

La fisica del neutrino

- Introduzione e proprietà generali del neutrino
- Oscillazioni di neutrino
 - Sorgenti naturali di origine astrofisica
 - Sorgenti artificiali
- Particelle di Dirac o di Majorana?
- Questioni aperte

Il Curriculum Vitae del neutrino (v)

1930 - Pauli lo concepì

1932 - Fermi lo battezzò e lo inserì in un quadro coerente

1958 - Goldhaber ne misurò indirettamente l'elicità

1959 - Cowan e Reines lo rivelarono

1959 - Pontecorvo, Lee e Yang ne proposero i saponi

1957 - 1962 - Pontecorvo e Sakata ne proposero le oscillazioni

1962 - Steinberger et al. ne distinsero sperimentalmente i saponi

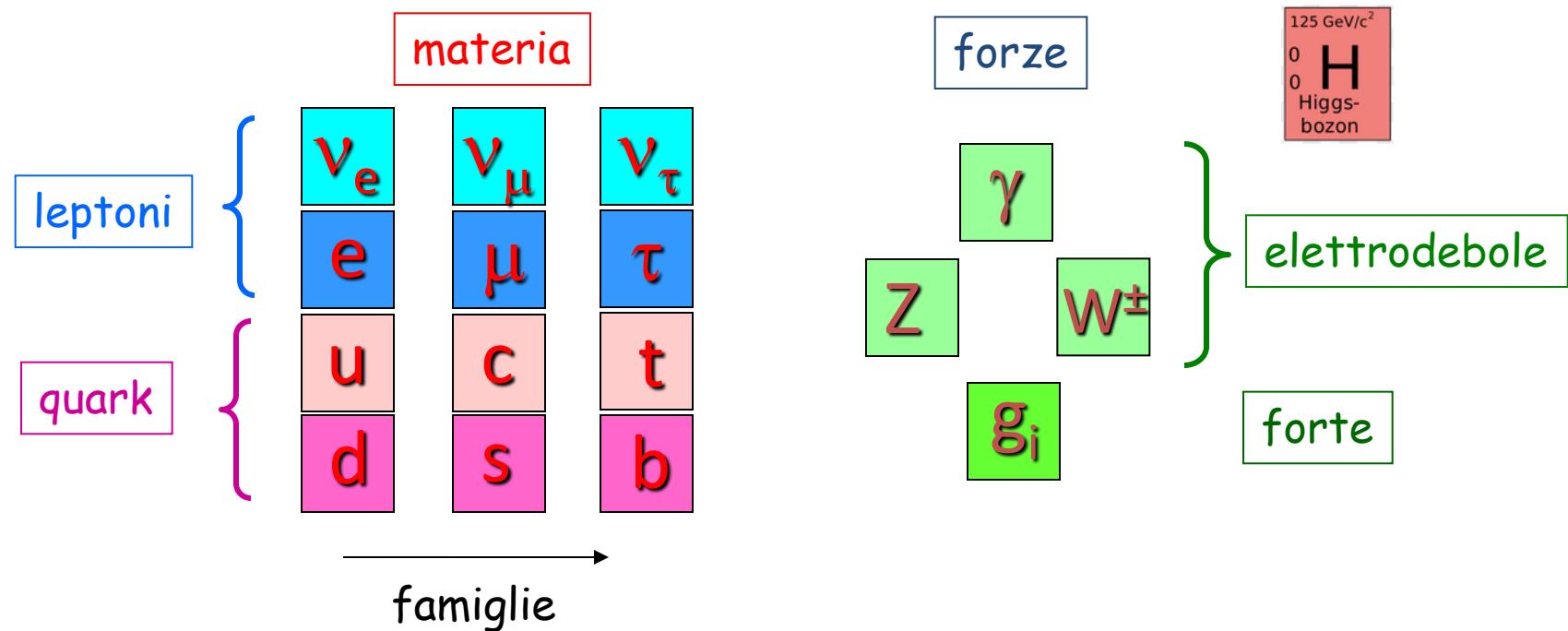
1998 - Superkamiokande rivela le oscillazioni dei ν atmosferici

1969 - 2002 - Vari gruppi rivelano le oscillazioni dei ν solari

2002 - oggi - Le oscillazioni vengono studiate in dettaglio → masse del ν

Il modello standard delle interazioni fondamentali

La **materia** e le **forze** sono spiegate in termini di pochi e semplici elementi



Straordinarie capacità predittive, ma sistema teorico insoddisfacente

Molte proprietà imposte e non spiegate

masse delle particelle

[

Prototipo di tutte le particelle di materia: elettrone
Massa - Carica - Spin

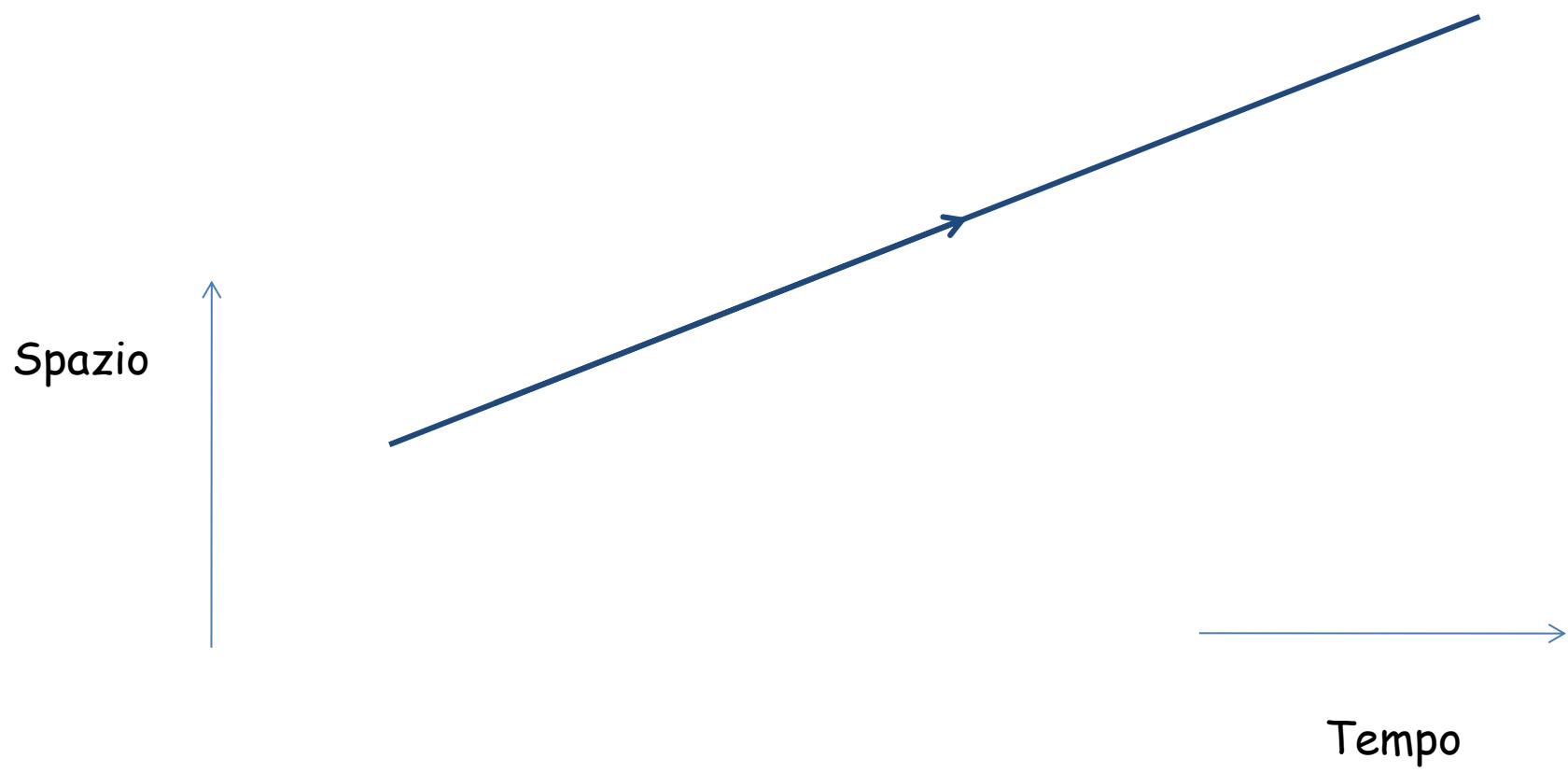
Un elettrone in quiete

Spazio



Tempo

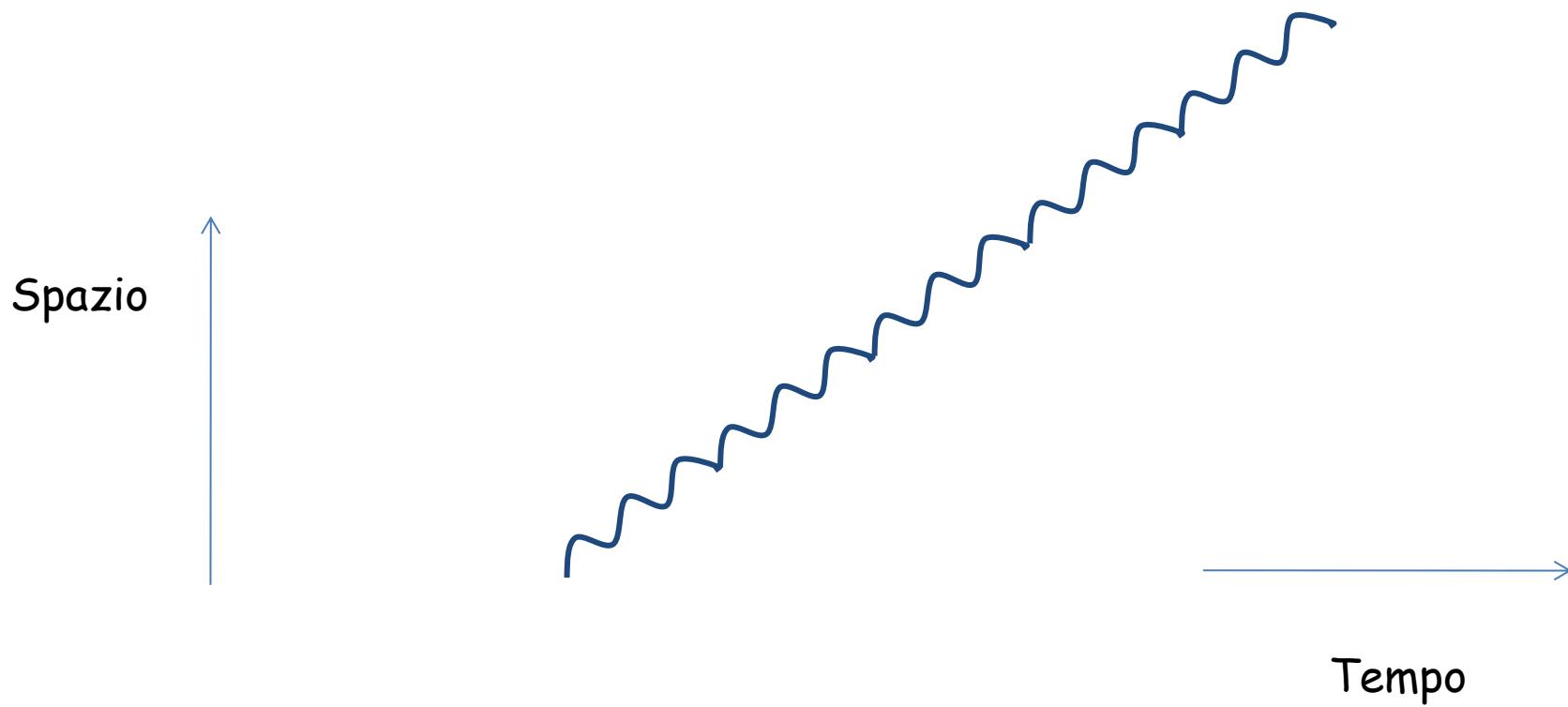
Un elettrone in moto rettilineo uniforme



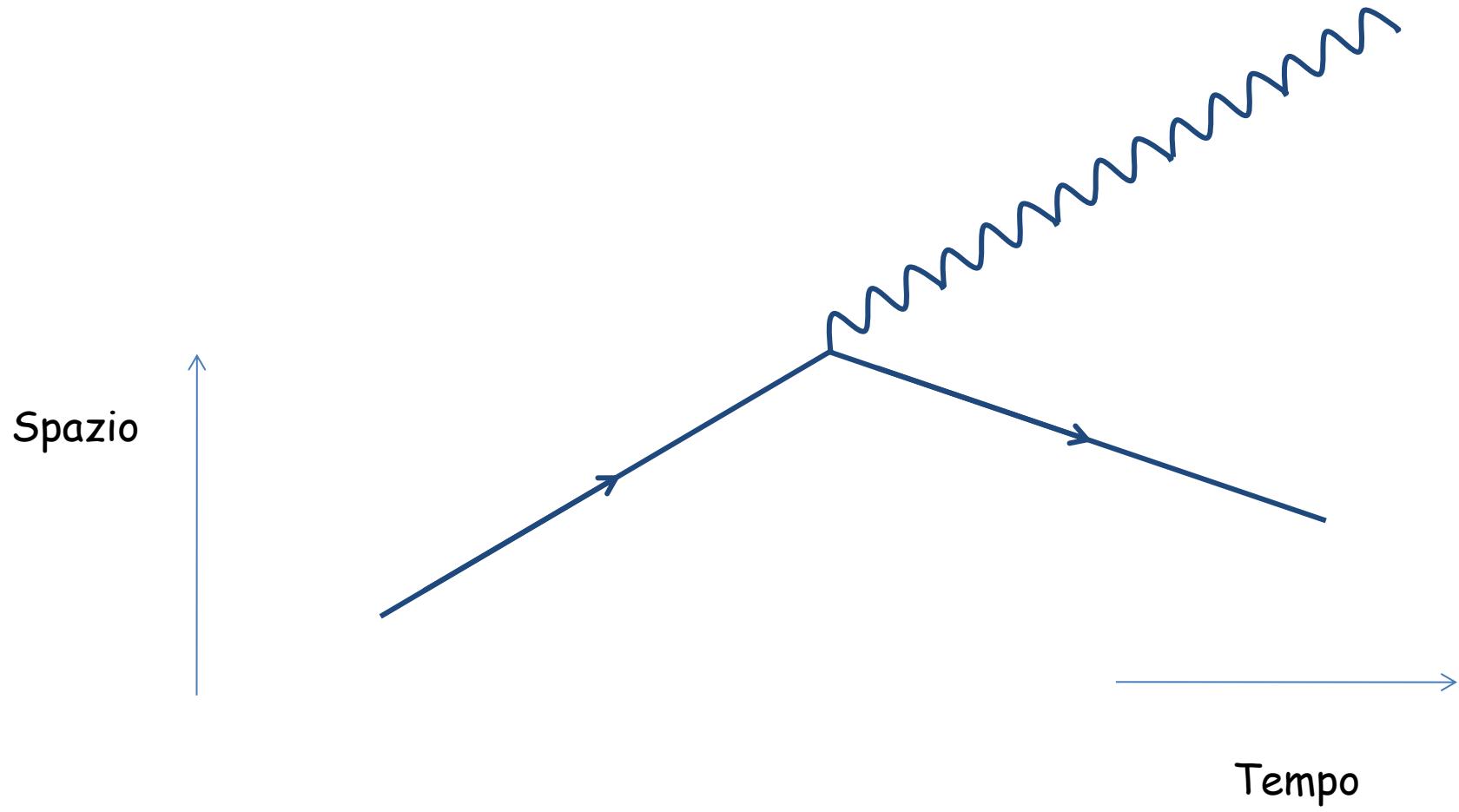
Prototipo di tutte le particelle associate a una forza: fotone

~~Massa - Carica - Spin~~

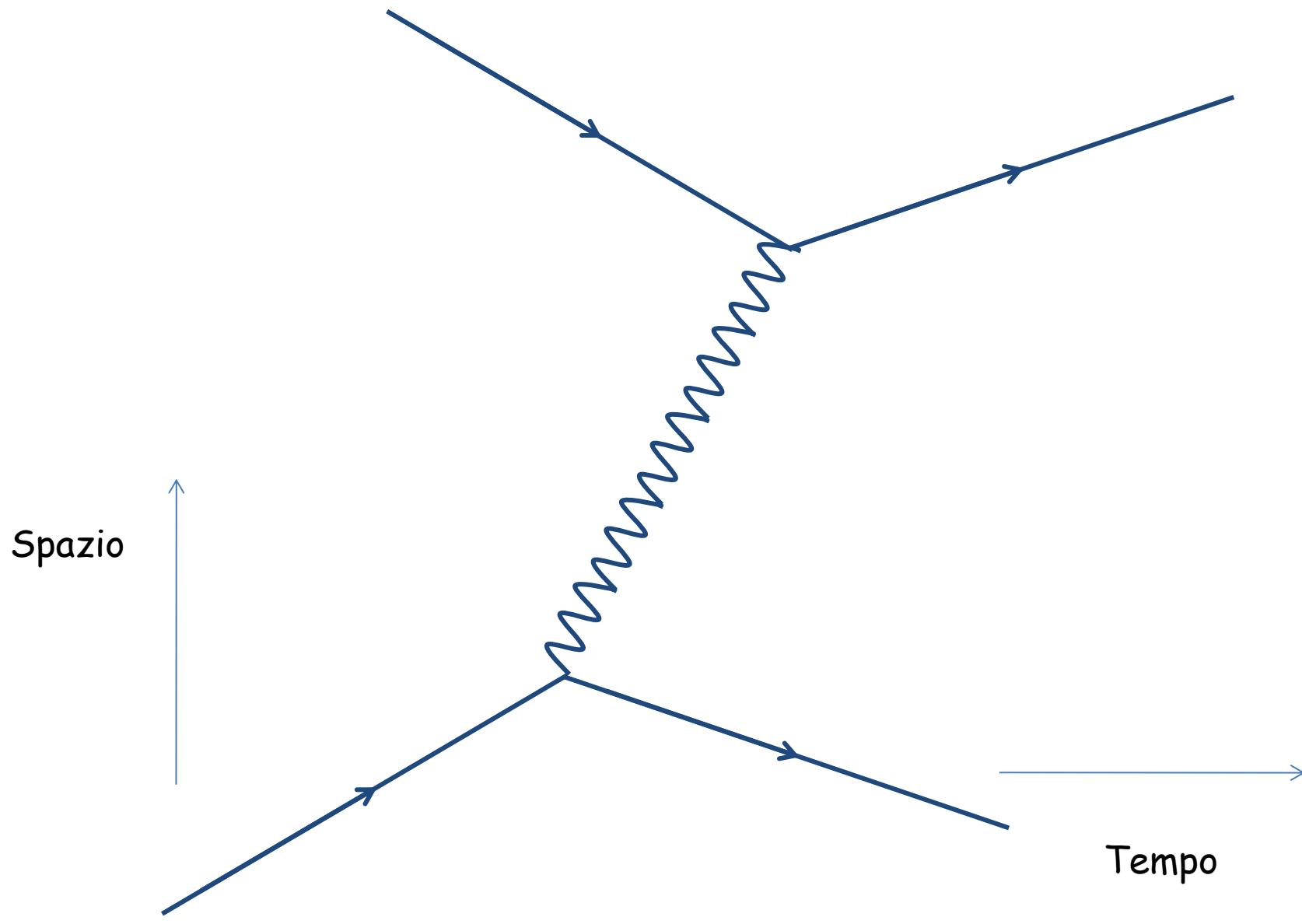
Un fotone si propaga liberamente



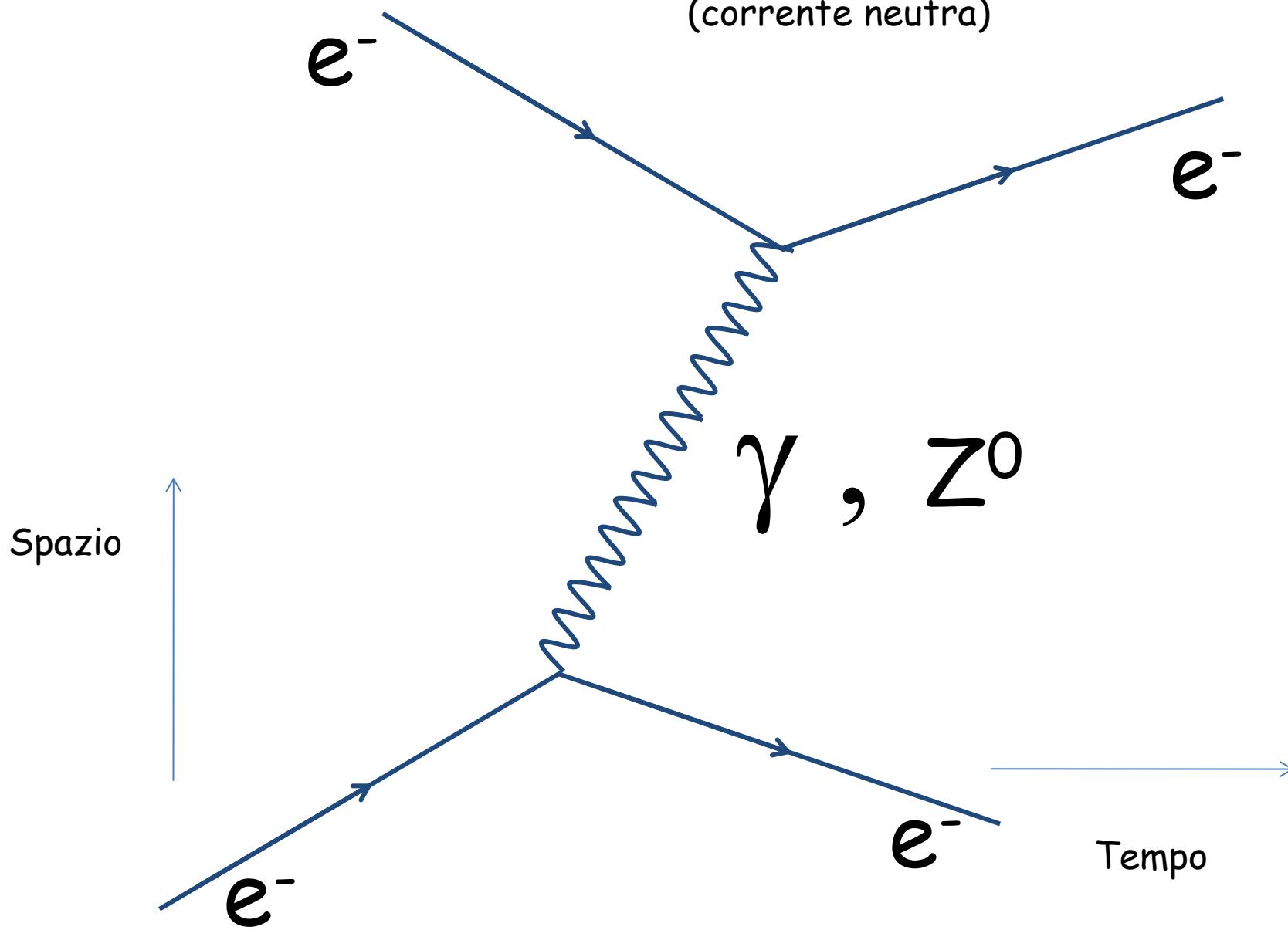
Prototipo di tutte le interazioni: il fotone si “accoppia” all’elettrone



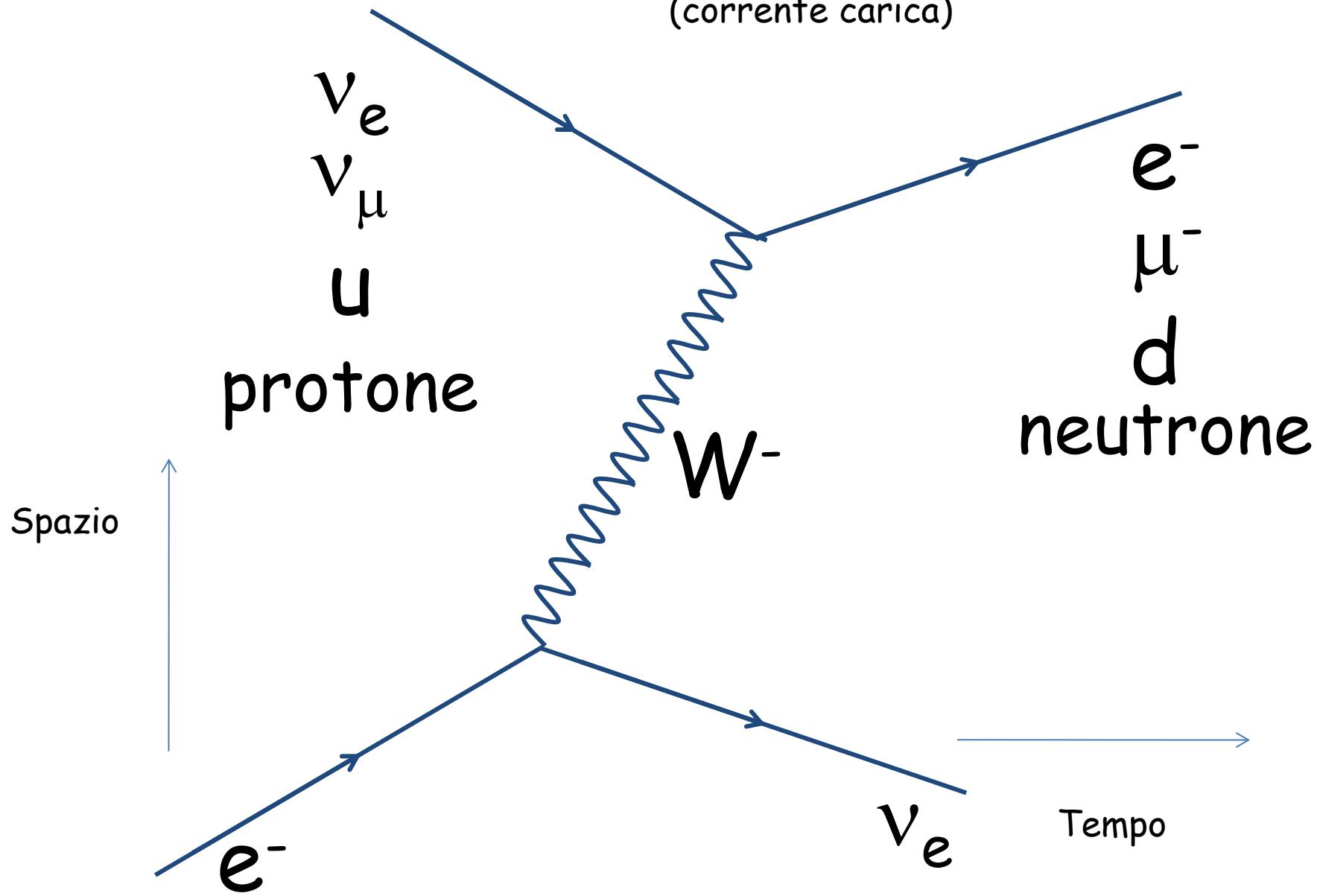
Prototipo di tutte le diffusioni: due elettroni
interagiscono e cambiano le loro velocità



Prototipo di tutte le reazioni: due particelle
interagiscono e cambiano le loro velocità
(corrente neutra)



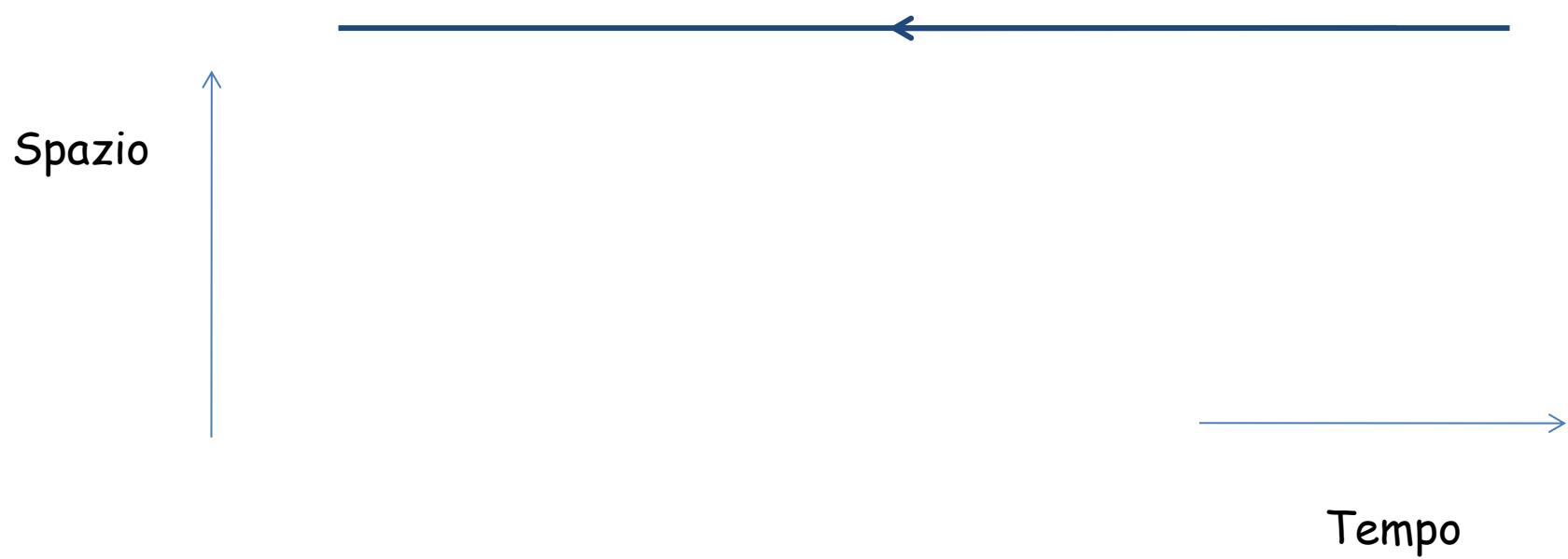
Prototipo di tutte le reazioni: due elettroni interagiscono e cambiano le loro velocità e la loro natura (corrente carica)



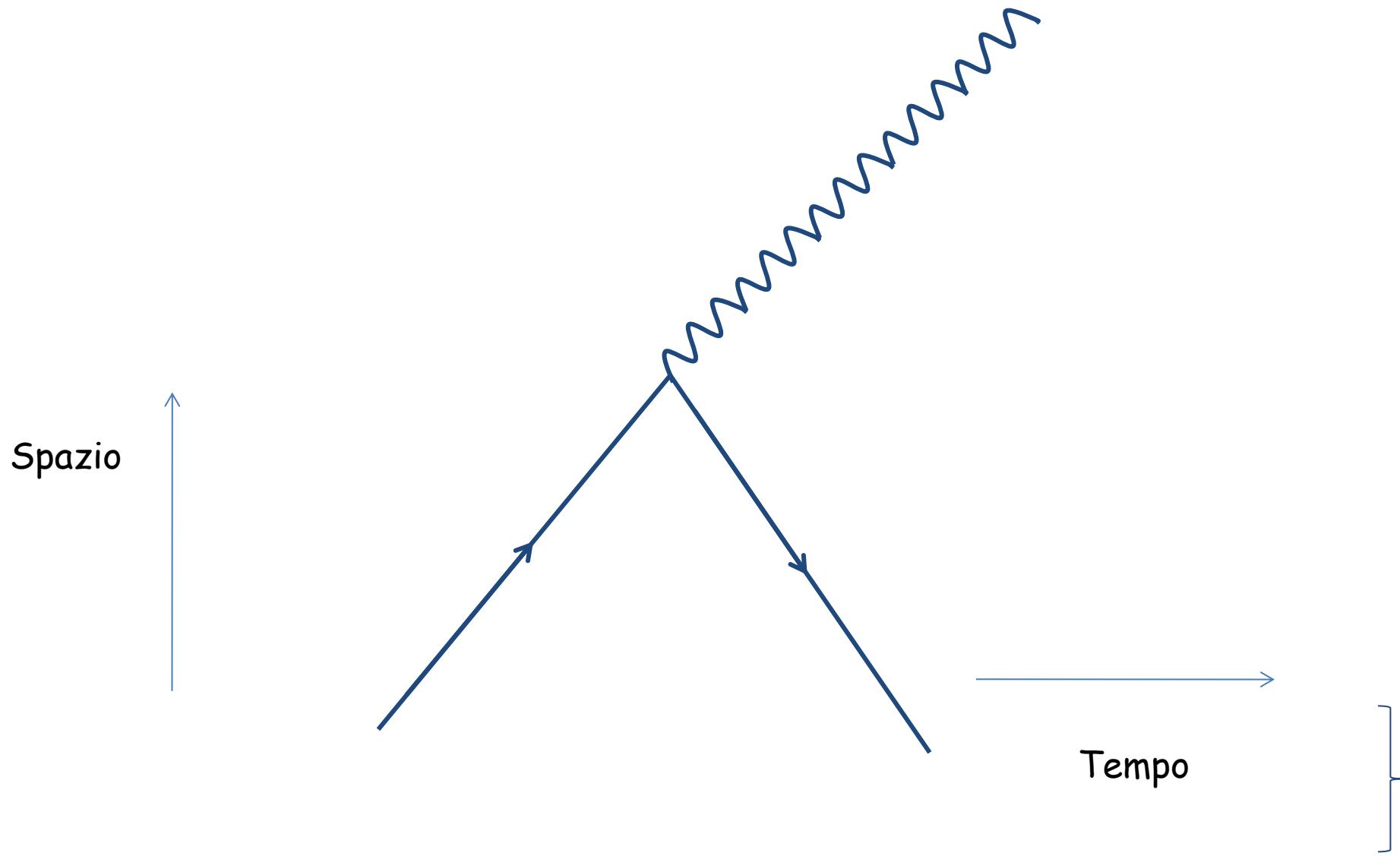
Prototipo di tutte le antiparticelle

Massa - Carica - Spin

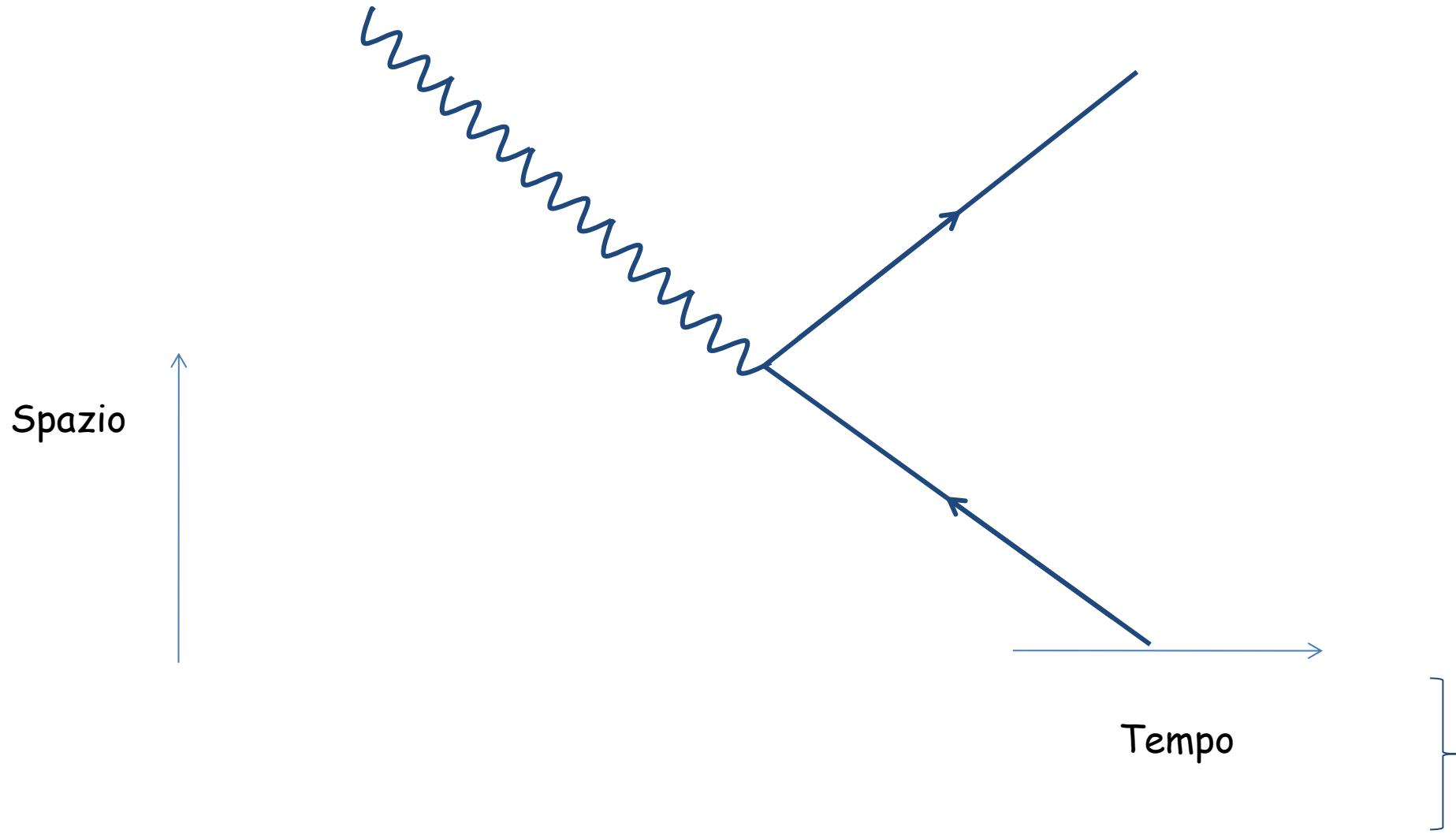
Un positrone in quiete



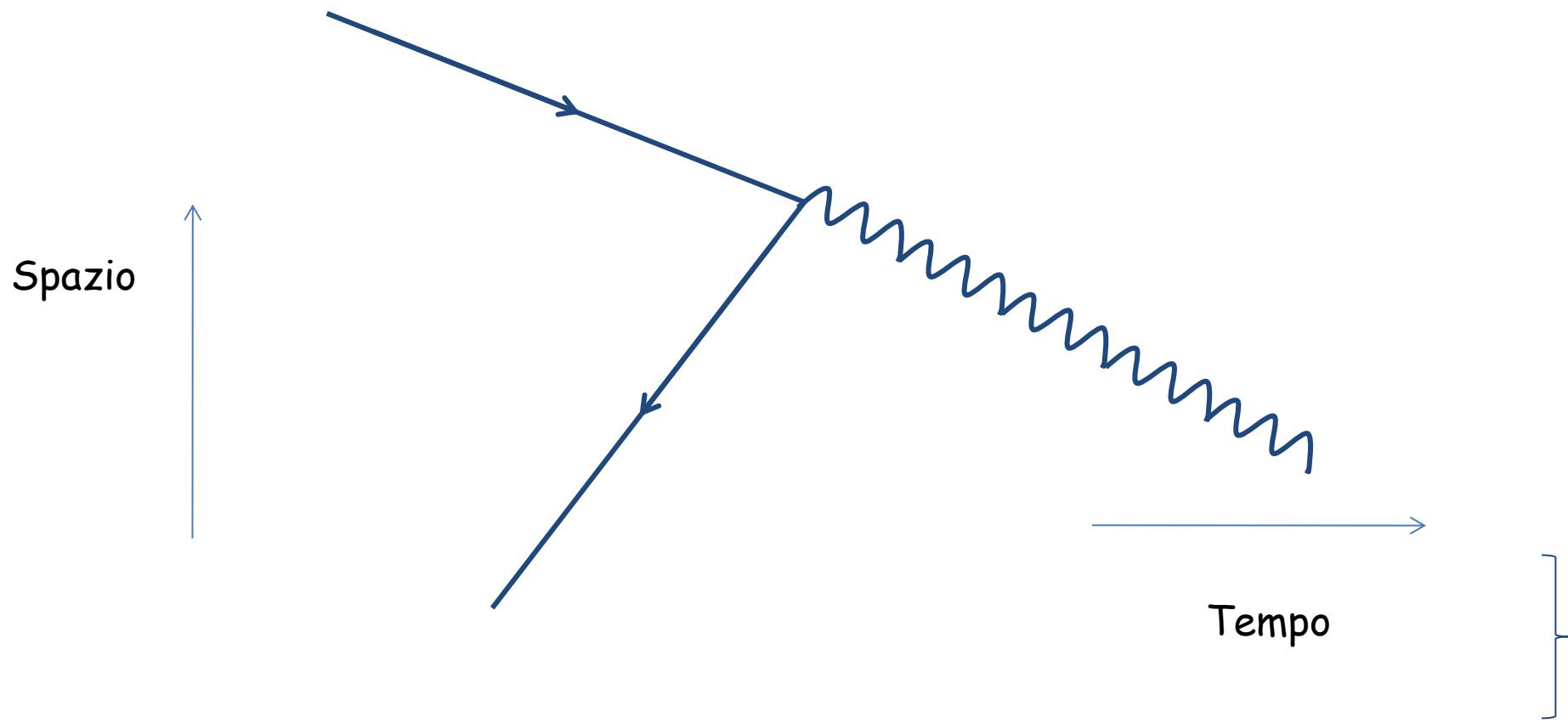
Emissione, assorbimento, produzione di coppie e annichilazione



Emissione, assorbimento, produzione di coppie e annichilazione



Emissione, assorbimento, produzione di coppie e annichilazione



Il neutrino si presenta

Il neutrino è in mezzo a noi:

- ◆ Neutrini nell'**Universo** $\simeq 1.2 \times 10^{89}$ (atomi: $\sim 10^{82}$)
- ◆ Neutrini **solari**: flusso $\simeq 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $E < 10 \text{ MeV}$
- ◆ Neutrini **“atmosferici”**: flusso $\simeq 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $E \simeq 1\text{-}100 \text{ GeV}$
- ◆ Il **nostro corpo** come sorgente di neutrini: $\sim 10^4 \text{ s}^{-1}$

Che cos'è il neutrino?

