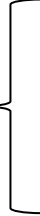


La fisica del neutrino

- 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 (ν)

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 sapori

1957 - 1962 - Pontecorvo e Sakata ne proposero le oscillazioni

1962 - Steinberger et al. ne distinsero sperimentalmente i sapori

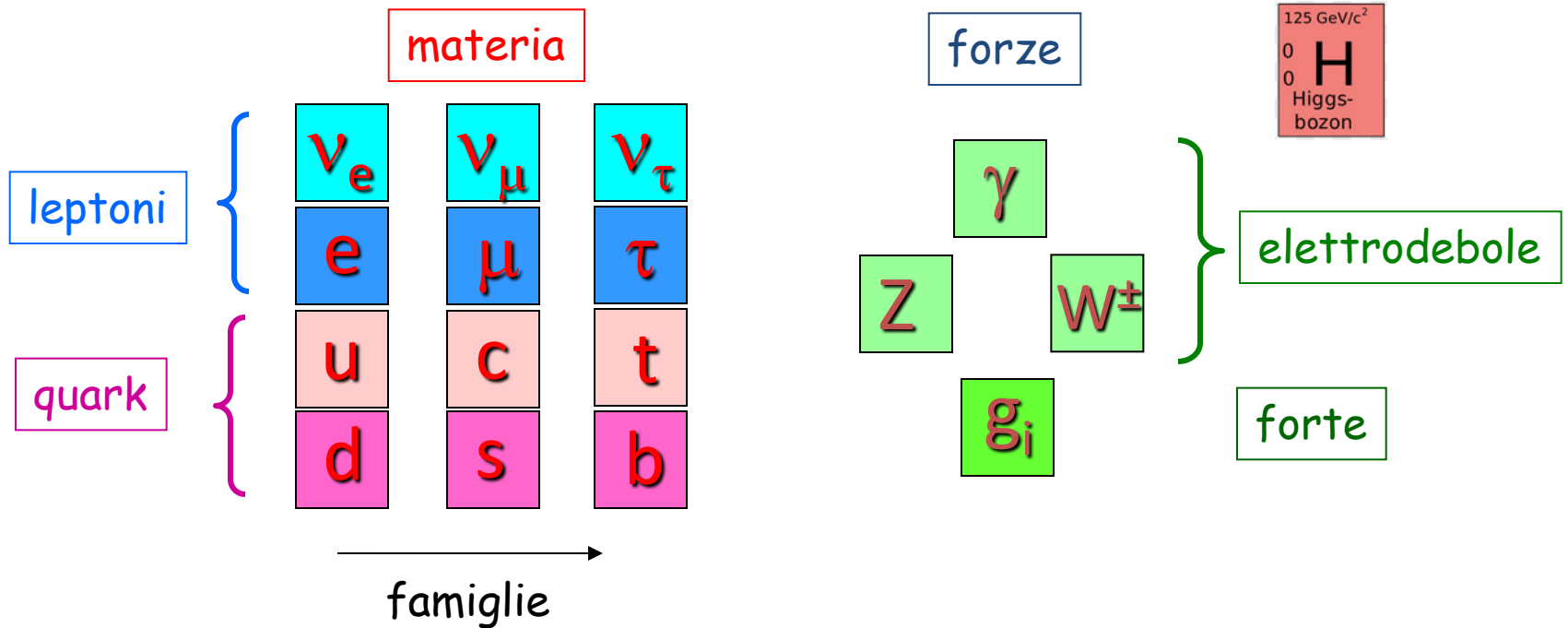
1998 - Superkamiokande rivela le oscillazioni dei ν atmosferici

