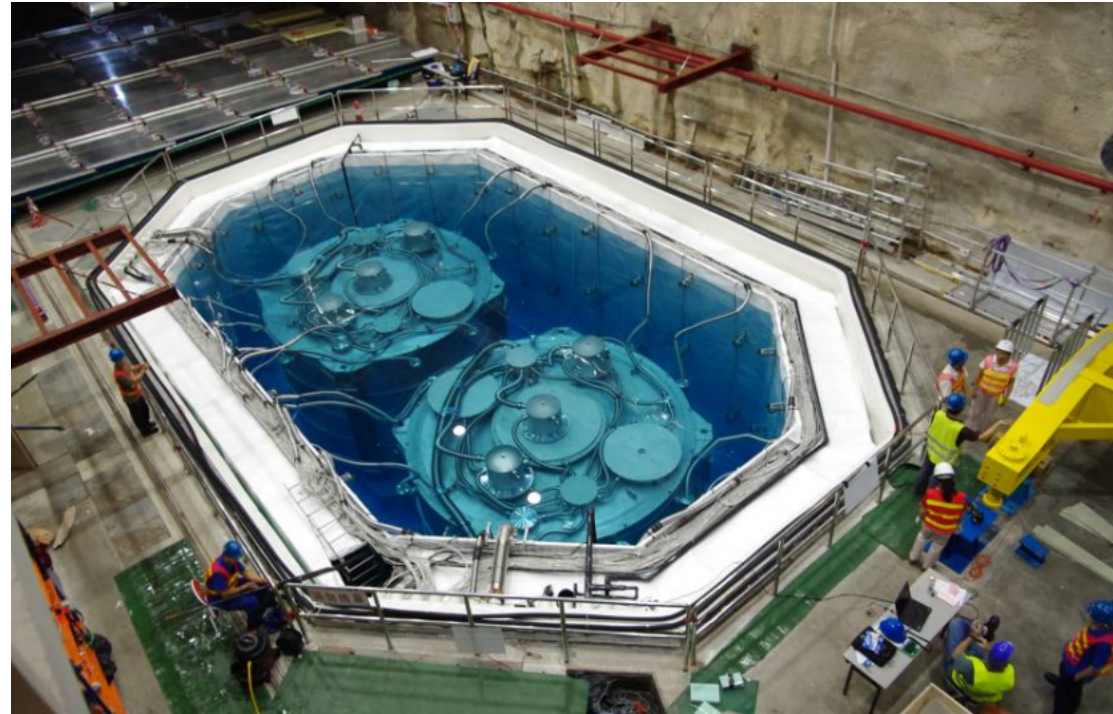
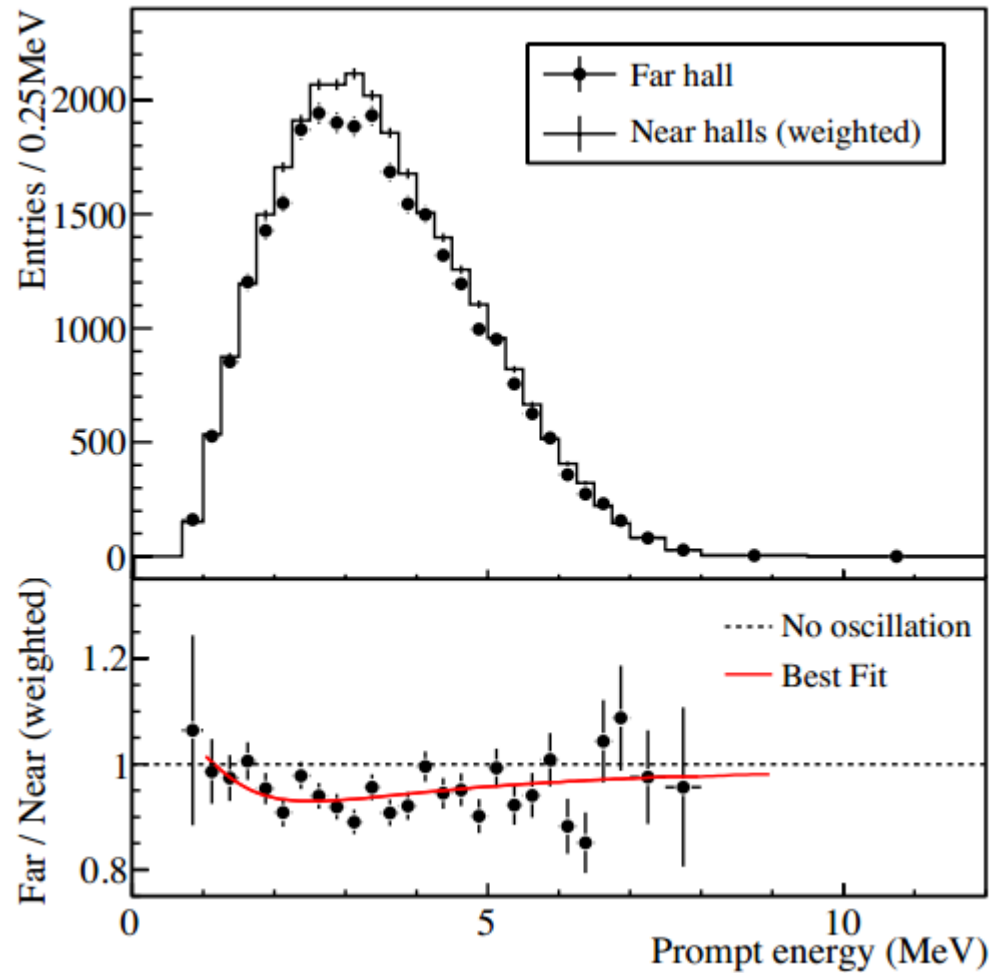
Storia di oggi: scoperta la transizione $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$



Recentemente la
collaborazione T2K
ha riportato una
prima evidenza per
l'osservazione di ν_e
su un fascio di ν_μ



Storia di oggi: scoperta la transizione $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$



Daya-Bay (Cina): il 5-6 % degli anti- ν_e osservati al rivelatore vicino al reattore (~500 m) “scompaiono” in un rivelatore identico lontano (1.6 km). Dipendenza dall'energia come atteso. Confermato da altri esperimenti simili: RENO (Korea) e DCHOOZ (Francia)

Cosa sappiamo del mescolamento dei ν ?

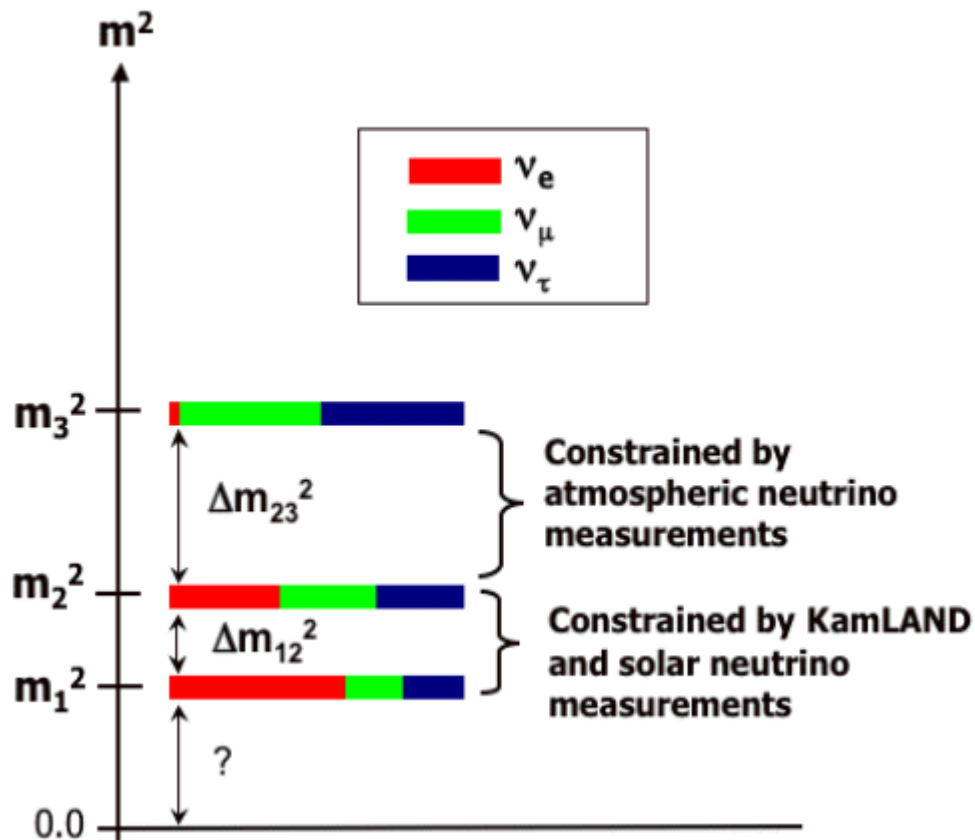
Le oscillazioni ci dicono che **almeno due neutrini devono avere una massa diversa da 0** (non era per niente scontato!)

I neutrini **si mescolano “molto”** tra loro

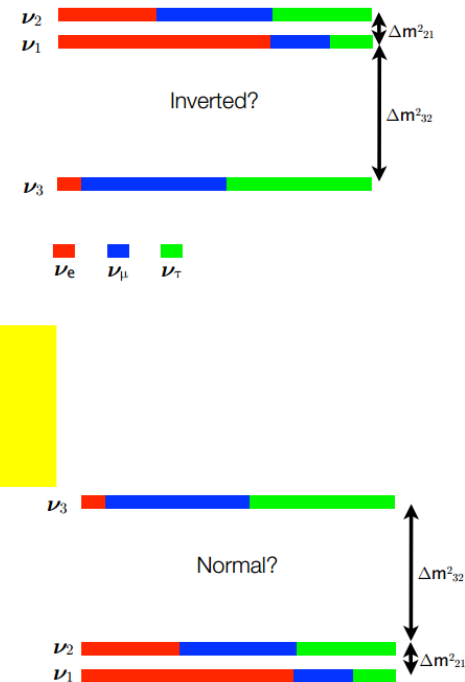
$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E_\nu} \right)$$

Le masse dei neutrini sono simili: $\sqrt{\Delta m_{23}^2} = 0.05 \text{ eV}$

A oggi non siamo ancora stati capaci di **misurare le masse assolute**: solo limiti superiori



**Non ancora noto
(gerarchia)**



La fisica del ν e' intrigante e piena di sorprese!

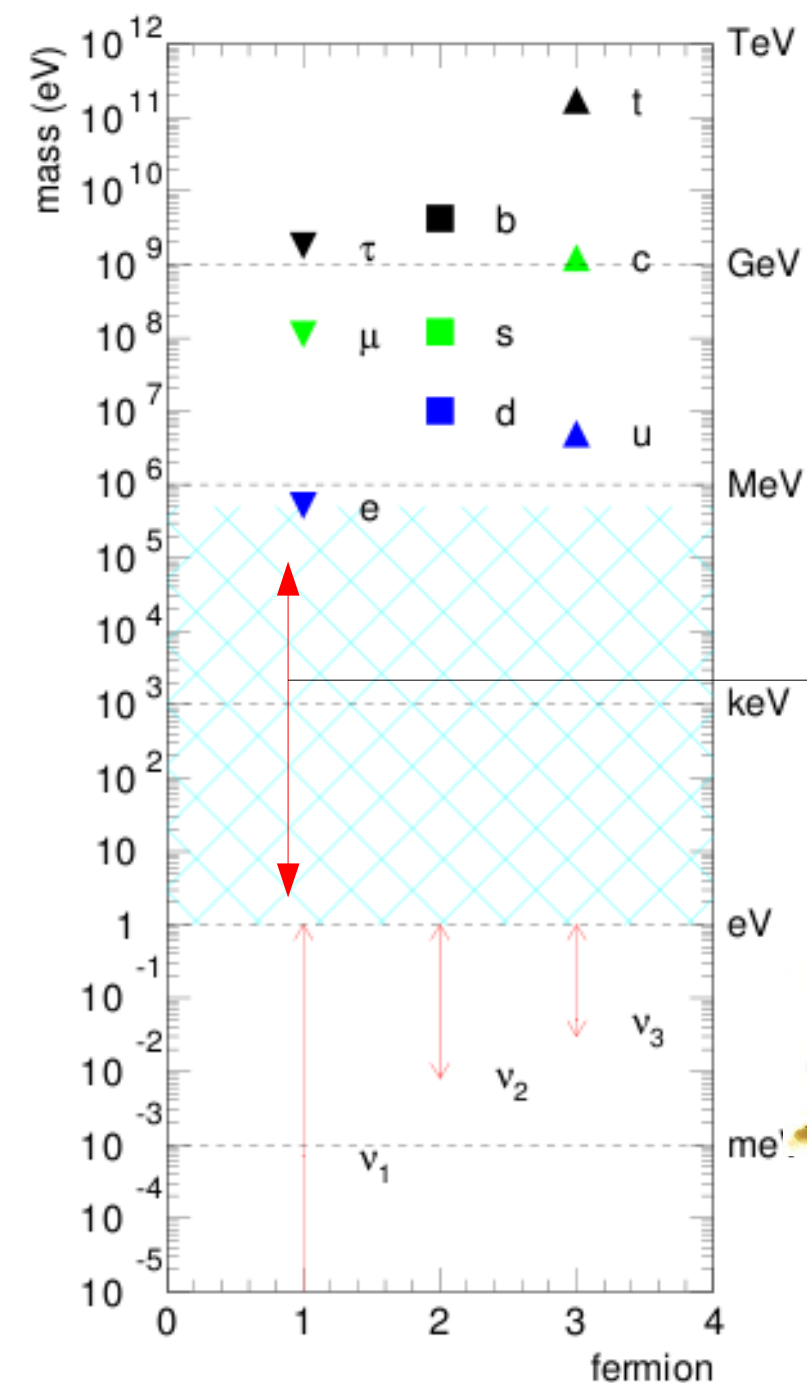
Cose di base che vorremmo capire:

Perche' hanno masse tanto piccole ?