- È un **elettrone “minore”**, privato di molte proprietà:

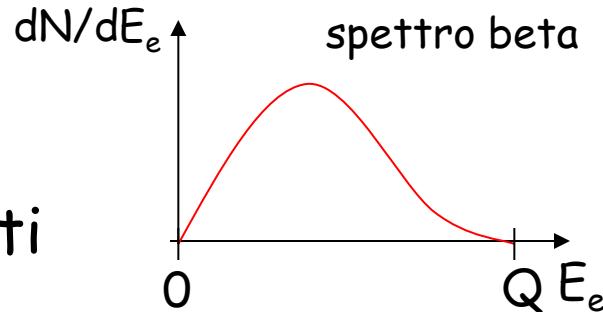
	Taglia	Spin	Carica	Massa	Momento magnetico
Elettrone	$< 10^{-16} \text{ cm}$	$1/2$	e	$m_e = 511 \text{ keV}$	$\mu_B \equiv e \hbar / 2 m_e$
Neutrino	$< 10^{-16} \text{ cm}$	$1/2$	0	$< 10^{-5} m_e$	$< 10^{-10} \mu_B$

Il concepimento ...

Pauli postula l'esistenza del neutrino per garantire la **conservazione dell'energia** nel Decadimento Beta (1930)



Q: energia cinetica dei prodotti



Mythen - Plottergebnis auf 20.6.1973
Abschrift/15.12.96 JH



Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiviten bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 1. Dec. 1930
Utostraße

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
ansuhören bitte, Ihnen des näheren auszeinanderzusetzen wird, bin ich
angesehne der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweigten Augweg
verfallen um den "Wechselgatz" (1) der Statistik und den Energienatz
zu retten. Mögliche die Möglichkeit, es könnten **elektrisch neutrale**
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche **den Spin 1/2 haben** und das Ausschließungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten **ausserdem noch dadurch unterscheiden**, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
sollte von derselben Grossenordnung wie die Elektronenmasse sein und
nicht grösser als 0,01 Protonenmassen. Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

particella con:

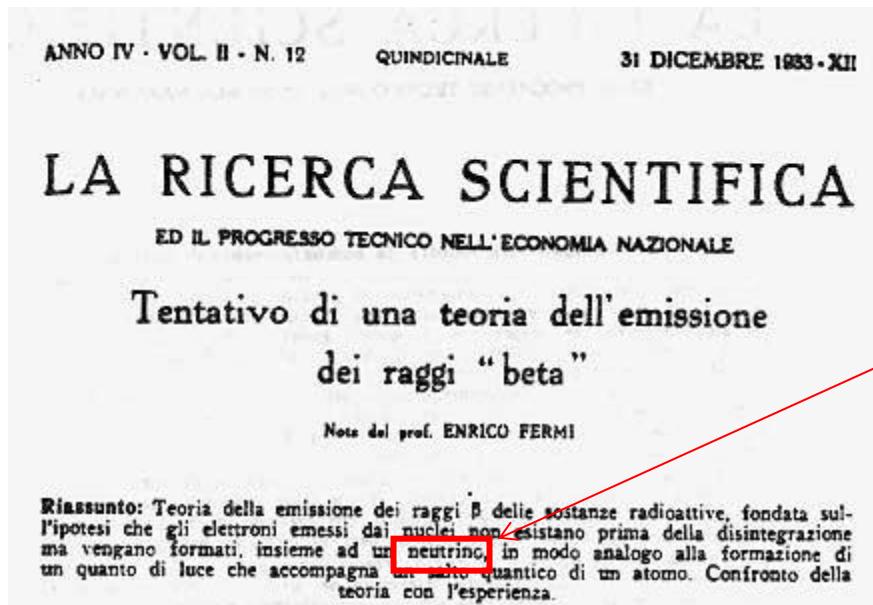
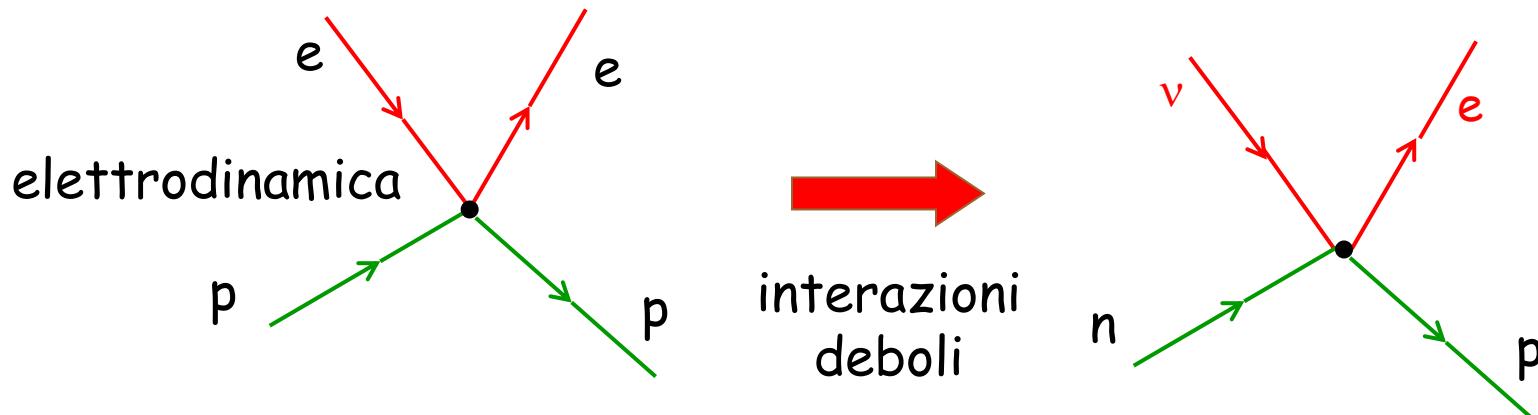
carica nulla

spin 1/2

**massa non maggiore
di 0.01 volte
la massa del protone**

... e il battesimo

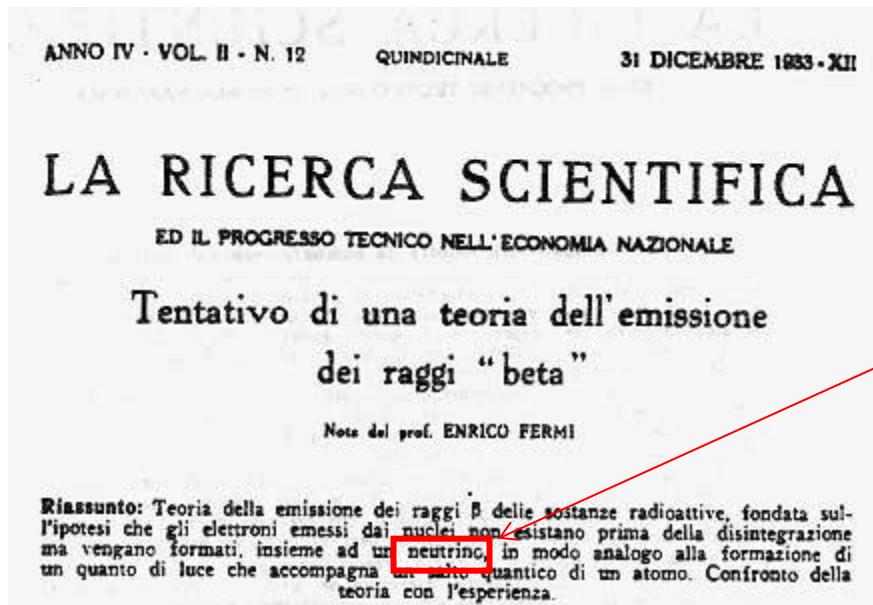
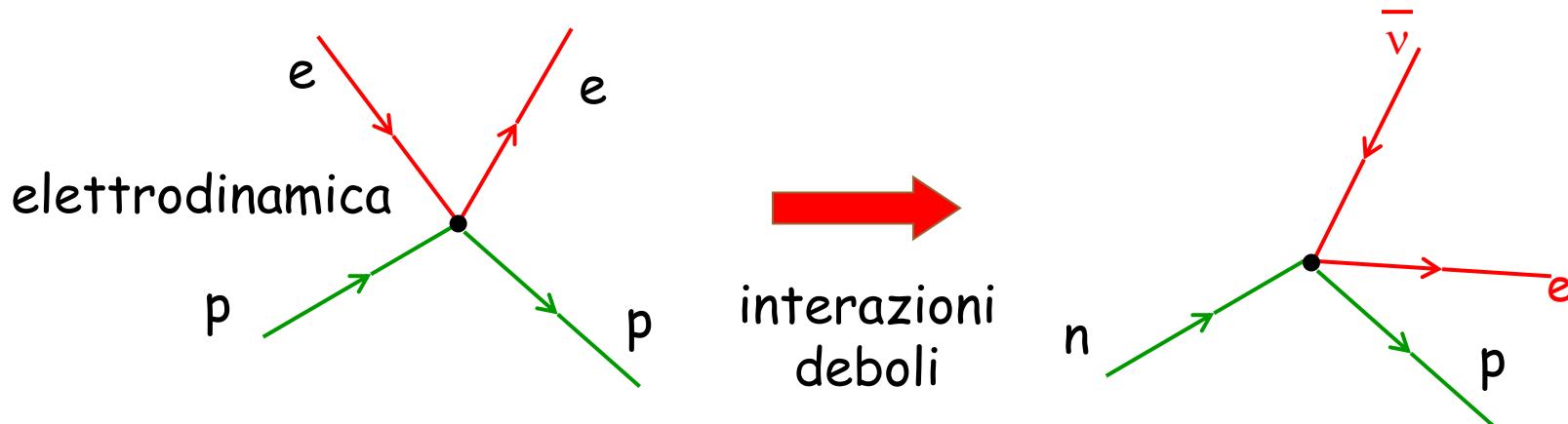
Fermi elabora **una teoria di campo**, sul calco dell'elettrodinamica, che consente predizioni quantitative sui processi beta (1933)



Il termine neutrino
(«piccolo neutrone»)
entra nella storia per
rimanerci

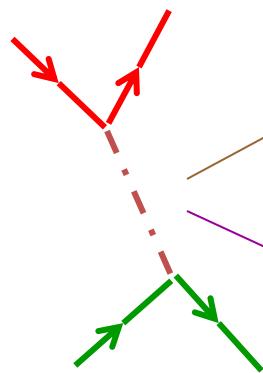
... e il battesimo

Fermi elabora **una teoria di campo**, sul calco dell'elettrodinamica, che consente predizioni quantitative sui processi beta (1933)



Il termine neutrino
(«piccolo neutrone»)
entra nella storia per
rimanerci

I bosoni vettori



elettrodinamica: fotone $\rightarrow m_\gamma = 0$

$$A \sim e^2/(k^2 + m_\gamma^2) \sim e^2/k^2$$

interazioni deboli: $W^\pm, Z^0 \rightarrow m_{W,Z} \sim 90 \text{ GeV}$

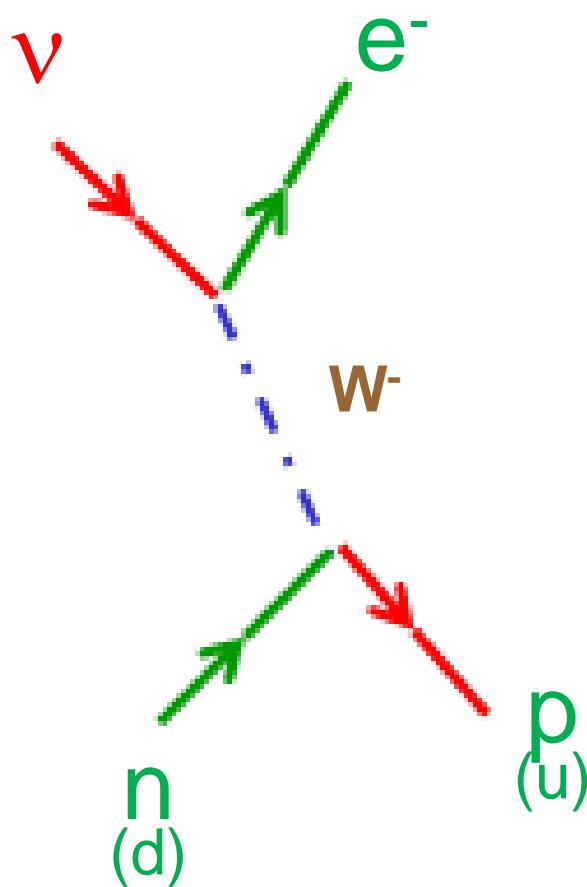
$$A \sim e^2/(k^2 + m_{W,Z}^2) \sim e^2/m_{W,Z}^2 \sim G_F$$

scambio di **W**: varia la carica del lepton (corrente carica)

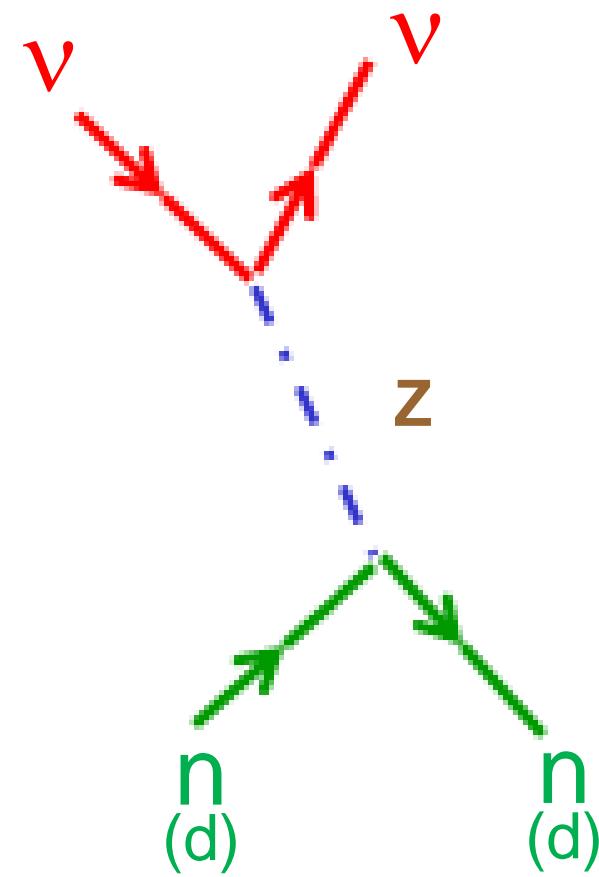
scambio di **Z**: il lepton viene diffuso (corrente neutra)

Modello Standard

Le correnti cariche e neutre

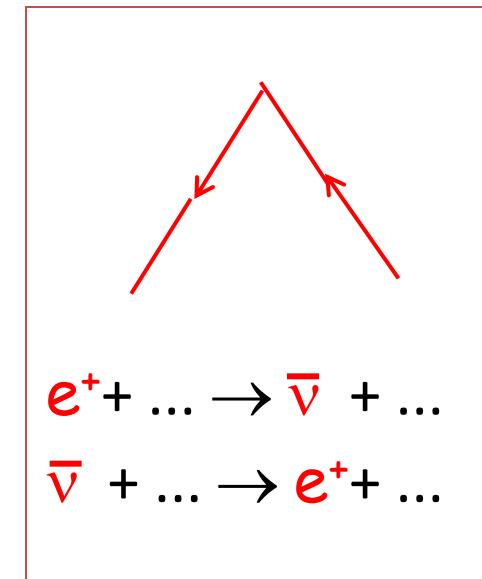
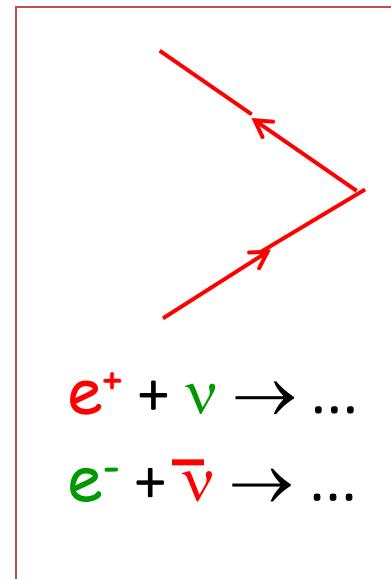
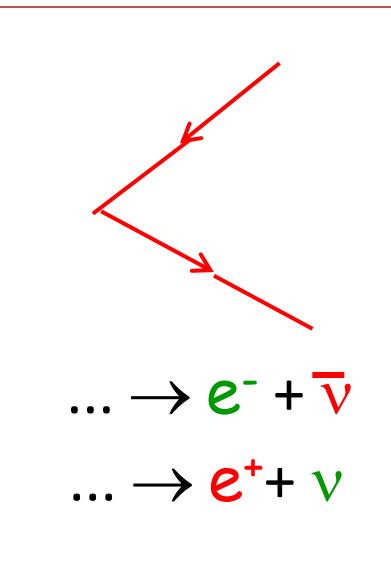
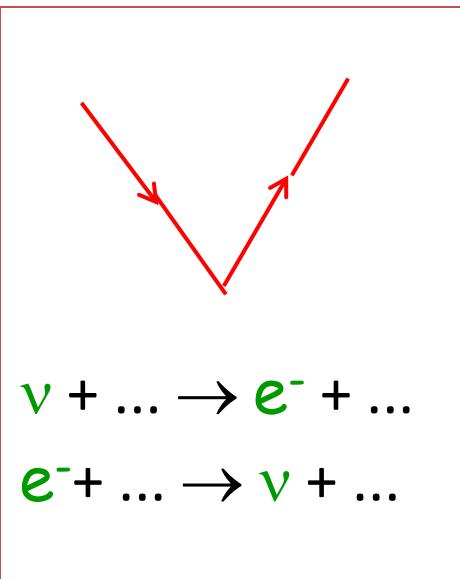


corrente carica



corrente neutra

"Algebra" con neutrini ed elettroni



Data una reazione ammessa, se ne ottiene un'altra possibile e dinamicamente equivalente scambiando di membro e e/o n e operando le sostituzioni: $e^- \Leftrightarrow e^+$; $v \Leftrightarrow \bar{v}$



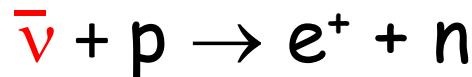
Decadimento beta inverso

introduzione di una pseudocarica: numero leptonico L

$$L(e^-, v) = 1 \quad L(e^+, \bar{v}) = -1$$

La rivelazione diretta

Cowan e Reines rivelano direttamente gli antineutrini emessi da un reattore nucleare (1959), attraverso la reazione:



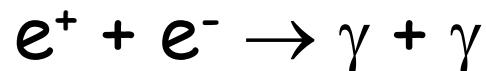
Esperimento molto difficile,
a causa della piccolissima
sezione d'urto del neutrino:



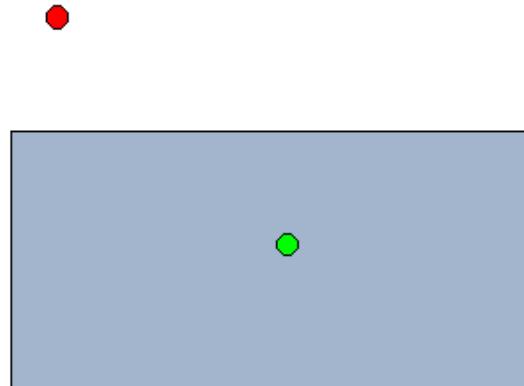
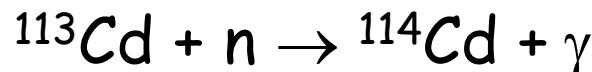
$$\sigma(1 \text{ MeV}) \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$$

Libero cammino medio
in $\text{H}_2\text{O} \sim 100$ anni luce

- ① immediata annichilazione
di e^+ (10^{-9} s) ($E_\gamma = 511$ keV)



- ② cattura radiativa di n da parte
di Cd (10^{-5} s) ($E_\gamma \sim \text{MeV}$)



- neutrino
- proton
- neutron
- positron
- ~ photon

I tre sapori

Ci sono tre leptoni carichi: e^\pm μ^\pm τ^\pm

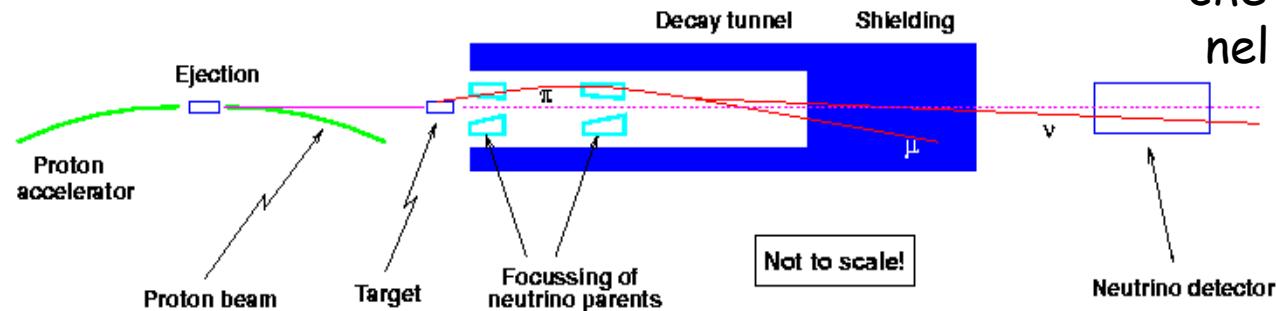
A ciascun leptone carico corrisponde un diverso tipo di neutrino:

ν_e ν_μ ν_τ
 e μ τ

I tre sapori sono fenomenologicamente ben distinti:
per corrente carica, ciascun neutrino
si converte nel leptone carico corrispondente

Sperimentalmente, si producono fasci di neutrini di **alta energia**:

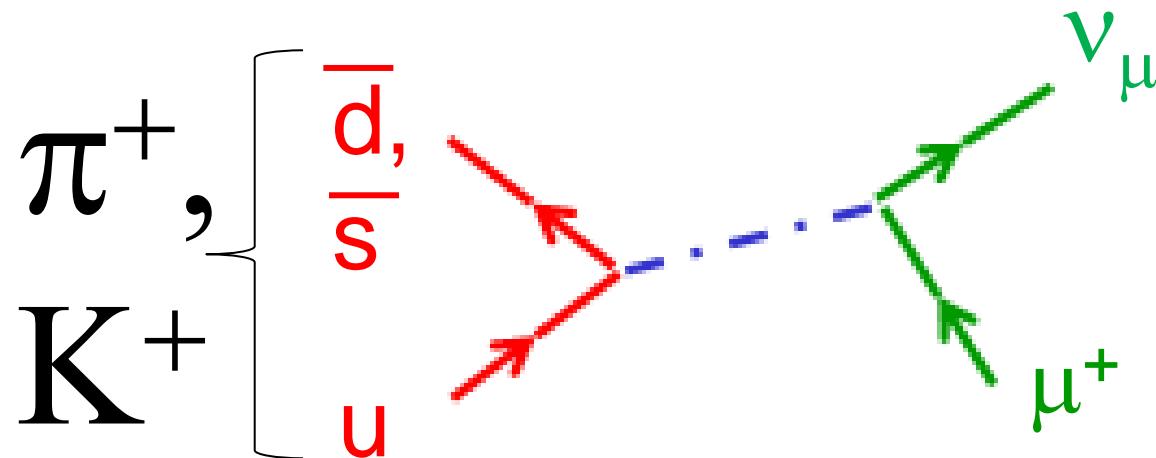
p su bersaglio $\rightarrow \pi, K \rightarrow \mu + \nu$



Steinberger et al. osservano
che i neutrini interagiscono
nel rivelatore producendo
 μ e non e (1962)

Formazione dei neutrini da acceleratore

I protoni, interagendo con il bersaglio, producono copiosamente adroni leggeri per interazione forte, come i mesoni π e K .



La massa del neutrino

Non si hanno per ora **evidenze dirette** di una massa finita per nessuno dei tre tipi di neutrino.



Le masse dei neutrini, se finite, sono molto più piccole di quelle dei corrispondenti leptoni carichi (**Fermi, 1933**)

Gli attuali limiti sperimentali sono:

ν_e : $m < 2.0$ eV

da considerazioni di carattere cosmologico:

ν_μ : $m < 0.19$ MeV



ν_τ : $m < 18.2$ MeV

$$\sum m_\nu < 0.23 \text{ eV}$$

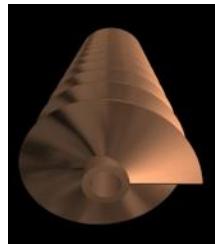
Se i neutrini hanno masse finite, allora sono possibili in linea generale

tre autostati di **massa**
distinti dai tre autostati di **sapore**

$$\begin{aligned} \nu_1 &- \nu_2 - \nu_3 \\ \nu_e &- \nu_\mu - \nu_\tau \end{aligned}$$

Il neutrino allo specchio

Data la direzione di moto, lo spin del neutrino può essere ad essa parallelo o antiparallelo



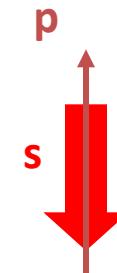
vite destrorsa

$$H = +1$$



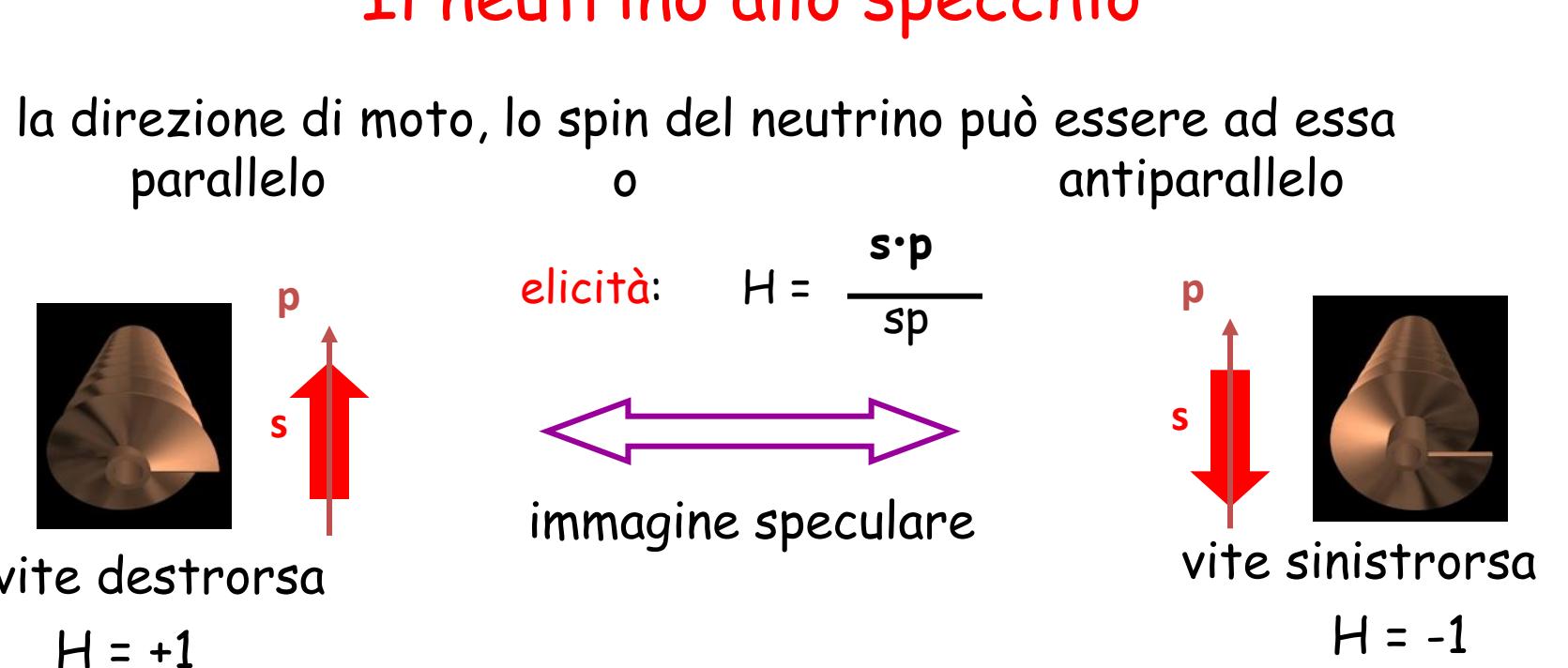
elicità: $H = \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{p}}{s p}$

immagine speculare



vite sinistrorsa

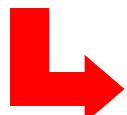
$$H = -1$$



Goldhaber dimostra in un celebre esperimento (1957) che:

i neutrini sono sempre sinistrorsi: $H(\nu) = -1$ non conservazione della parità
gli antineutrini sono sempre destrorsi: $H(\bar{\nu}) = +1$ della parità

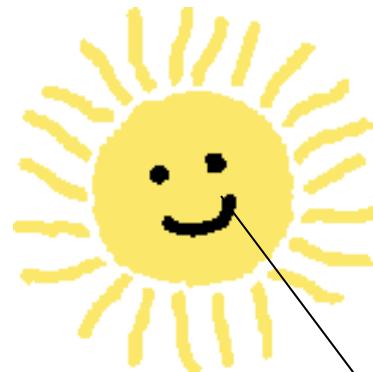
ma H non dipende dal sistema di riferimento **solo se $m_\nu = 0$**



se $m_\nu \neq 0$, quali sono i ruoli di H e di L ?

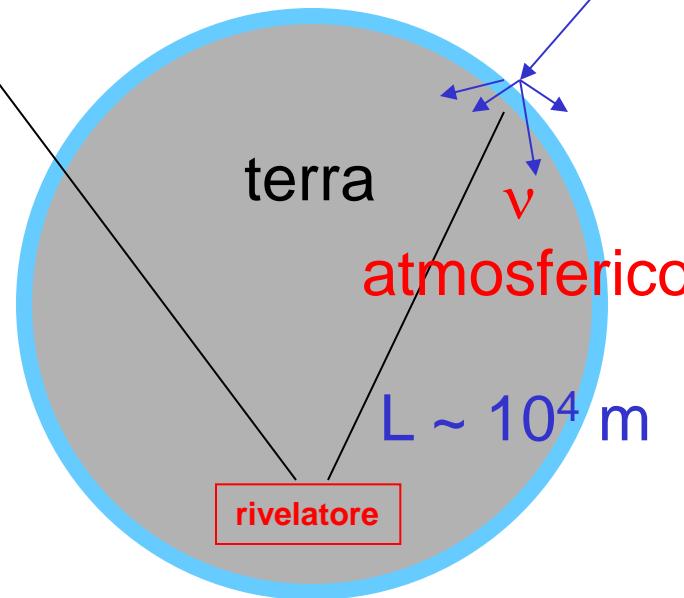
Invarianza per CP ?