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

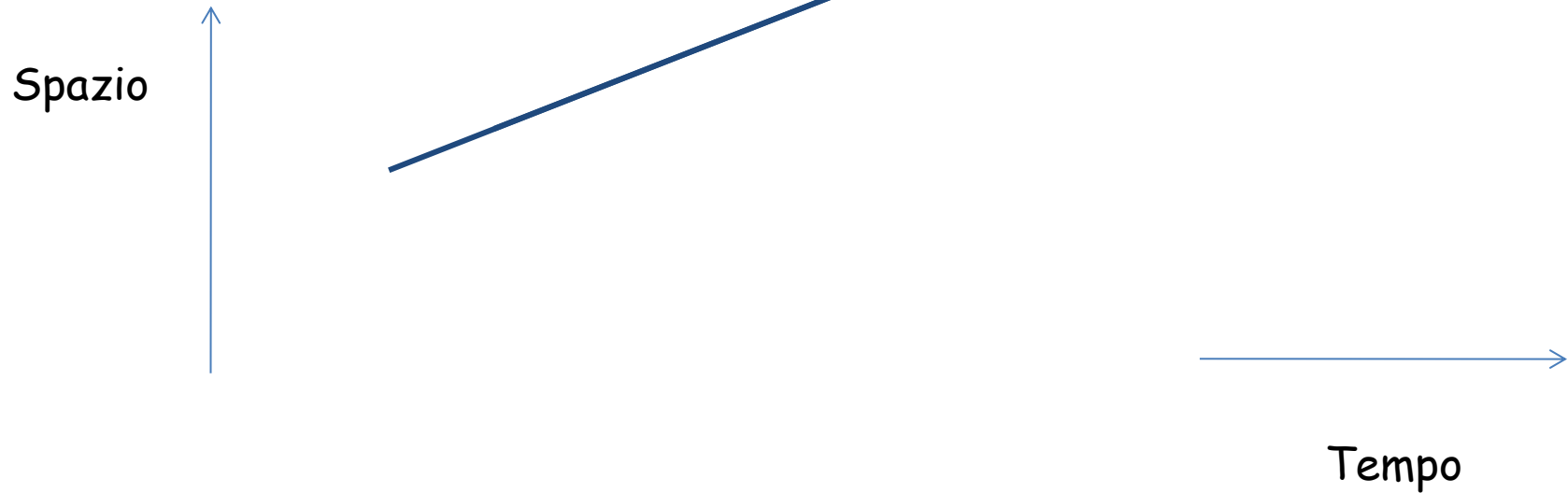
Un elettrone in quiete

Spazio

Tempo



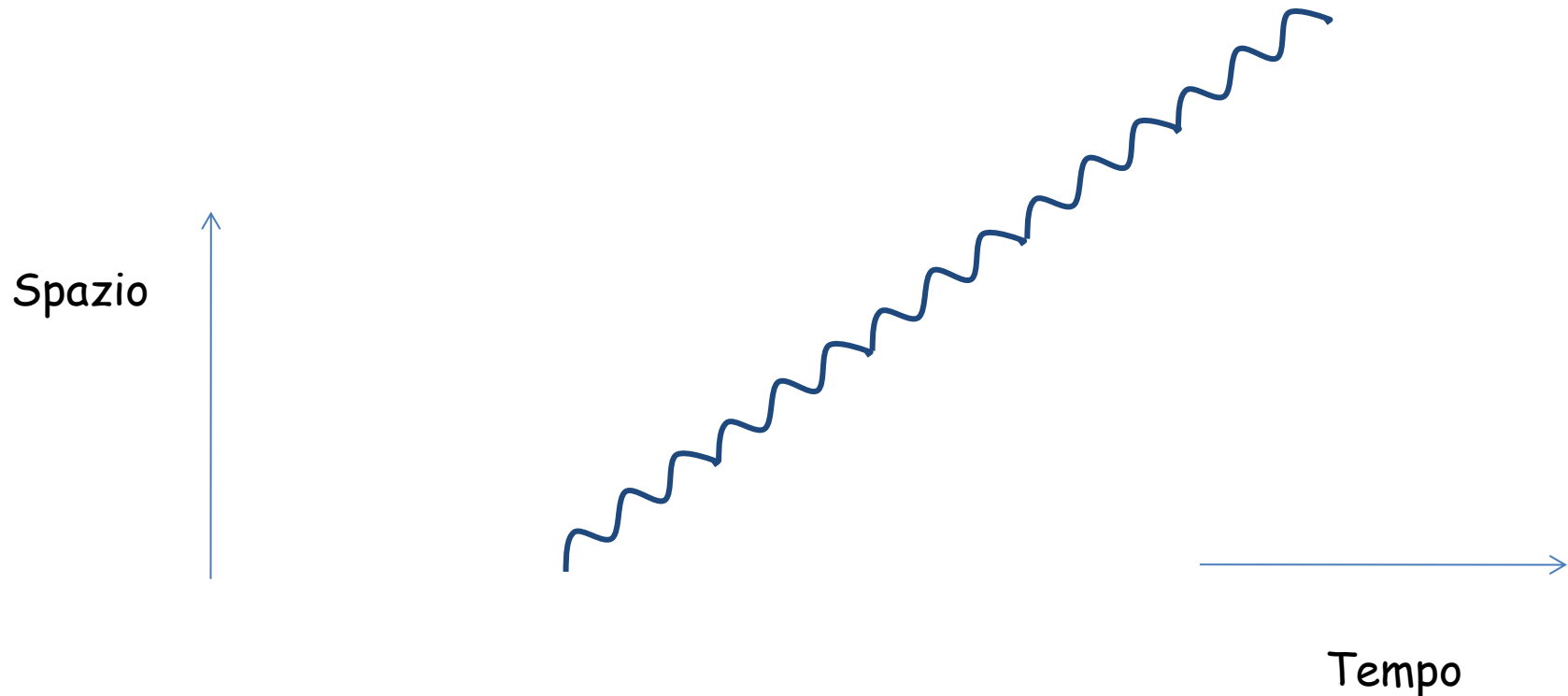
Un elettrone in moto rettilineo uniforme