> 6 ordini di grandezza

I neutrini ci “parlano” di scale di energia non raggiungibili dagli acceleratori di particelle (10^{16} GeV, **grande unificazione**)

Meccanismo see-saw
 $\text{meV} \sim (10^2 \text{ GeV})^2 / 10^{16} \text{ GeV}$



Come mai i neutrini si comportano in maniera tanto diversa dai quarks ? Ci sono delle simmetrie che possono spiegare naturalmente questi numeri che osserviamo ?

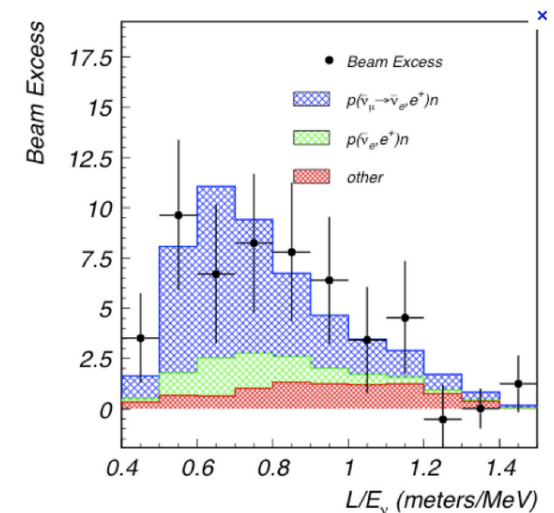
$$\begin{array}{ccc}
 \text{quarks} & & \text{neutrini} \\
 V_{CKM} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.001 \\ 0.2 & 1 & 0.01 \\ 0.001 & 0.01 & 1 \end{pmatrix} & \longleftrightarrow & V_{MNS} \sim \begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}
 \end{array}$$

circa “diagonale”

tutti sensibilmente diversi da zero

Esistono dei neutrini “extra” che non abbiamo ancora scoperto e che hanno nuovi tipi di accoppiamenti con le particelle note ? (neutrini “sterili”)

- Esperimento **LSND**: evidenza di transizioni $\text{anti-}\nu_{\mu} \rightarrow \text{anti-}\nu_e$ su una distanza di soli 30 m ?!?
- Nuova differenza di massa compatibile con le due note e tre soli neutrini.
- Costringerebbe ad ipotizzare uno (o più) nuovi neutrini
- Molti nuovi esperimenti al lavoro !



La violazione della simmetria CP e' presente anche nei neutrini ? Puo' spiegare l'asimmetria tra materia e antimateria nell'Universo ?

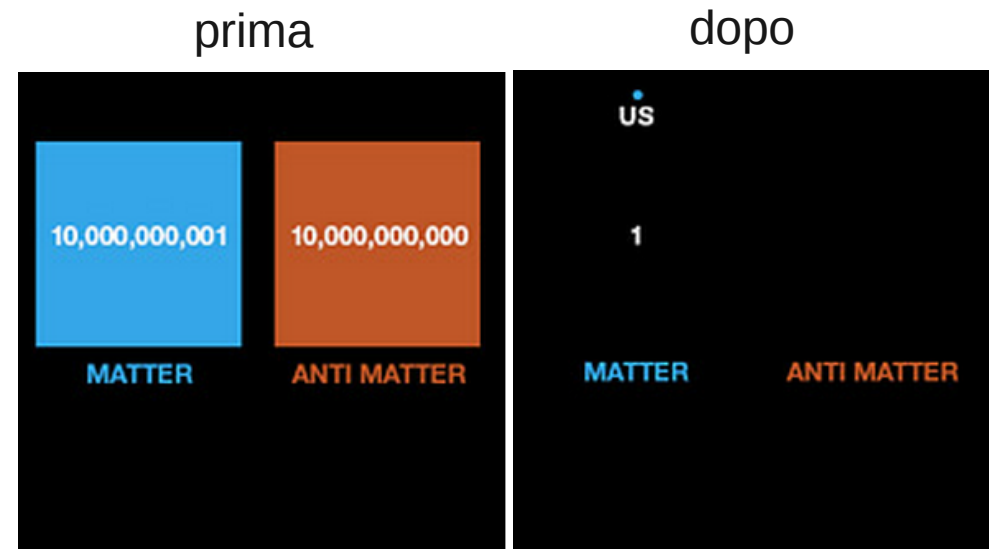
Violazione di CP ~

"Asimmetria di comportamento nei processi che coinvolgono particelle o anti-particelle"

$$A_{CP} = \frac{\mathcal{P}_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} - \mathcal{P}_{\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e}}{\mathcal{P}_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} + \mathcal{P}_{\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e}} = 1 ?$$

Se la violazione di CP fosse scoperta per i neutrini leggeri questo darebbe forza all'ipotesi dell'origine leptonica dell'asimmetria tra materia e antimateria nell'universo

Sappiamo già che la violazione di CP nel settore dei quark non è sufficiente.



Dall'8 marzo 2012 sappiamo che questo tipo di studi sono fattibili grazie alla scoperta delle oscillazioni $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$! grande fermento nella comunita'

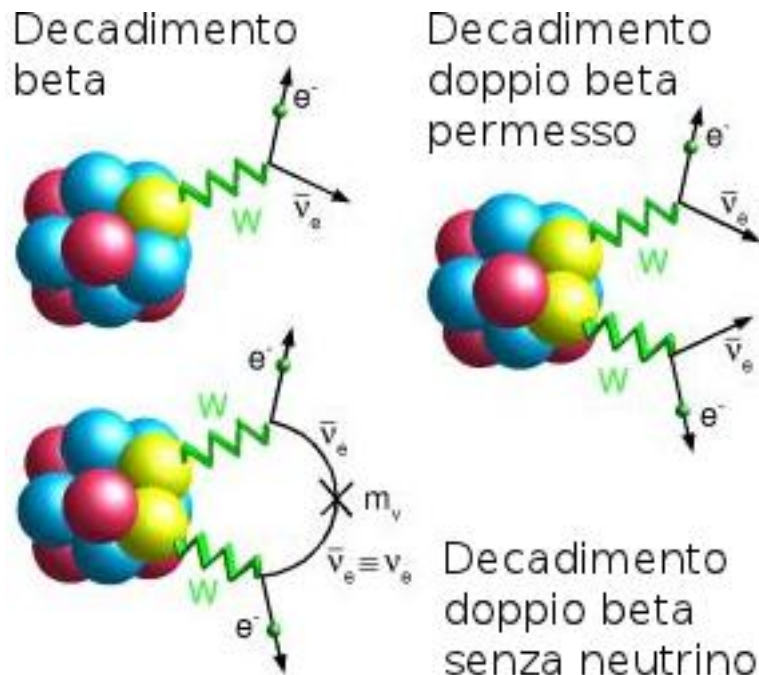
Esiste il “doppio decadimento β senza neutrini” ? Sono i neutrini simili alle altre particelle note ?

I neutrini sono particelle a spin $\frac{1}{2}$ (fermioni).

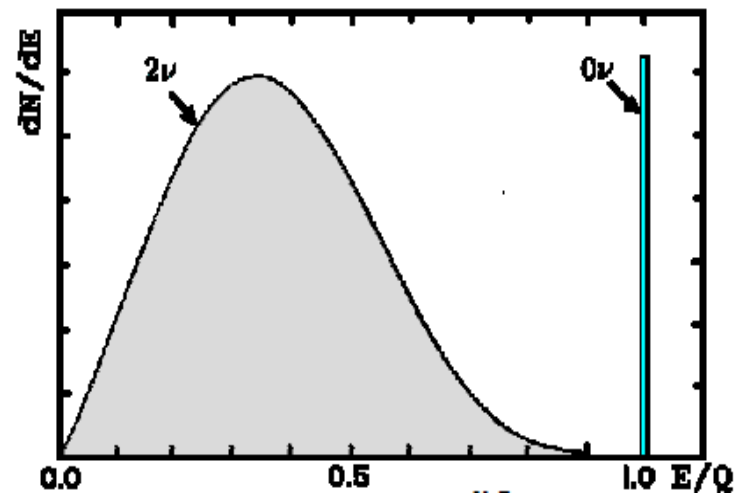
Sperimentalmente: ν spin anti-// alla velocita', anti- ν hanno spin // alla velocita'.

Dirac: esistono ν con tutte e due le elicità con le loro antiparticelle (4 stati, di cui solo 2 “visibili”).

Majorana: ν ed anti- ν sono due stati della stessa particella (possono “fondersi”).



e

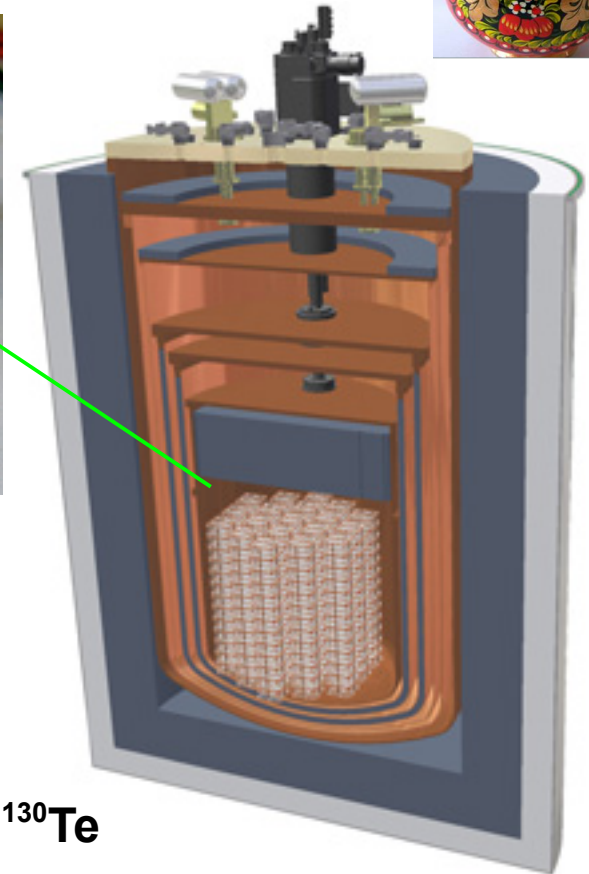
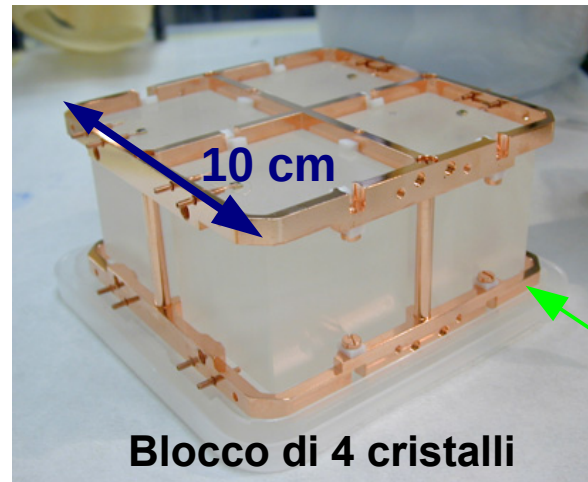


Spettro energetico dei due elettroni

Se si osservasse “avrebbe ragione” Majorana!

Esperimenti sul doppio decadimento β

L'esperimento Heidelberg-Moskow (11 kg di cristalli di Germanio al Gran Sasso) ha dato un'indicazione (controversa) dell'osservazione del fenomeno. Per capire meglio in costruzione due nuovi esperimenti al Gran Sasso.



GERDA: nuclei di ^{76}Ge

20 kg di cristalli immersi in azoto liquido.

In caso di conferma dell'esperimento HM, e' prevista l'estensione a 500 kg.

CUORE: nuclei di ^{130}Te

1000 cristalli di TeO_2 da 650 g a 7-10 mK.
L'energia depositata dagli elettroni e' convertita in calore (bolometri).

I neutrini come messaggeri ...