Le sorgenti astrofisiche di neutrini

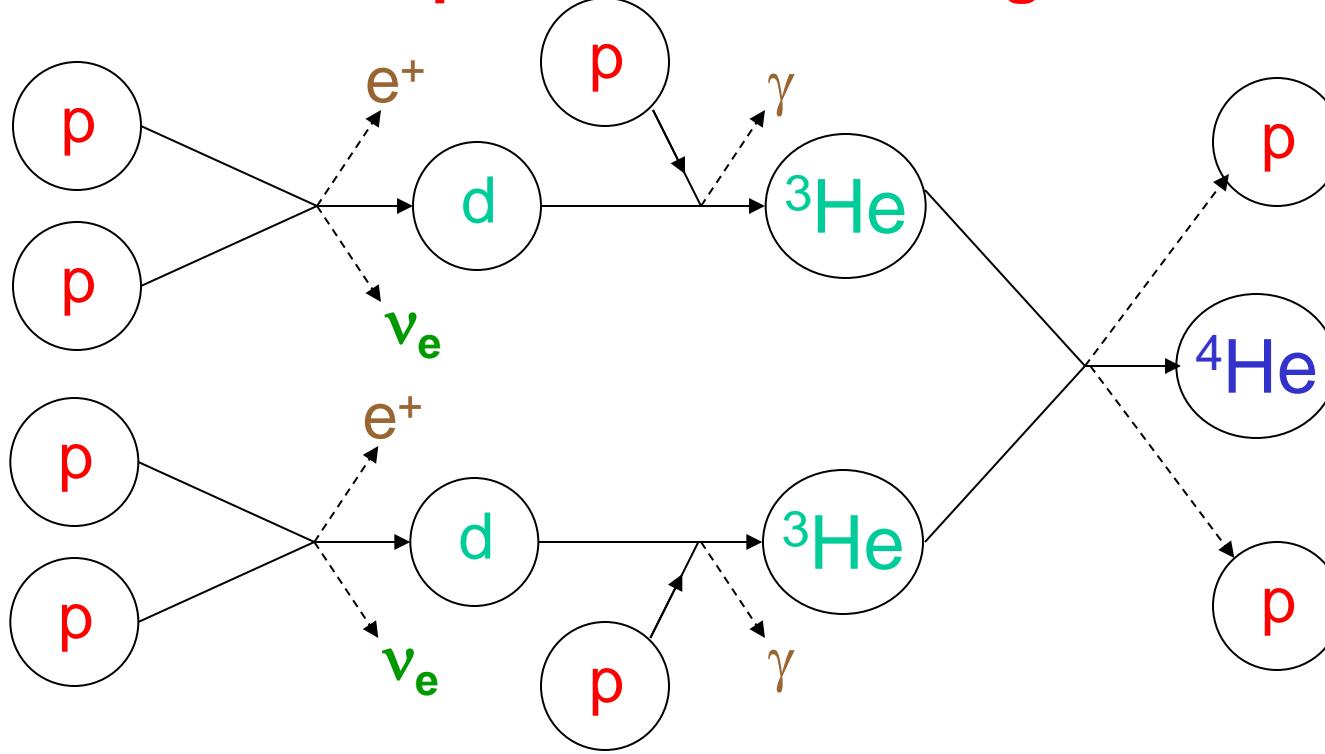


ν solare

$L \sim 1.5 \times 10^8$ m



La produzione di energia nel sole



complessivamente:



$Q = 25 \text{ MeV}$

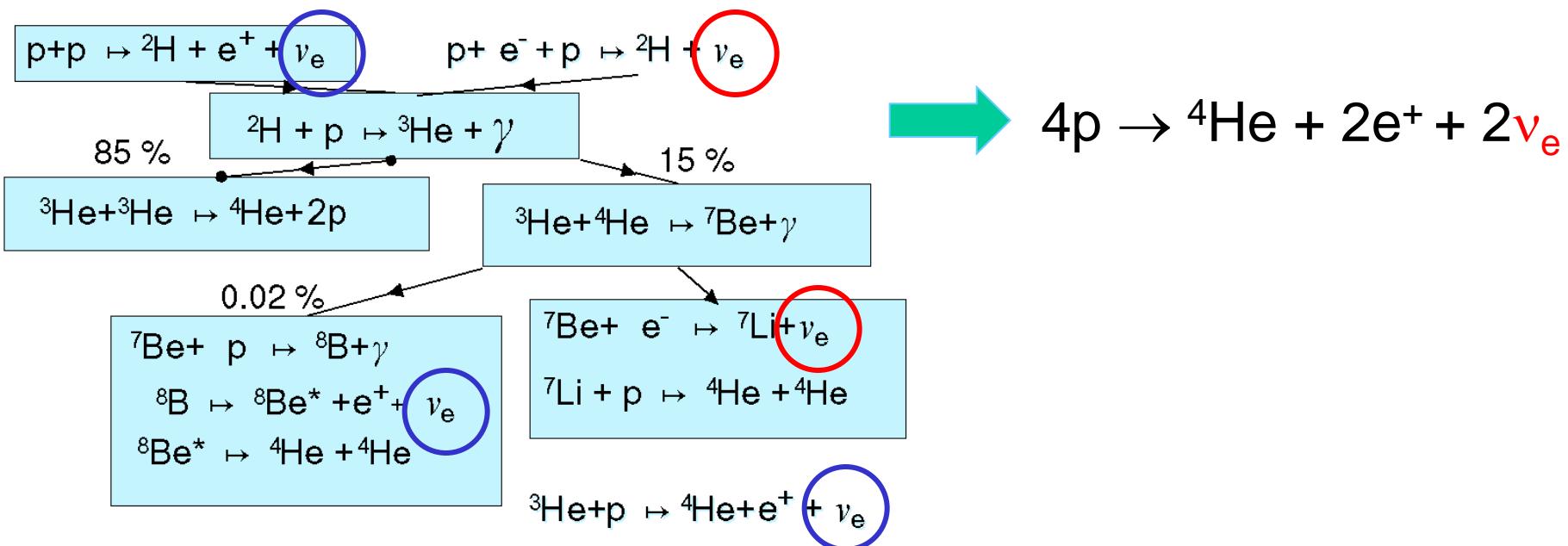
luminosità apparente del sole: 1.36 kW / m^2

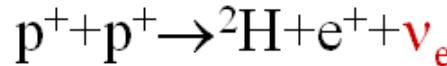
flusso neutrini solari $\simeq 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Lo spettro dei neutrini solari

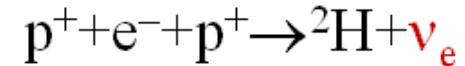
John Bahcall elabora il Modello Solare Standard (1968-2000) e calcola con grande esattezza lo spettro dei neutrini solari, considerando anche reazioni nucleari secondarie

ciclo protone-protone

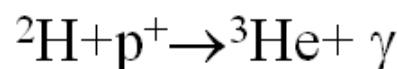
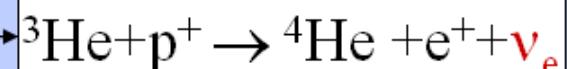


pp

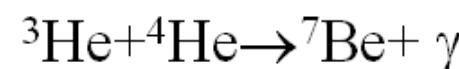
99,77 %

pep

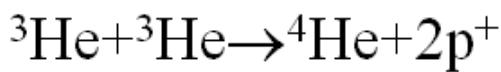
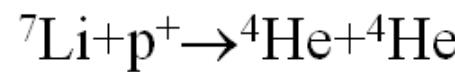
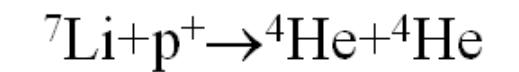
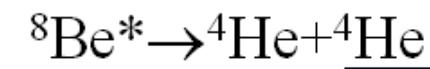
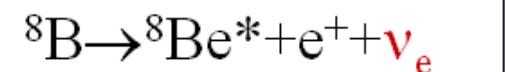
0,23 %

10⁻⁵ %**hep**

15,08 %

**7Be**

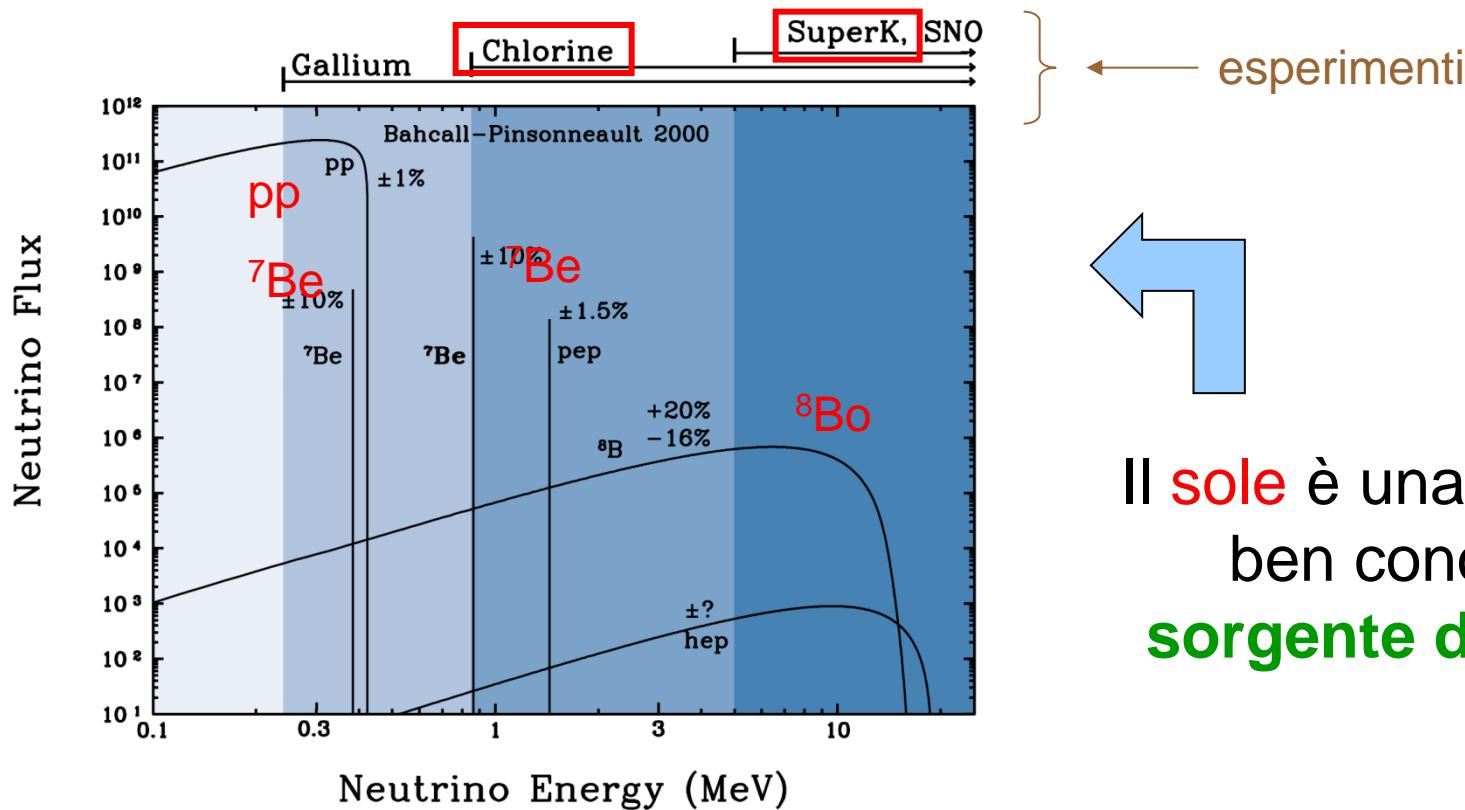
99,9 %

**ppI****ppII****8B****ppIII**

84,92 %

Lo spettro dei neutrini solari

John Bahcall elabora il Modello Solare Standard (1968-2000) e calcola con grande esattezza lo spettro dei neutrini solari, considerando anche reazioni nucleari secondarie

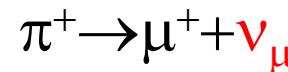
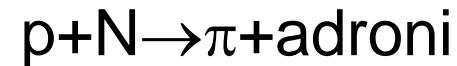
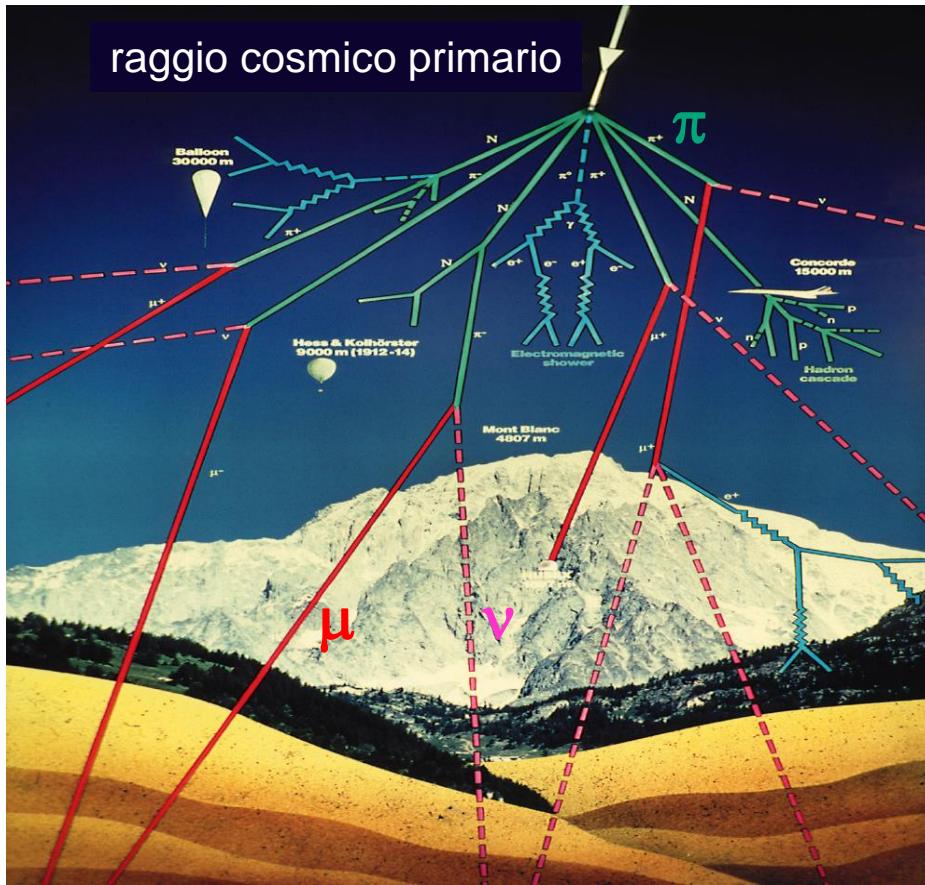


Il sole è una potente e
ben conosciuta
sorgente di neutrini

I raggi cosmici e i neutrini “atmosferici”

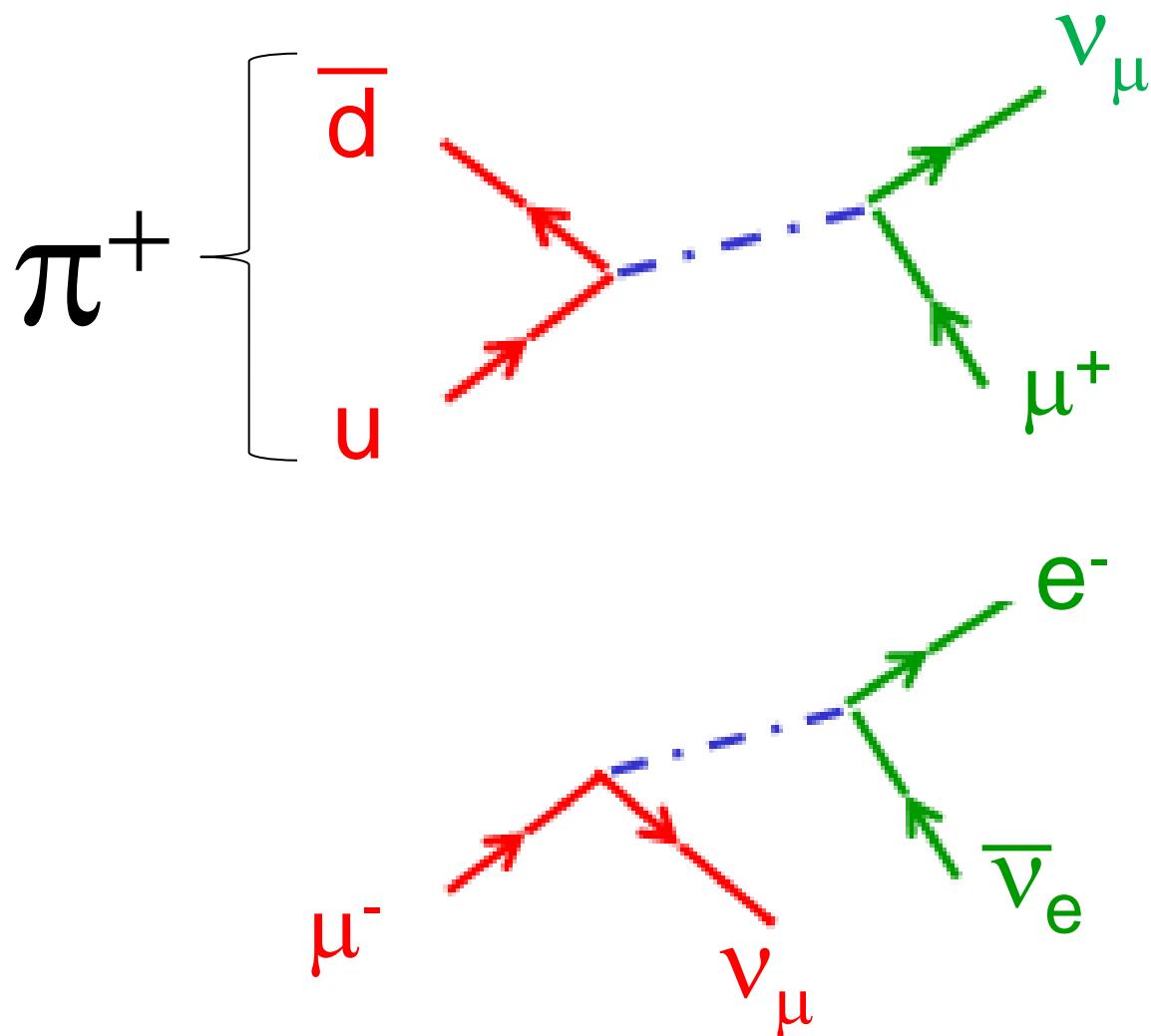
Raggi cosmici: particelle cariche di origine cosmica (principalmente protoni) che colpiscono con alta energia gli stati alti dell'atmosfera

i raggi cosmici producono neutrini di alta energia (1-10 GeV)



in media, 2 ν_μ per ogni ν_e

Origine dei neutrini “atmosferici”



Un ingrediente fondamentale per le oscillazioni: la massa

Non si hanno per ora **evidenze dirette** di una massa finita per nessuno dei tre tipi di neutrino.



Le masse dei neutrini, se finite, sono molto più piccole di quelle dei corrispondenti leptoni carichi (**Fermi, 1933**)

Gli attuali limiti sperimentali sono:

ν_e : $m < 2.0$ eV

da considerazioni di carattere cosmologico:

ν_μ : $m < 0.19$ MeV



ν_τ : $m < 18.2$ MeV

$$\sum m_\nu < 0.23 \text{ eV}$$

Se i neutrini hanno masse finite, allora sono possibili in linea generale

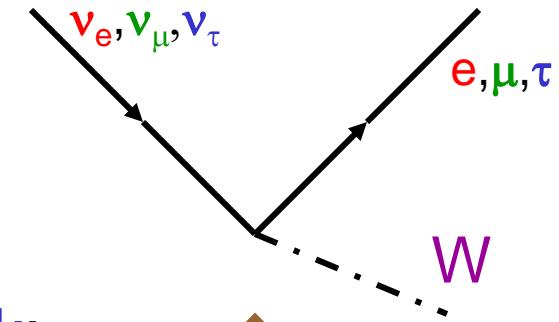
tre autostati di **massa**
distinti dai tre autostati di **sapore**

$$\begin{aligned} \nu_1 &- \nu_2 - \nu_3 \\ \nu_e &- \nu_\mu - \nu_\tau \end{aligned}$$

Gli autostati di sapore e gli autostati di massa

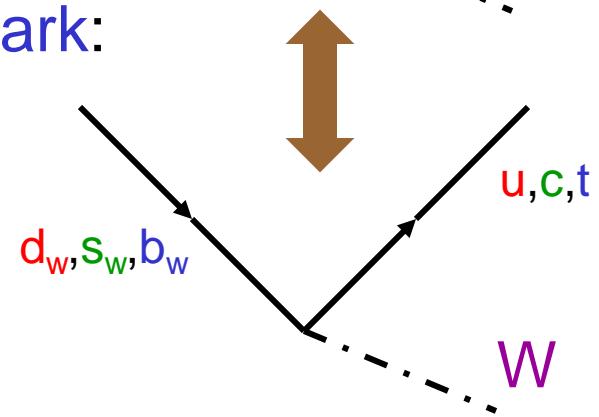
Una **trasformazione unitaria** connette gli **autostati di sapore** agli **autostati di massa**:

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$



Esiste una **profonda analogia** con i **quark**:

$$\begin{bmatrix} d_w \\ s_w \\ b_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

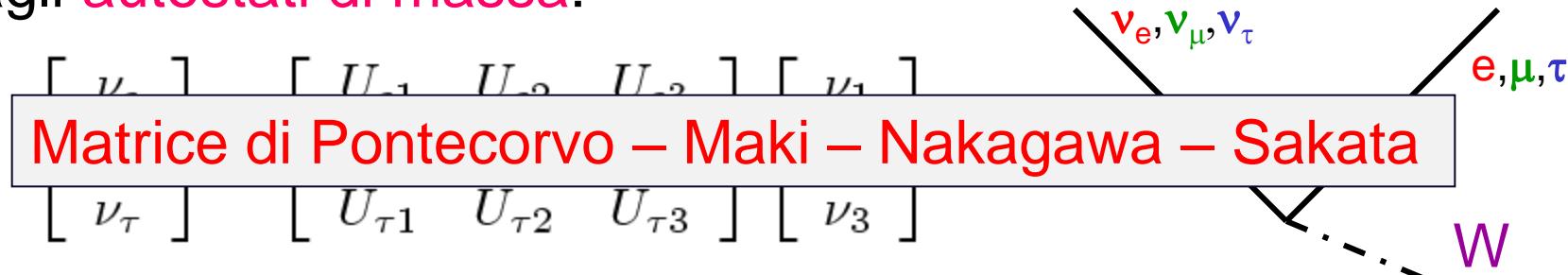


Le matrici unitarie 3x3 sono descrivibili in termini di **4 parametri reali** fisicamente rilevanti, **3 angoli** e **1 fase**

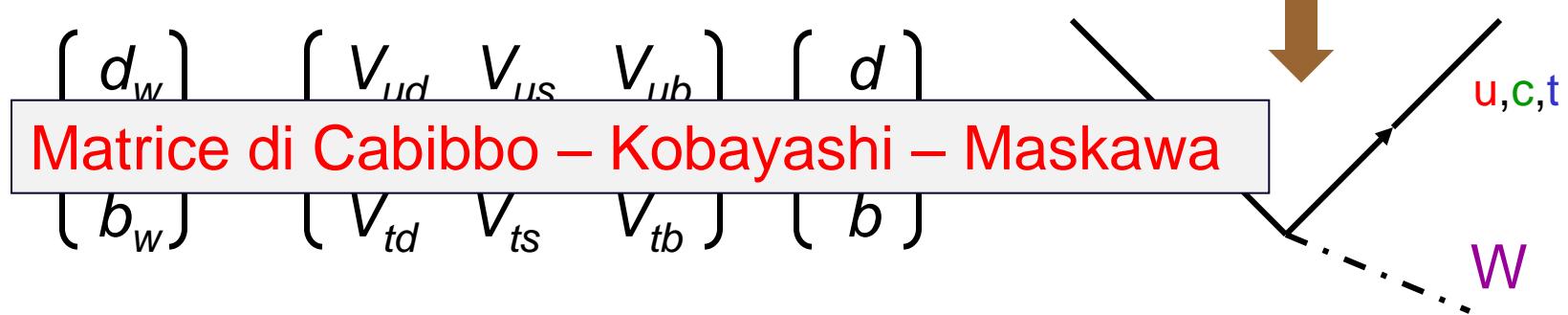
Questi parametri vanno misurati **sperimentalmente**

Gli autostati di sapore e gli autostati di massa

Una **trasformazione unitaria** connette gli **autostati di sapore** agli **autostati di massa**:



Esiste una profonda analogia con i **quark**:



Le matrici unitarie 3×3 sono descrivibili in termini di 4 parametri reali fisicamente rilevanti, 3 angoli e 1 fase

Questi parametri vanno misurati sperimentalmente

Parametrizzazione standard

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_\mu \\ \mathbf{v}_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{13}s_{23}c_{12}e^{i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{13}s_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - s_{13}c_{23}c_{12}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{13}c_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$
$$c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

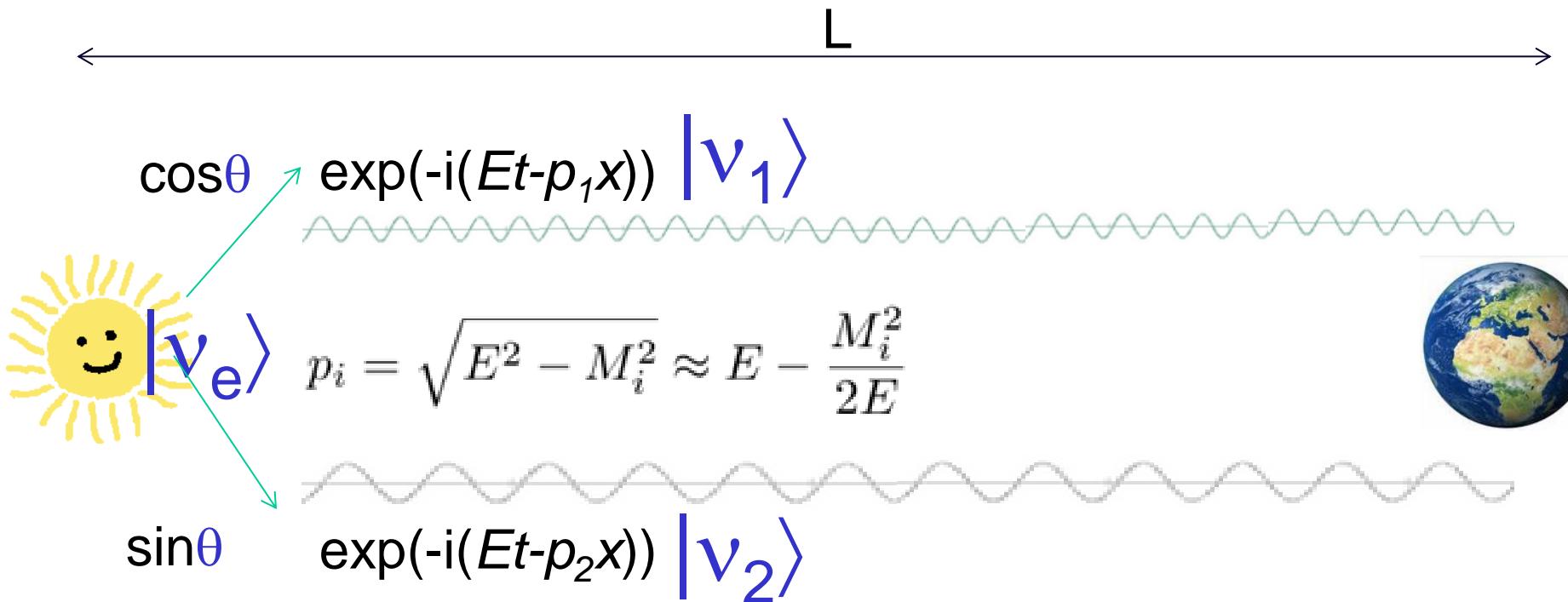
$$c_{12}^2 \equiv \cos^2 \theta_{12} = \frac{|U_{e1}|^2}{1 - |U_{e3}|^2}, \quad s_{12}^2 \equiv \sin^2 \theta_{12} = \frac{|U_{e2}|^2}{1 - |U_{e3}|^2},$$

$$s_{13}^2 \equiv \sin^2 \theta_{13} = |U_{e3}|^2, \quad s_{23}^2 \equiv \sin^2 \theta_{23} = \frac{|U_{\mu 3}|^2}{1 - |U_{e3}|^2},$$

$$c_{23}^2 \equiv \cos^2 \theta_{23} = \frac{|U_{\tau 3}|^2}{1 - |U_{e3}|^2}.$$

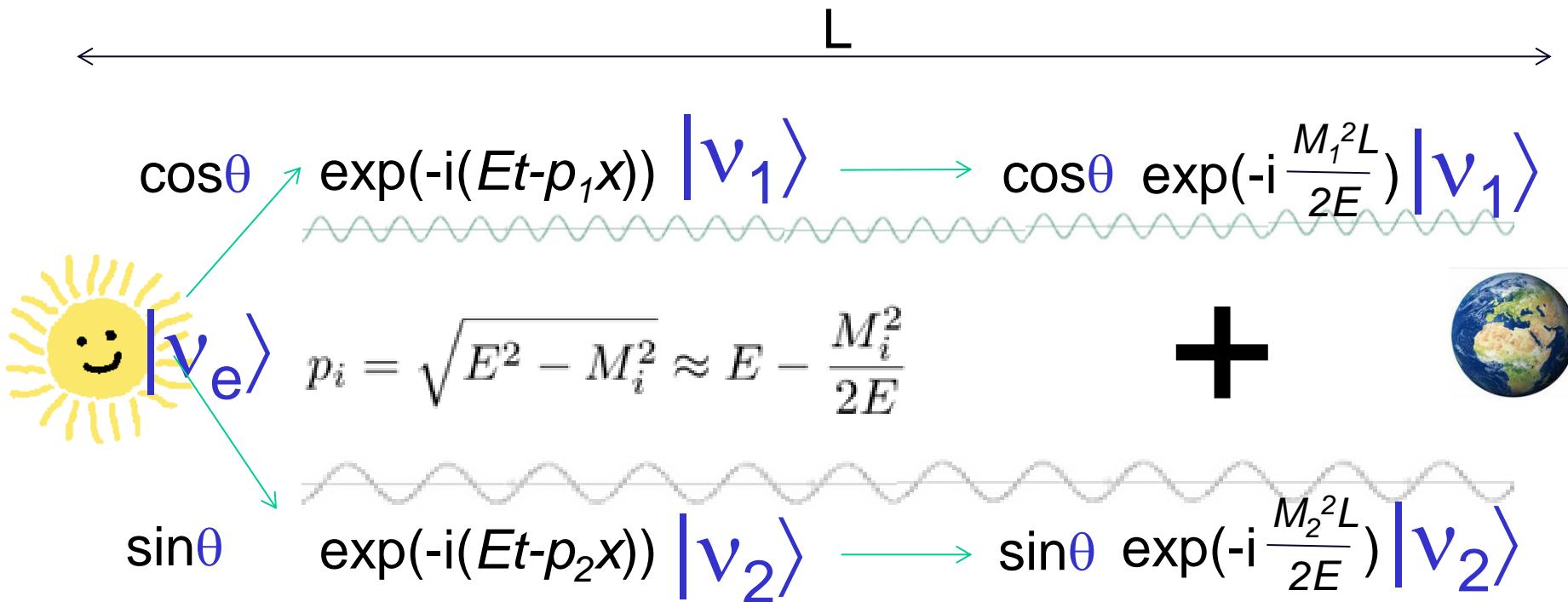
Approssimazione a due sapori Neutrini solari

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$



Approssimazione a due sapori Neutrini solari

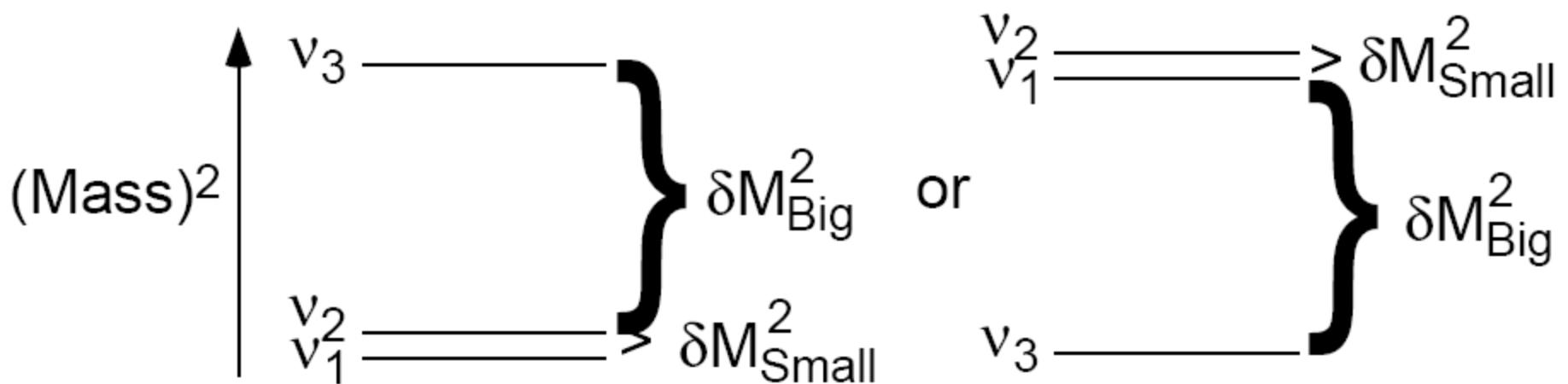
$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix}$$



$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = |\langle \nu_\mu | \nu_\oplus \rangle|^2 = |\nu_\oplus\rangle$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\oplus \rangle|^2$$

Possibili gerarchie delle masse



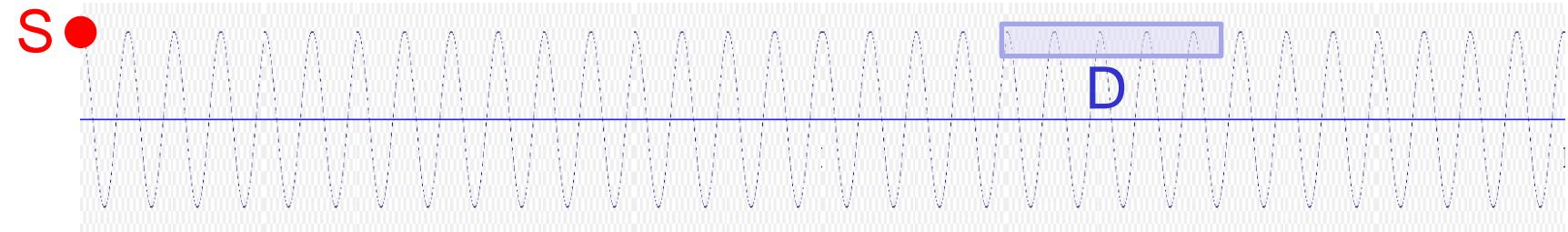
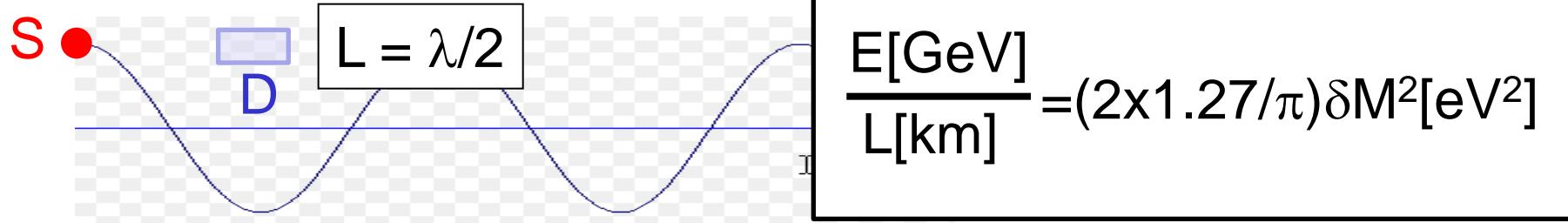
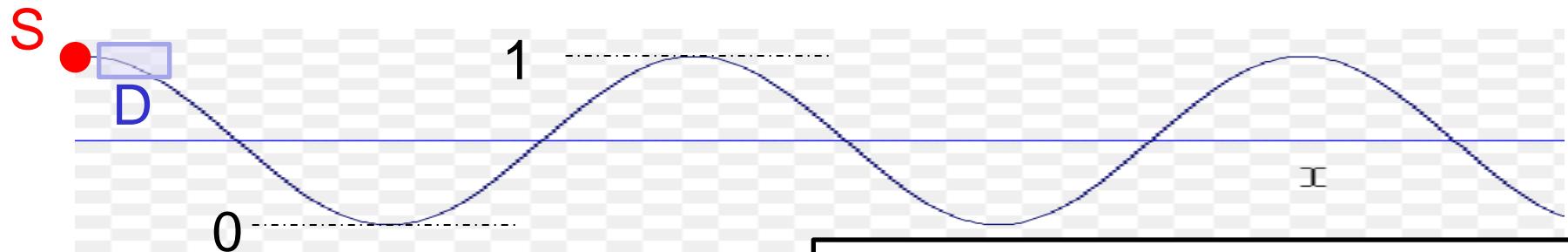
Approssimazione a due sapori

$$\delta M_{ij}^2 \equiv M_i^2 - M_j^2$$

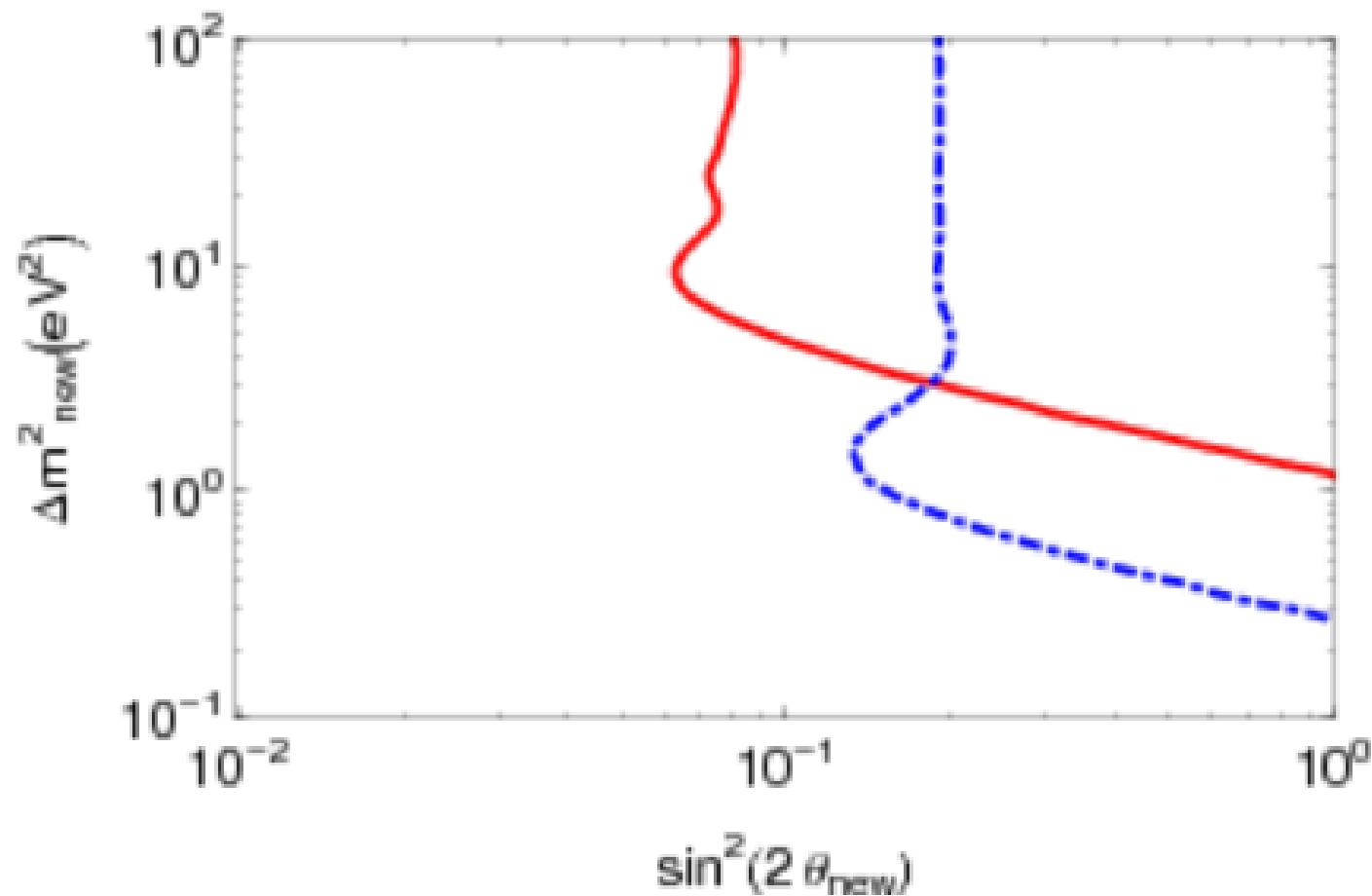
$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \delta M^2(\text{eV}^2) \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})})$$

$$\lambda = \pi E [\text{GeV}] / 1.27 \times \delta M^2 [\text{eV}^2]$$



Plot di esclusione



Probabilità di oscillazione proporzionale a:

$$\sin^2(1.27 \delta M^2(\text{eV}^2) \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})})$$

Occorre che:

$$\delta M^2(\text{eV}^2) \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})} \sim 1 \quad \text{Ossia:}$$

$$\delta M^2(\text{eV}^2) \sim \left[\frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})} \right]^{-1}$$

Sorgenti di neutrini e δM^2 esplorabili

Ci sono 4 tipi di sorgenti di neutrini rilevanti per le oscillazioni:

	reazione	L(km)	E(GeV)	L / E (km/GeV)	minimo δM^2 esplorabile (eV ²)	
sole (scomparsa)	$p+p \rightarrow d + e^+ + \bar{\nu}_e$	10^8	10^{-3}	10^{11}	10^{-11}	
atmosfera (scomparsa)	$p+N \rightarrow \pi + \text{adroni}$ $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$ \downarrow $e^+ + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu$ $\pi^- \rightarrow \dots + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu + \bar{\nu}_\mu$	10^4	1	10^4	10^{-4}	
reattori (scomparsa)	$(A,Z) \rightarrow (A,Z+1) + e^- + \bar{\nu}_e$	1	10^{-3}	10^3	10^{-3}	“short baseline”
		10^2	10^{-3}	10^5	10^{-5}	“long baseline”
acceleratori (apparizione e scomparsa)	$p+N \rightarrow \pi + \text{adroni}$	10^3	10	10^2	10^{-2}	“long baseline”
	$\pi^+, K^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\mu$ $\pi^-, K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	1	1	1	1	“short baseline”

Le oscillazioni a tre sapori

il flusso totale è conservato

$$P(v_\alpha \rightarrow v_\beta) = |A(v_\alpha \rightarrow v_\beta)|^2 = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2(\delta M_{ij}^2 \frac{L}{4E})$$

$$\delta M_{ij}^2 \equiv M_i^2 - M_j^2$$

$$+ 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin(\delta M_{ij}^2 \frac{L}{2E}) .$$

- l'oscillazione è dovuta alle **interferenze** tra i contributi dei diversi autostati di massa

non dà alcuna informazione sui valori assoluti delle masse dei neutrini

- Se $M_i = 0 \ \forall i$, allora $P(v_\alpha \rightarrow v_\beta) = \delta_{\alpha\beta}$

sensibilità a piccoli δM_{ij}^2
richiede grandi L/E

- $P(v_\alpha \rightarrow v_\beta)$ oscilla in funzione di $\delta M_{ij}^2 \frac{L}{4E} = 1.27 \delta M_{ij}^2 (\text{eV}^2) \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})}$

- lunghezza di oscillazione λ (km) = $\pi \frac{E(\text{GeV})}{1.27 \delta M_{ij}^2 (\text{eV}^2)}$

introducendo h, c

“Never measure anything but frequency.”