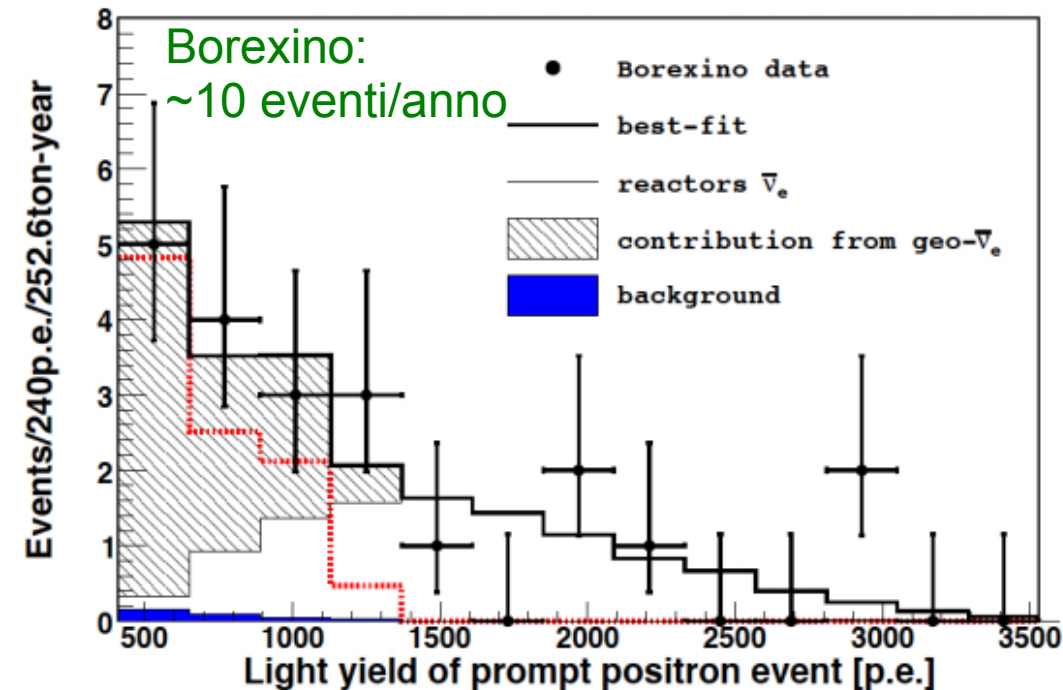
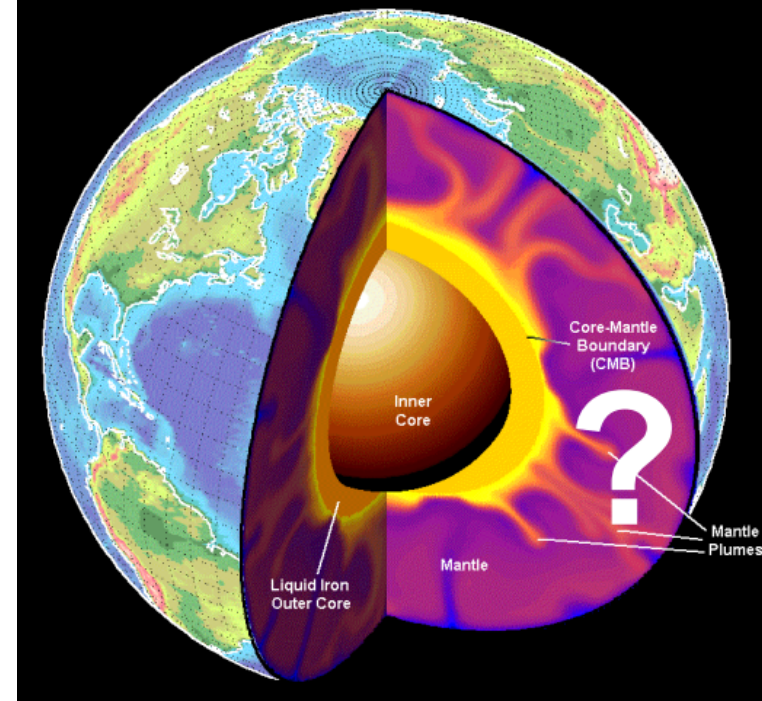
I neutrini come messaggeri ...

Prova a fermarmi ... !

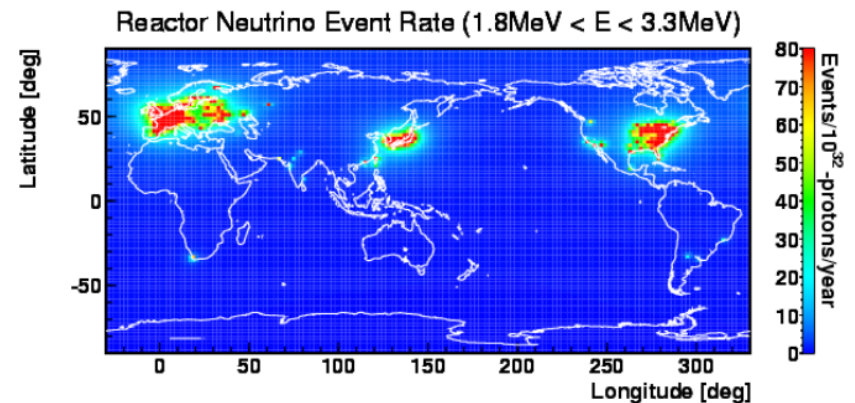


Geo-neutrini

- Sono anti-neutrini elettronici prodotti nelle catene di decadimento di **Uranio**, **Torio** e **Potassio-40** all'interno della Terra.
- L'esistenza di isotopi radioattivi all'interno della Terra potrebbe essere la principale sorgente del calore terrestre (16-42 TW).
- I carotaggi coprono una frazione infinitesima del raggio terrestre, ma i neutrini attraversano indisturbati la Terra per essere rivelati sulla superficie.



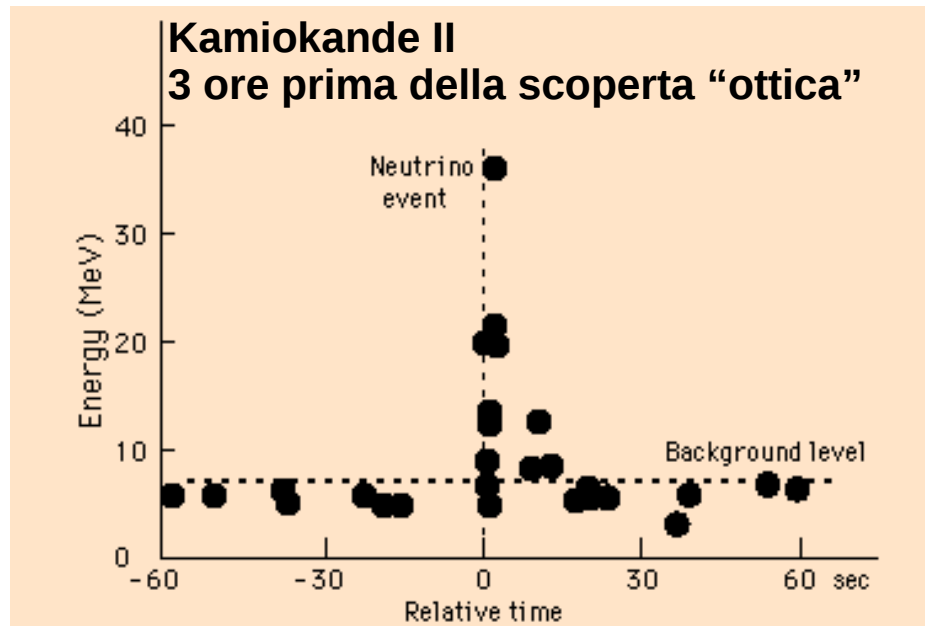
- Osservati da KAMLAND e Borexino
- Gli anti- ν_e da reattori costituiscono un disturbo (“fondo”)



Neutrini da SuperNova

I 99% dell'energia sottoforma di neutrini e, μ, τ ($10^{58} \nu$, 10^{46} J)
Energie fino a qualche decina di MeV.

L'osservazione a Terra avvenuta nel 1987 (SN1987A), da tre rivelatori water-Cerenkov (24 neutrini).

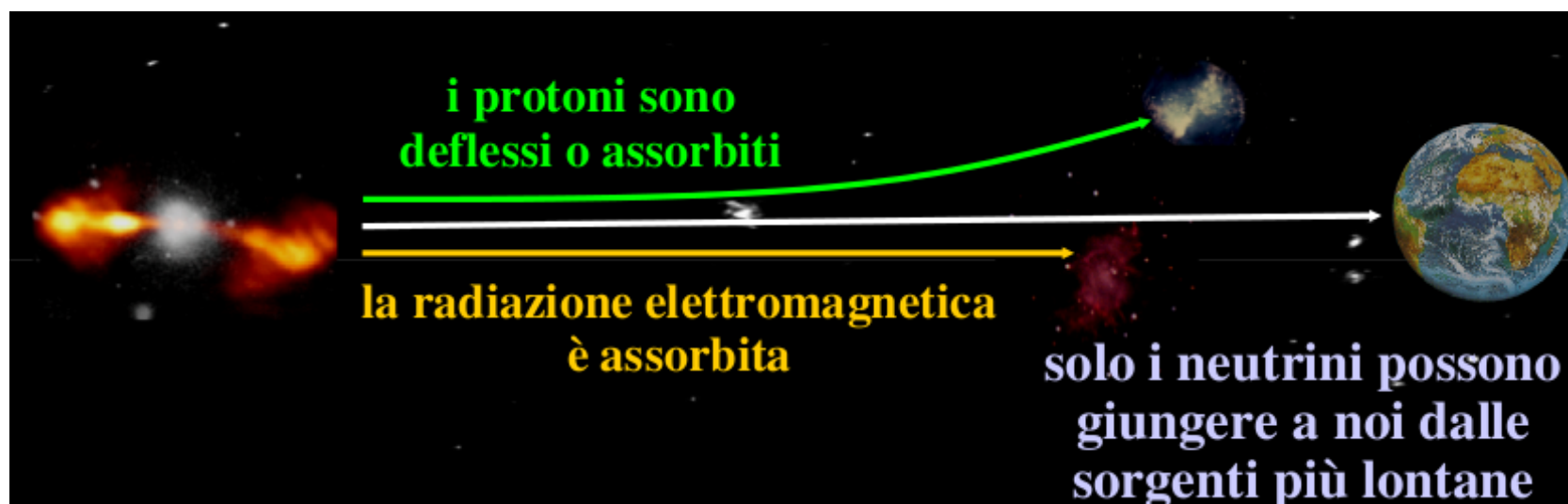


L'esperimento LVD, situato presso i laboratori del Gran Sasso, e' costituito da 1000 tonnellate di liquido scintillante. Attivo dal 1992.

Astronomia coi neutrini

Nell'interazione dei protoni accelerati dalle sorgenti astrofisiche con altri protoni o con la radiazione di fondo cosmica possono essere prodotti neutrini di altissima energia.

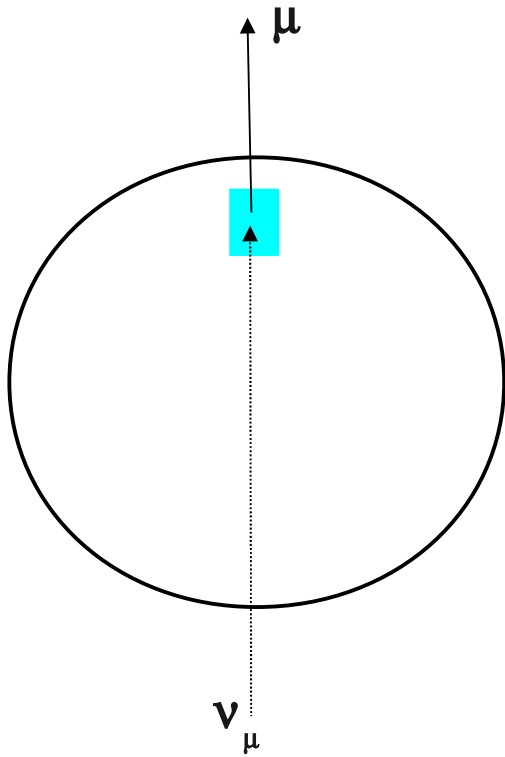
Attraversano imperturbati l'interno delle sorgenti astrofisiche.



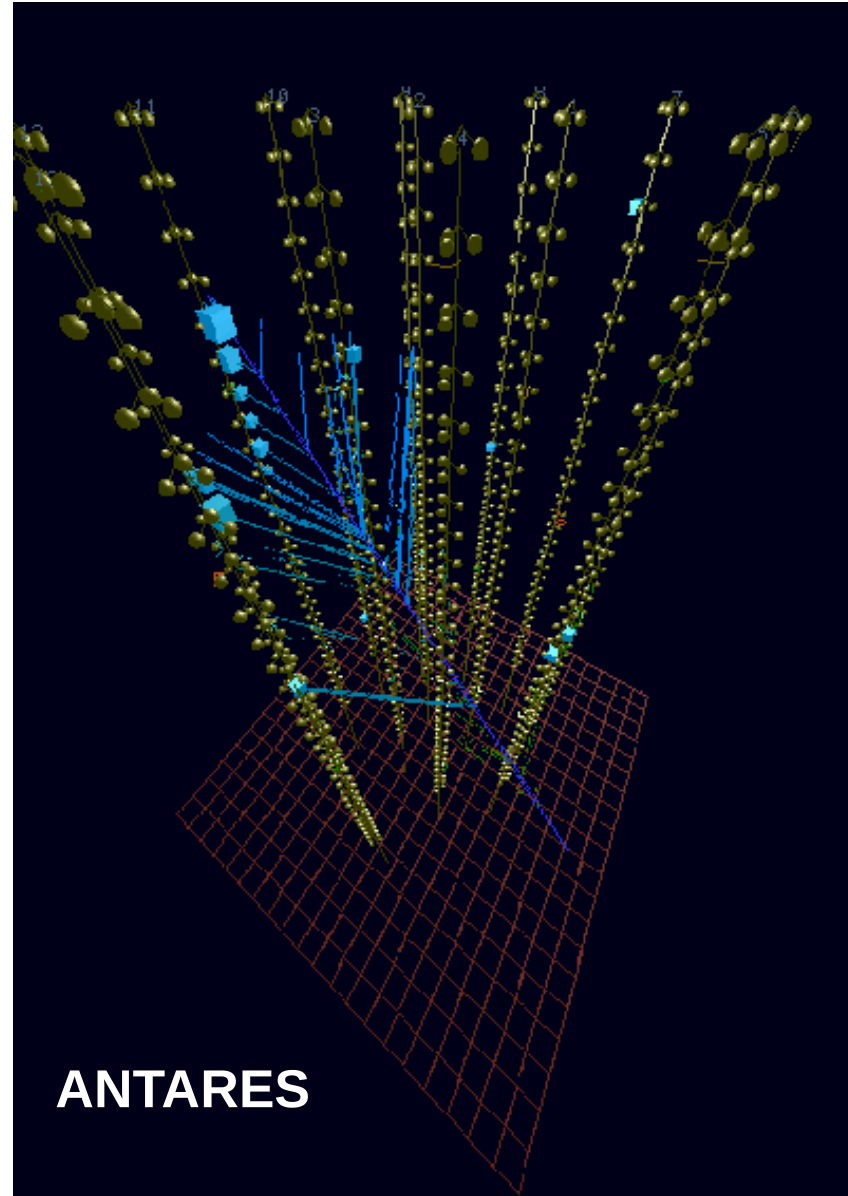
L'eventuale osservazione di neutrini astrofisici di alta energia ci permetterebbe di ottenere altre informazioni sui meccanismi di funzionamento degli “acceleratori naturali” di particelle che originano i raggi cosmici.

Rivelazione di neutrini da sorgenti astrofisiche

Bassa probabilita' di interazione e flusso: occorre instrumentare volumi molto grandi ($\sim 1 \text{ km}^3$): unica soluzione possibile e' usare l'acqua marina o il ghiaccio come schermo per i raggi cosmici e radiatore di luce Cerenkov per i muoni (elettroni) prodotti



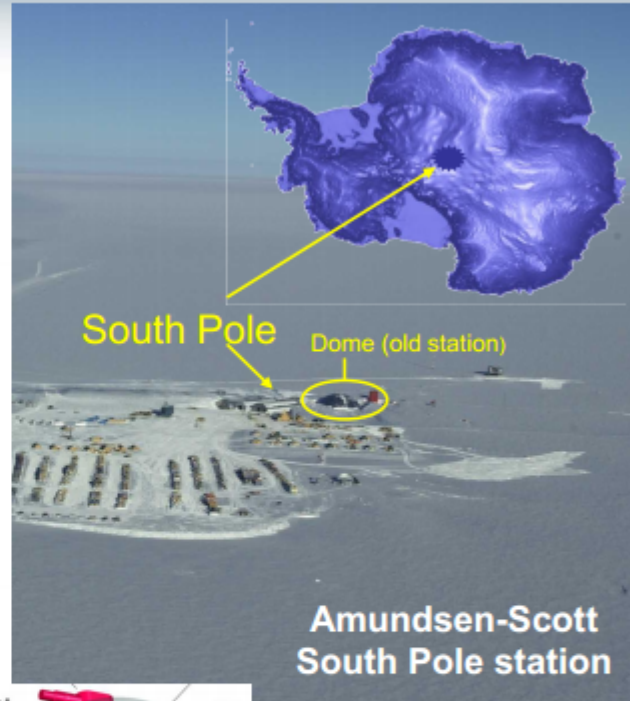
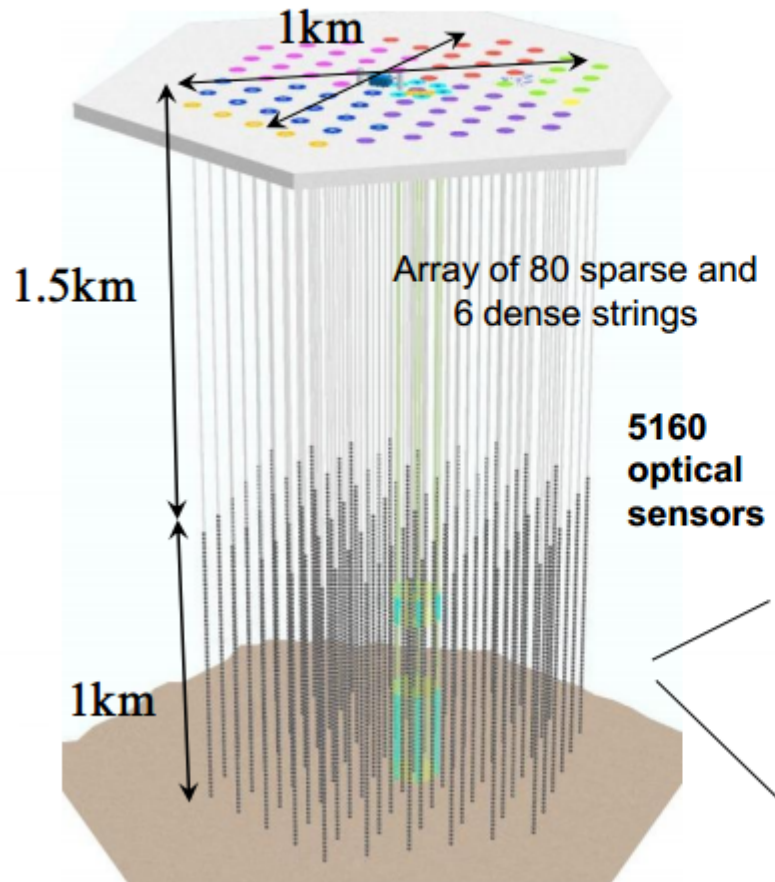
Upward-going
muons !



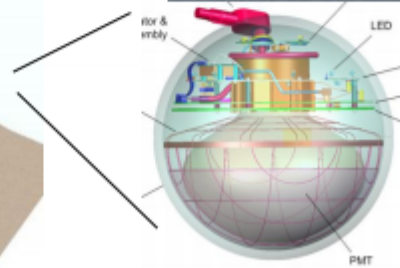
ANTARES

“Neutrino telescopes” nel ghiaccio antartico: ICECUBE

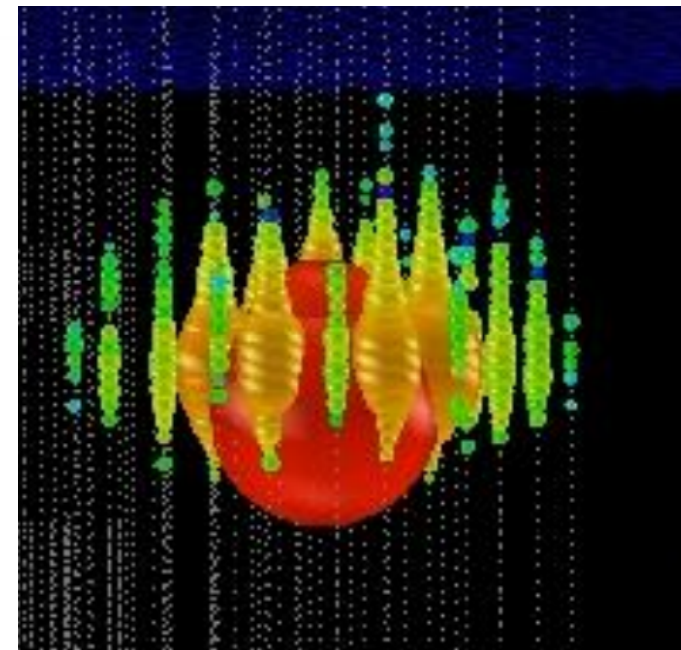
The IceCube Detector



5160
optical
sensors



**Candidato neutrino con
energia $\sim 10^{15}$ eV !!!**



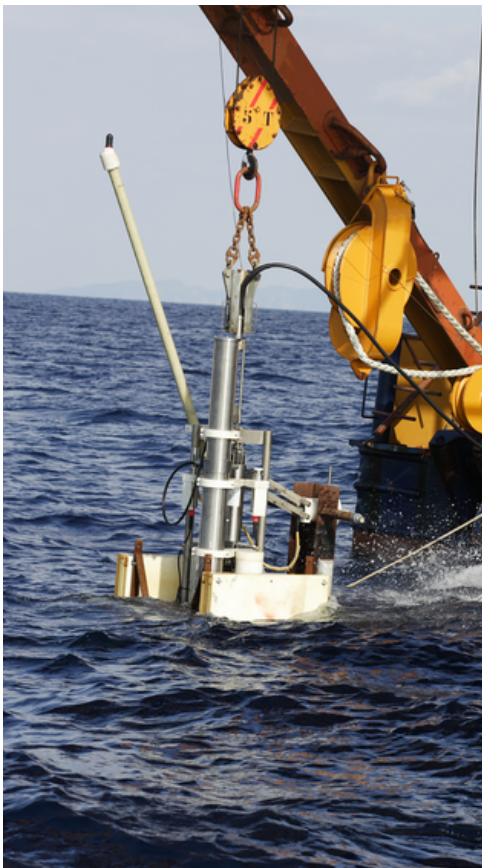
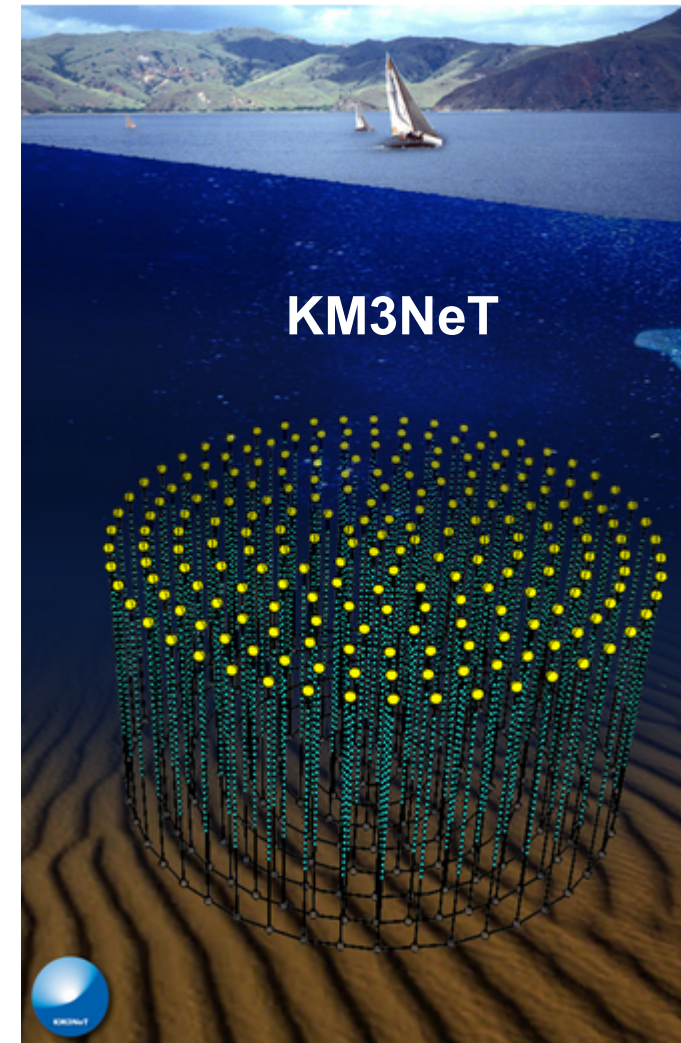
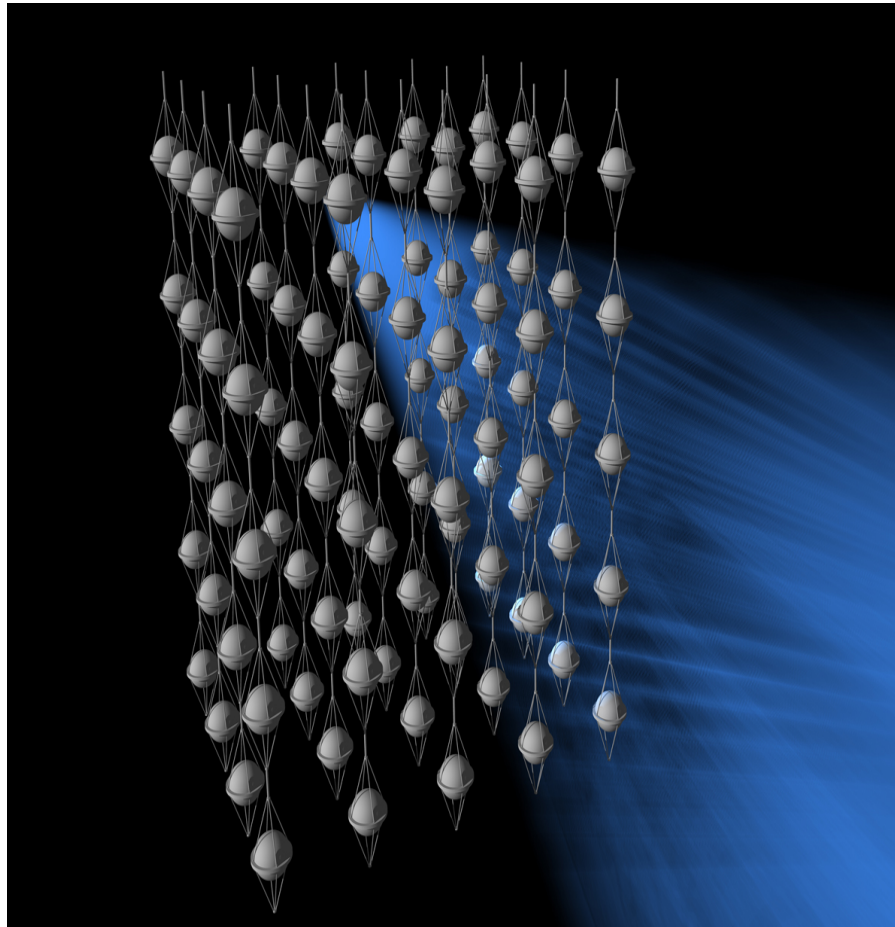
80 stringhe (2400 fotomoltiplicatori), in Antartide.

**Finora non sono state identificate sorgenti di
neutrini di alta energia.**

“Neutrino telescopes” in fondo al mare

Nell'emisfero nord sono attivi 3 “piccoli” esperimenti pilota: ANTARES (Francia), NESTOR (Grecia) e NEMO (Italia, Capo Passero).