Isidor I. Rabi

Rivelazione di neutrini

Rivelare un neutrino è difficile:

libero cammino medio di un neutrino di 1 MeV in acqua:

~100 anni luce

- ◆ grandi masse (10s ton - ktons)
 - ◆ basso fondo
 - ◆ alta sensibilità

Metodi più usati:



1946

*INVERSE β PROCESS** (d) *Nucleon Decay* (e)

B.M. Pontecorvo (f)

Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario



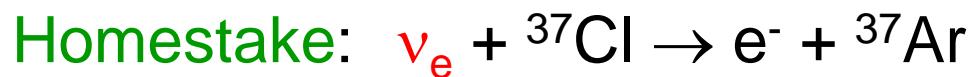
I neutrini solari: gli esperimenti

- ♦ esperimenti < 2000

Radiochimici

non in tempo reale
non spettro

Soglie:

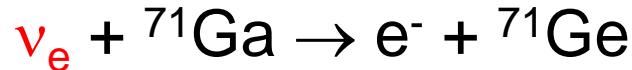


0.814 MeV

Gallex

SAGE

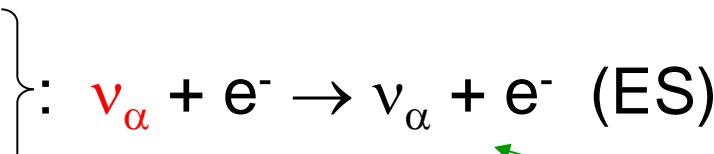
GNO



0.233 MeV

Kamiokande

SuperKamiokande



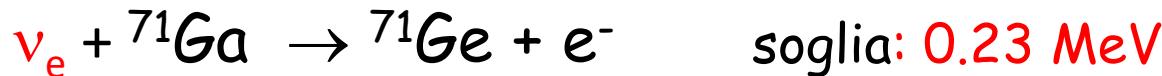
7.5-5.5 MeV

Čerenkov

tempo reale e spettro
ma solo ${}^8\text{B}$

Gli esperimenti storici sui neutrini solari: Homestake (Davies) e GALLEX

Reazioni:

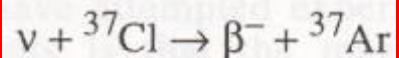


Sono radioattivi ma con vite medie lunghe (decine di giorni)

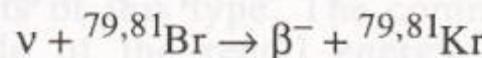
Pontecorvo, 1946

AN EXAMPLE

There are several elements which can be used for neutrino radiation in the suggested investigation. Chlorine and Bromine, for example, fulfil reasonably well the desired conditions. The reactions of interest would be:



(34 days; K capture)

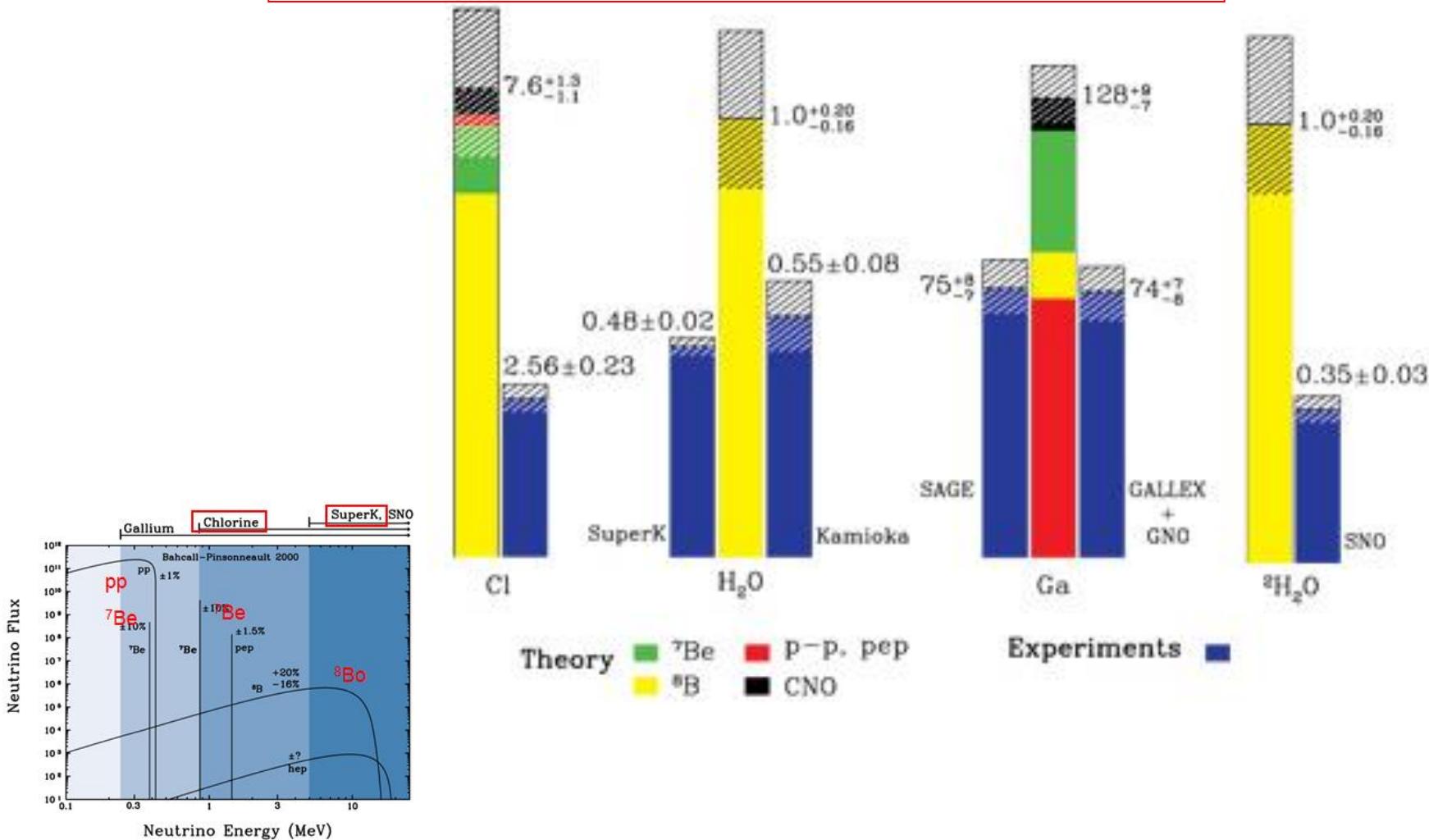


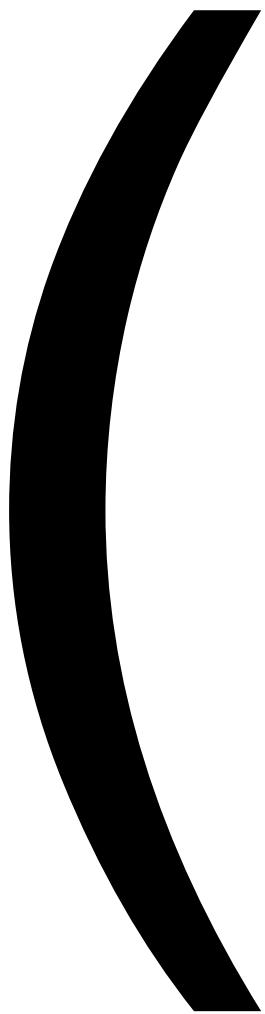
(34 h; emission of positrons of 0.4 MeV).

The experiment with Chlorine, for example, would consist in irradiating with neutrinos a large volume of Chlorine or Carbon Tetra-Chloride, for a time of the order of one month, and extracting the radioactive ${}^{37}\text{Ar}$ from such volume by boiling. The radioactive argon would be introduced inside a small counter the counting efficiency is close to 100%, because of the high Auger electron yield. Conditions 1, 2, 3, 4, are reasonably fulfilled in this example. It can be shown also that condition 5, implying a relatively low background, is fulfilled.

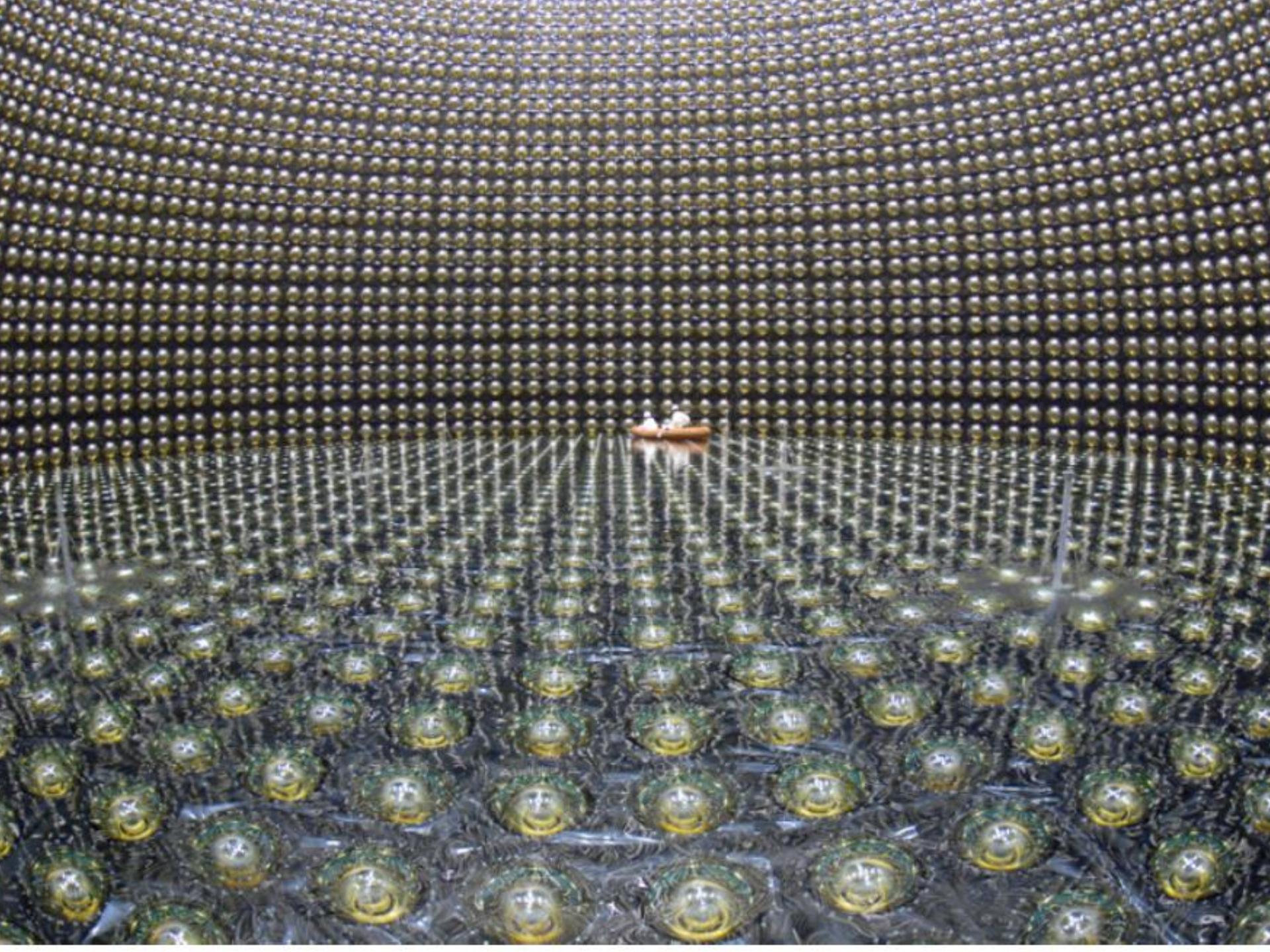
Il cosiddetto “solar neutrino puzzle”

Flussi di neutrini misurati confrontati con previsioni del SSM
deficit sistematico in tutti gli esperimenti





In Giappone...



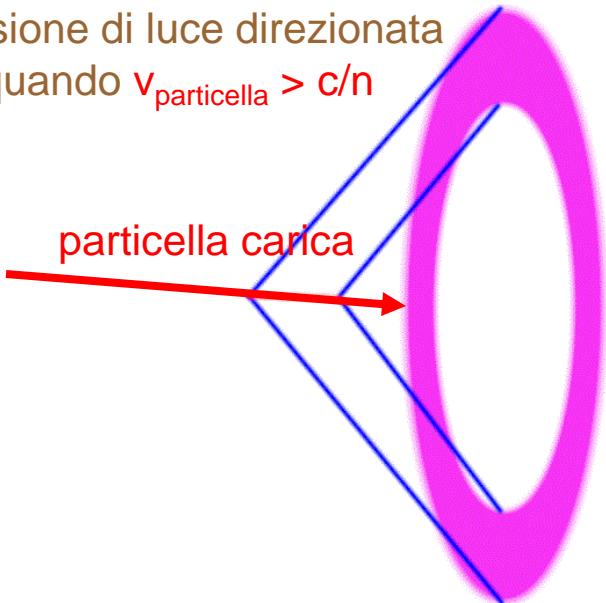
(Super)kamiokande (SK)

Kamioka: sito minerario
giapponese profondo ~ 1000 m

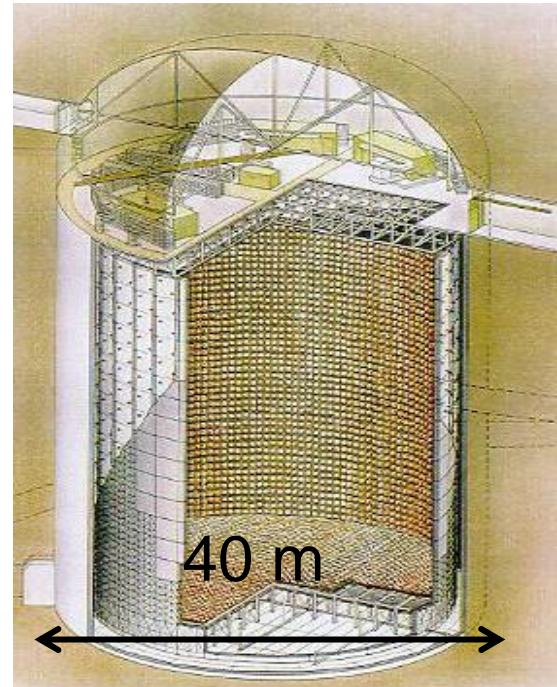
SK è una tanica sotterranea
 contenente 50 kton di acqua

Sulle pareti, sono in funzione
 11200 fotomoltiplicatori, $\Phi=50$ cm

emissione di luce direzionale
 quando $v_{\text{particella}} > c/n$



Le particelle cariche di alta energia
 vengono rivelate per effetto Čerenkov



(Super)kamiokande (SK)

SK è un esperimento per il decadimento del protone...

...ma ha un fondo fastidioso: i neutrini atmosferici

Lo studio dei questo fondo e la scoperta
che ne segue è un classico esempio di
serendipity



NEUTRINO'98

NEUTRINO'98 in Kamioka !

The XVIIIth International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO'98) will be held in Takayama near Kamioka, Japan on 4-9 June, 1998.



June 5

* Session 6: Atmospheric neutrinos I



- Contained events and Soudan-2
 - E.Peterson(Minesota)
- Upward-going muons and MACRO
 - F.Ronga(Frascati)
- Results from Super-Kamiokande & Kamiokande
 - T.Kajita(ICRR)



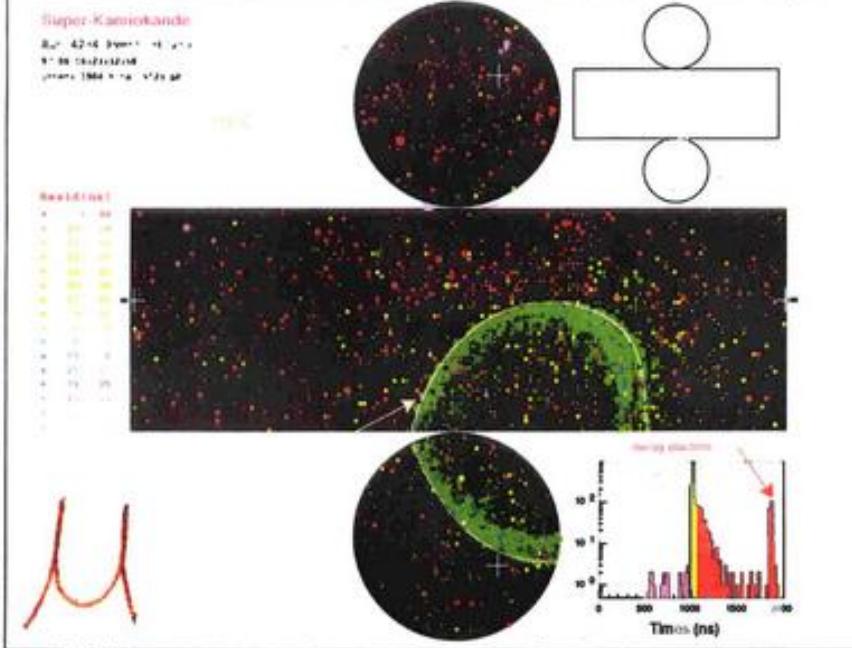
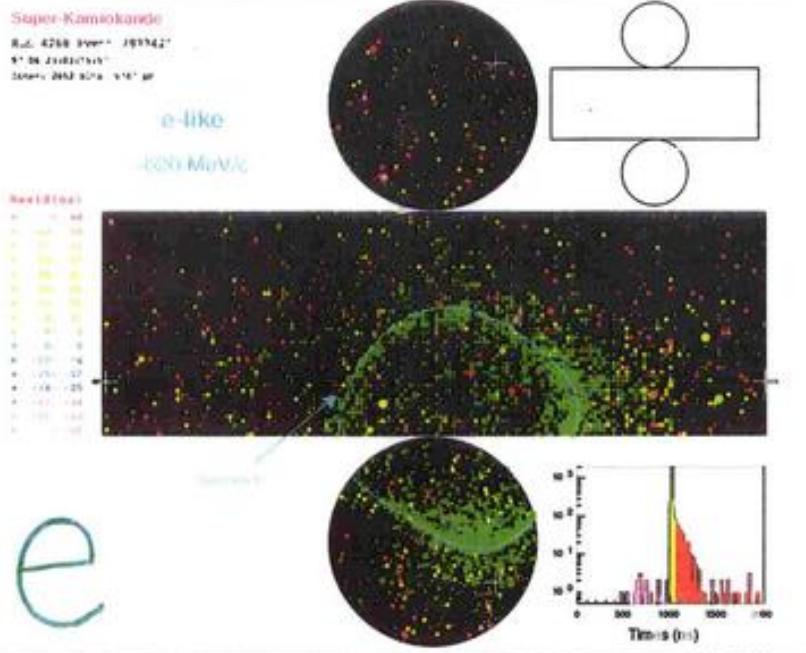
ν98, @Takayam
June 1998

Atmospheric neutrino results
from Super-Kamiokande & Kamiokande
— Evidence for ν_μ oscillations —

T. Kajita

Kamioka observatory, Univ. of Tokyo

for the { Kamiokande
Super-Kamiokande } Collaborations



Super-Kamiokande

Run 3062 Event 475360

96-11-08:12:07:30

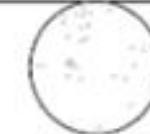
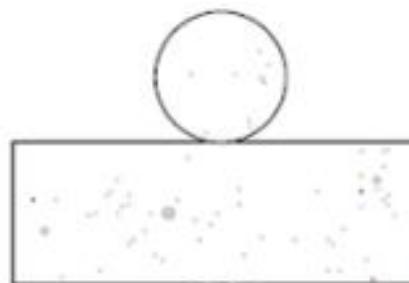
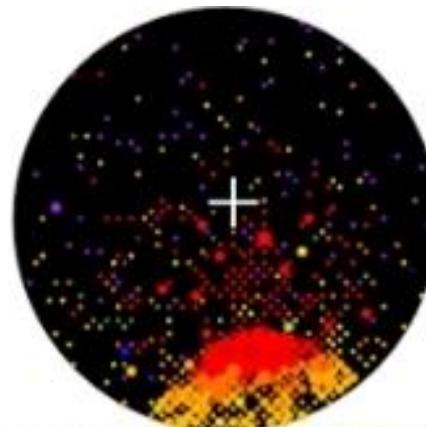
Inner: 2305 hits, 7763 pE

Outer: 5 hits, 4 pE (in-time)

Trigger ID: 0x03

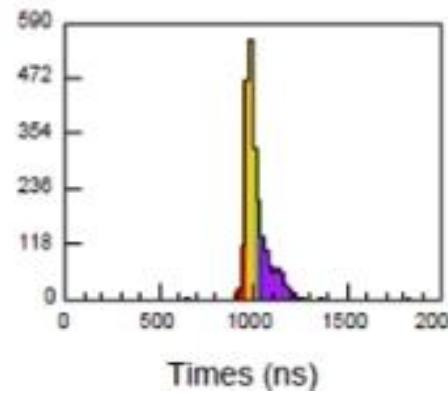
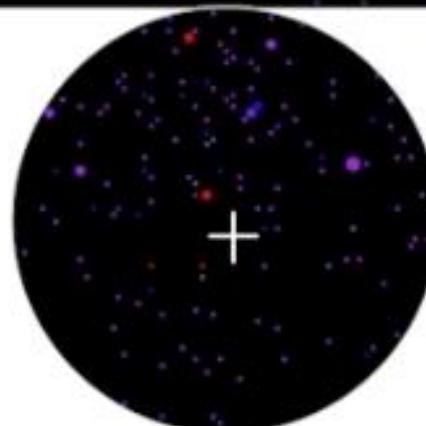
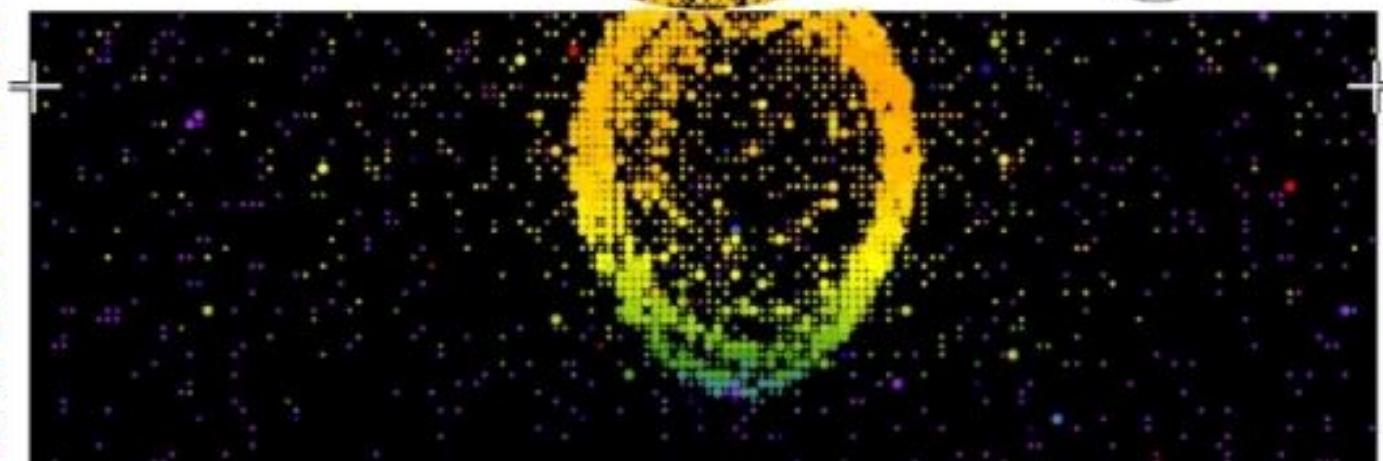
D wall: 601.2 cm

PC mu-like, $p = 1088.0$ MeV/c



Time (ns)

- < 971
- 971- 977
- 977- 983
- 983- 989
- 989- 995
- 995-1001
- 1001-1007
- 1007-1013
- 1013-1019
- 1019-1025
- 1025-1031
- 1031-1037
- 1037-1043
- 1043-1049
- 1049-1055
- >1055



Super-Kamiokande

Run 3013 Event 149004

96-10-24:19:39:51

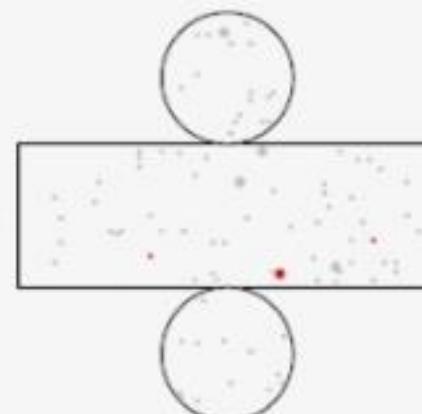
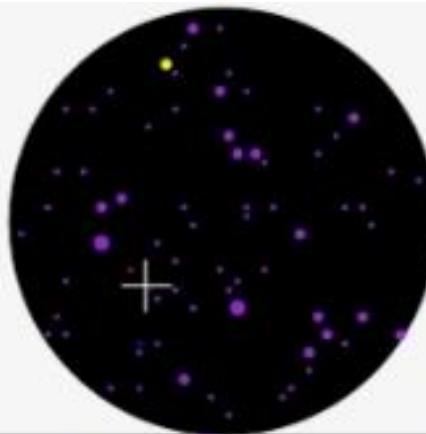
Inner: 1763 hits, 4003 pE

Outer: 3 hits, 5 pE (in-time)

Trigger ID: 0x03

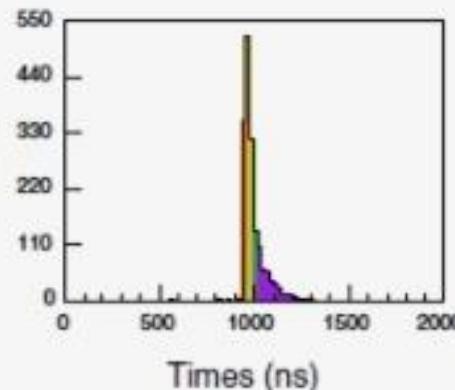
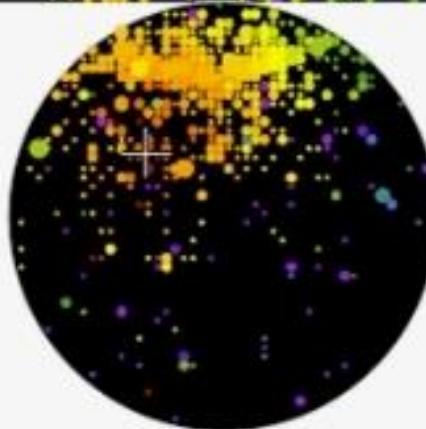
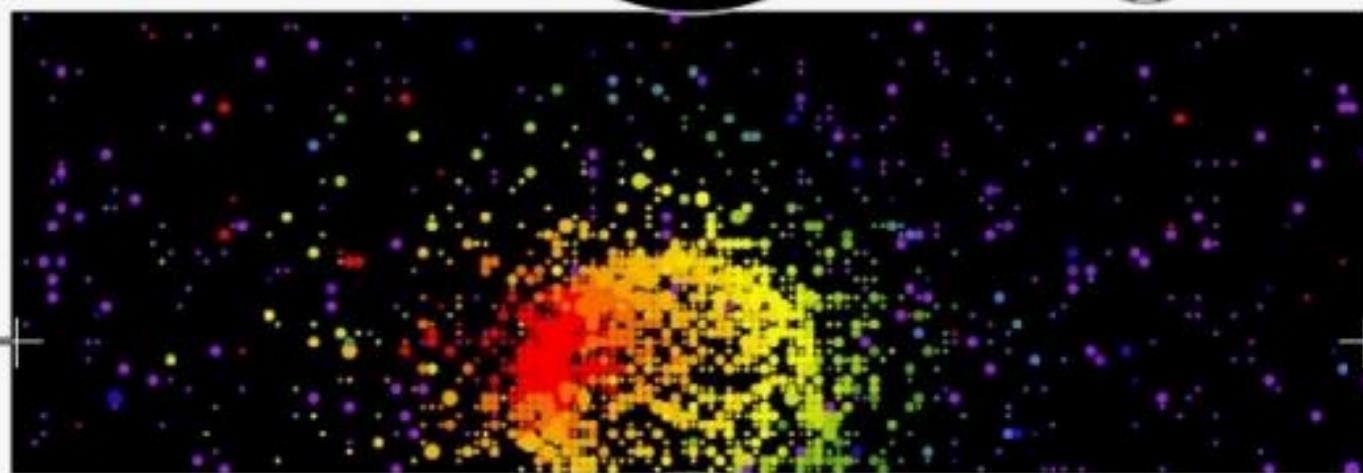
D wall: 897.4 cm

PC e-like, $p = 463.8$ MeV/c



Time (ns)

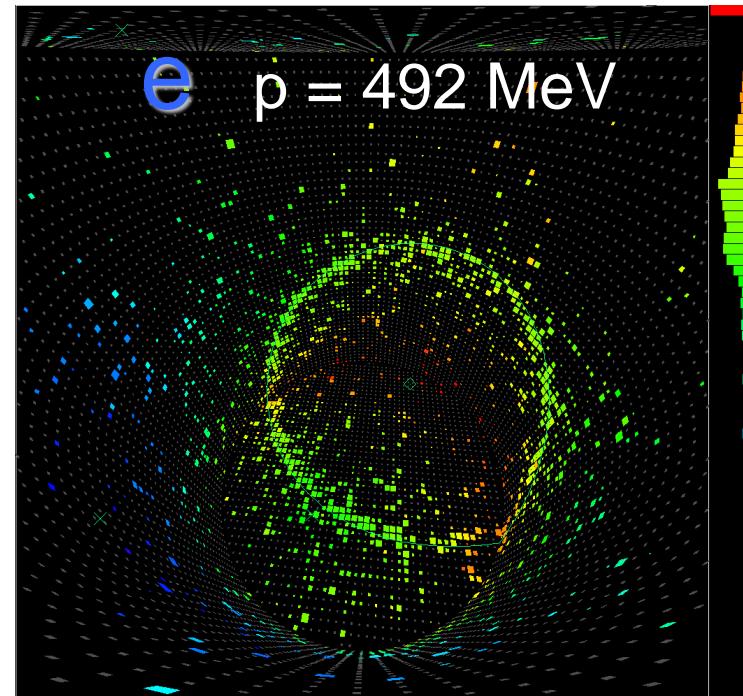
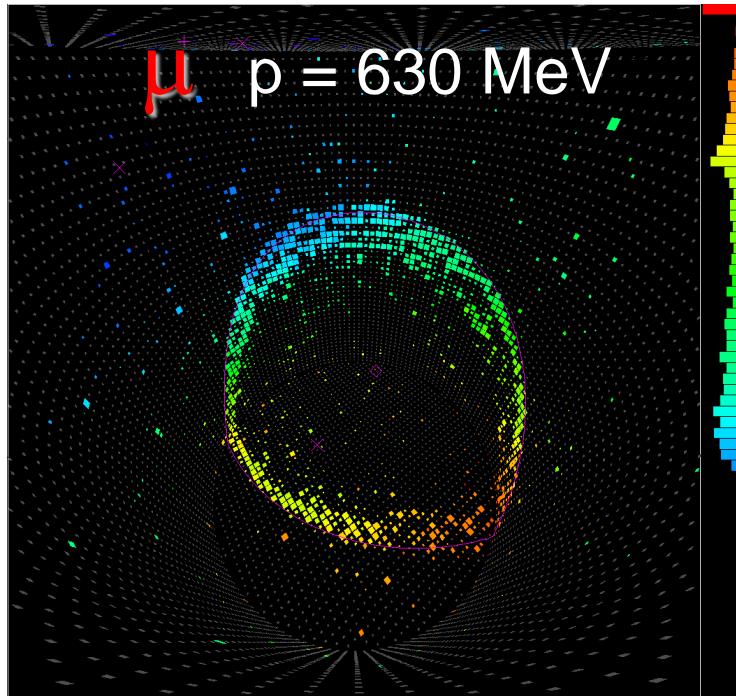
- < 950
- 950- 963
- 963- 969
- 969- 973
- 973- 978
- 978- 983
- 983- 989
- 989- 993
- 993- 998
- 998-1003
- 1003-1008
- 1008-1013
- 1013-1018
- 1018-1023
- 1023-1028
- >1028



Superkamiokande (SK): oscillazioni dei neutrini atmosferici

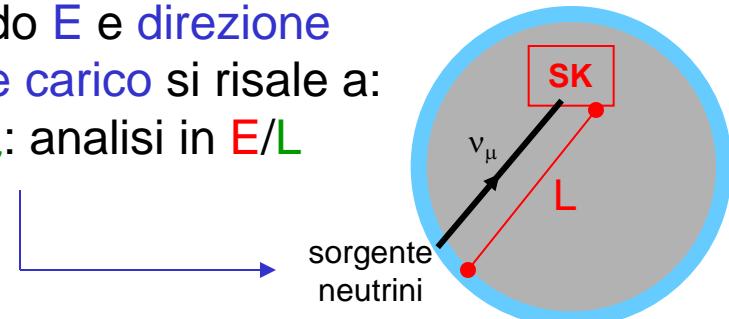
I segnali

SK distingue μ da e



μ ed e di alta energia sono generati dai **corrispondenti neutrini** che interagiscono nel rivelatore o nella roccia vicina

misurando E e direzione
del lepton carico si risale a:
 $E_v - L_v$: analisi in E/L



Superkamiokande (SK): oscillazioni dei neutrini atmosferici

I risultati (1)

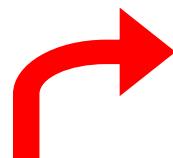
- ◆ SK osserva un deficit di ν_μ spiegabile solo con oscillazioni:

$$\nu_\mu \Leftrightarrow \nu_\tau$$

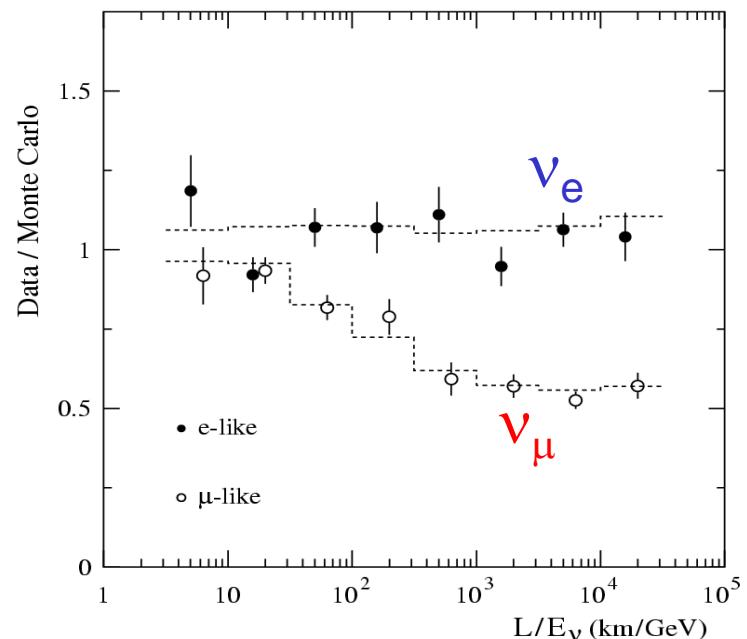
Il flusso di ν_e corrisponde alle aspettative

① $(\mu/e)_{\text{dati}} / (\mu/e)_{\text{calcolato}} = \begin{cases} 0.63 \pm 0.03 \text{ (stat)} \pm 0.05 \text{ (sys)} & E < 1 \text{ GeV} \\ 0.65 \pm 0.05 \text{ (stat)} \pm 0.08 \text{ (sys)} & E > 1 \text{ GeV} \end{cases}$

riduce incertezza sistematica

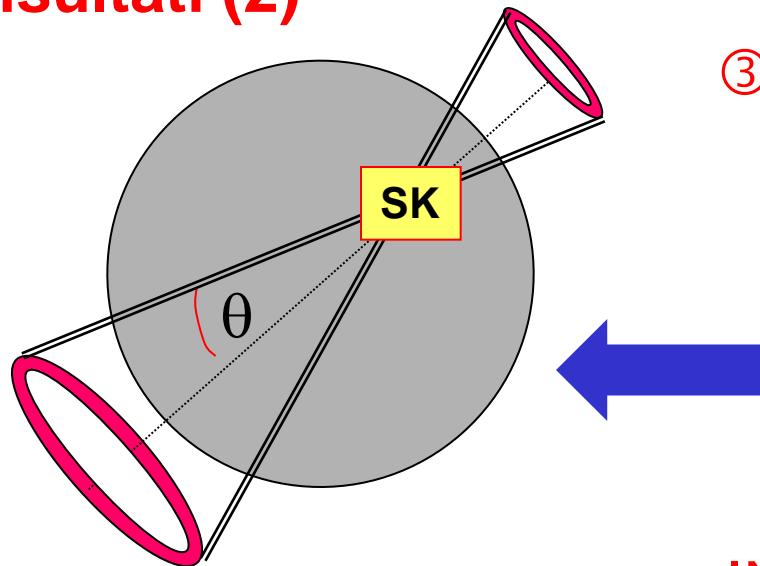


- ② Il flusso di ν_μ dipende da L/E come ci si aspetta dalle oscillazioni, mentre il flusso di ν_e è costante