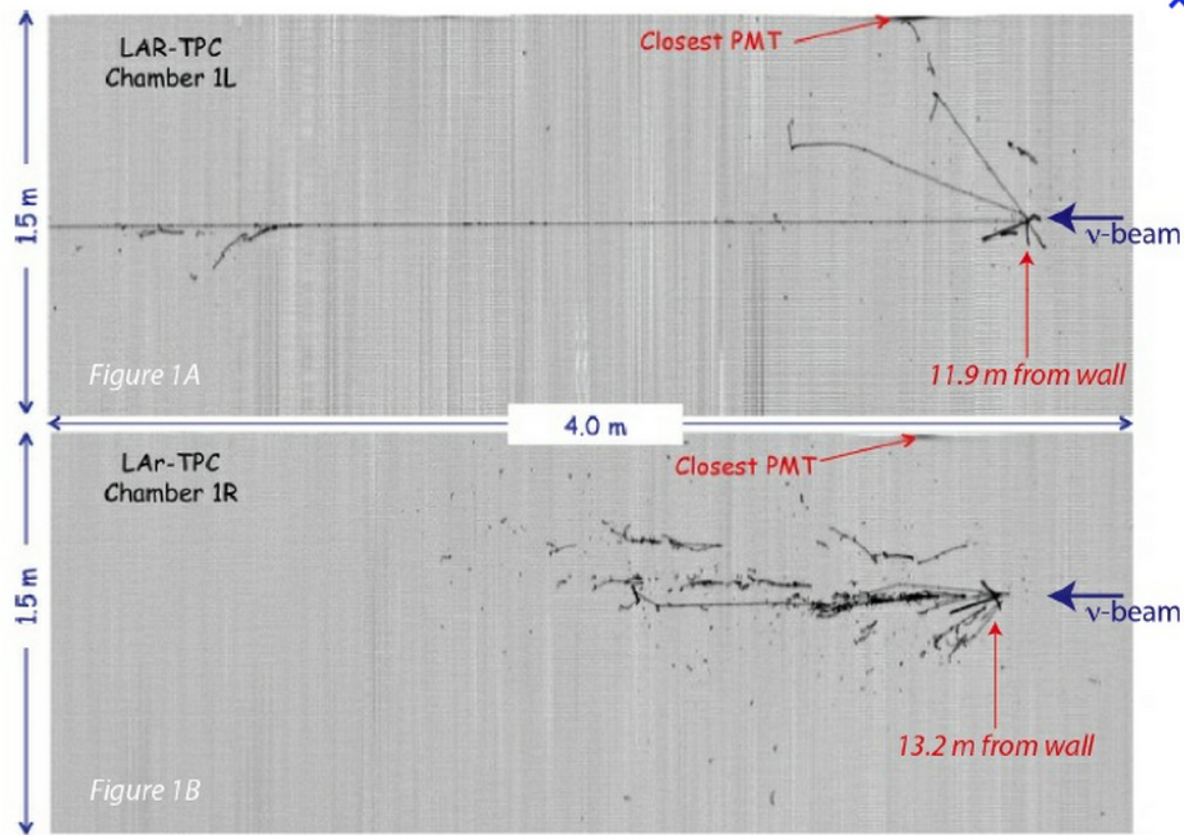
Futuro progetto per un volume $\sim \text{km}^3$ (KM3NeT) nel Mediterraneo



Spero di essere abbastanza “leggero”
(meno di un neutrino) ma di avere
interagito (piu' di un neutrino) con la
vostra curiosita'...

Grazie per l'attenzione!

Domande?



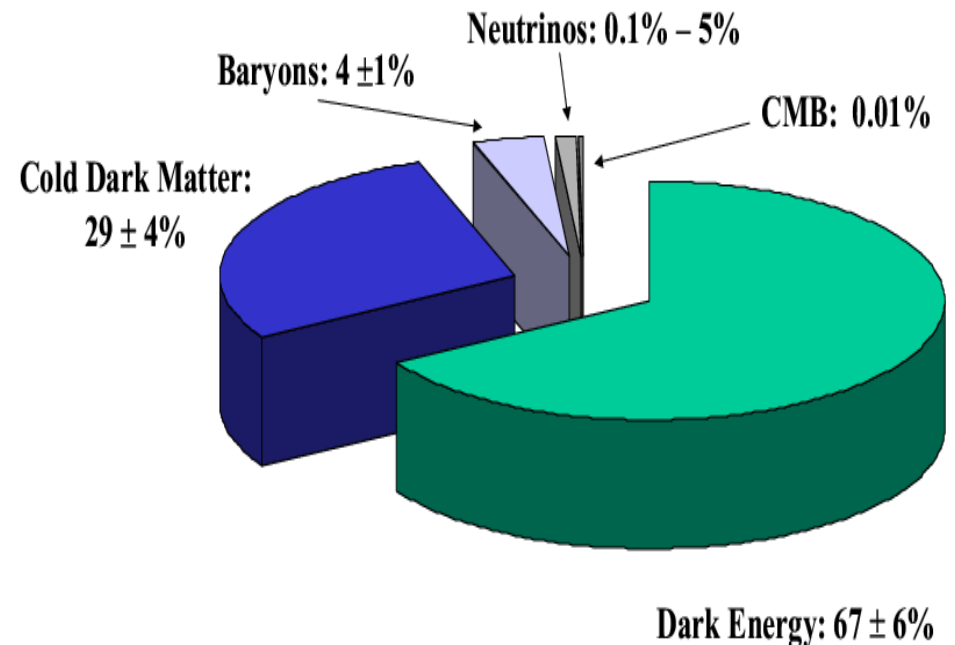
Le masse dei neutrini (III)

Gli esperimenti sul doppio decadimento β senza neutrini pongono un limite sulla massa del neutrino (la rate di decadimento dipende dalla massa; un limite superiore sul rate di decadimento si trasforma in un limite superiore sulla massa).

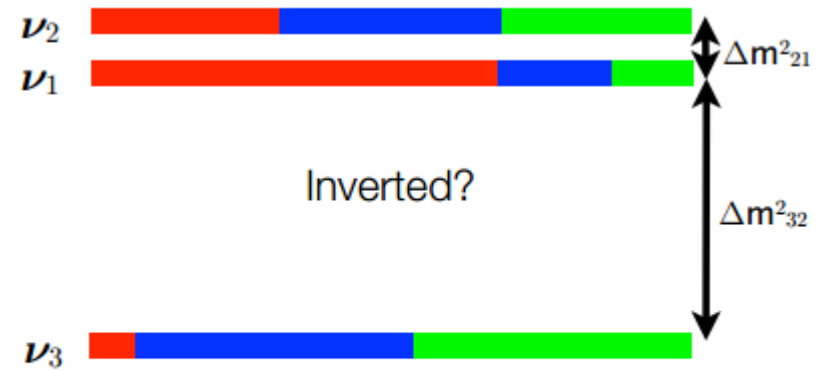
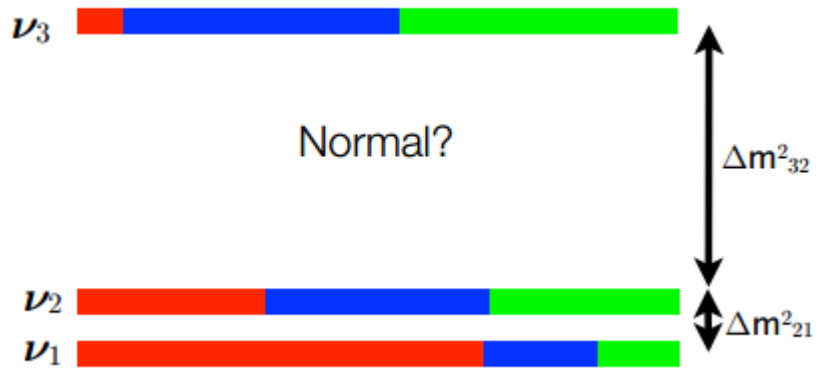
$M_{\nu_e} < 0.39 \text{ eV}$ (valido pero' solo se i neutrini sono alla Majorana).

Un altro limite superiore indiretto viene da misure astrofisiche (radiazione di fondo cosmico, distribuzione delle galassie e del gas intergalattico). Il risultato di queste misure e' la ripartizione della massa dell'universo (anche in neutrini fossili del Big Bang). Nota la loro densita' ($360/\text{cm}^3$), si stima

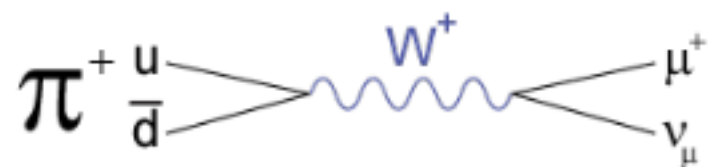
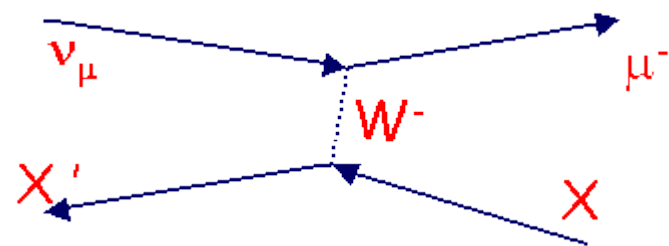
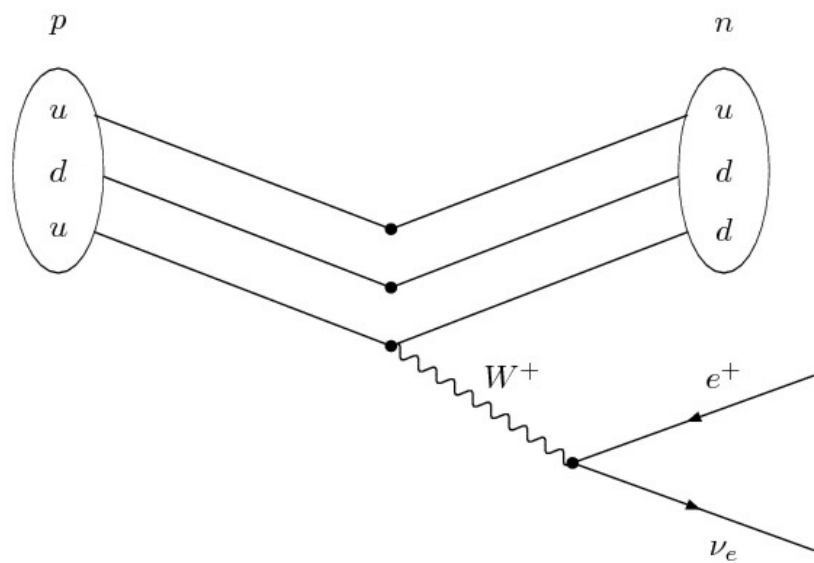
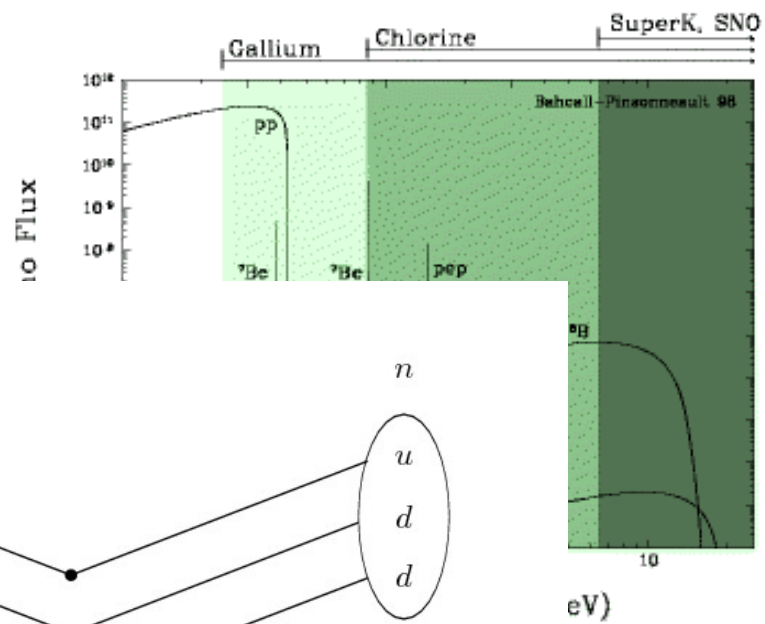
$$\Sigma M_{\nu_i} < 0.6 \text{ eV}$$



Gerarchia normale o inversa ?



 ν_e  ν_μ  ν_τ



Esperimenti sulle oscillazioni dei neutrini solari (III)

Scintillatori.

Uno scintillatore e' un materiale che emette impulsi luminosi quando viene attraversato da un fotone o da un particella carica.

La luce prodotta viene trasformata in segnali elettrici dai fotomoltiplicatori.

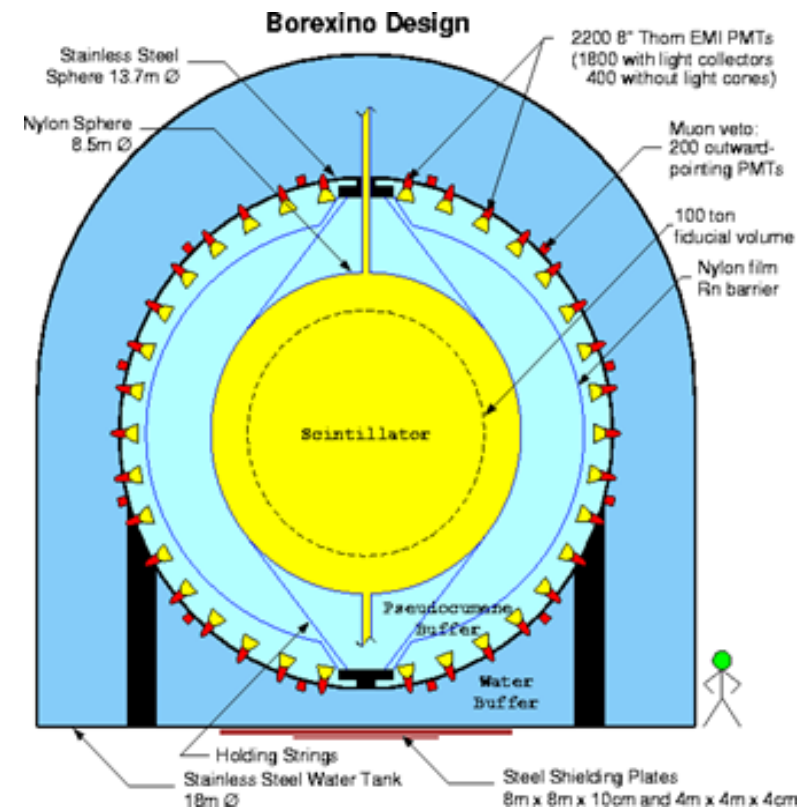
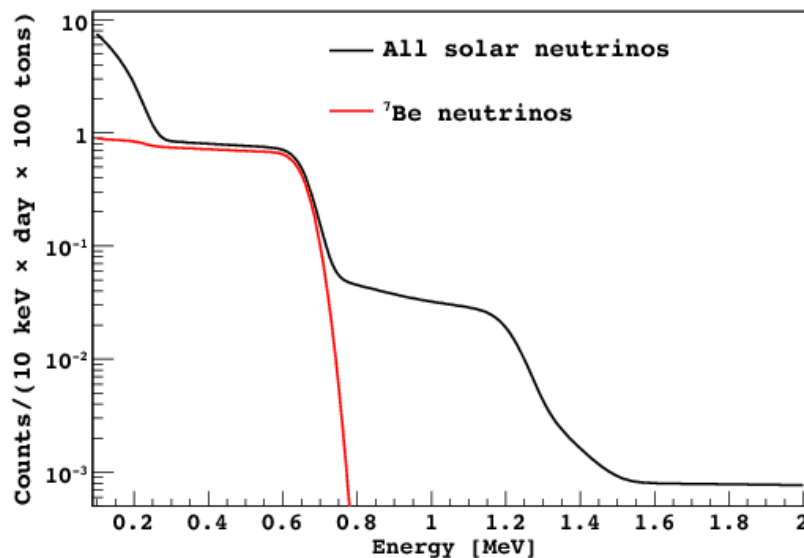
I rivelatori di neutrini solari con scintillatore liquido rivelano la luce prodotta dall'elettrone nello stato finale del processo:

Borexino

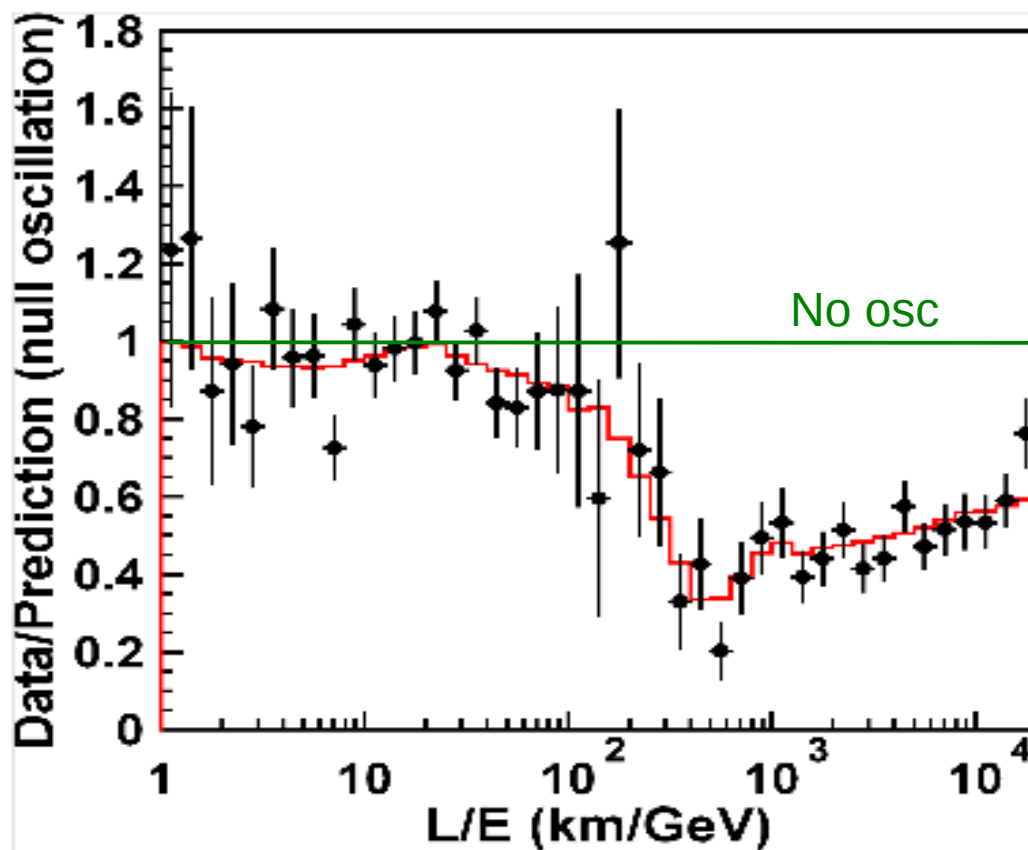
Sito: Gran Sasso

Soglia = 250 keV

Purezza scintillatore liquido: $\sim 10^{-17}$ per limitare il fondo dovuto alla radioattivita' dello scintillatore.



Analisi L/E di SuperKamiokande



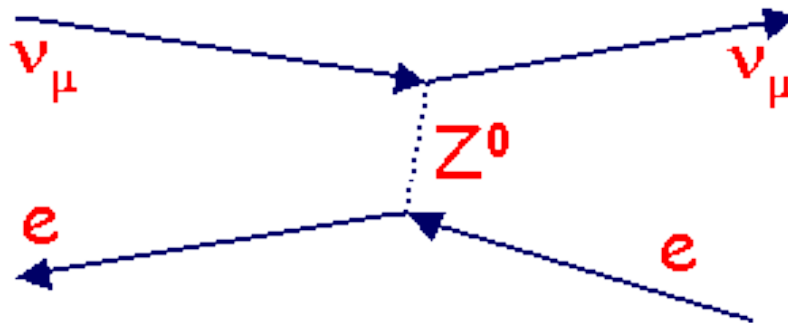
Oscillazione in ν_τ favorita dai dati (spettro eventi di tipo elettronico e dati di CHOOZ)

Lista dei principali esperimenti sulle oscillazioni

<u>Sorgente</u>	<u>Tipo</u>	<u>Esperimento</u>	<u>Parametri</u>
Sole	ν_e	Homestake, Gallex/GNO, SaGe, Kamiokande, SuperKamiokande, SNO, Borexino	$\theta_{12}, \Delta m^2_{12}$
<u>Raggi cosmici</u>	ν_μ , anti- ν_μ	Kamiokande, IMB, MACRO, Soudan II, Superkamiokande	$\theta_{23}, \Delta m^2_{23}$
<u>Fasce</u>	ν_μ , anti- ν_μ	K2K, MINOS, OPERA T2K	$\theta_{23}, \Delta m^2_{23}$ θ_{13}
<u>Reattori nucleari</u>	anti- ν_e	CHOOZ, Palo Verde, Double CHOOZ, DayaBay KamLAND	θ_{13} $\theta_{12}, \Delta m^2_{12}$

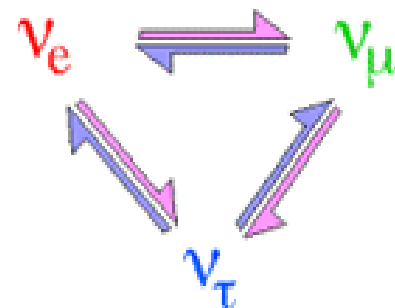
I neutrini nel Modello Standard (II)

Coppie neutrini-anti-neutrini sono accoppiate alla Z^0 (interazioni deboli a corrente neutra).



Se i neutrini sono massivi, devono essere accoppiati anche al bosone di Higgs (l'unica particella del Modello Standard non ancora osservata). Non c'è alcun motivo per cui gli stati dei neutrini che intervengono nelle interazioni deboli cariche e neutre (ν_e, ν_μ, ν_τ) debbano essere gli stessi dell'accoppiamento al bosone di Higgs (ν_1, ν_2, ν_3).

In altre parole, i neutrini prodotti nell'interazione debole non hanno una massa definita e come conseguenza percorrendo una distanza possono oscillare, ovvero cambiare di tipo (oscillazione).



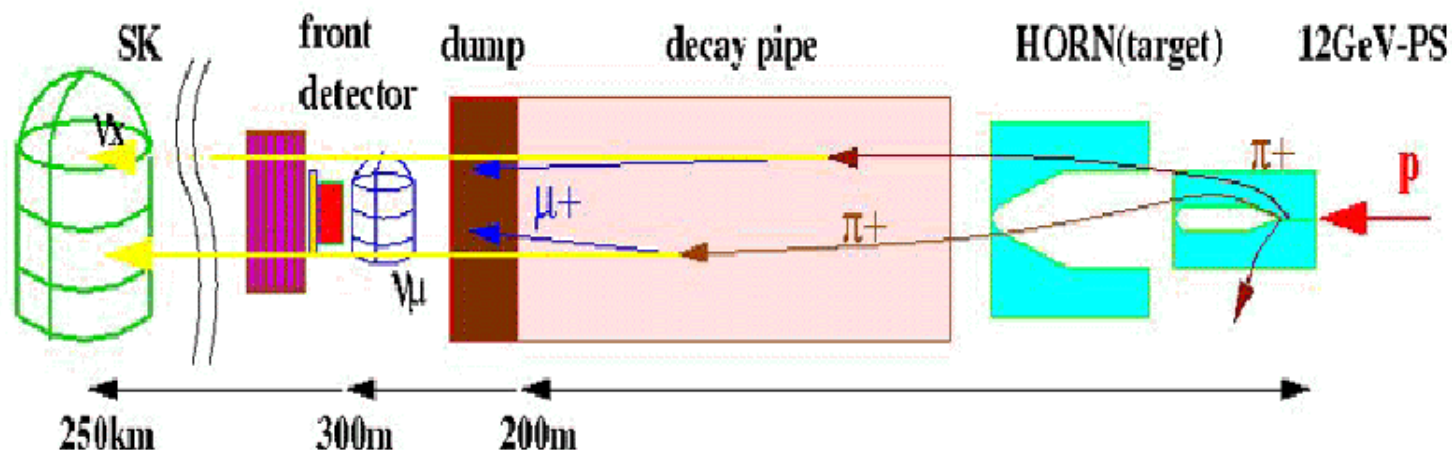
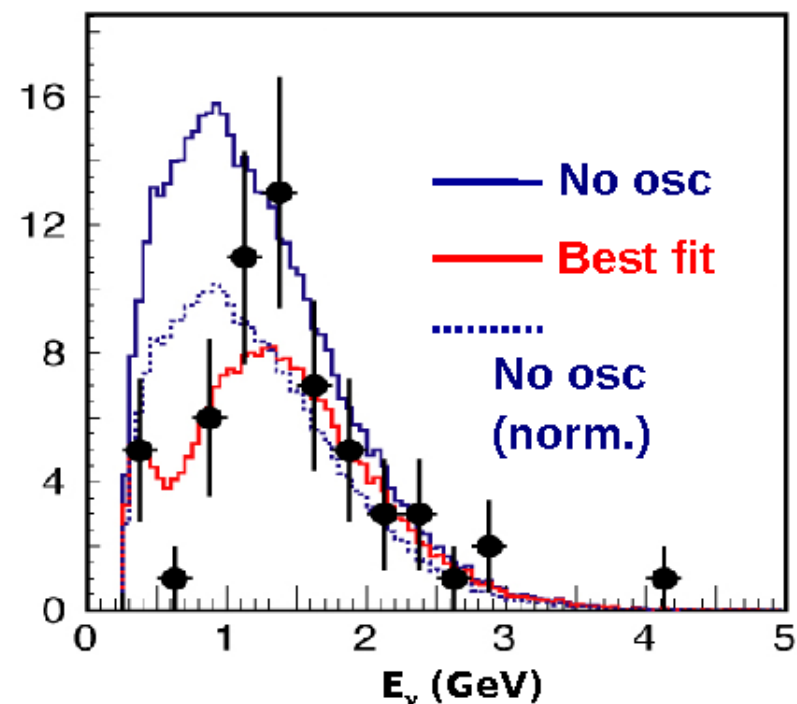
Esperimenti di oscillazione su fasci di ν_μ : K2K

K2K (L=250 km)