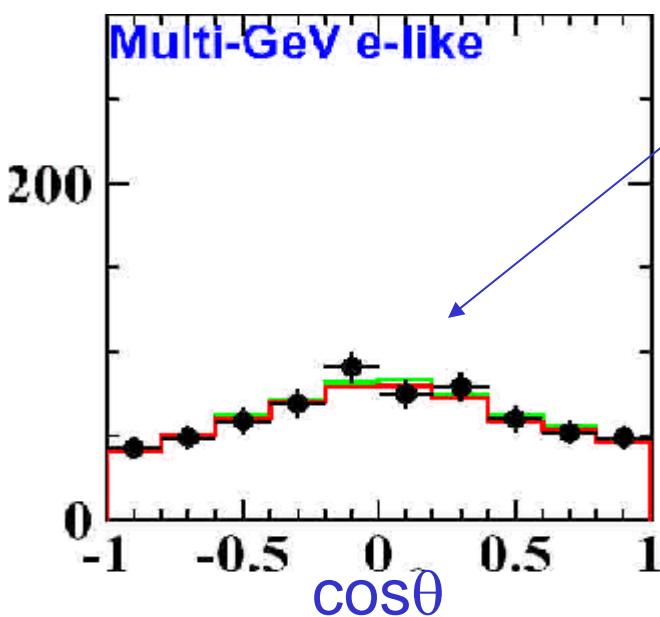
Superkamiokande (SK): oscillazioni dei neutrini atmosferici

I risultati (2)



- ③ argomento potente e che non dipende da simulazioni

per semplici considerazioni geometriche, ci aspettiamo **simmetria ALTO-BASSO** se guardiamo nello stesso elemento di angolo solido $2\pi d(\cos\theta)$



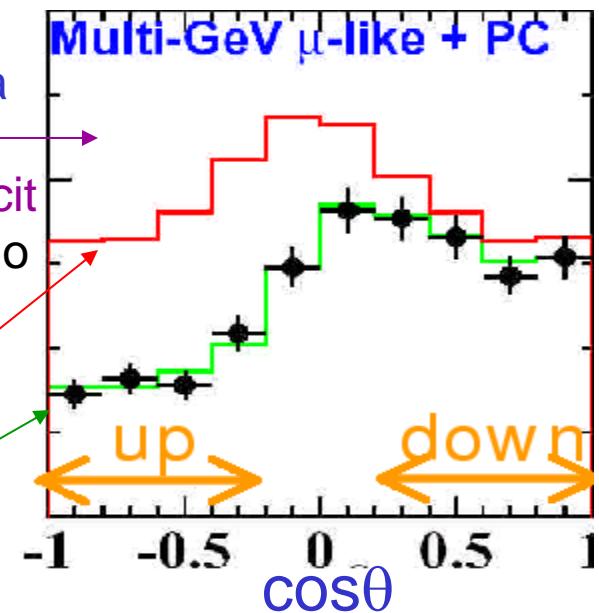
INVECE:

per gli **elettroni** c'è **simmetria**

per i **muoni**, c'è un forte **deficit** di particelle dal **basso** (hanno avuto tempo di oscillare)

senza oscillazioni

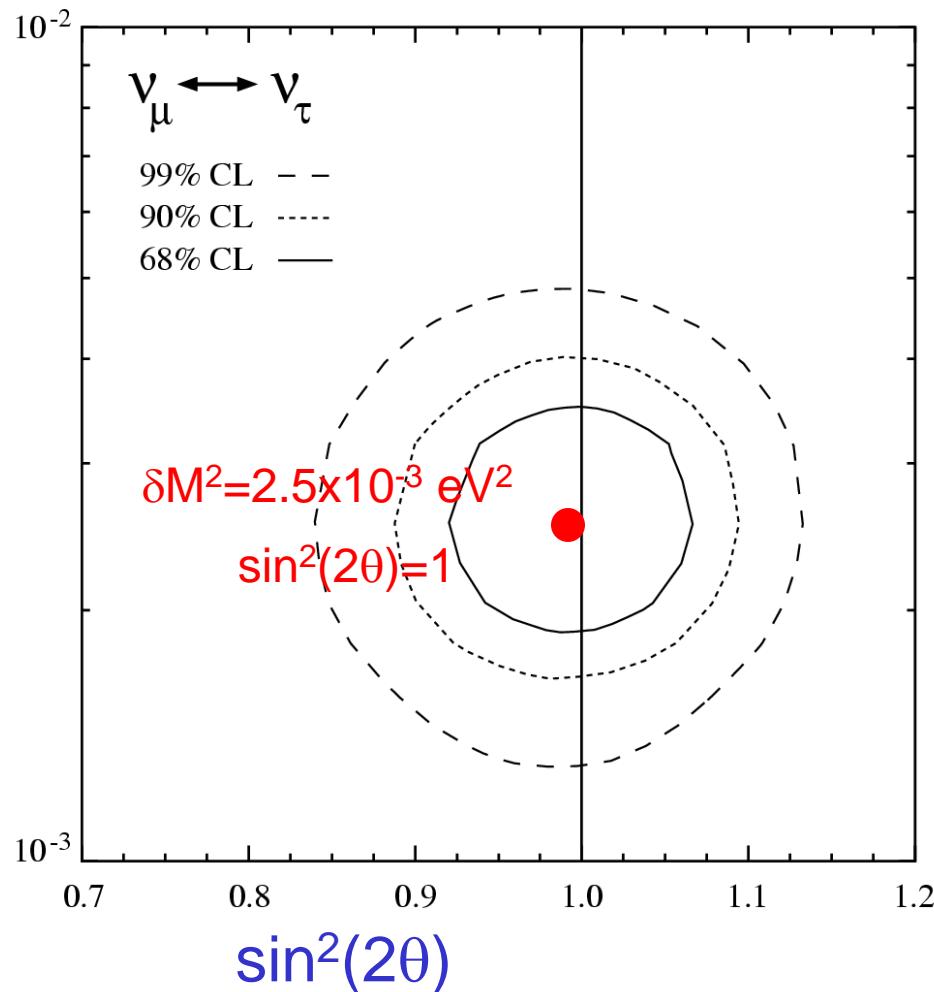
con oscillazioni



Superkamiokande (SK): oscillazioni dei neutrini atmosferici

I risultati (3)

δM^2



I risultati, interpretati come oscillazione a 2 sapore, sono compatibili con “maximal mixing”, ossia con:

$$\boxed{\begin{aligned}\sin^2(2\theta) &\sim 1 \\ \theta &\sim \pi/4\end{aligned}}$$

F. Ronga
NEUTRINO 98

Atmospheric Neutrino Induced Muons



Monopole, **A**strophysics, and **C**osmic **R**ay **O**bservatory

USA-ITALY Collaboration

Bari, Bologna, Boston, Caltech, Drexel, Indiana, Frascati, Gran
Sasso, L'Aquila, Lecce, Michigan, Napoli, Pisa, Roma I,
Texas, Torino

Summary:

- Upward-going (through-going) muons produced by neutrino interactions in the rock below the detector. $\langle E_\nu \rangle \approx 100 \text{ GeV}$
MACRO and other experiments
- Muons produced by neutrino interactions inside the detector or stopping muons $\langle E_\nu \rangle \approx 5 \text{ GeV}$

Conclusions

MACRO Upgoing Muons (Through-going) :

$E_\nu \approx 100 \text{ GeV}$

- Peak probability $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ **17%**
- Probability for No oscillations **0.1 %**
- Peak Probability $\nu_\mu \rightarrow \nu$ sterile **2%**

Low energy events:

$E_\nu \approx 5 \text{ GeV}$

	$R = \text{data/predict}$	No oscillations	With oscillations
	0.53		
Internal Up	0.53 ± 0.15	1	0.56
Internal	0.71 ± 0.21	1	0.73
Down + Stopping Up			
Conclusion: a $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscillation with maximum mixing and $\delta m^2 \approx$ a few units in 10^{-3} eV^2 is consistent with all the MACRO Data			

Only Warning :

The peak probability for the angular distributions of the
Upgoing Muons (Through-going) is low (4.6%)

**==> Statistical Fluctuation or Hidden
Physics?**

Superkamiokande (SK): misure più raffinate

VOLUME 93, NUMBER 10

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
3 SEPTEMBER 2004

Evidence for an Oscillatory Signature in Atmospheric Neutrino Oscillations

(The Super-Kamiokande Collaboration)

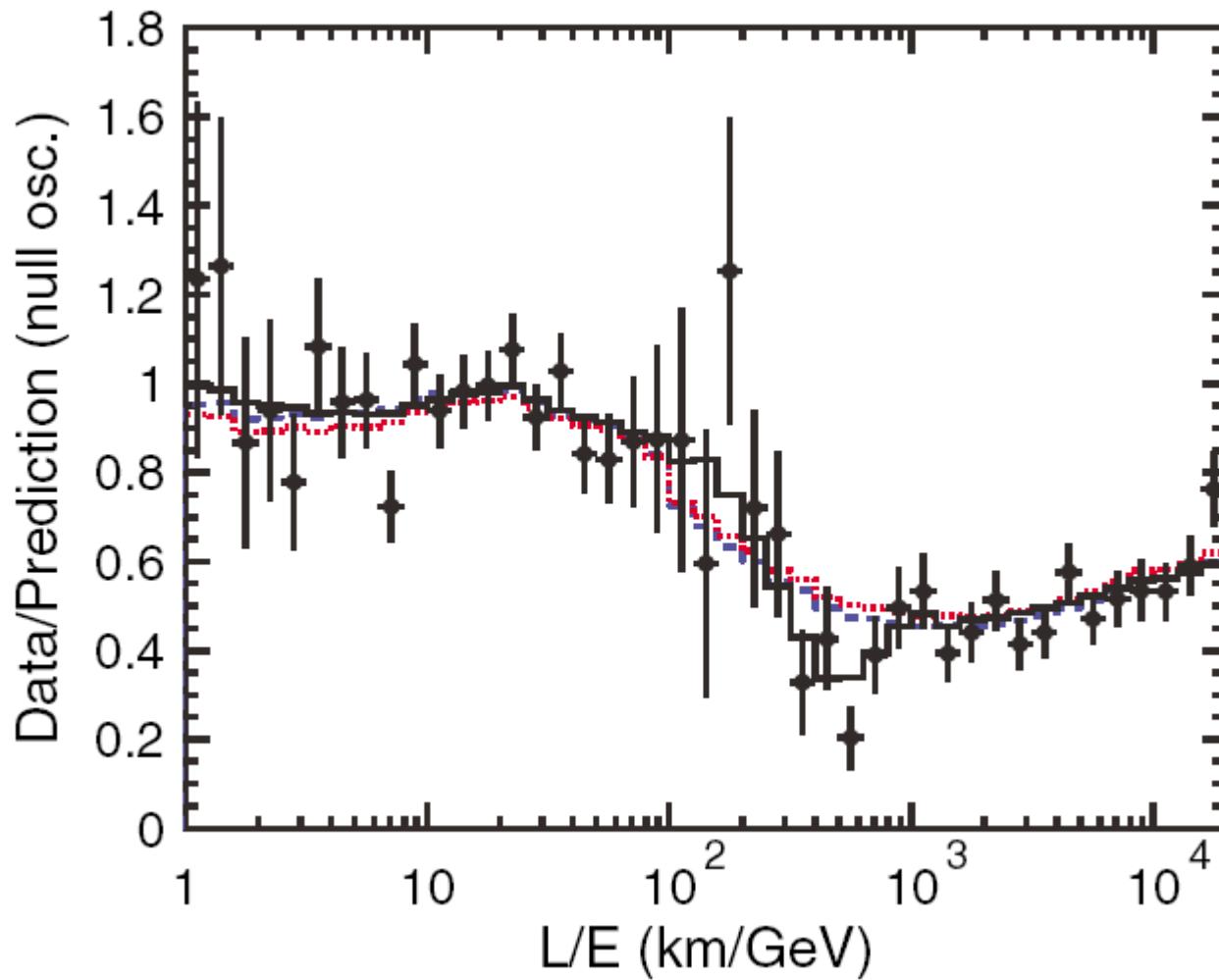
(Received 27 April 2004; published 3 September 2004)

Muon neutrino disappearance probability as a function of neutrino flight length L over neutrino energy E was studied. A dip in the L/E distribution was observed in the data, as predicted from the sinusoidal flavor transition probability of neutrino oscillation. The observed L/E distribution constrained $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ neutrino oscillation parameters; $1.9 \times 10^{-3} < \Delta m^2 < 3.0 \times 10^{-3}$ eV 2 and $\sin^2 2\theta > 0.90$ at 90% confidence level.

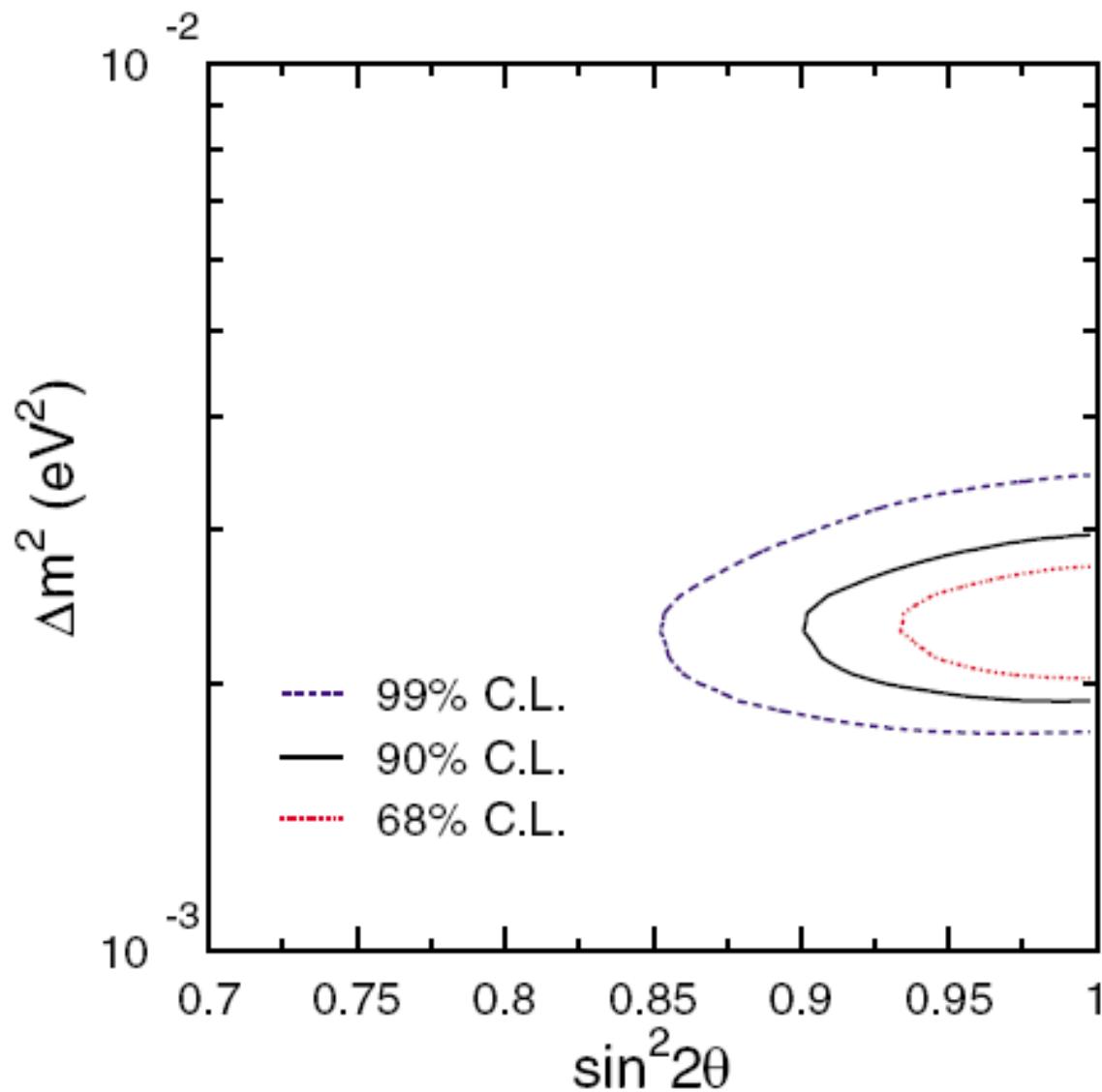
DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.101801

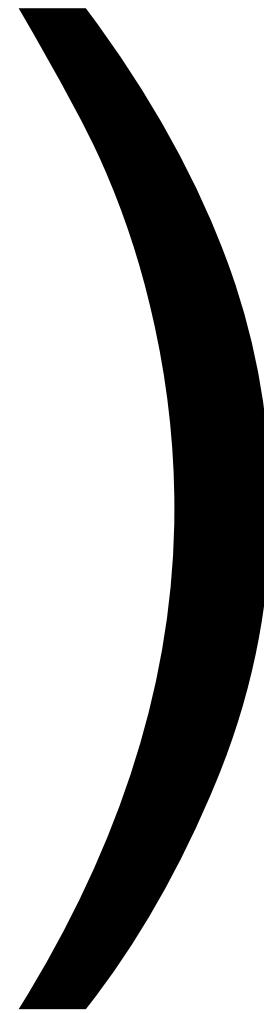
PACS numbers: 14.60.Pq, 96.40.Tv

Superkamiokande (SK): misure più raffinate



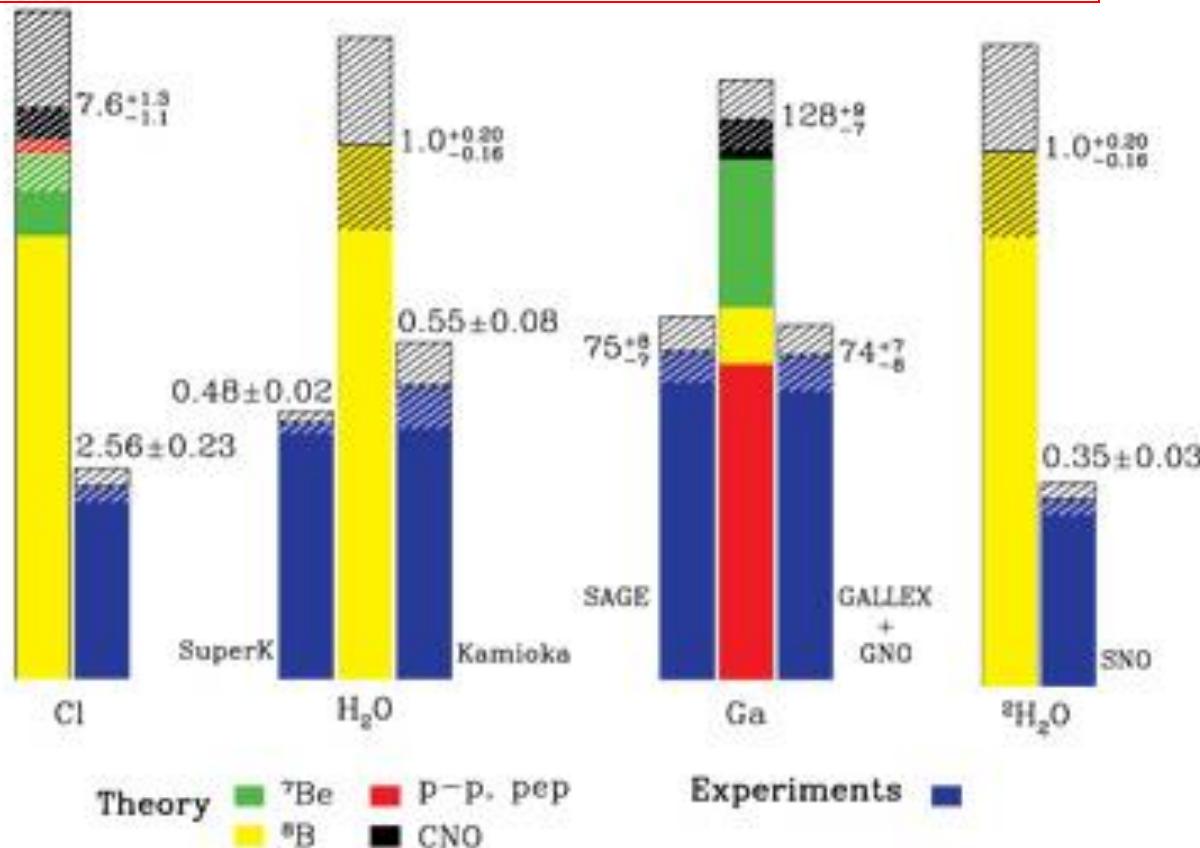
$$\Delta M_{\text{atm}}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 = (50 \text{ meV})^2$$





Il cosiddetto “solar neutrino puzzle”

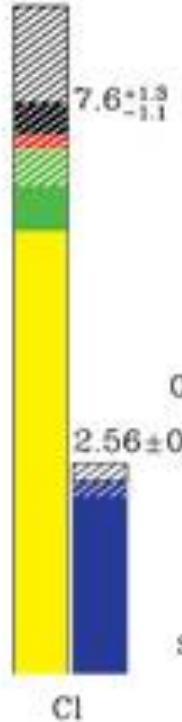
Flussi di neutrini misurati confrontati con previsioni del SSM
deficit sistematico in tutti gli esperimenti



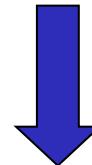
La soluzione di Pontecorvo

Flussi di neutrini misurati confrontati con previsioni del SSM

deficit sistematico in tutti gli esperimenti



Pontecorvo e Gribov (1969)



ipotizzarono che il deficit fosse dovuto
alla oscillazione di neutrini $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$

Theory

^7Be

^8B

p-p, pep

CNO

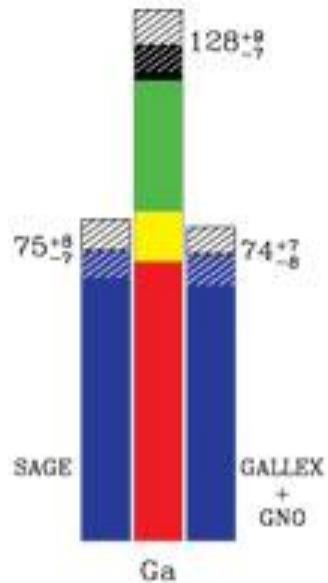
Experiments

■

Possibili soluzioni dell'enigma

Per molti anni, si sono prese in considerazione **due soluzioni**:

- ◆ Fisica del neutrino
 - oscillazioni
 - momento magnetico
 - decadimento
- ◆ Modello solare standard
 - non corrette previsioni delle reazioni “minori”
 - condizioni solari non testabili in laboratorio



Risultati del ^{71}Ga :
potrebbe non esserci
un deficit dei neutrini pp

Oscillazioni nella materia solare

Flusso di neutrini nella **materia** → Energia di interazione dovuta alla diffusione su elettroni

ν_e e $\nu_{\mu,\tau}$ hanno energia di interazione differente

◆ Calcolo di oscillazione a due sapore nella **materia** (effetto **MSW**)

densità di elettroni

$$x_{\odot} = \frac{2\sqrt{2}G_F N_e E}{\delta M_{21}^2}$$

$$\sin^2 2\theta_{\odot} = \frac{\sin^2 2\theta_V}{\sin^2 2\theta_V + (\cos 2\theta_V - x_{\odot})^2}$$

$$D_{\odot} = \sqrt{\sin^2 2\theta_{\odot} + (\cos 2\theta_{\odot} - x_{\odot})^2}$$

angolo di mixing
nel vuoto

r: distanza dal centro del sole

$$\begin{aligned} P(\nu_e \rightarrow \nu_{\mu}) &= P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e) \\ &= \sin^2 2\theta_{\odot} \sin^2 [1.27 \delta M_{21}^2 (\text{eV}^2) D_{\odot} \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})}] \end{aligned}$$

se per $r=0$, $x_{\odot} > \cos 2\theta_V$,
allora $\exists r_c$ t.c. $x_{\odot} = \cos 2\theta_V$



Risonanza

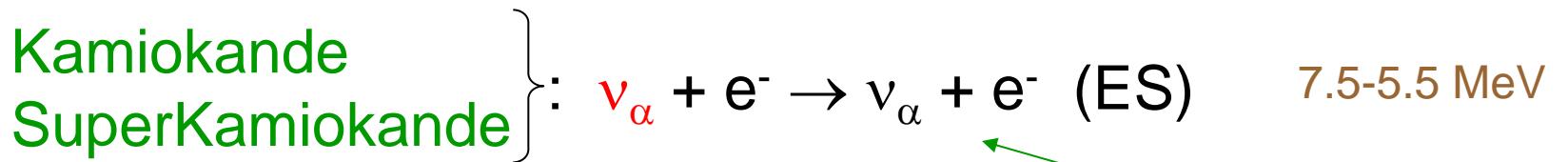
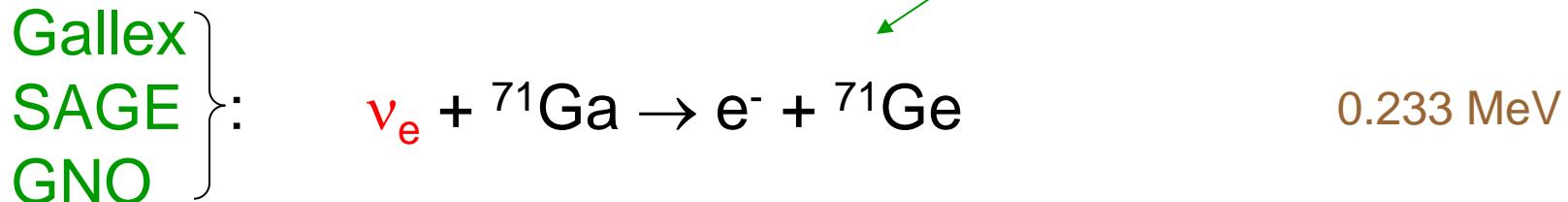
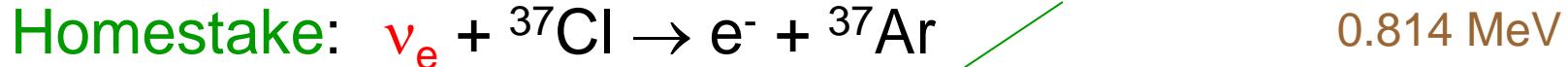
I neutrini solari: gli esperimenti

♦ esperimenti storici

Radiochimici

non in tempo reale
non spettro

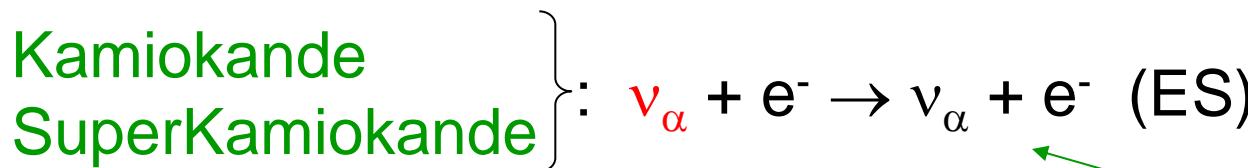
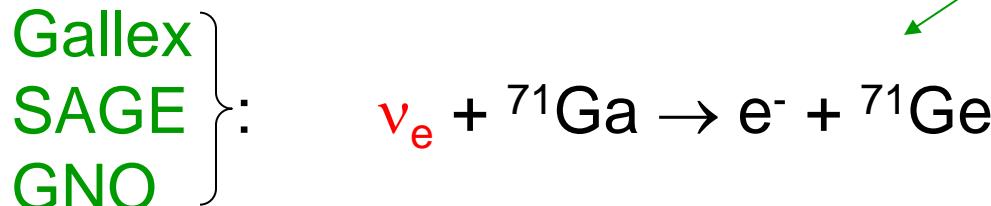
Soglie:



Čerenkov
tempo reale e spettro
ma solo ${}^8\text{B}$

I neutrini solari: gli esperimenti

◆ esperimenti storici



Radiochimici
non in tempo reale
non spettro

Soglie:

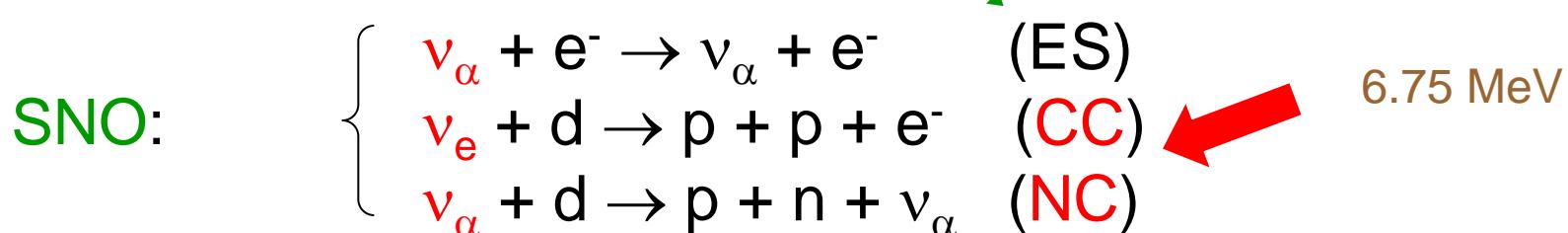
0.814 MeV

0.233 MeV

7.5-5.5 MeV

Čerenkov
tempo reale e spettro
ma solo ${}^8\text{B}$

◆ Per sciogliere il nodo di Gordio

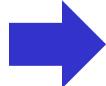




NEUTRINO'98

* Session 2: Solar neutrinos I

- [Experiments at the Homestake mine](#)
 - K.Lande(Pennsylvania)
- [Results from SAGE](#)
 - V.N.Gavrin(INR)
- [Results from Gallex and GNO](#)
 - T.Kirsten(Max-Plank)
- [Results from Super-Kamiokande & Kamiokande](#)
 - Y.Suzuki(ICRR)
- [Status of the SNO project](#)
 - A.McDonald(Queen's)



Sudbury Neutrino Observatory.

Main Features:

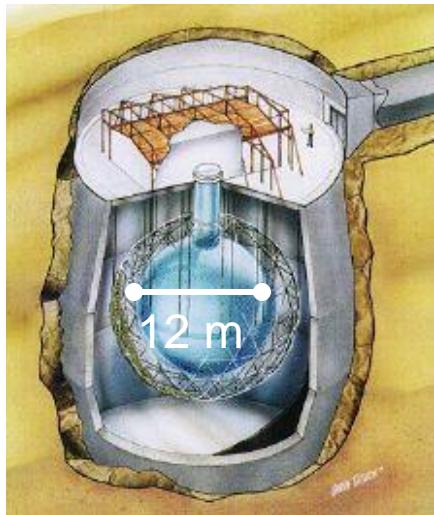
- Inco's Creighton Mine, Sudbury, Ontario, Canada.
- 2,000 meters underground, 1 μ/hr .
- Cavity size, 35 m high by 22 m diameter.
- 1,000 tonnes of D_2O , shielded by 7,000 tonnes of H_2O .
- 9,600 8" Hamamatsu PMTs, TTS = 1.6 ns.

Participating institutions:

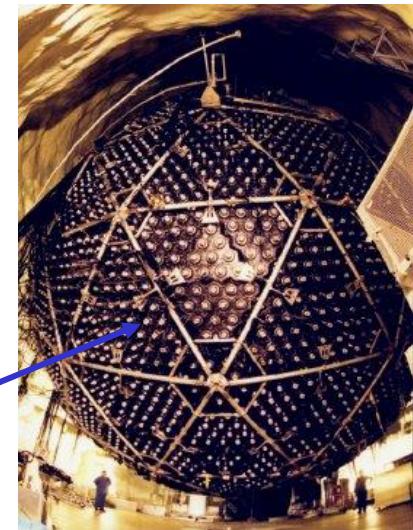
Canada	Queen's University Guelph University Laurentian University Univ of British Columbia Centre for Research in Particle Physics
USA	Univ of Pennsylvania Univ of Washington Los Alamos National Lab Lawrence Berkeley National Lab Brookhaven National Lab
UK	Oxford University

Subdury Neutrino Observatory (SNO)

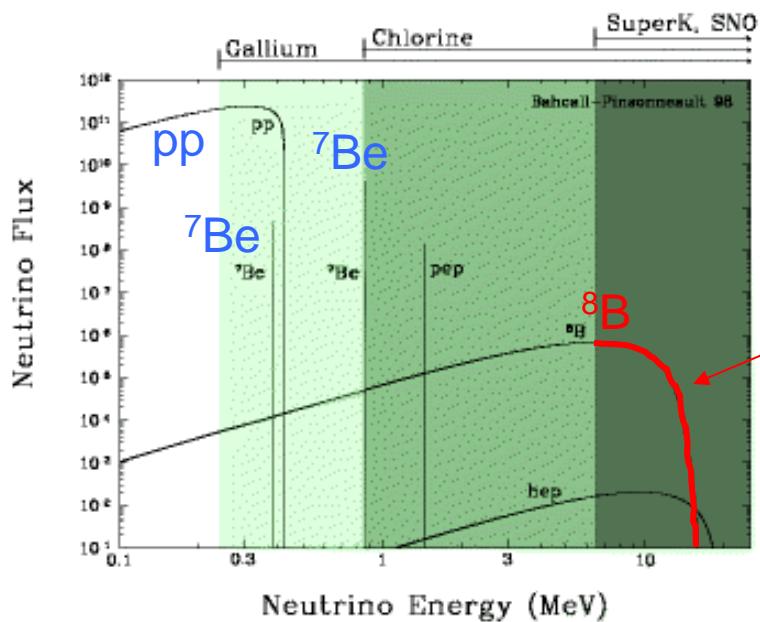
il rivelatore e la soglia



SNO è un esperimento a effetto Čerenkov in acqua installato in una ex-miniera canadese



9500 fotomoltiplicatori

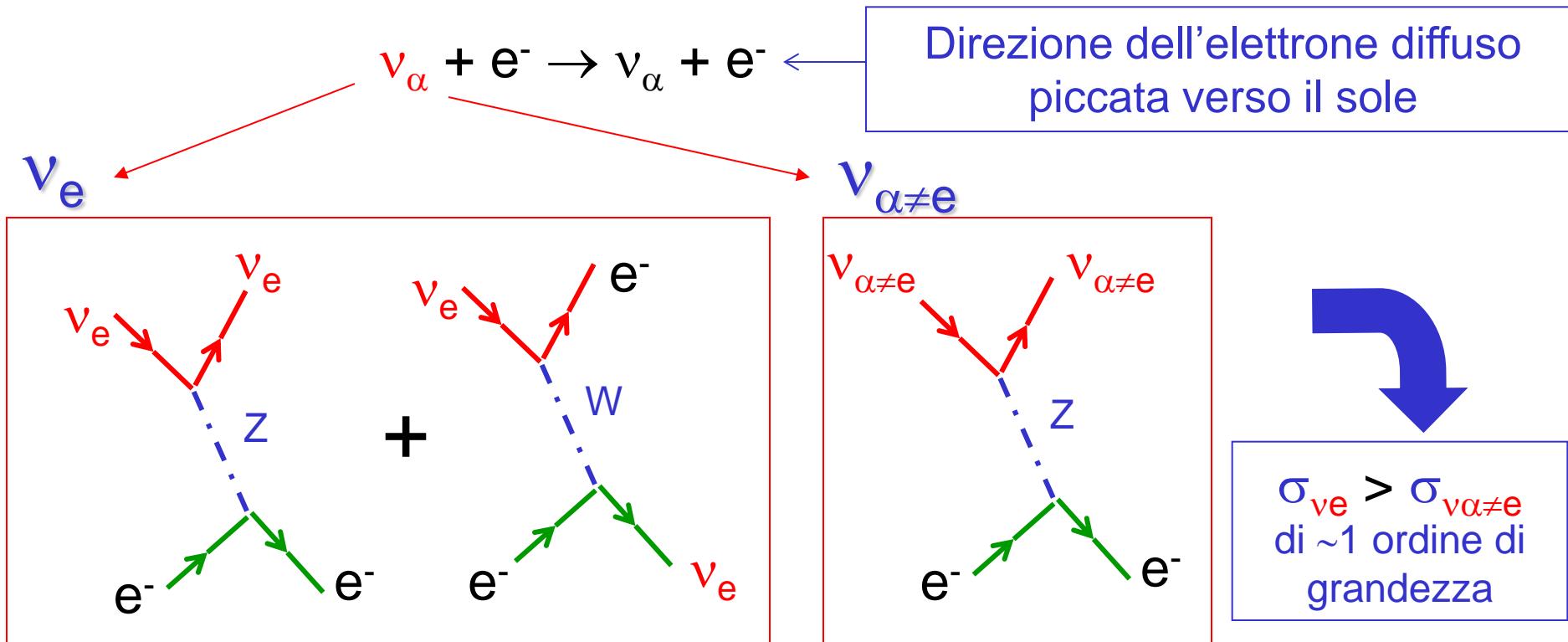


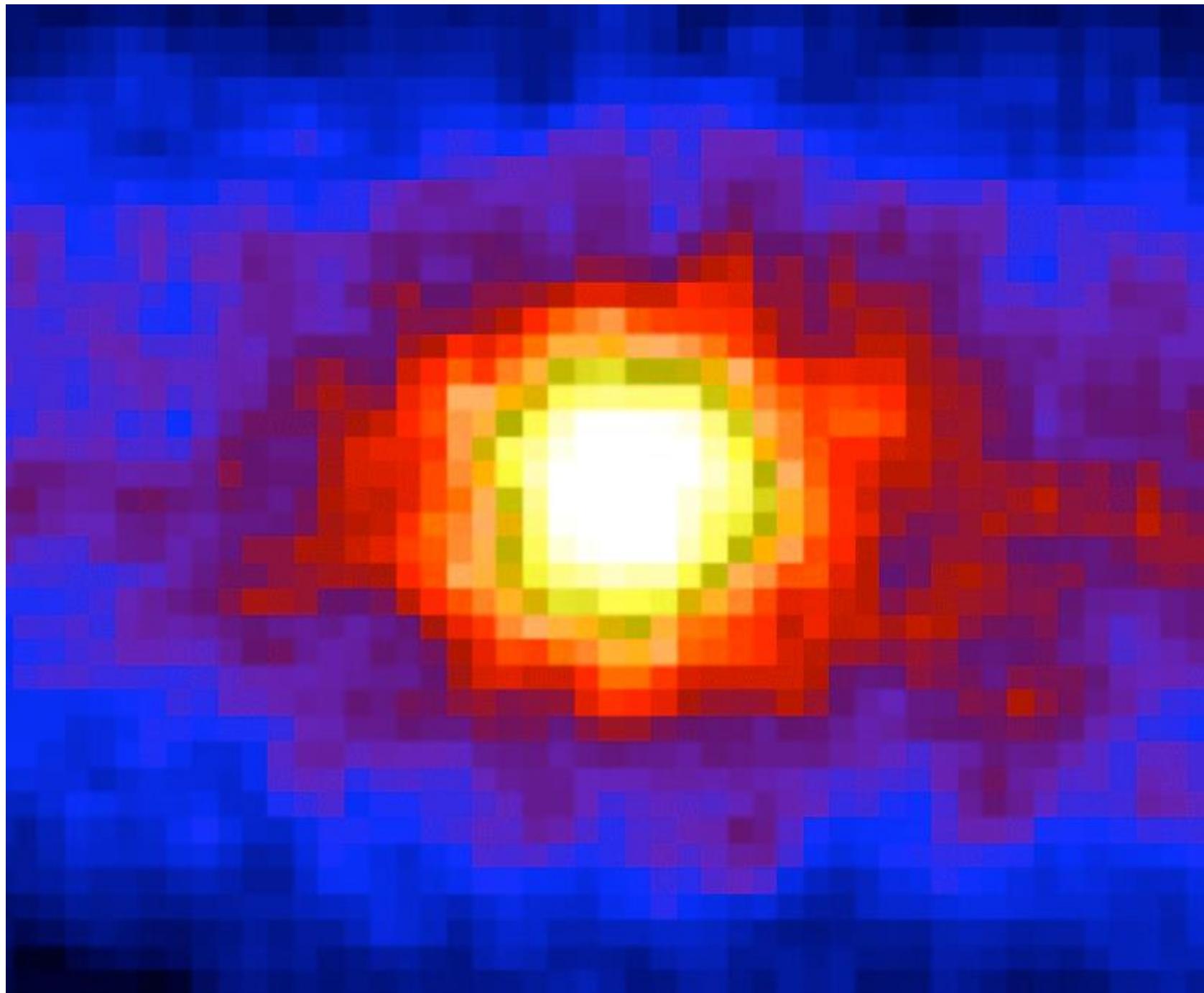
SNO e SK vedono la stessa porzione (minima) di spettro dei neutrini solari, (soglia a circa 7 MeV)

Subdury Neutrino Observatory (SNO)

Evidenza di oscillazioni dei neutrini solari (1)

SK e SNO vedono, con diversa sensibilità, neutrini dei tre sapori (elastic scattering)





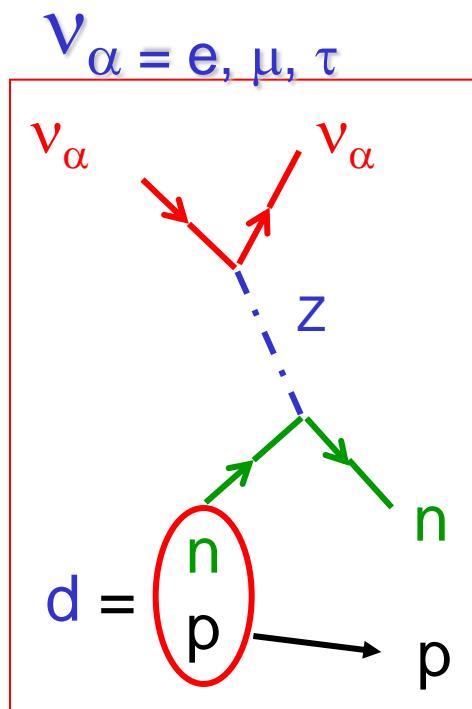
Subdury Neutrino Observatory (SNO)

Evidenza di oscillazioni dei neutrini solari (2)

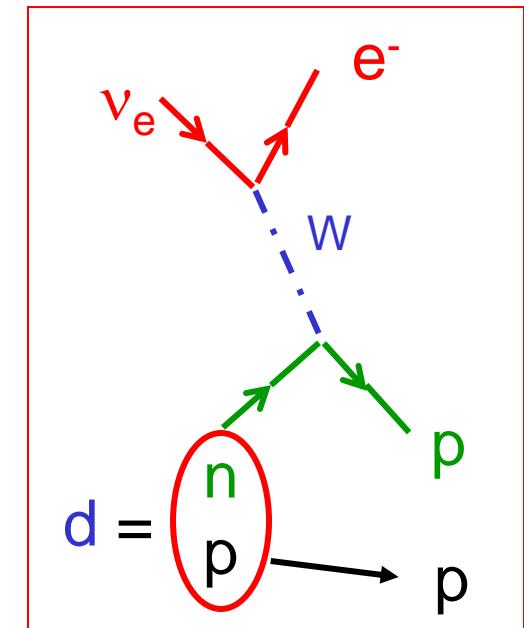
SNO distingue il contributo dei soli ν_e



(corrente carica)



Il momento dell'elettrone ha debole correlazione con direzione del sole



e inoltre misura con eguale peso i tre saperi (corrente neutra)



Cattura radiativa del neutrone su deuterio

DETECTION REACTIONS

1) Inverse beta decay (Charged Current)



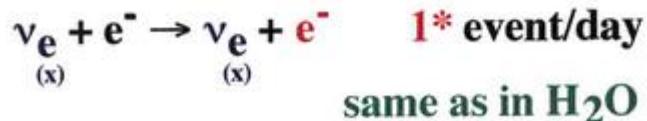
2) Deuteron disintegration (Neutral Current)



Neutron Observation:

- a) $n + d \rightarrow t + \gamma$
- b) $n + Cl \rightarrow Cl + \gamma$
- c) $n + ^3He \rightarrow t + p$

3) Electron Scattering (ES)



* assumes a 5 MeV detection threshold

Physics Objectives

Solar Neutrinos:

Ratio of CC/NC:

- Clear Indication of Neutrino Flavour Change

Spectral Distortion:

- MSW Effect for Nonadiabatic Case

^{8B} Total Flux:

- From NC Measurement

Time Variation of Flux: (Very Good Statistics)

- Regeneration in Earth
- Solar Magnetic Field Effects
- Earth-Sun Distance Effects

Supernovae:

- Good sensitivity to mu, tau neutrinos.