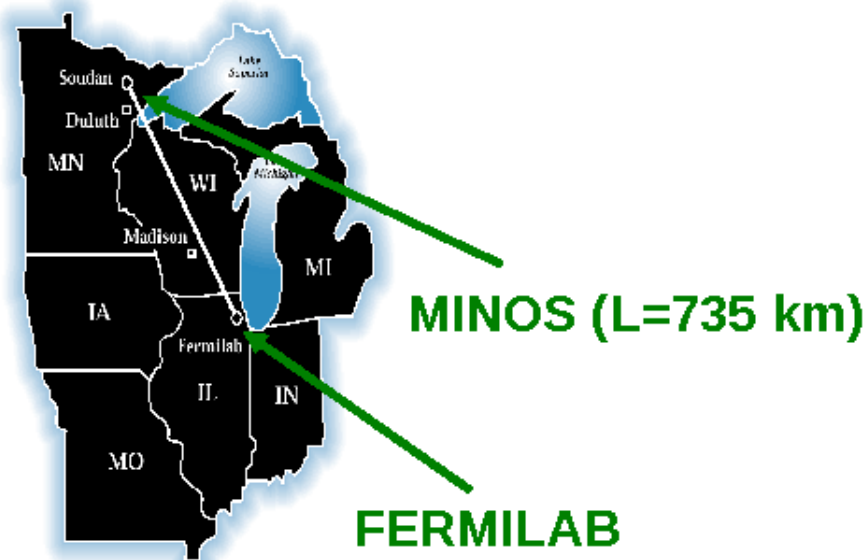


Detector di long baseline = SuperKamiokande

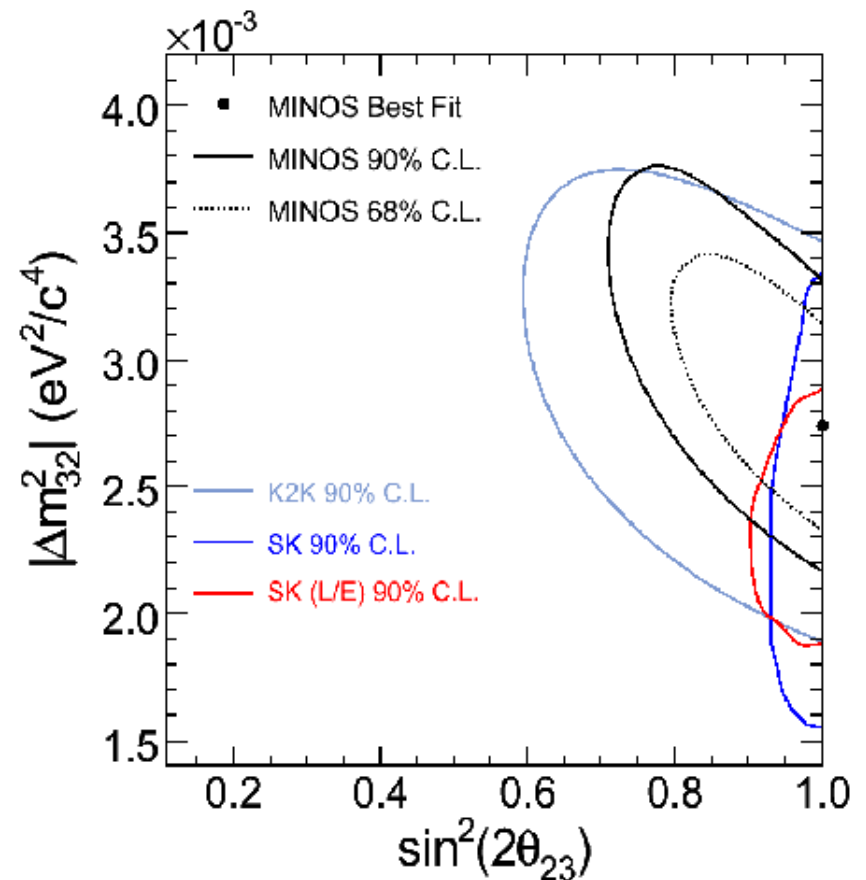
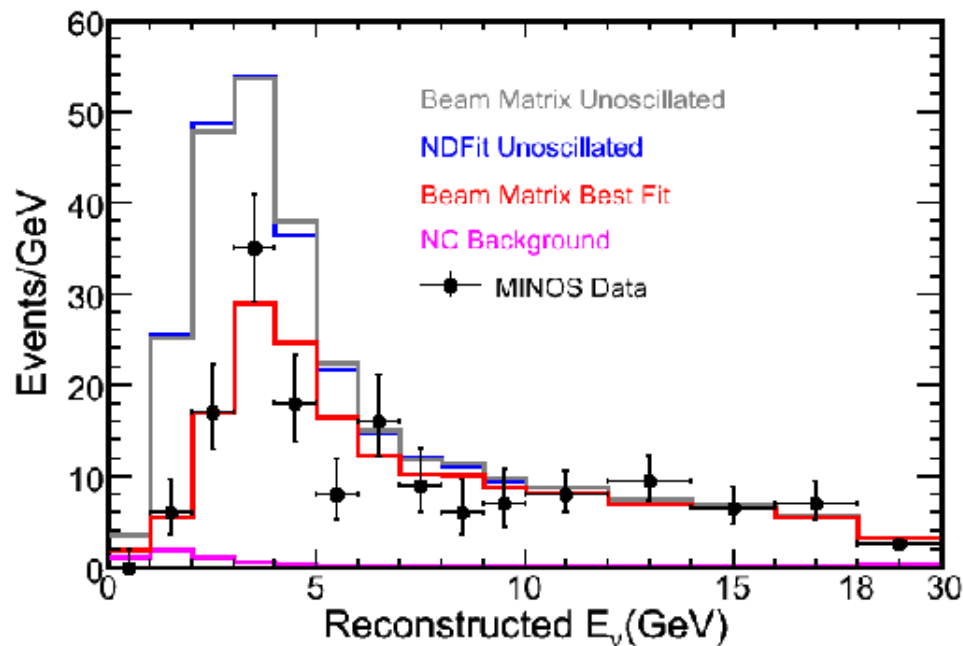
Detector di short baseline = 1 kton water Cerenkov with fine grained detector system, per controllare il fascio.

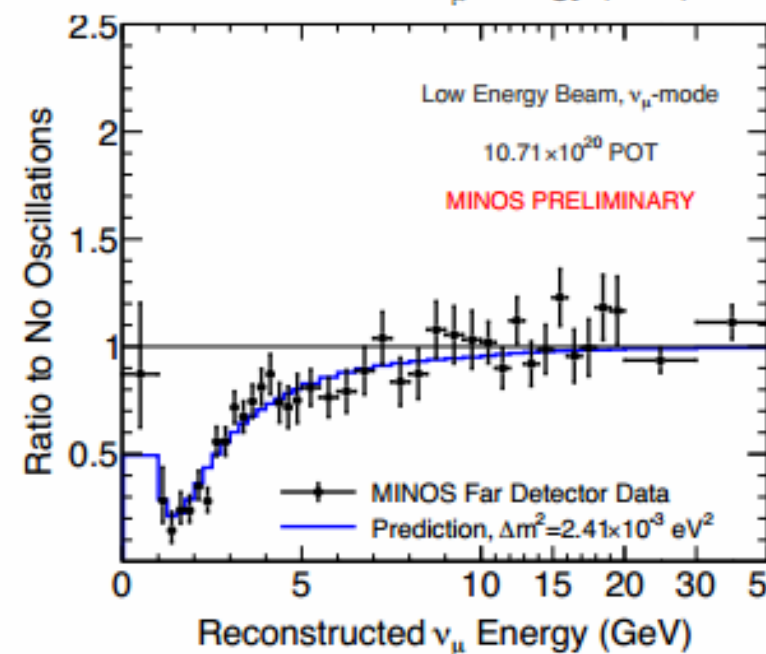
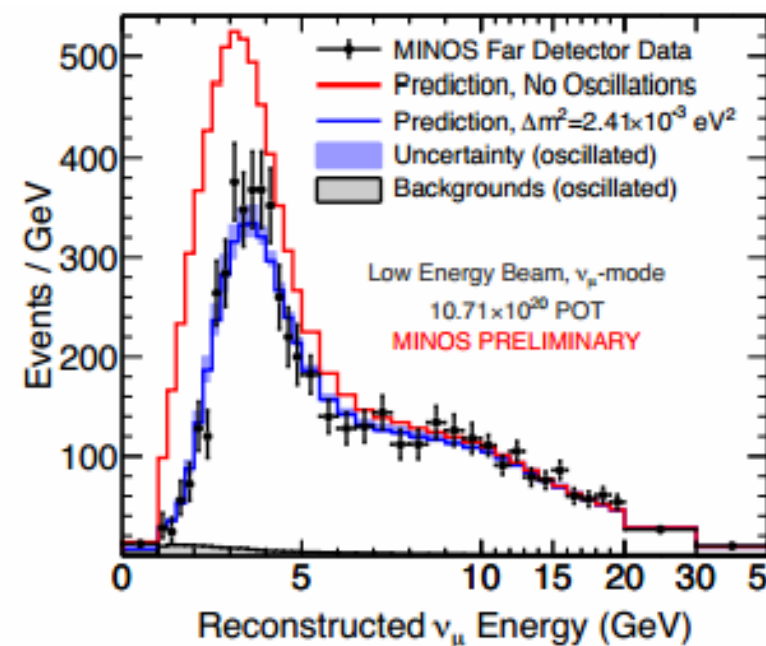


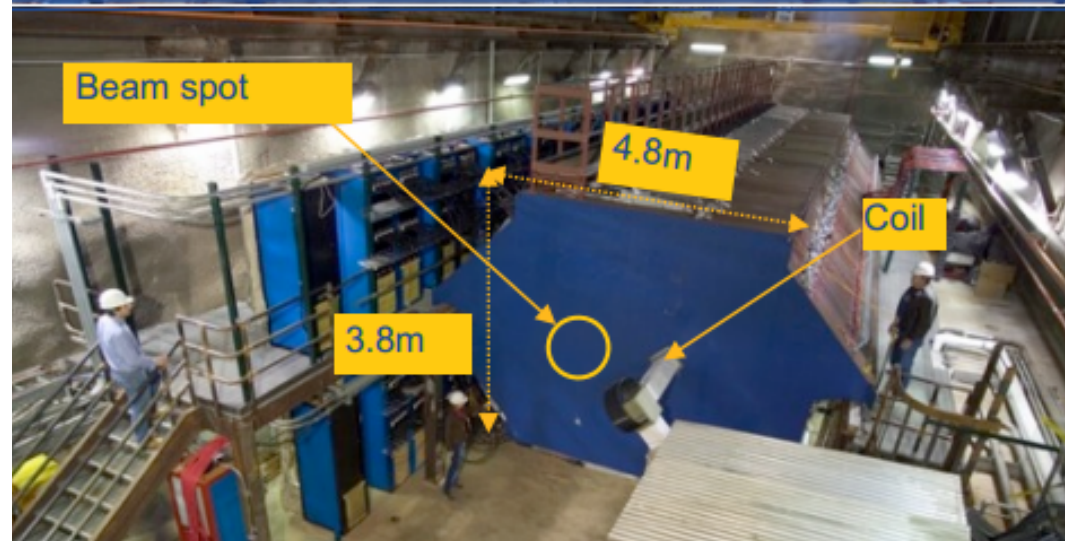
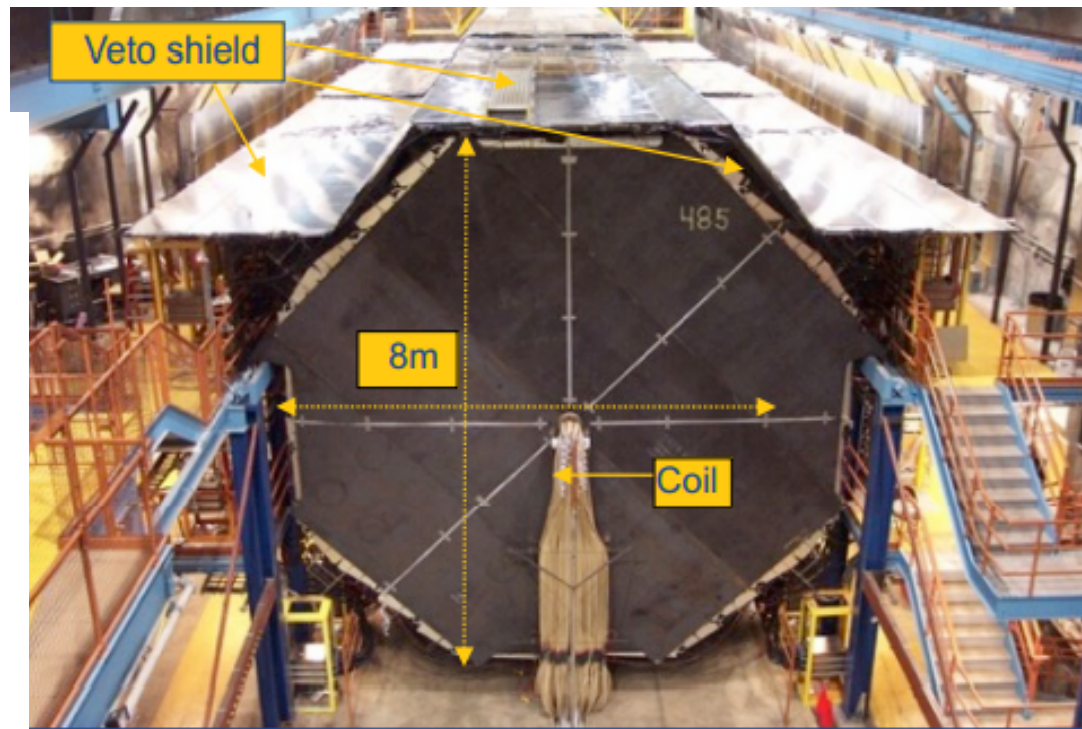
Esperimenti di oscillazione su fasci di ν_μ : MINOS (USA)



Far detector = steel-scintillator tracking calorimeter (5.4 kton)
Near detector = steel-scintillator tracking calorimeter (0.98 kton)
Inizio della presa dati=Maggio 2005