Good Signature for anti- ν_e :

- Two neutrons produced: provides very low background signal

Subdury Neutrino Observatory (SNO)

Evidenza di oscillazioni dei neutrini solari (3)

È possibile ora calcolare il flusso di ν_e emesso dal sole (${}^8\text{B}$)

$$\Phi(\nu_e)(\text{arrivati a terra}) + \Phi(\nu_{\mu,\tau})(\text{arrivati a terra}) = \Phi(\nu_e)(\text{emessi dal sole})$$

\uparrow \uparrow

SNO_{CC} $\text{SNO}_{\text{CN}} - \text{SNO}_{\text{CC}}$

Subdury Neutrino Observatory (SNO)

Evidenza di oscillazioni dei neutrini solari (3)

È possibile ora calcolare il flusso di ν_e emesso dal sole (^{8}B)

$$\Phi(\nu_e)(\text{arrivati a terra}) + \Phi(\nu_{\mu,\tau})(\text{arrivati a terra}) = \Phi(\nu_e)(\text{emessi dal sole})$$

SNO_{CC}

SNO_{CN}-SNO_{CC}

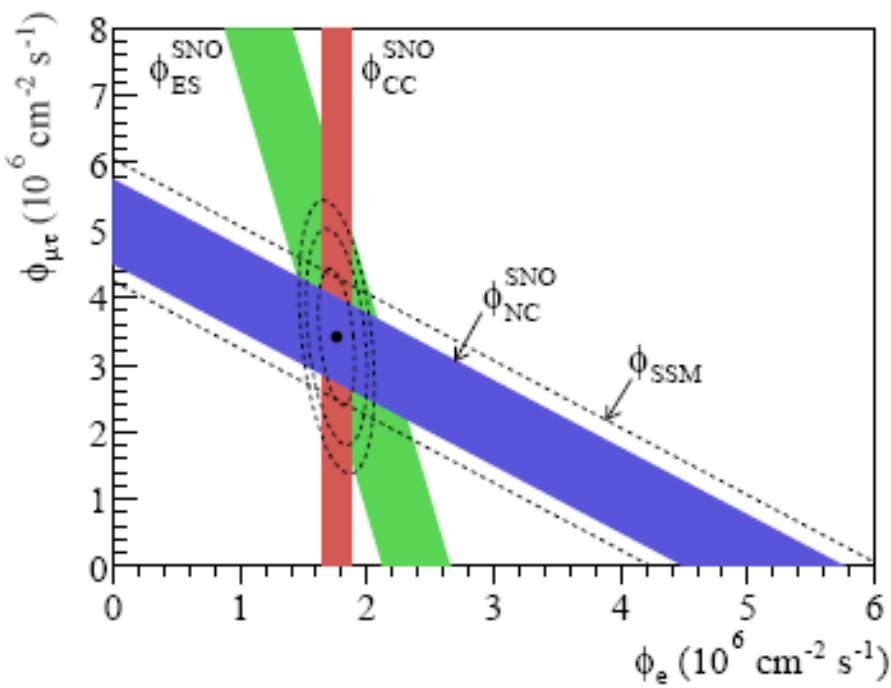
$$(5.09 \pm 0.4_{\text{stat}} \pm 0.4_{\text{syst}}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

exp

$$(5.05 \begin{array}{l} +1.01 \\ -0.81 \end{array}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

theo

*The
Bahcall's
Glory*



**Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions
in the Sudbury Neutrino Observatory**

Q. R. Ahmad,¹⁷ R. C. Allen,⁴ T. C. Andersen,⁵ J. D. Anglin,¹⁰ J. C. Barton,^{11*} E. W. Beier,¹² M. Bencovich,¹⁰ J. Bigu,⁷ S. D. Biller,¹¹ R. A. Black,¹¹ I. Blevins,⁵ R. J. Boardman,¹¹ J. Boger,³ E. Bonvin,¹⁴ M. G. Boulay,^{9,14} M. G. Bowler,¹¹ T. J. Bowles,⁹ S. J. Brice,^{9,11} M. C. Browne,^{17,9} T. V. Bullard,¹⁷ G. Bühl,⁴ J. Cameron,¹¹ Y. D. Chan,⁹ H. H. Chen,^{4,8} M. Chen,¹⁴ X. Chen,^{9,11} B. T. Cleveland,¹¹ E. T. H. Clifford,¹⁴ J. H. M. Cowan,⁷ D. F. Cowen,¹² G. A. Cox,¹⁷ X. Dai,¹¹ F. Dalnoki-Veress,⁵ W. F. Davidson,¹⁰ P. J. Doe,^{17,9,4} G. Doucas,¹¹ M. R. Dragowsky,^{9,8} C. A. Duba,¹⁷ F. A. Duncan,¹⁴ M. Dunford,¹² J. A. Dunmore,¹¹ E. D. Earle,^{14,1} S. R. Elliott,^{17,9} H. C. Evans,¹⁴ G. T. Ewan,¹⁴ J. Farine,^{7,5} H. Fergani,¹¹ A. P. Ferraris,¹¹ R. J. Ford,¹⁴ J. A. Formaggio,¹⁷ M. M. Fowler,⁹ K. Frame,¹¹ E. D. Frank,¹² W. Prati,¹² N. Gagnon,^{11,9,8} J. V. Germani,¹⁷ S. Gil,² K. Graham,¹⁴ D. R. Grant,⁵ R. L. Hahn,³ A. L. Hallin,¹⁴ E. D. Hallman,⁷ A. S. Hamer,^{9,14} A. A. Hamian,¹⁷ W. B. Handler,¹⁴ R. U. Haq,⁷ C. K. Hargrove,⁵ P. J. Harvey,¹⁴ R. Hazama,¹⁷ K. M. Heeger,¹⁷ W. J. Heintzelman,¹² J. Heise,²⁹ R. L. Helmer,^{16,2} J. D. Hepburn,¹⁴ H. Heron,¹¹ J. Hewett,⁷ A. Hirne,⁹ M. Howe,¹⁷ J. G. Hykawy,⁷ M. C. P. Isaac,⁸ P. Jagam,⁶ N. A. Jelley,¹¹ C. Jillings,¹⁴ G. Jonkmans,^{7,1} K. Kazkaz,¹⁷ P. T. Keener,¹² J. R. Klein,¹² A. B. Knock,¹¹ R. J. Komar,² R. Kouzes,¹³ T. Kutter,² C. C. M. Kyba,¹² J. Law,⁶ I. T. Lawson,⁶ M. Lay,¹¹ H. W. Lee,¹⁴ K. T. Lesko,⁸ J. R. Leslie,¹⁴ I. Levine,⁵ W. Locke,¹¹ S. Luoma,⁷ J. Lyon,¹¹ S. Majerus,¹¹ H. B. Mak,¹⁴ J. Maneira,¹⁴ J. Manor,¹⁷ A. D. Marino,⁸ N. McCauley,^{12,11} A. B. McDonald,^{14,13} D. S. McDonald,¹² K. McFarlane,⁵ G. McGregor,¹¹ R. Meijer-Drees,¹⁷ C. Mifflin,⁵ G. G. Miller,⁹ G. Milton,¹ B. A. Moffat,¹⁴ M. Moorhead,¹¹ C. W. Nally,² M. S. Neubauer,¹² F. M. Newcomer,¹² H. S. Ng,² A. J. Noble,^{16,5} E. B. Norman,⁸ V. M. Novikov,⁵ M. O'Neill,⁵ C. E. Okada,⁸ R. W. Ollerhead,⁶ M. Omori,¹¹ J. L. Orrell,¹⁷ S. M. Oser,¹² A. W. P. Poon,^{8,17,29} T. J. Radcliffe,¹⁴ A. Roberge,⁷ B. C. Robertson,¹⁴ R. G. H. Robertson,^{17,9} S. S. E. Rosendahl,⁸ J. K. Rowley,³ V. L. Rusu,¹² E. Saettler,⁷ K. K. Schaffer,¹⁷ M. H. Schwendener,⁷ A. Schulke,⁸ H. Seifert,^{7,17,9} M. Shatkay,⁵ J. J. Simpson,⁵ C. J. Sims,¹¹ D. Sinclair,^{5,16} P. Skensved,¹⁴ A. R. Smith,⁸ M. W. E. Smith,¹⁷ T. Speitzer,¹² N. Starinsky,⁵ T. D. Steiger,¹⁷ R. G. Stokstad,⁸ L. C. Stonehill,¹⁷ R. S. Stoney,¹⁰ B. Sur,^{1,14} R. Tafirout,⁷ N. Tagg,^{6,11} N. W. Tanner,¹¹ R. K. Taplin,¹¹ M. Thorman,¹¹ P. M. Thornewell,¹¹ P. T. Trent,¹¹ Y. I. Tserkovnyak,² R. Van Berg,¹² R. G. Van de Water,^{8,12} C. J. Virtue,⁷ C. E. Waltham,² J.-X. Wang,⁶ D. L. Wark,^{15,11,9} N. West,¹¹ J. B. Wilhelmy,⁹ J. F. Wilkerson,^{17,9} J. R. Wilson,¹¹ P. Wittich,¹² J. M. Wouters,⁹ and M. Yeh,³

(SNO Collaboration)

¹Atomic Energy of Canada, Limited, Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario K0J 1J0, Canada

²Department of Physics and Astronomy, University of British Columbia, Vancouver, British Columbia V6T 1Z1, Canada

³Chemistry Department, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973-5000

⁴Department of Physics, University of California, Irvine, California 92717

⁵Carleton University, Ottawa, Ontario K1S 5B6, Canada

⁶Physics Department, University of Guelph, Guelph, Ontario N1G 2W1, Canada

⁷Department of Physics and Astronomy, Laurentian University, Sudbury, Ontario P3E 2C6, Canada

⁸Institute for Nuclear and Particle Astrophysics and Nuclear Science Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720

⁹Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545

¹⁰National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario K1A 0R6, Canada

¹¹Department of Physics, University of Oxford, Denys Wilkinson Building, Keble Road, Oxford OX1 3RH, United Kingdom

¹²Department of Physics and Astronomy, University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania 19104-6395

¹³Department of Physics, Princeton University, Princeton, New Jersey 08544

¹⁴Department of Physics, Queen's University, Kingston, Ontario K7L 3N6, Canada

¹⁵Rutherford Appleton Laboratory, Chilton, Didcot, Oxford OX11 0QX, United Kingdom

and University of Sussex Physics and Astronomy Department, Brighton BN1 9QH, United Kingdom

¹⁶TRIUMF, 4004 Wesbrook Mall, Vancouver, British Columbia V6T 2A3, Canada

¹⁷Center for Experimental Nuclear Physics and Astrophysics, and Department of Physics, University of Washington, Seattle, Washington 98195

(Received 19 April 2002; published 13 June 2002)

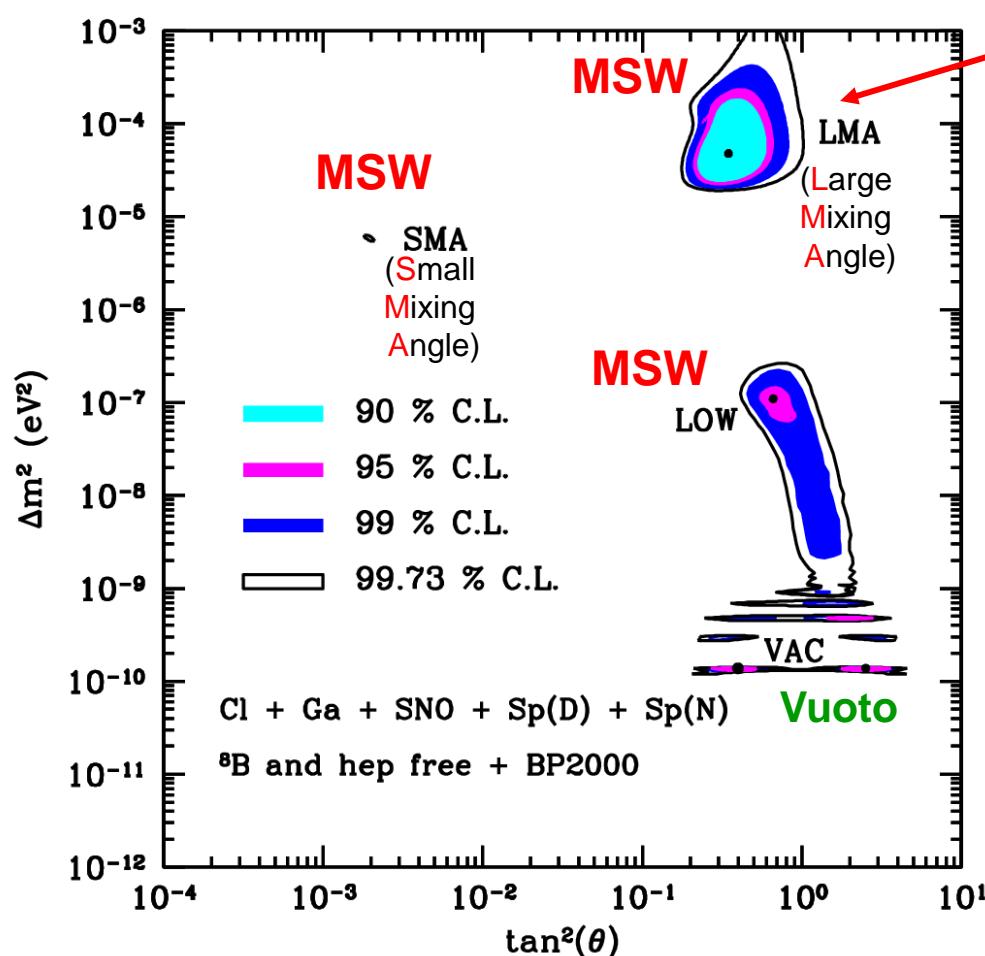
“It always seems impossible until it's done.”

– Nelson Mandela

Possibili valori di δM^2 e angolo di mixing.

Oscillazione a due saponi $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \nu_\tau$, governata da $\delta M^2_{12} \ll \delta M^2_{23}$

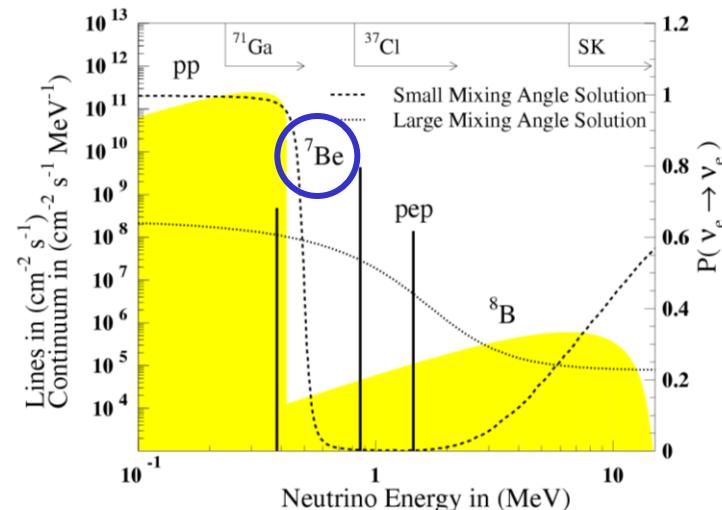
Sia l'effetto MSW (in tre zone separate in uno spazio δM^2 - θ)
sia le oscillazioni nel vuoto descrivono tutti i dati (prima di KamLAND)



Fit migliore: MSW - LMA

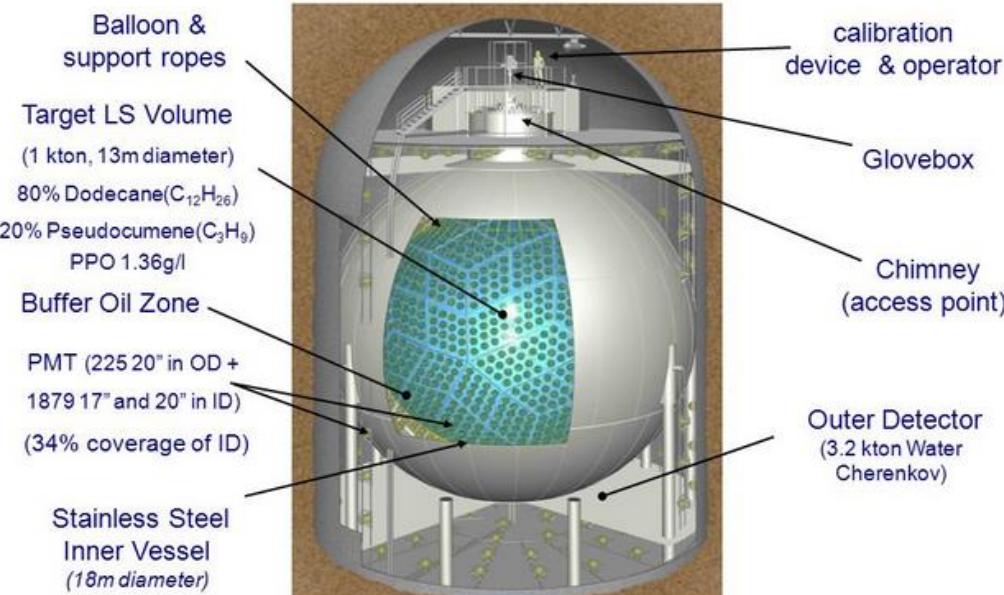
Esperimenti per discriminare:
KamLAND (Giappone)
Borexino (Gran Sasso)

↓
test della soluzione LMA



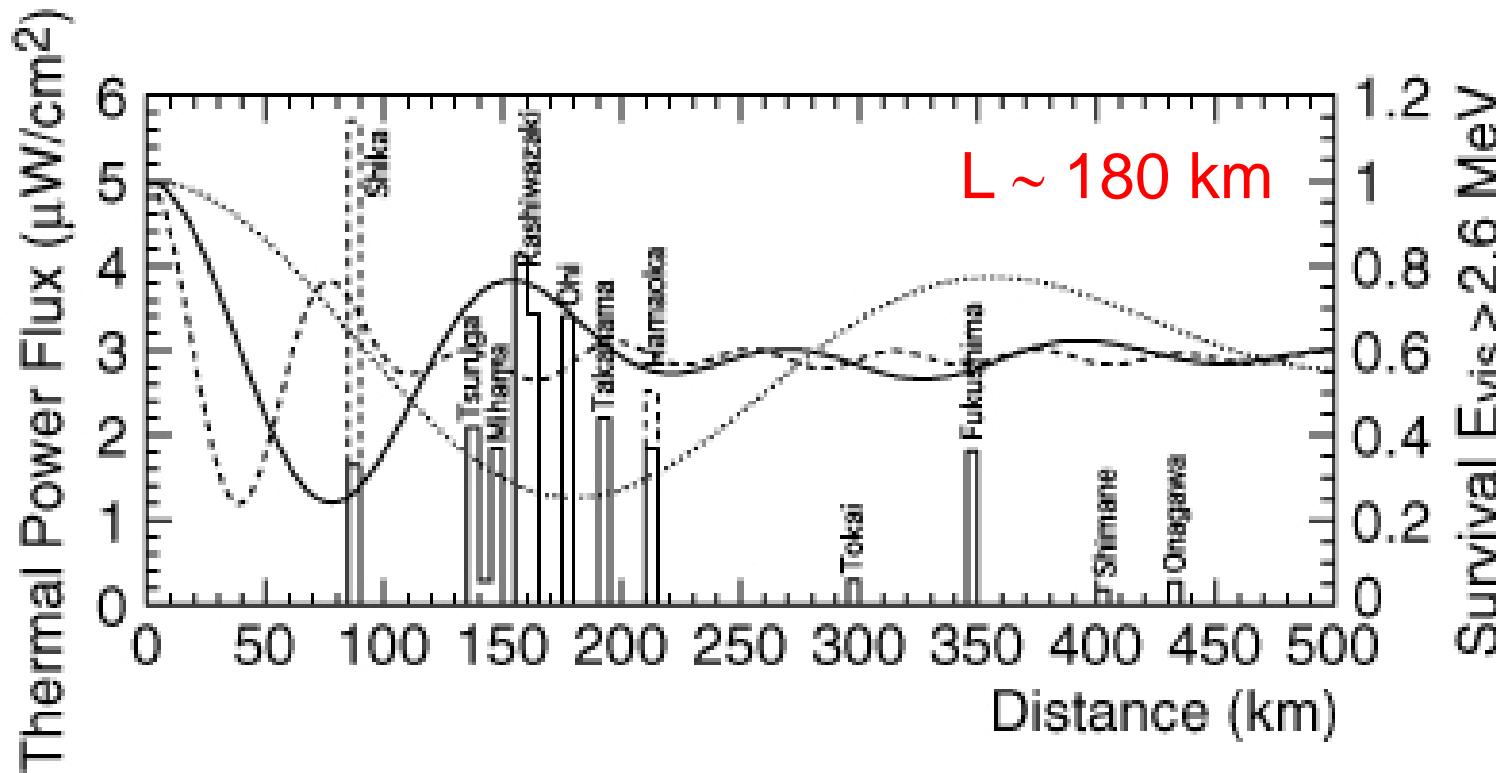
Esperimento risolutore: KamLAND

Sorgente di neutrini: reattori nucleari
Rivelatore: scintillatore liquido



KamLAND

Evidenza di oscillazioni dei neutrini da reattore



Iistogramma continuo: potenza reattori al momento dell'inizio dell'esperimento
Iistogramma tratteggiato: potenza prevista in tempi successivi

Linea continua: probabilità di sopravvivenza per $\delta M^2 = 7 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

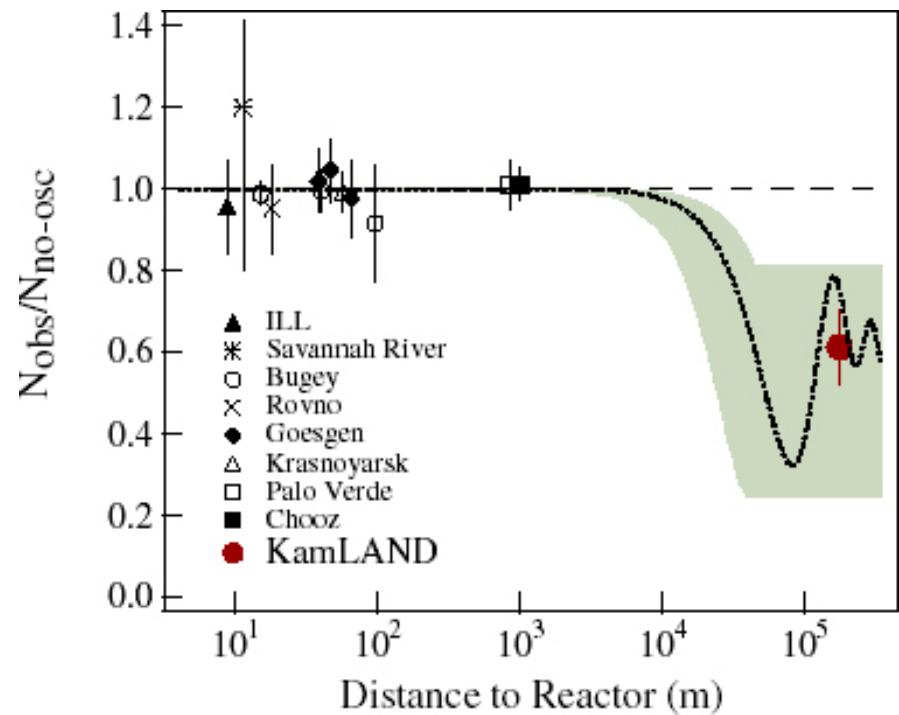
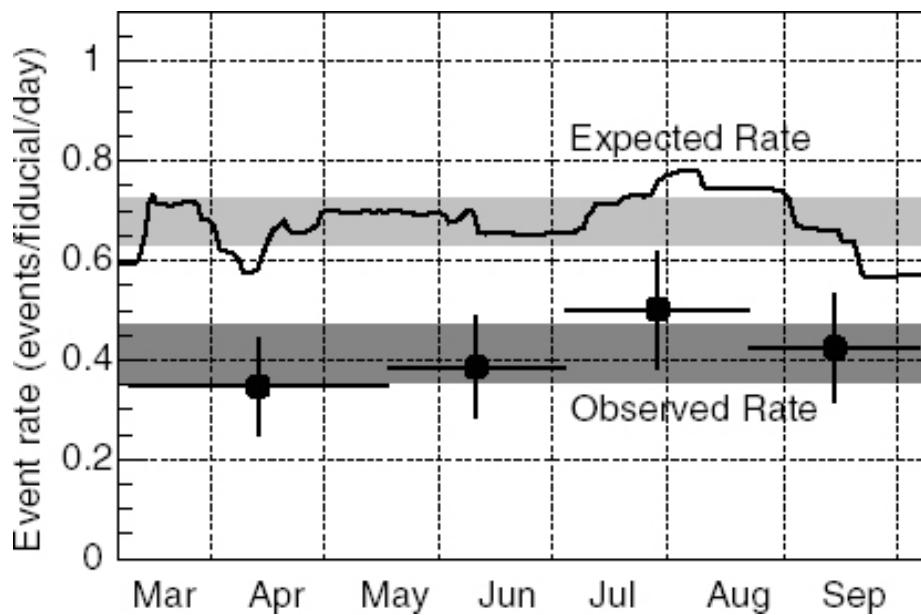
Linea tratteggiata: $\delta M^2 = 3 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

Linea punteggiata: $\delta M^2 = 1.4 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$

$$\sin^2 2\theta = 0.84$$

KamLAND

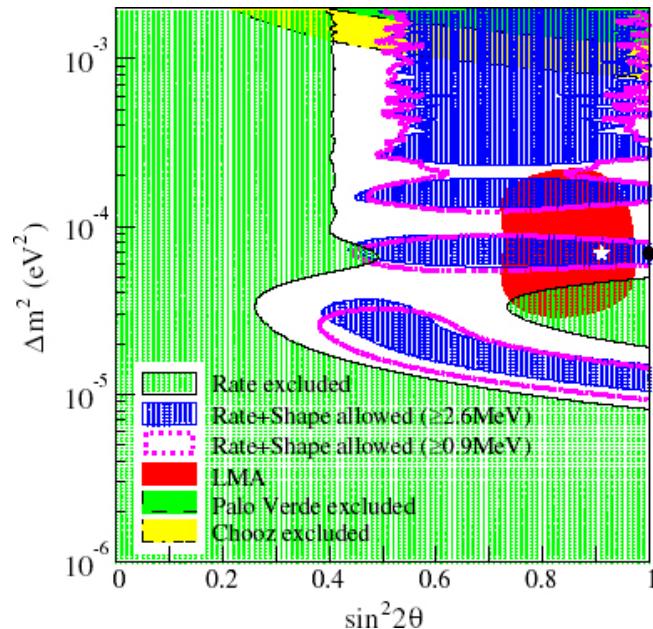
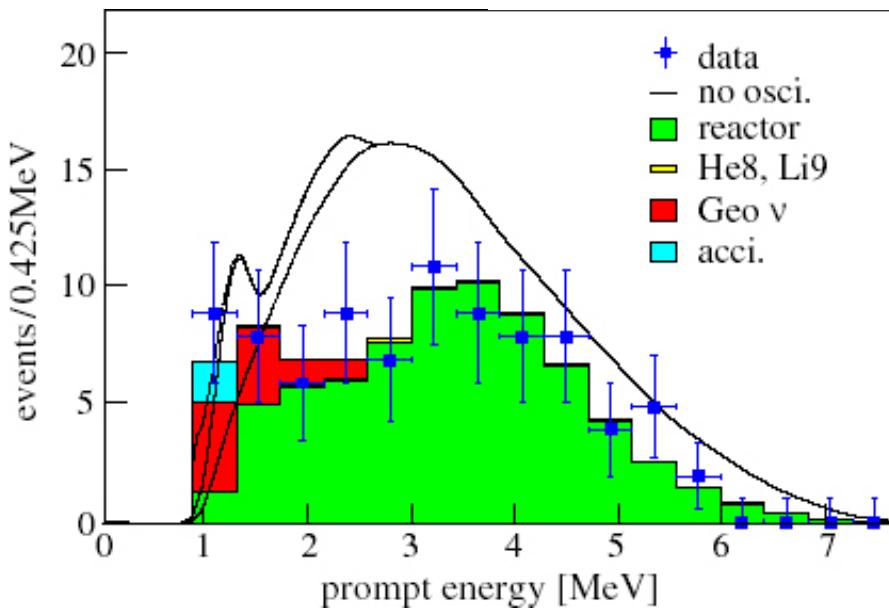
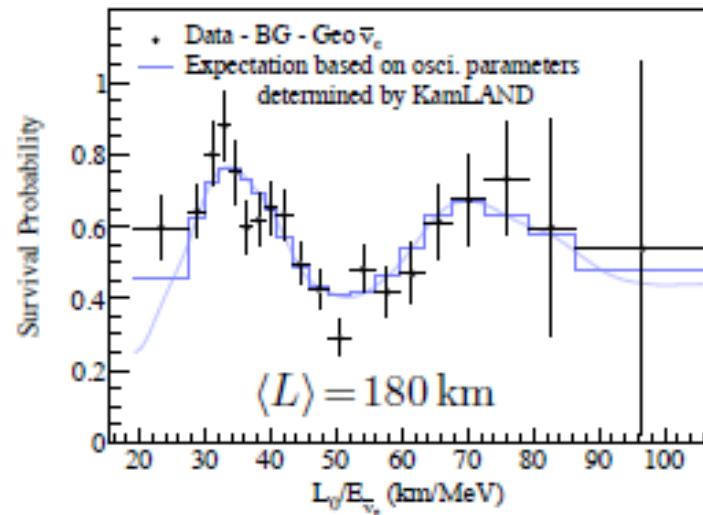
Evidenza di oscillazioni dei neutrini da reattore



$$R = \frac{N_{\text{obs}} - N_{\text{BG}}}{N_{\text{no-osc}}} = 0.611 \pm 0.085 \text{ (stat)} \pm 0.041 \text{ (syst)}.$$

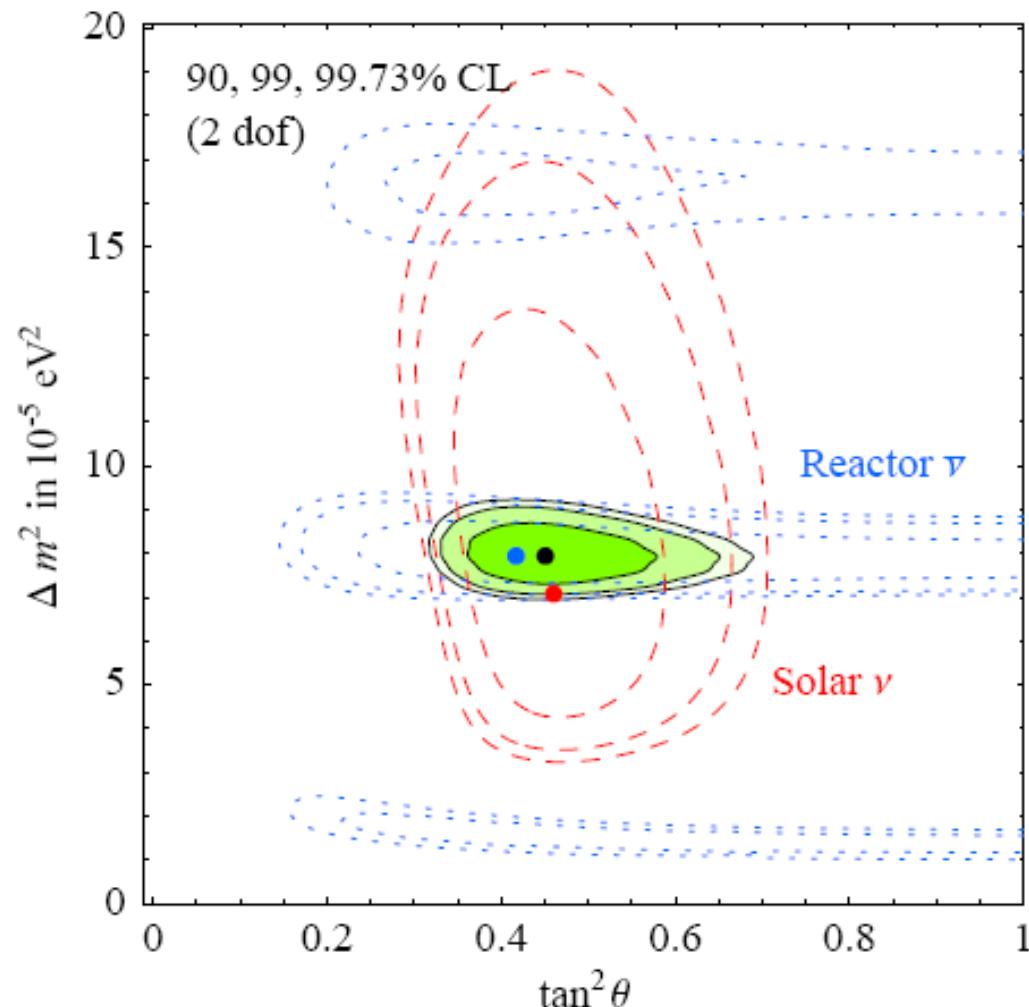
KamLAND

Evidenza di oscillazioni dei neutrini da reattore

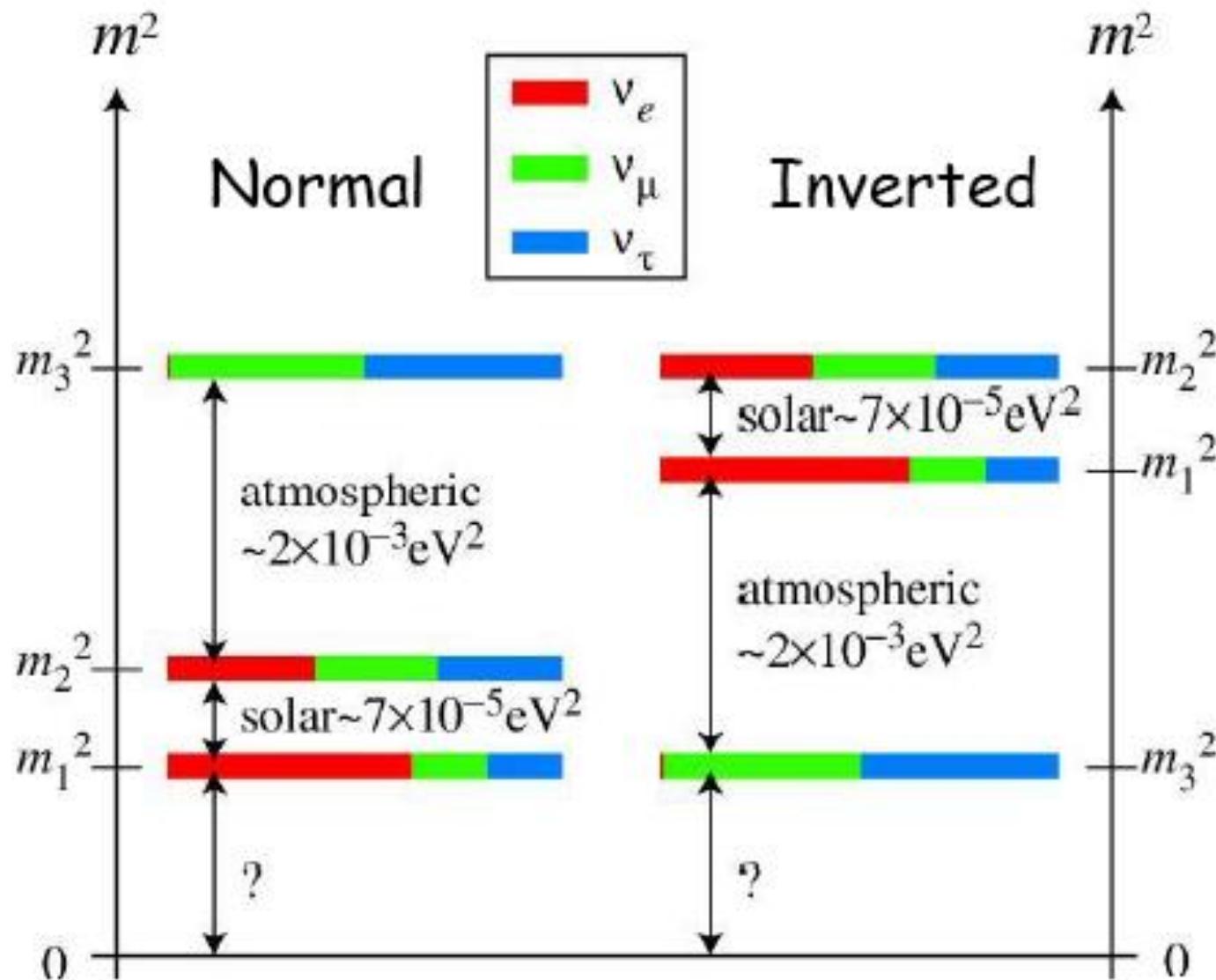


Analisi congiunta KamLAND + ν solari

$$\Delta M_{\text{sol}}^2 = 7.4 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \sim (8.6 \text{ meV})^2$$



Che cosa sappiamo oggi, e cosa rimane da scoprire

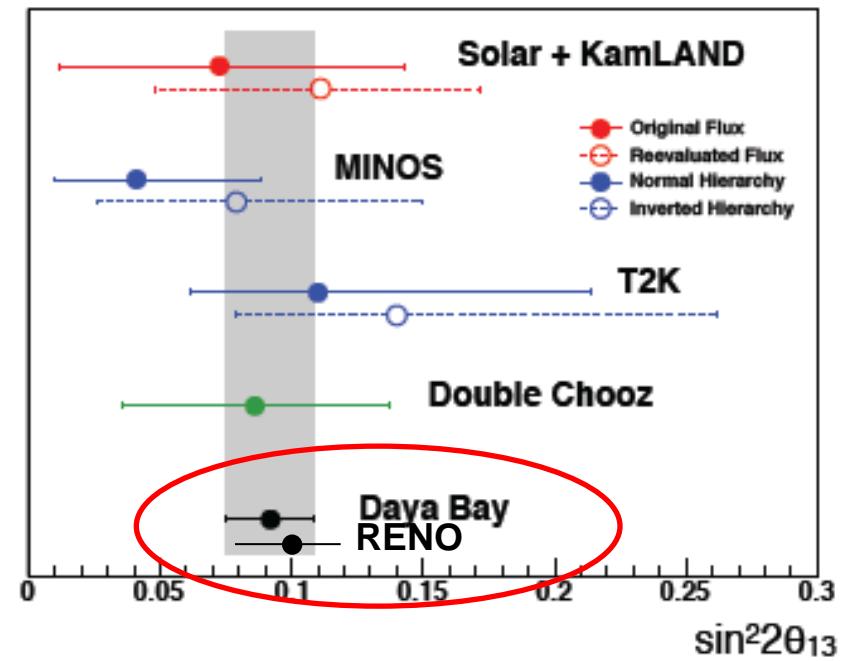
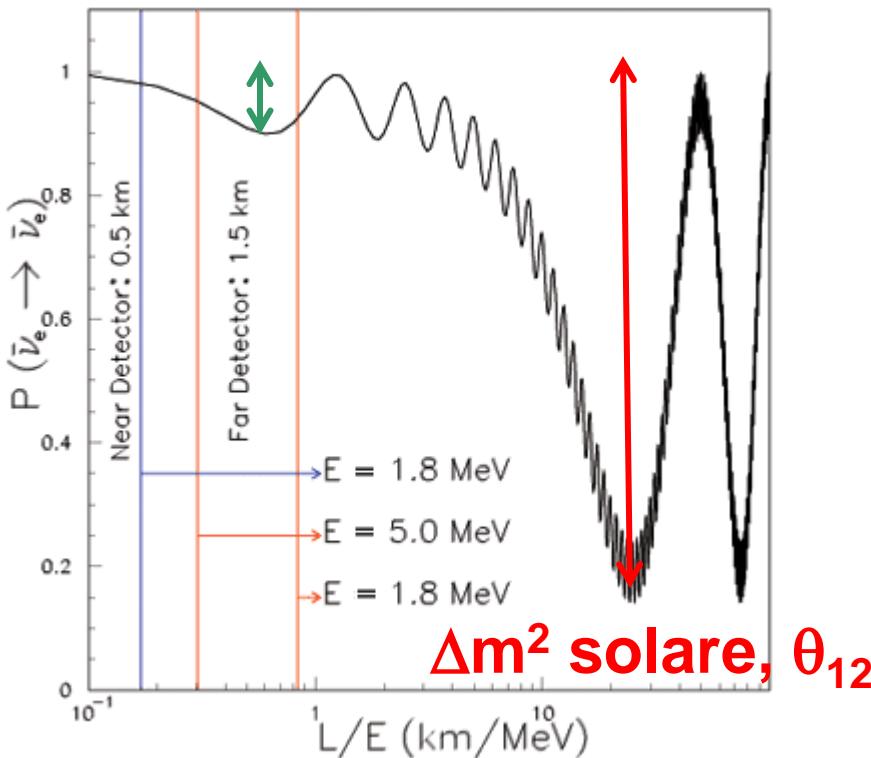


Tre ingredienti fondamentali hanno completato il quadro

- 1) «Maximal Mixing» atmosferico: ν_μ e ν_τ sono sempre nella stessa proporzione (**SuperKamiokande**)
- 2) Oscillazioni dei neutrini solari nella materia solare: i neutrini elettronici iniziali vengono convertiti nello stato di massa ν_2 che contiene in proporzioni pressoché uguali i tre saperi (**SNO**)
- 3) Gli esperimenti di neutrino a reattore «short baseline» (1 km) permettono di valutare il piccolissimo valore di U_{e3}

Probabilità di sopravvivenza dei $\bar{\nu}_e$ da reattore

Δm^2 atmosferico, θ_{13}



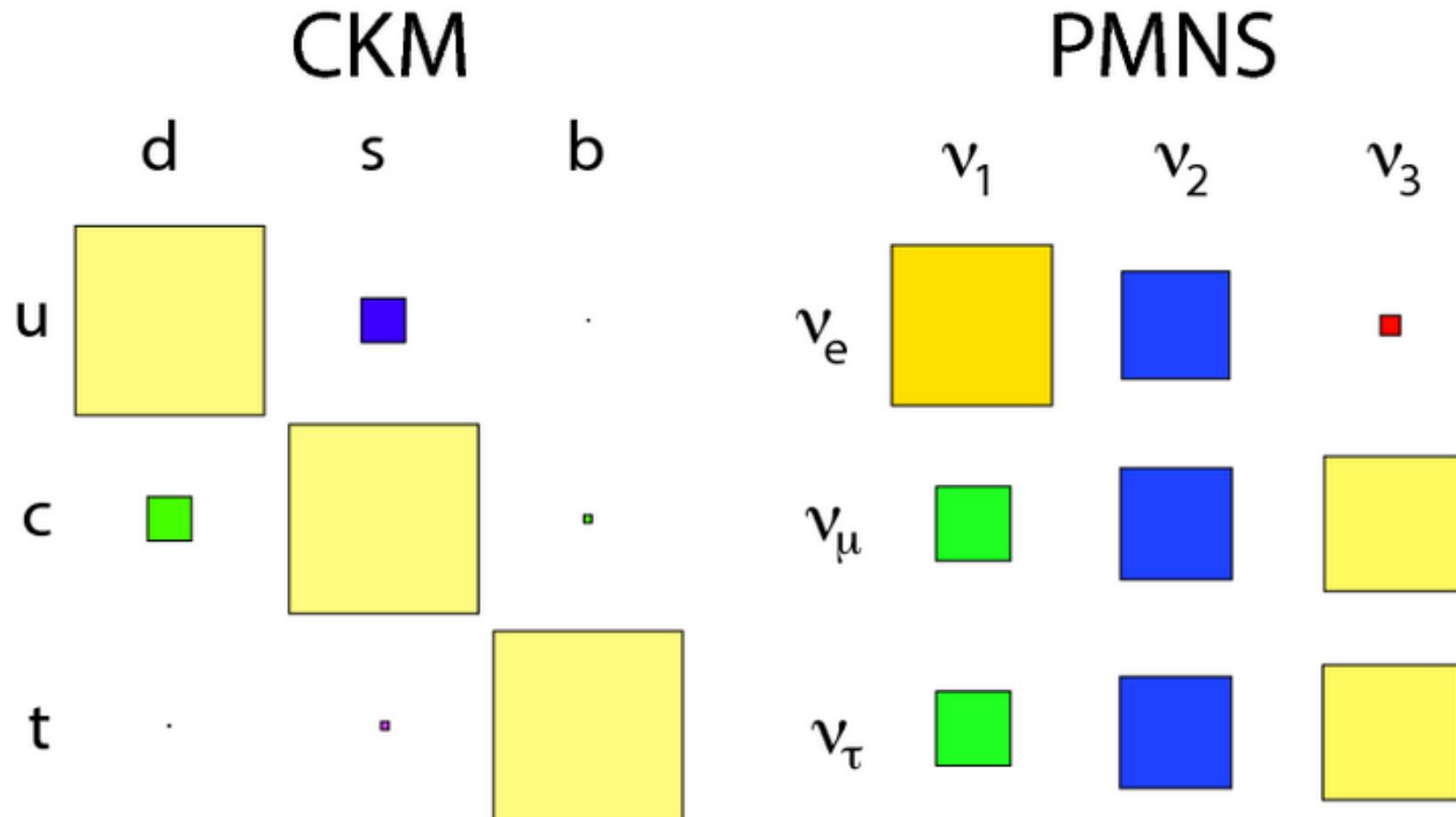
$\theta_{13} \neq 0$ at 6 σ

Tri-bi maximal mixing?

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} |U_{e1}|^2 & |U_{e2}|^2 & |U_{e3}|^2 \\ |U_{\mu 1}|^2 & |U_{\mu 2}|^2 & |U_{\mu 3}|^2 \\ |U_{\tau 1}|^2 & |U_{\tau 2}|^2 & |U_{\tau 3}|^2 \end{pmatrix} \stackrel{?}{=} \begin{pmatrix} 2/3 & 1/3 & 0 \\ 1/6 & 1/3 & 1/2 \\ 1/6 & 1/3 & 1/2 \end{pmatrix}$$

Inspiegabile differenza tra settore adronico e leptonico



Attuale quadro delle conoscenze in dettaglio

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_\mu \\ \mathbf{v}_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{13}s_{23}c_{12}e^{i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{13}s_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - s_{13}c_{23}c_{12}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{13}c_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{pmatrix}$$

parameter	Ref. [1]		Ref. [2] (MINOS updated)	
	best fit $\pm 1\sigma$	3σ interval	best fit $\pm 1\sigma$	3σ interval
Δm_{21}^2 [10 $^{-5}$ eV 2]	7.65 $^{+0.23}_{-0.20}$	7.05–8.34	7.67 $^{+0.22}_{-0.21}$	7.07–8.34
Δm_{31}^2 [10 $^{-3}$ eV 2]	$\pm 2.40^{+0.12}_{-0.11}$	$\pm (2.07\text{--}2.75)$	-2.39 ± 0.12 $+2.49 \pm 0.12$	$-(2.02\text{--}2.79)$ $+(2.13\text{--}2.88)$
$\sin^2 \theta_{12}$	0.304 $^{+0.022}_{-0.016}$	0.25–0.37	0.321 $^{+0.023}_{-0.022}$	0.26–0.40
$\sin^2 \theta_{23}$	0.50 $^{+0.07}_{-0.06}$	0.36–0.67	0.47 $^{+0.07}_{-0.06}$	0.33–0.64
$\sin^2 \theta_{13}$	0.01 $^{+0.016}_{-0.011}$	≤ 0.056	0.003 ± 0.015	≤ 0.049

Oscillazioni con neutrini artificiali da acceleratori

➤ Misure di "long baseline"

- produrre un fascio di ν_μ
- farli viaggiare per $\sim 100 - 1000$ km
- studiare la **scomparsa** di ν_μ o l'**apparizione** di ν_τ

Prima generazione

Fermilab → Soudan
739 km



MINOS

CERN → Gran Sasso
732 km



OPERA

Gran Sasso Lab, November 9th & 10 th, 1995

Organizers:
P. Monicelli
Director of the Gran Sasso Laboratory

C. Arpesella
F. Cavanna
A. Grillo

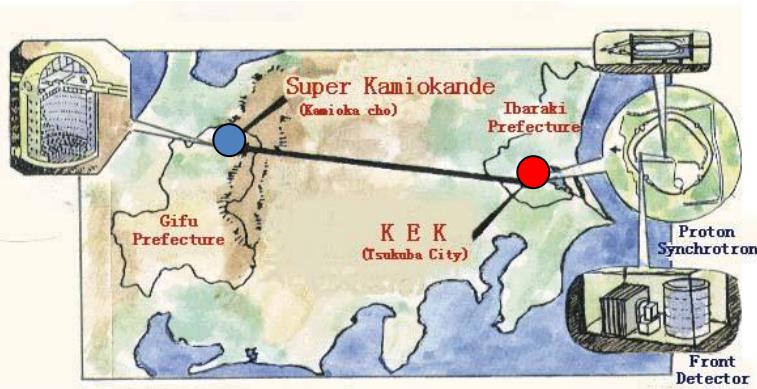
Informations:
grillo@vaxgs.lngs.infn.it
cavanna@vxscaq.aquila.infn.it

News on:

<http://www.aquila.infn.it/cerns/long.html>

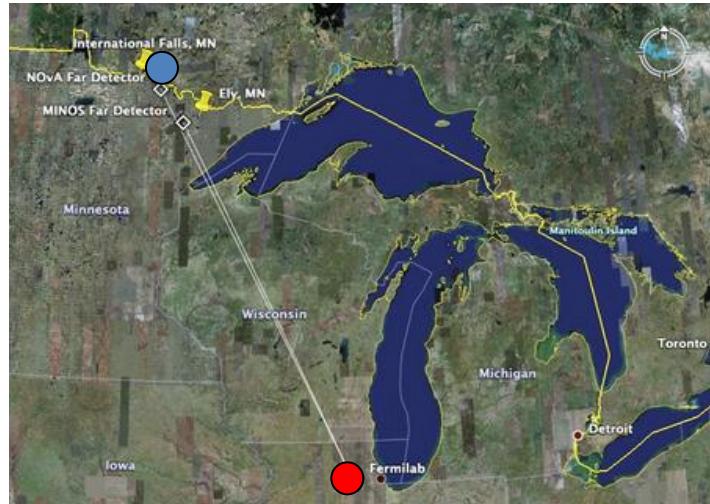
Attuale generazione

JPark → SK
290 km



T2K

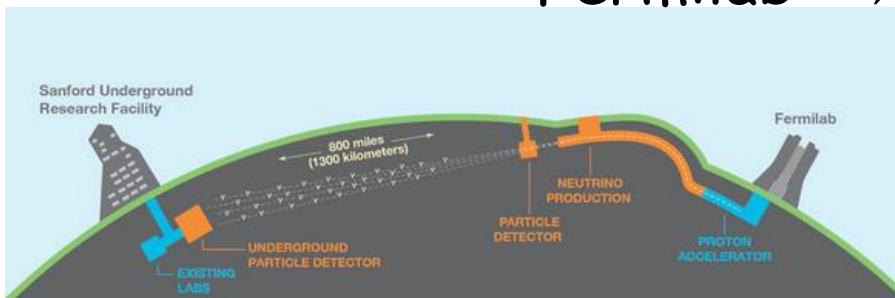
Fermilab → Northern Minnesota
810 km



NOvA

Futura generazione

Fermilab → Sanford underground facility
1300 km



DUNE

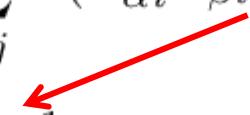
Scopo degli esperimenti long baseline

Due obiettivi principali:

1) Misurare la gerarchia delle masse, ossia il segno di $\Delta M_{2\text{ atm}}$

2) Misurare la fase δ , ossia la violazione di CP nel settore leptonico

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |A(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)|^2 &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2(\delta M_{ij}^2 \frac{L}{4E}) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin(\delta M_{ij}^2 \frac{L}{2E}) . \end{aligned}$$


$$= \frac{1}{8} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin \delta$$

(per $\alpha=\mu$ e $\beta=e$)

$$P(\overline{\nu_\alpha} \rightarrow \overline{\nu_\beta}) = P(\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha) \quad (\text{Teorema CPT})$$

$$P(\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha; U) = P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta; U^*) \quad (\text{Dalla formula precedente})$$

Se $\sin \delta \neq 0$  $P(\overline{\nu_\mu} \rightarrow \overline{\nu_e}) \neq P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

Neutrino e antineutrino

AIP



DIRAC o MAJORANA?

$$\nu \neq \bar{\nu}$$

$$\nu \equiv \bar{\nu}$$



Il Nuovo Cimento, 14 (1937) 171

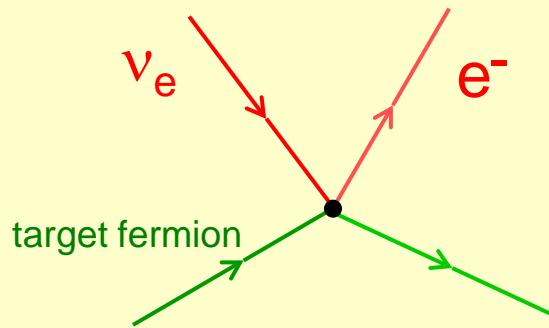
TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE E DEL POSITRONE

Nota di ETTORE MAJORANA

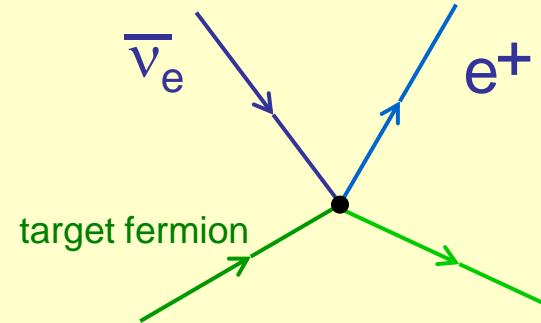
Sunto. - Si dimostra la possibilità di pervenire a una piena simmetrizzazione formale della teoria quantistica dell'elettrone e del positrone facendo uso di un nuovo processo di quantizzazione. Il significato delle equazioni di DIRAC ne risulta alquanto modificato e non vi è più luogo a parlare di stati di energia negativa; nè a presumere per ogni altro tipo di particelle, particolarmente neutre, l'esistenza di « antiparticelle » corrispondenti ai « vuoti » di energia negativa.

Neutrini e antineutrini: particelle diverse?

ν_e produce **electroni** quando interagisce con la materia per corrente carica



$\bar{\nu}_e$ produce **positroni** quando interagisce con la materia per corrente carica



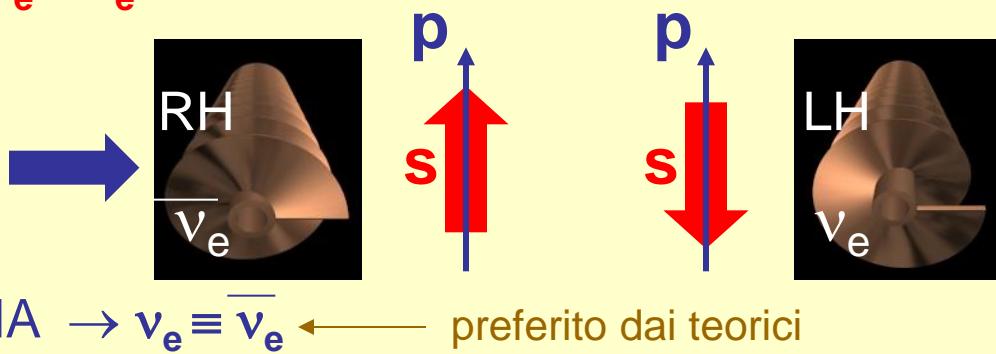
Due modi per spiegare questa fenomenologia:

① ν_e e $\bar{\nu}_e$ hanno diversi **numeri leptonici**: $L(\nu_e, e^-) = 1$; $L(\bar{\nu}_e, e^+) = -1$

Il numero leptonico, come la **carica**, è rigorosamente conservato

ν_e particella di DIRAC $\rightarrow \nu_e \neq \bar{\nu}_e$

② ν_e e $\bar{\nu}_e$ hanno diverse **elicità**: $H(\nu_e) = -1$; $H(\bar{\nu}_e) = +1$



ν_e particella di MAJORANA $\rightarrow \nu_e \equiv \bar{\nu}_e$

preferito dai teorici

Neutrini di Dirac e Majorana, neutrini e antineutrini

Probabilità di produrre un leptone carico

Dirac

	helicity	l^-	l^+
ν $L = 1$	L	1	0
	R	$(\frac{m_\nu}{E})^2$	0

$\bar{\nu}$ $L = -1$	R	0	1
	L	0	$(\frac{m_\nu}{E})^2$

.....

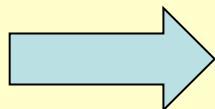
Majorana

	helicity	l^-	l^+
ν	L	1	$(\frac{m_\nu}{E})^2$
$\bar{\nu}$	R	$(\frac{m_\nu}{E})^2$	1

$\nu = \bar{\nu}$

Neutrino: particella di DIRAC o di MAJORANA?

$m_\nu \neq 0$



Neutrini di **DIRAC** e **MAJORANA**
hanno comportamenti diversi



L'elicità depende dal riferimento,
mentre il **numero leptonico** no



Esperimento “gedanken”



Protone
di alta
energia

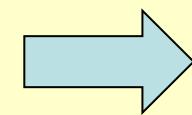


Antineutrino
di 1 GeV



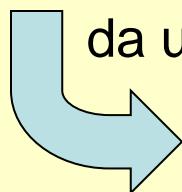
Protone
a riposo

- ① Un antineutrino RH ($E=1\text{GeV}$ $m=1\text{ev}$) interagisce con un protone a riposo
- ② Lo *stesso* antineutrino è inseguito da un protone molto energetico



Si produce un **positrone**
per corrente carica

È visto come una **particella LH**
di 1 GeV dal **protone veloce**



Si produrrà un **elettrone** o un **positrone** ?

Risposta di **MAJORANA**: conta H



Risposta di **DIRAC**: conta L



Doppio decadimento beta

Due modi di decadimento sono discussi:



2ν Double Beta Decay

Permesso dal Modello Standard
Già osservato – $\tau \sim 10^{19-24}$ y



neutrinoless Double Beta Decay (0ν-DBD)
Mai osservato
 $\tau > 10^{25-26}$ y

Il processo ② implicherebbe nuova fisica oltre il Modello Standard

Violazione della conservazione del numero leptonico

Si tratta di test molto sensibili a nuova fisica perché lo spazio delle fasi è molto più grande per il processo non standard

L'interesse per il 0ν-DBD risale a 70 anni fa !

Goeppert-Meyer propose il processo standard nel 1935
Racah propose il processo senza emissione di neutrini nel 1937

Il doppio beta e la fisica nucleare

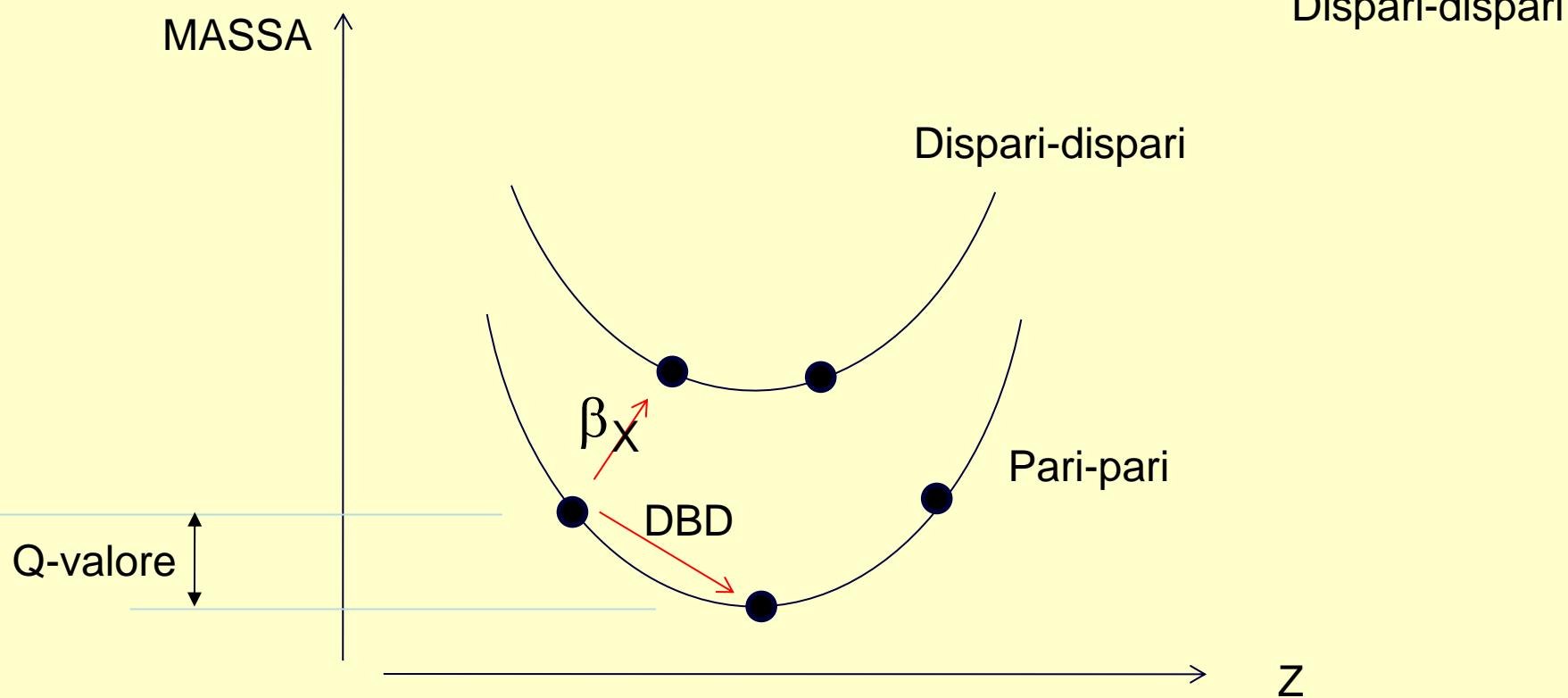
Formula di Weiszaecker per l'energia di legame dei nuclei

$$E_B(\text{MeV}) = a_v A - a_a (N - Z)^2/A - a_c Z^2/A^{1/3} - a_s A^{2/3} \pm a_\delta/A^{3/4}$$

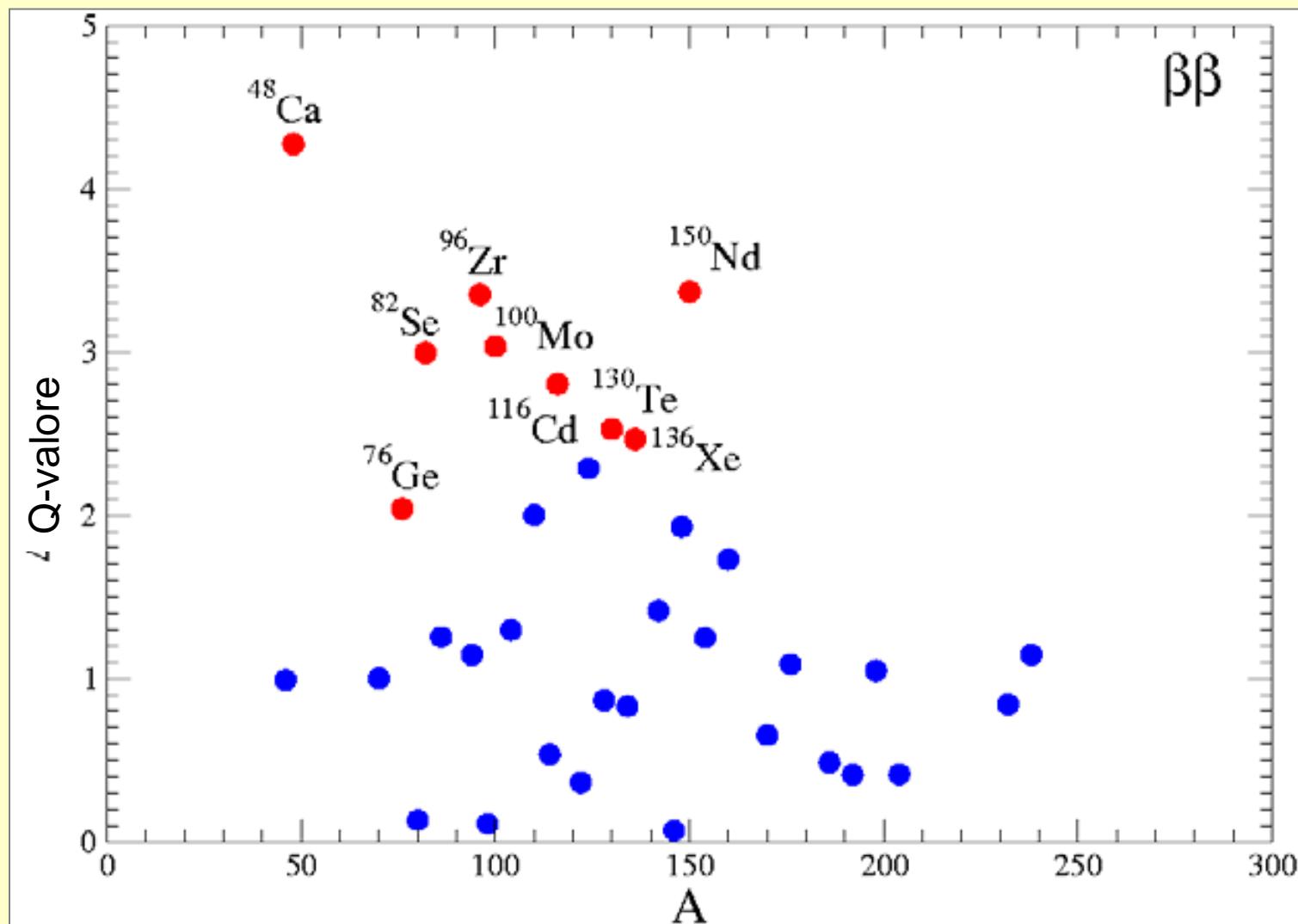
Pari-pari

Dispari-dispari

Massa nucleare in funzione di Z con A fissato



Quanti nuclei in questa situazione?