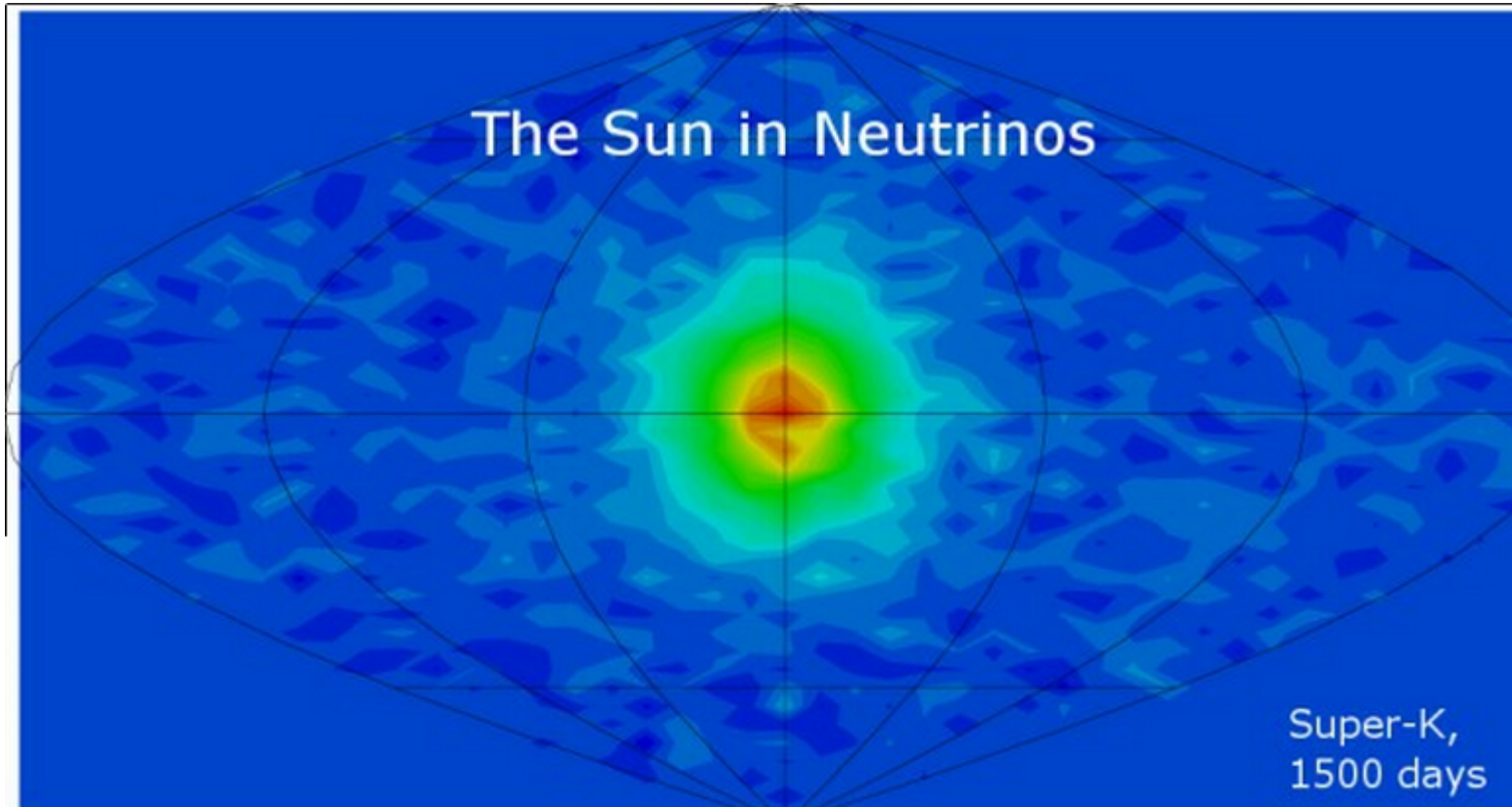






The Sun in Neutrinos

Super-K,
1500 days



Grazie alla loro debolissime interazioni

I neutrini prodotti all'interno del Sole emergono da esso

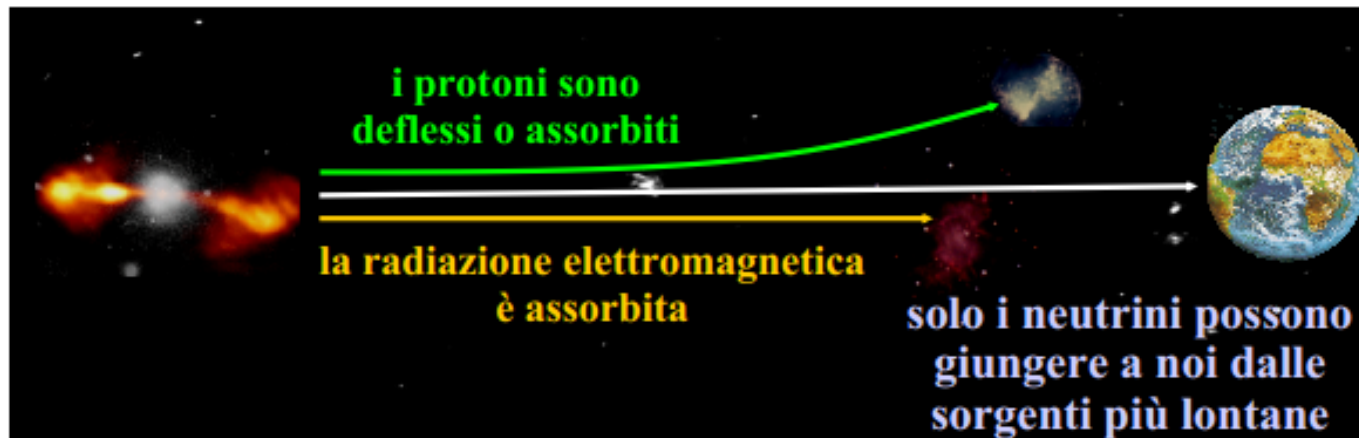
e ci danno informazioni sui processi che vi avvengono

Ogni altra radiazione (luce, ..) viene assorbita

I neutrini possono giungere a noi dal remoto Universo

Senza assorbimento (a differenza di luce, raggi γ , ...)

Non deflessi da campi magnetici (a differenza delle particelle cariche)

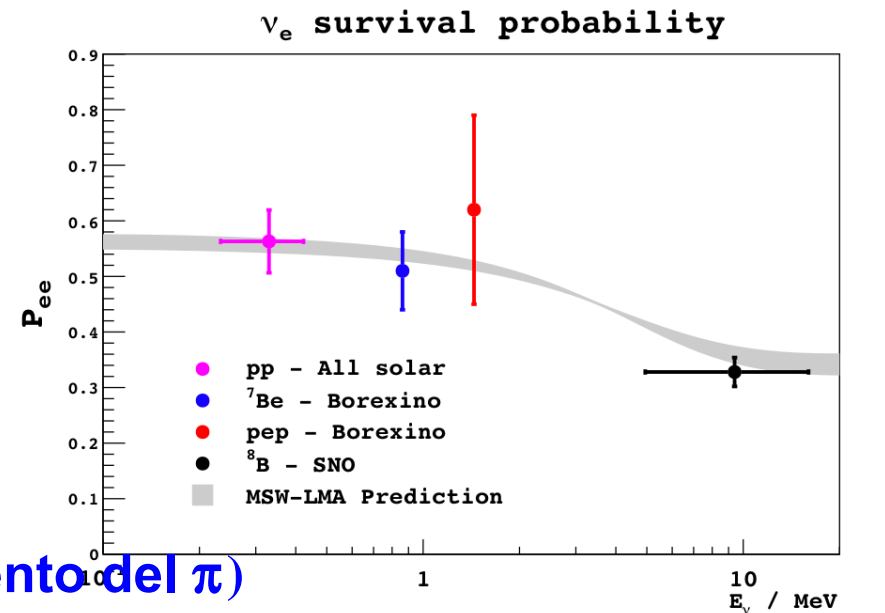
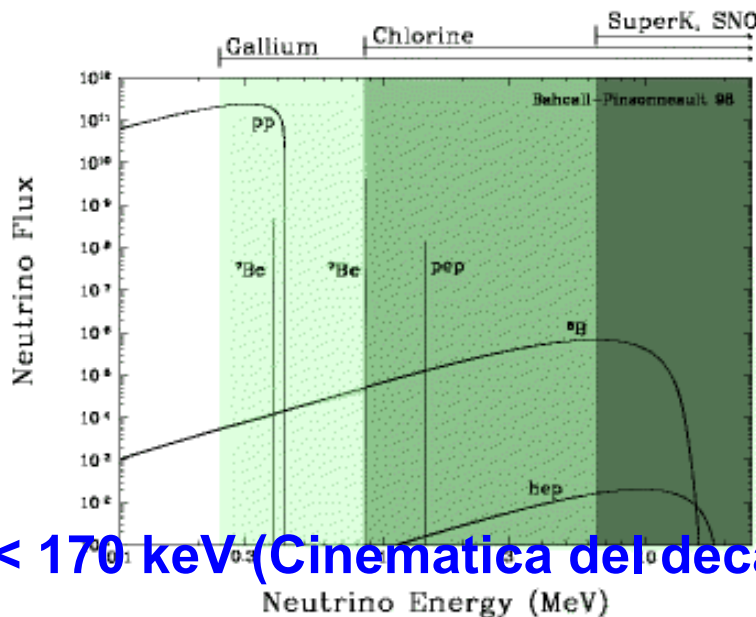


I neutrini come strumento di indagine

I neutrini, avendo una bassa probabilita' di interazione con la materia (interazione debole), possono essere utilizzati per studiare fenomeni astrofisici o geologici.

Neutrini solari

L'osservazione dei neutrini solari, dopo aver evidenziato l'esistenza delle oscillazioni dei neutrini, permette di migliorare la conoscenza del modello solare.



$m_{\nu\mu} < 170 \text{ keV}$ (Cinematica del decadimento del π)

$m_{\nu\tau} < 15.5 \text{ MeV}$ (Cinematica del decadimento in 5π del τ)

Le oscillazioni dei neutrini

Gli stati di neutrino nelle interazioni deboli non hanno una massa definita.

Se i neutrini hanno masse differenti tra loro, si ha il fenomeno delle oscillazioni: il neutrino prodotto in uno stato dell'interazione debole ν_α ($\alpha=e,\mu,\tau$) cambia di tipo nel tragitto L e si trasforma in un altro stato $\beta \neq \alpha$.

Le oscillazioni sono descritte da sei parametri: Δm^2_{12} , Δm^2_{23} ed una matrice di mescolamento U .

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

$c = \cos \theta$
 $s = \sin \theta$

Si ha evidenza di oscillazioni nei neutrini solari (Δm^2_{12} , θ_{12}), atmosferici e su fasci di lunga baseline (Δm^2_{23} , θ_{23}).

θ_{13} si studia con esperimenti su neutrini da reattore e su fasci di lunga baseline.

δ e' ancora ignoto, e potrebbe essere legato all'asimmetria materia-antimateria.

Un evento di OPERA e uno del nera detector e far detector di T2K

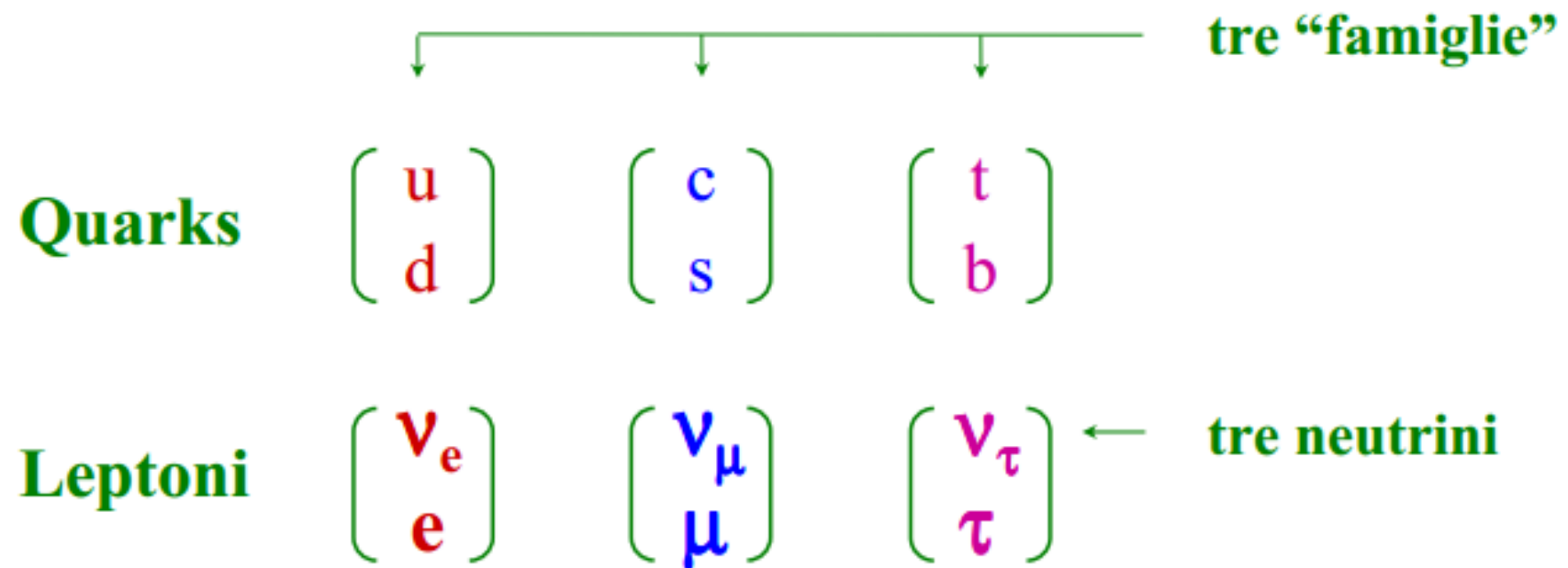
Probabilità di oscillazione nel caso di due neutrini

The diagram shows the formula for neutrino oscillation probability P with four green arrows pointing to its components:

- Angolo di mixing** points to $\sin^2(2\theta)$.
- Differenza delle masse al quadrato** points to $\Delta m^2 [\text{eV}^2]$.
- Tragitto (baseline)** points to $L [\text{km}]$.
- Energia del neutrino** points to $E [\text{GeV}]$.

$$P = \sin^2(2\theta) * \sin^2(1.27 * \Delta m^2 [\text{eV}^2] * \frac{L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]})$$

E' una buona approssimazione in molti casi,
dato che θ_{13} e' piccolo e $\Delta m^2_{23} \gg \Delta m^2_{12}$



Sono “elementari” in senso assoluto?

Emergerà una più profonda struttura della materia?

Il neutrino

La particella più misteriosa

Importantissimo per Fisica, Astrofisica e Cosmologia