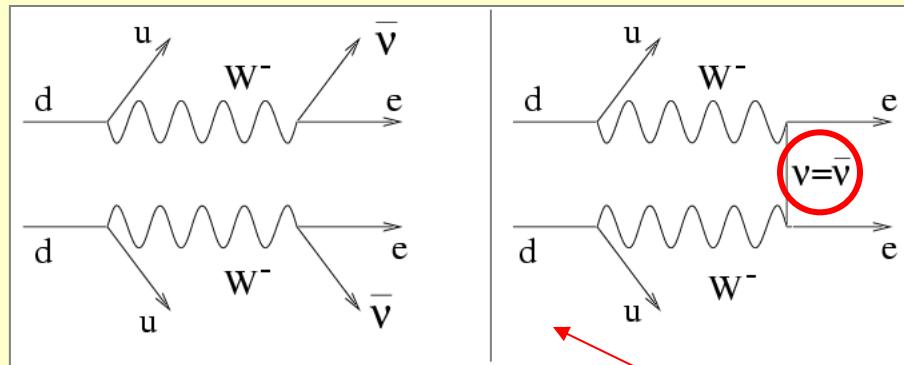


Double Beta Decay (DBD) e la fisica del neutrino

DBD è un processo debole del secondo ordine

Bassi tassi di conteggio

Diagrammi per I due processi discussi prima:



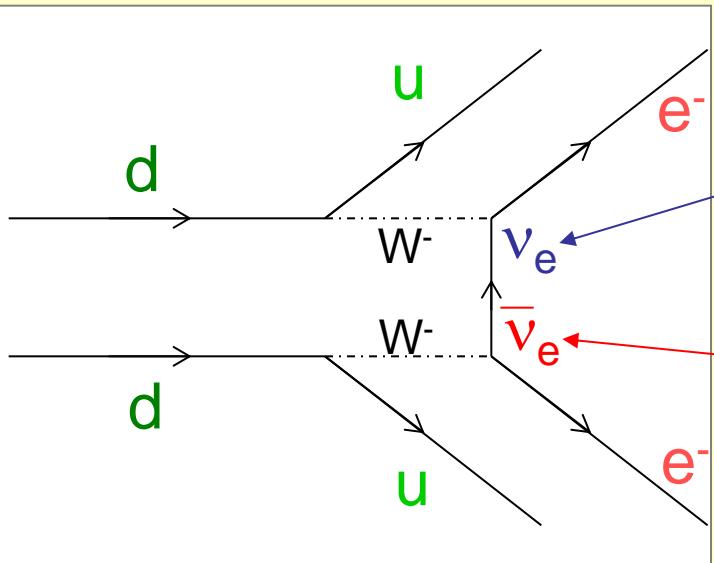
Processo Standard

Due decadimenti beta simultanei

0v-DBD

Un neutrino virtuale
scambiato tra I due vertici

Proprietà del neutrino e 0v-DBD



Un neutrino LH ($L=1$)
è assorbito

Un antineutrino RH ($L=-1$)
è emesso

Per neutrini privi di massa
questo processo non ha
luogo in quanto il neutrino
non ha i corretti
elicità / numero leptonico
per essere assorbito al
secondo vertice

- SE i neutrini sono particelle di DIRAC massive:
Le elicità possono essere accomodate grazie alla
massa finita, MA il numero leptonico è conservato

0v-DBD
è proibito

- SE i neutrini sono particelle di MAJORANA massive:
Le elicità possono essere accomodate grazie alla
massa finita, E il numero leptonico non è rilevante

0v-DBD
è permesso

Observation of 0v-DBD



$m_\nu \neq 0$
 $\overline{\nu} \equiv \nu$

0ν-DBD: parametri che fissano il tasso di conteggio

Come il **0ν-DBD** è connesso con il mixing dei neutrini e le masse

Tasso di conteggio del **Spazio delle fasi** Elementi di matrice
0ν-DBD nucleare

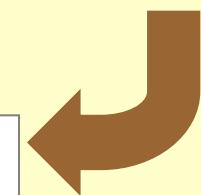
Massa di Majorana
effettiva

Quello che gli **sperimentalisti**
cercano di misurare

Quello che i **teorici nucleari**
cercano di calcolare

parametro che contiene
la fisica del neutrino

$$\langle M_{\beta\beta} \rangle = | |U_{e1}|^2 M_1 + e^{i\alpha_1} |U_{e2}|^2 M_2 + e^{i\alpha_2} |U_{e3}|^2 M_3 |$$



0v-DBD: parametri che fissano il tasso di conteggio

Come il **0v-DBD** è connesso con il mixing dei neutrini e le masse

Tasso di conteggio del **Spazio delle fasi** Elementi di matrice
0v-DBD nucleare

Massa di Majorana
effettiva

Quello che
cercano

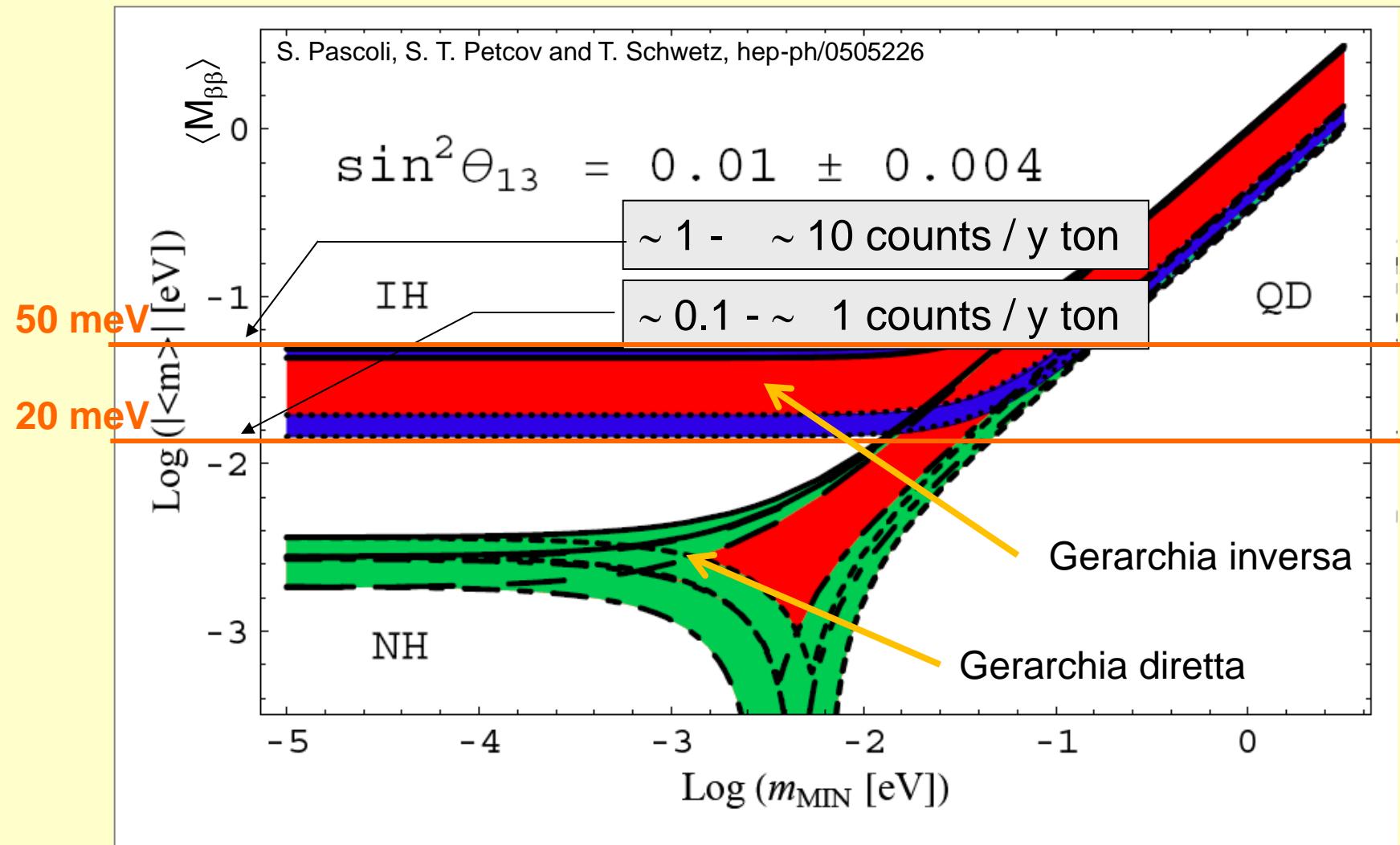
$$U_{MNSP} \sim$$

$$\begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.02 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

contiene
eutrino

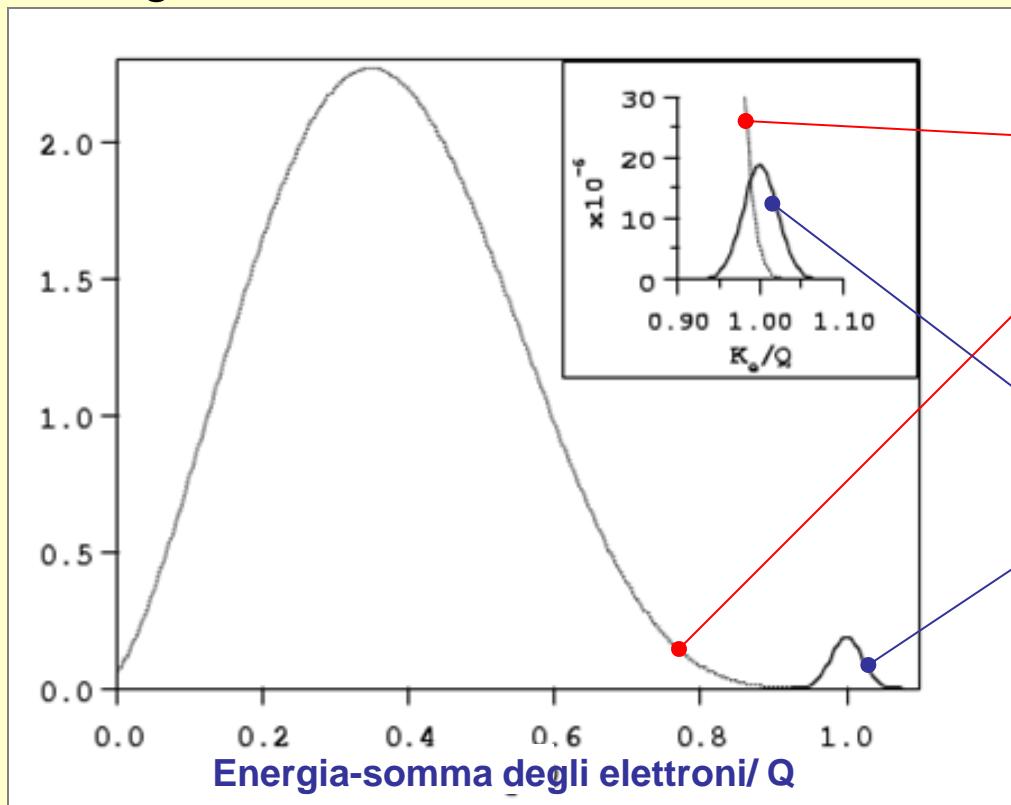
$$\langle M_{\beta\beta} \rangle = | |U_{e1}|^2 M_1 + e^{i\alpha_1} |U_{e2}|^2 M_2 + e^{i\alpha_2} |U_{e3}|^2 M_3 |$$

La portata della sfida



Spettro dell'energia-somma degli elettroni nel DBD

La **forma** dello spettro dell'energia-somma degli elettroni permette di distinguere tra i due modi di decadimento



DBD a 2 neutrini
Continuo piccato a $\sim 1/3 Q$

DBD a zero neutrini
Picco allargato solo dalla risoluzione energetica del processo

$Q \sim 2-3 \text{ MeV}$ per gli isotopi più promettenti

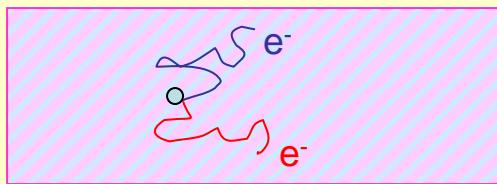
Caratteristiche addizionali:

- distribuzione di energia di elettrone singolo
- distribuzione angolare

Approcci sperimentali

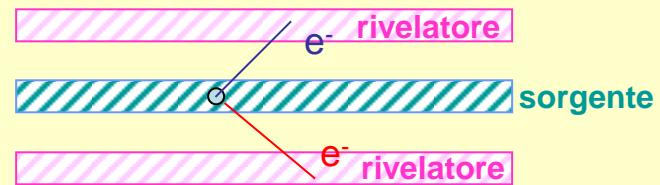
Due tecniche principali:

①



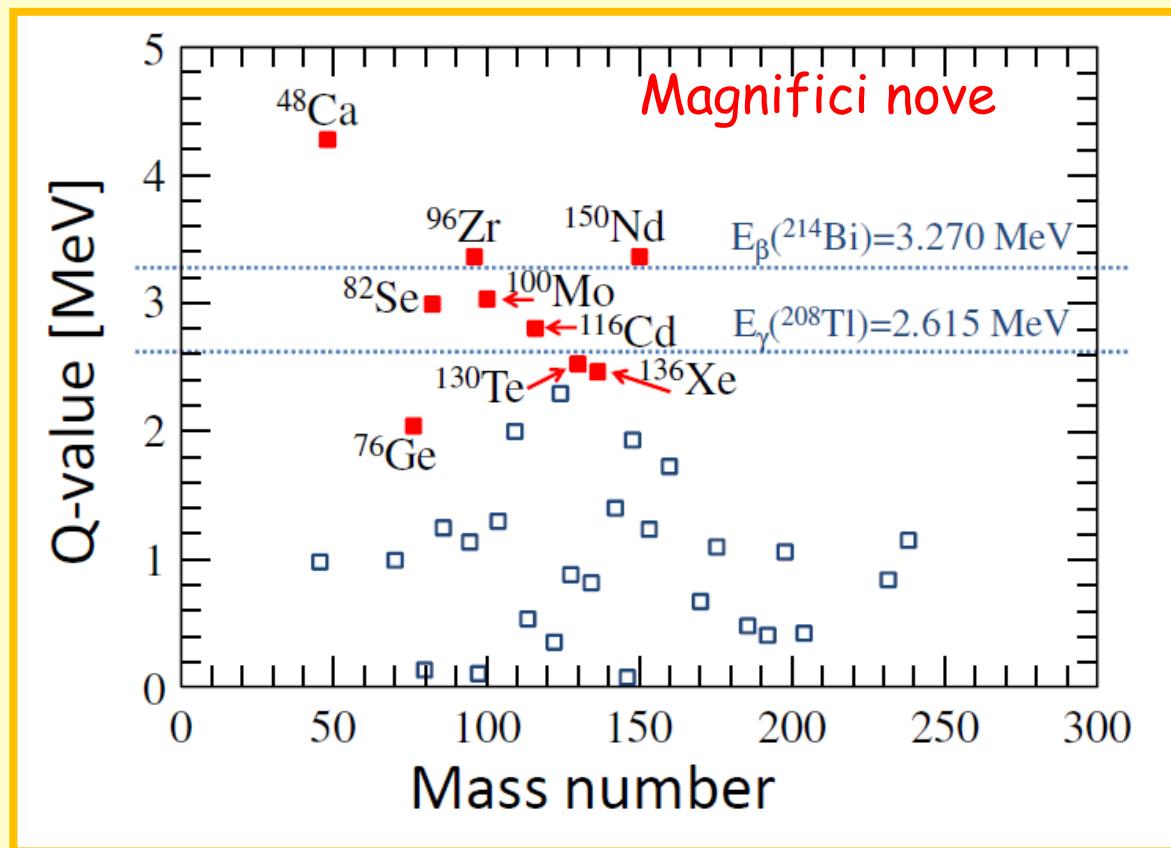
Sorgente \equiv Rivelatore
(tecnica calorimetrica)

②

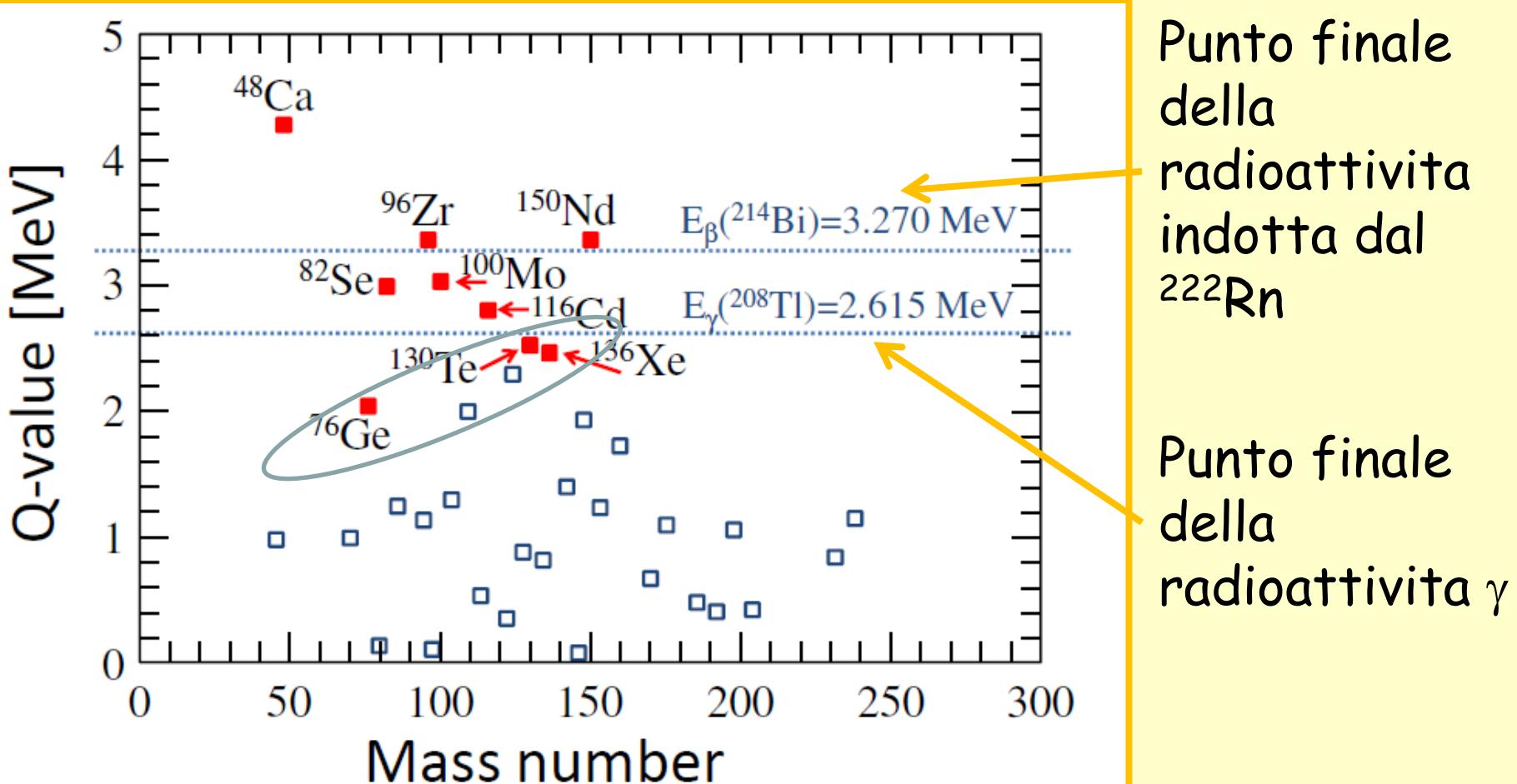


Sorgente \neq Rivelatore

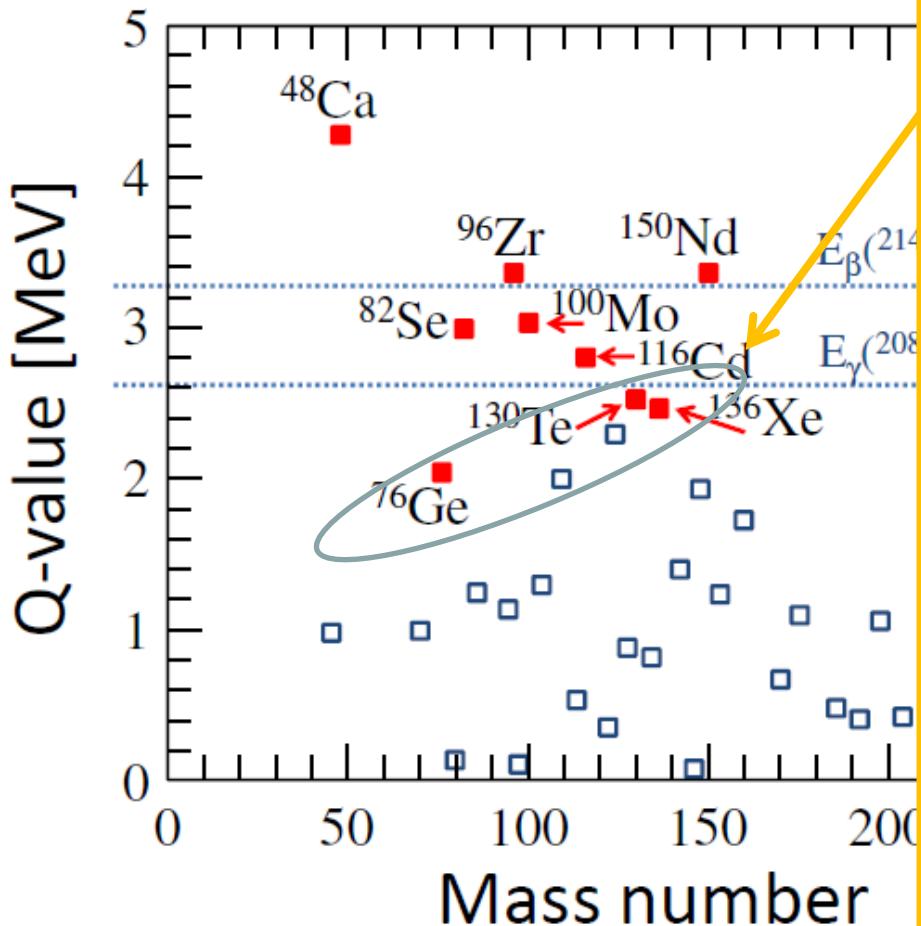
Fattori che guidano la selezione dei candidati



Candidati e tecniche



Candidati e tecniche



Eccellenti tecnologie sono praticabili nell'approccio calorimetrico

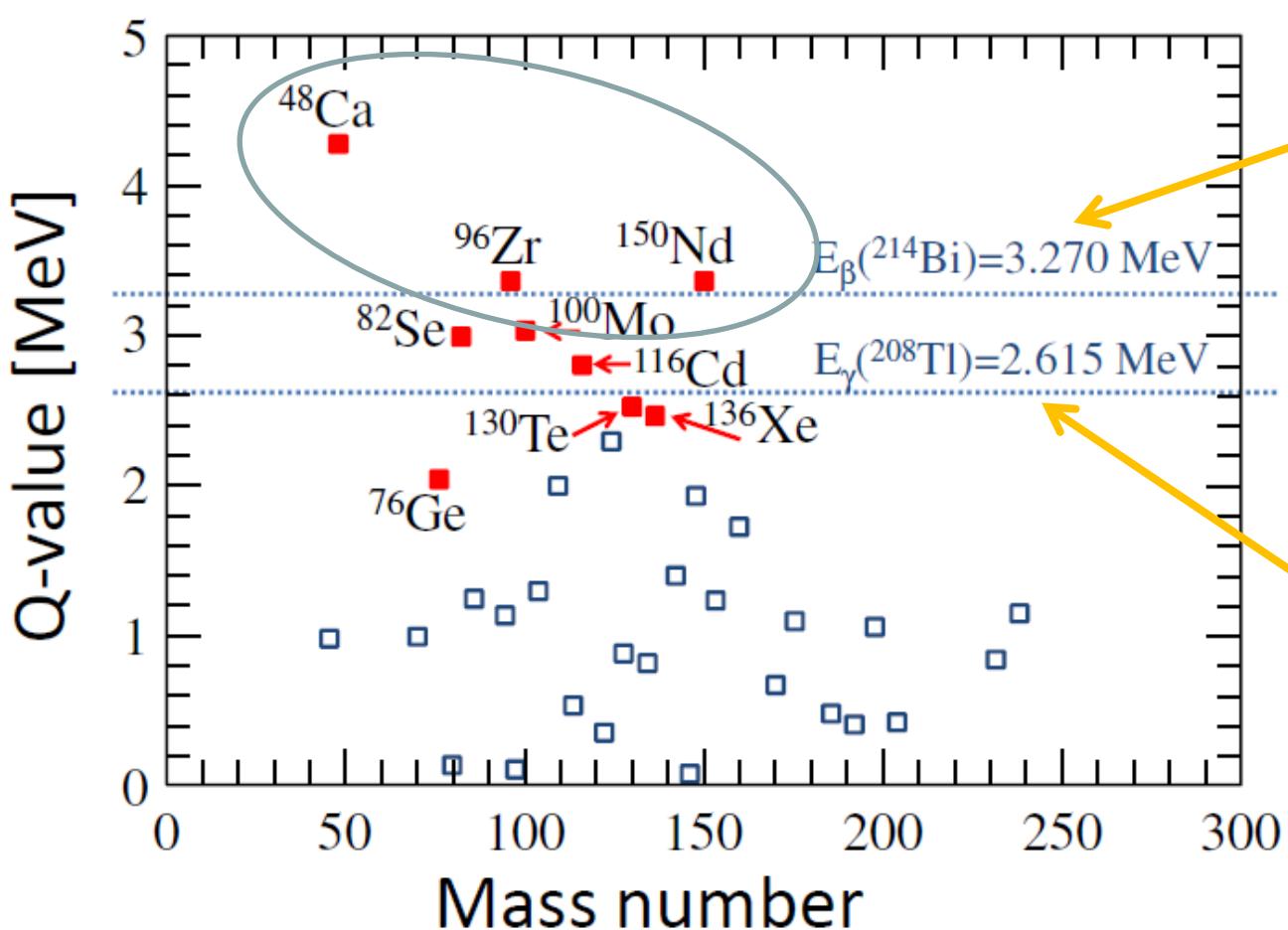
- Diodi $Ge \Rightarrow ^{76}Ge$ (**GERDA, MAJORANA**) - $\Delta E \ll 1\%$
- Bolometri $\Rightarrow ^{130}Te$ (cristalli TeO_2) (**CUORE**) - $\Delta E \ll 1\%$
- TPCs (**EXO, NEXT**), inclusione in grandi volumi di scintillatori (**KamLAND-Zen**)
 $\Rightarrow ^{136}Xe$

L'arricchimento è facile per ^{130}Te e non necessario al livello attuale

MA

Meno favorevole in termini di fondo

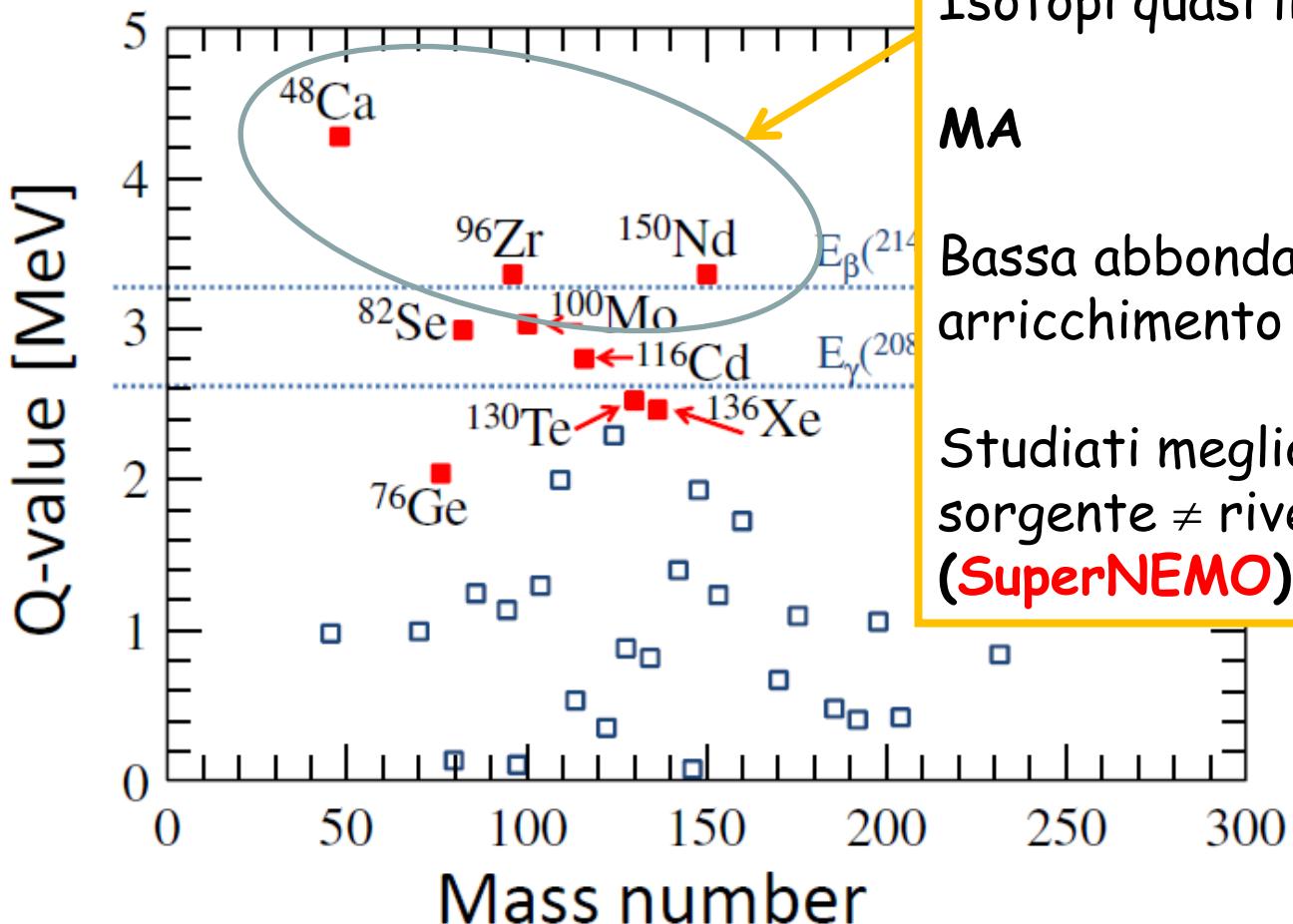
Candidati e tecniche



Punto finale della radioattività indotta dal ^{222}Rn

Punto finale della radioattività γ

Candidati e tecniche



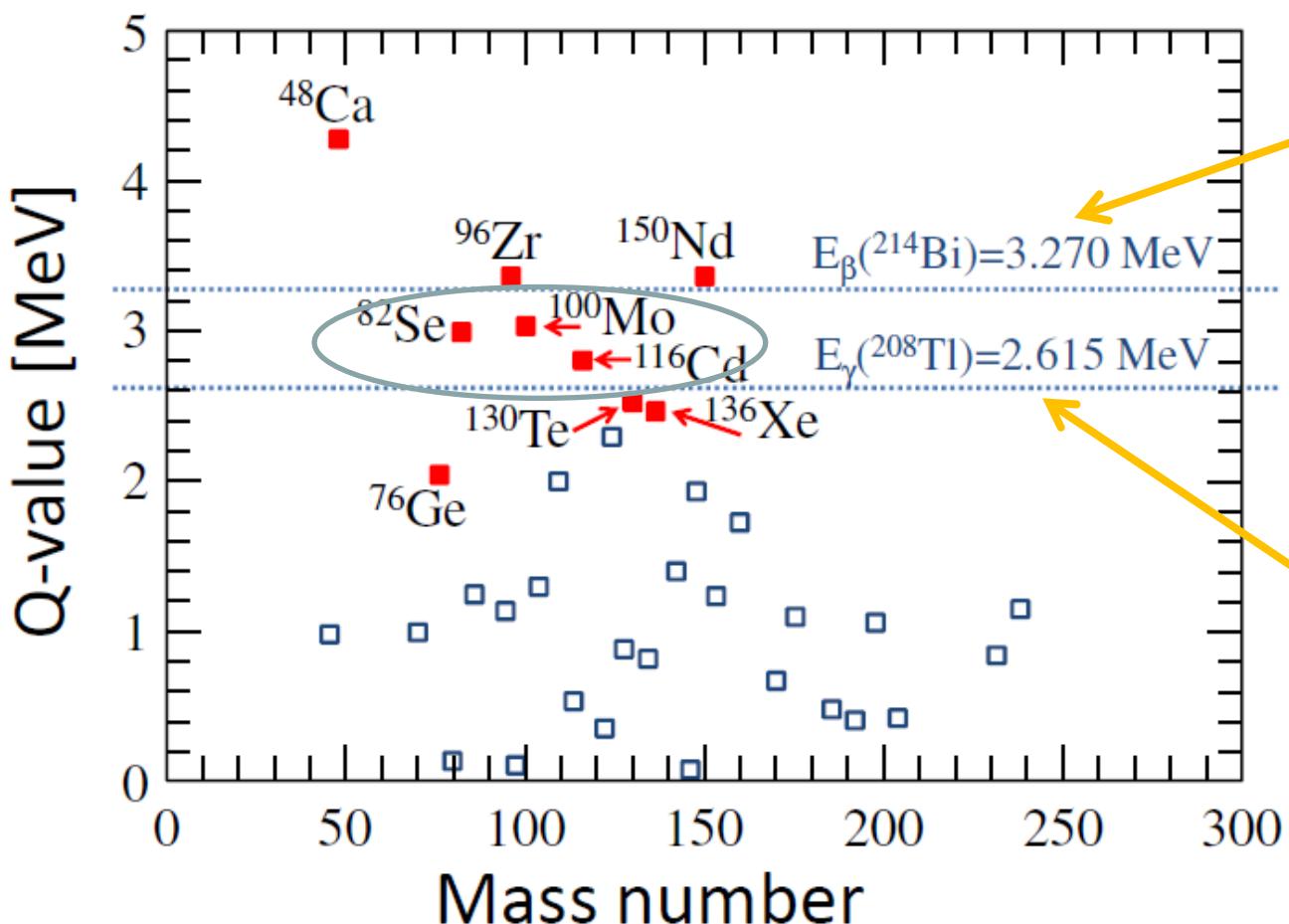
Isotopi quasi liberi da fondo!

MA

Bassa abbondanza isotopica e arricchimento difficile

Studiati meglio con approccio sorgente \neq rivelatore
(SuperNEMO)

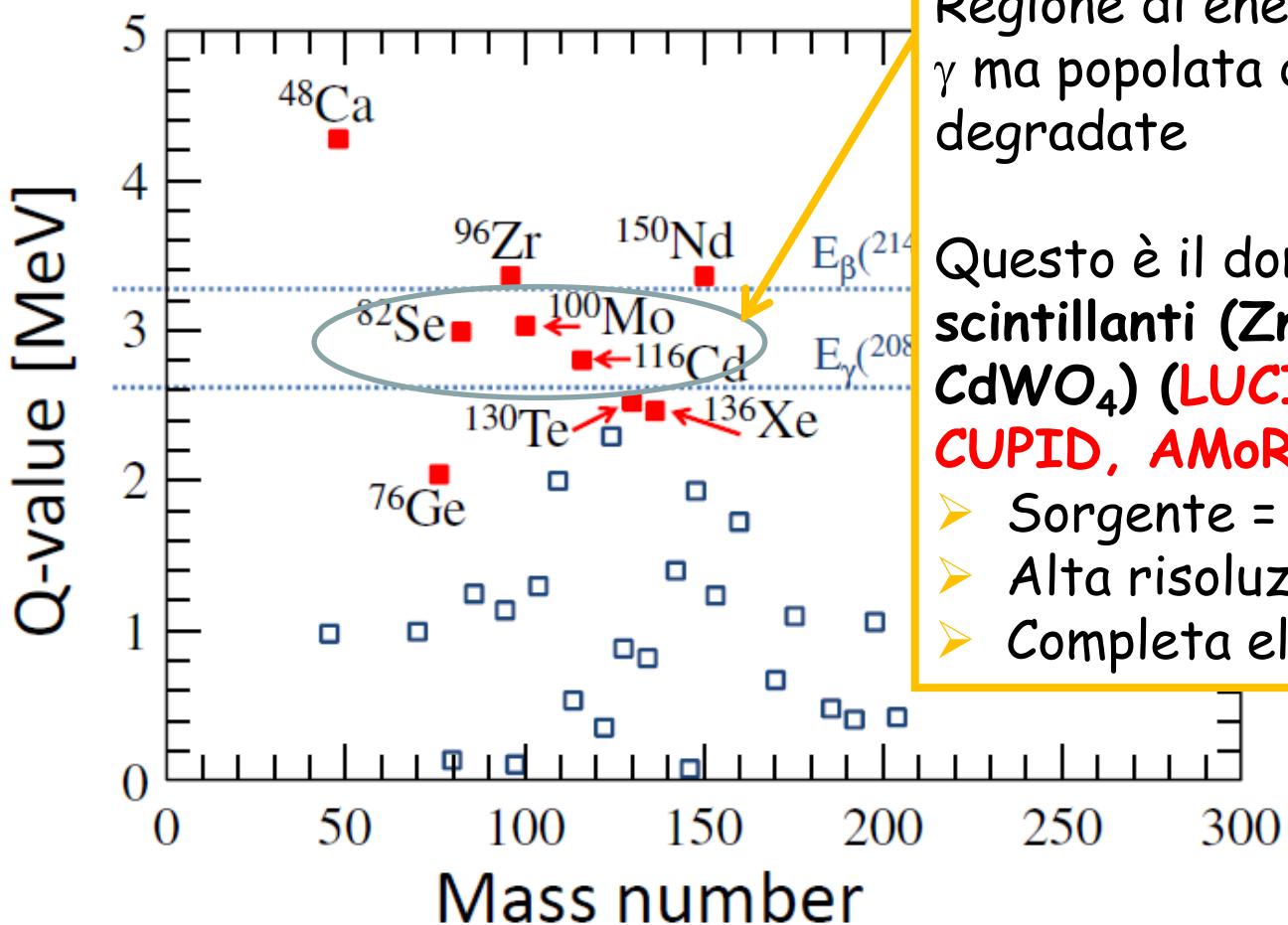
Candidati e tecniche



Punto finale
della
radioattività
indotta dal
 ${}^{222}\text{Rn}$

Punto finale
della
radioattività γ

Candidati e tecniche

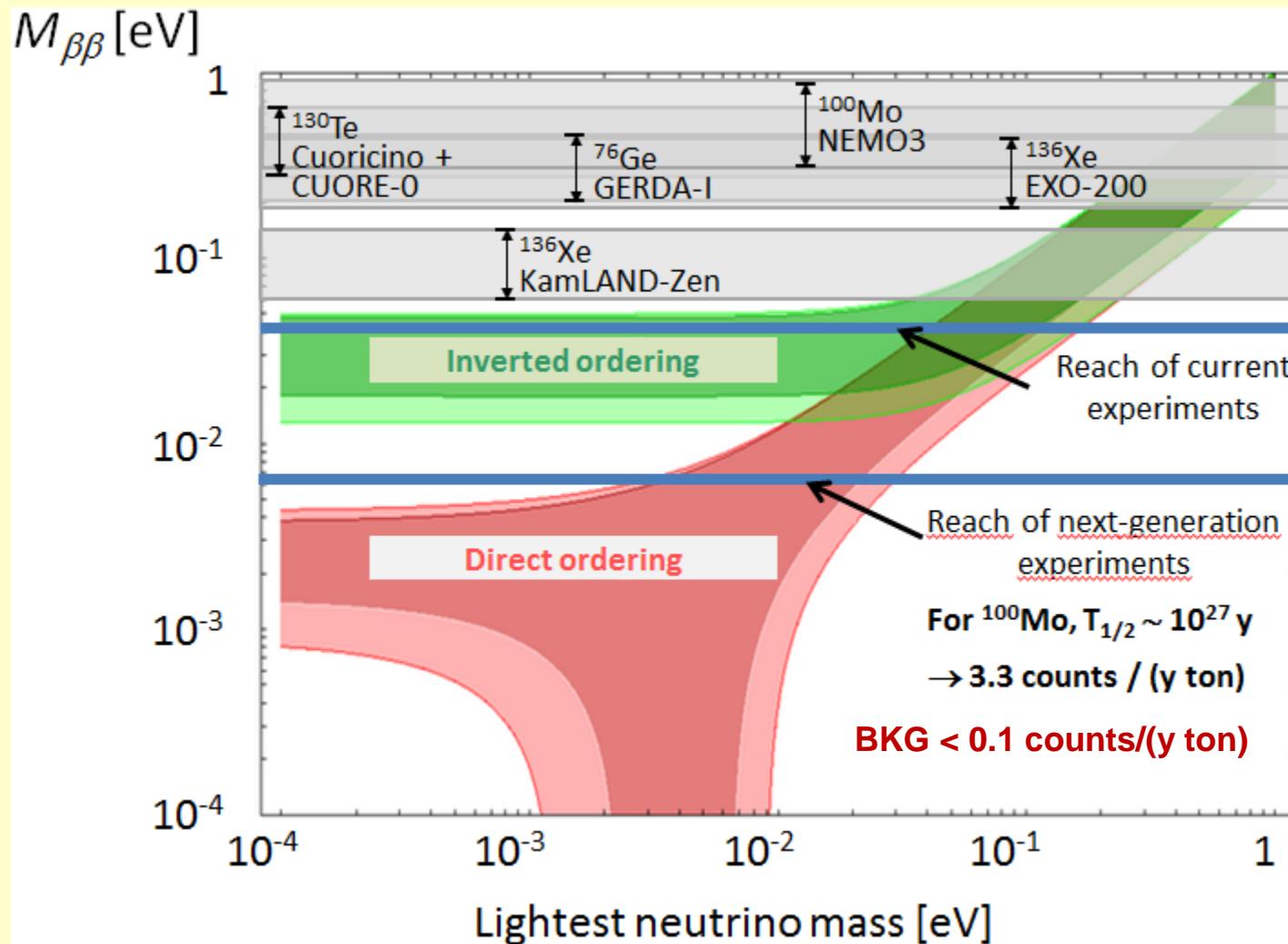


Regione di energia libera dal fondo
 γ ma popolata da α superficiali
degradate

Questo è il dominio dei bolometri scintillanti (ZnSe , ZnMoO_4 , CdWO_4) (**LUCIFER**, **LUMINEU**, **CUPID**, **AMoRE**), che danno:

- Sorgente = rivelatore
 - Alta risoluzione energetica
 - Completa eliminazione fondo α

Prospettive a medio/lungo termine



Conclusioni

- ◆ I neutrini si mescolano tra loro e oscillano
- ◆ La nostra conoscenza del meccanismo di produzione di energia nel sole è estremamente accurata
- ◆ I neutrini hanno masse non nulle:

$M_2^2 - M_1^2 \sim (9 \text{ meV})^2$ $|M_3^2 - M_1^2| \sim (50 \text{ meV})^2$
- ◆ Abbiamo misurato con grande precisione i moduli degli elementi della matrice PMNS
- ◆ Non conosciamo la gerarchia delle masse e la massa assoluta
- ◆ Non conosciamo la fase δ
- ◆ Non sappiamo se il neutrino è particella di Dirac o Majorana

Ma anche molte altre domande fondamentali

- Perché le masse dei neutrini sono così piccole ?
- Perchè ν_e contiene così poco ν_3 ?
- Il mixing atmosferico è esattamente massimale ?
- Il neutrino è responsabile del fatto che nell'Universo c'è solo materia?
- Come sono i neutrini emessi dalle supernovae?
- Sapremo mai vedere i neutrini del fondo cosmico?
- Provengono neutrini dai siti di accelerazione dei raggi cosmici?
- Esistono i neutrini sterili ?