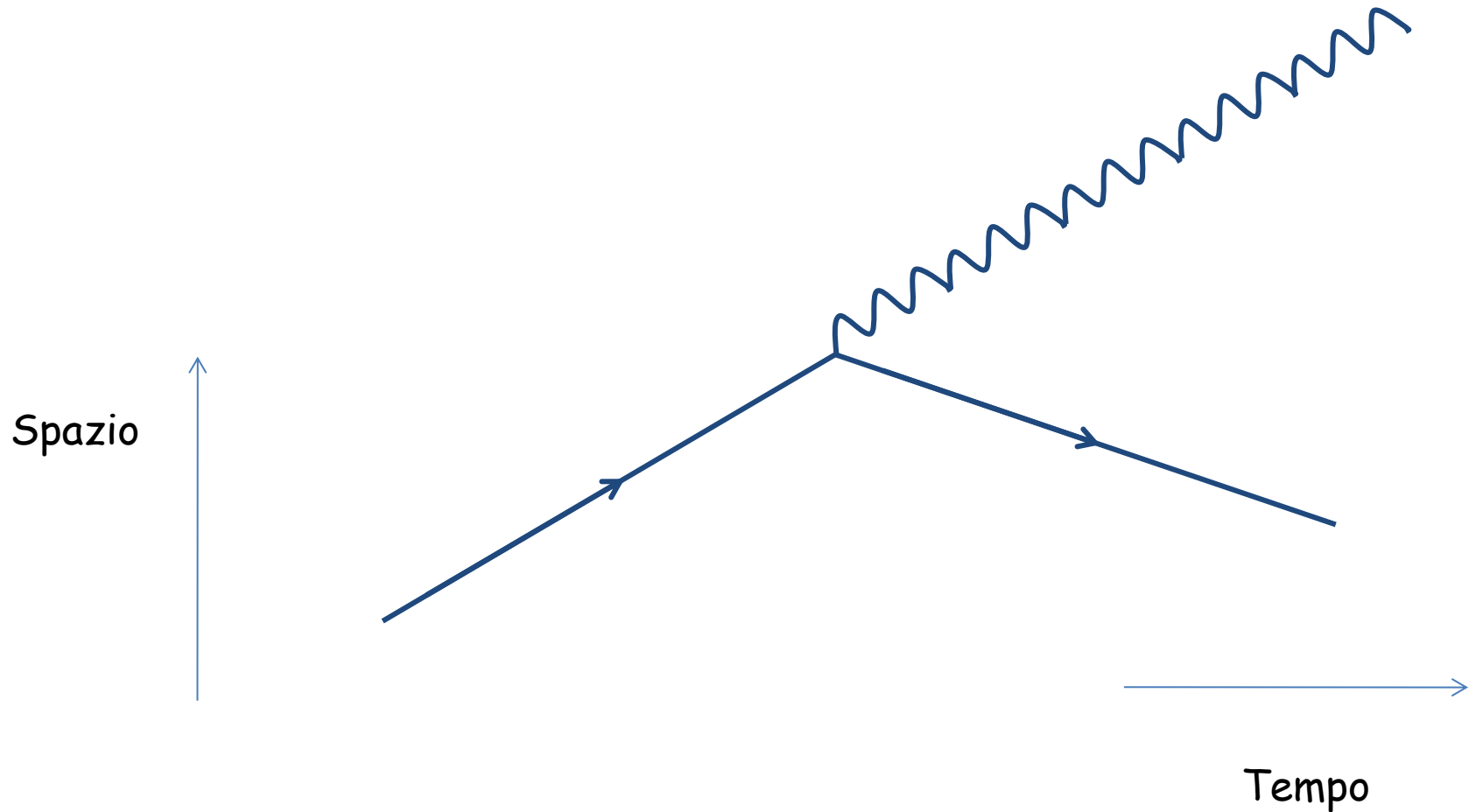
Prototipo di tutte le particelle associate a una forza: fotone

~~Massa~~ - ~~Carica~~ - Spin

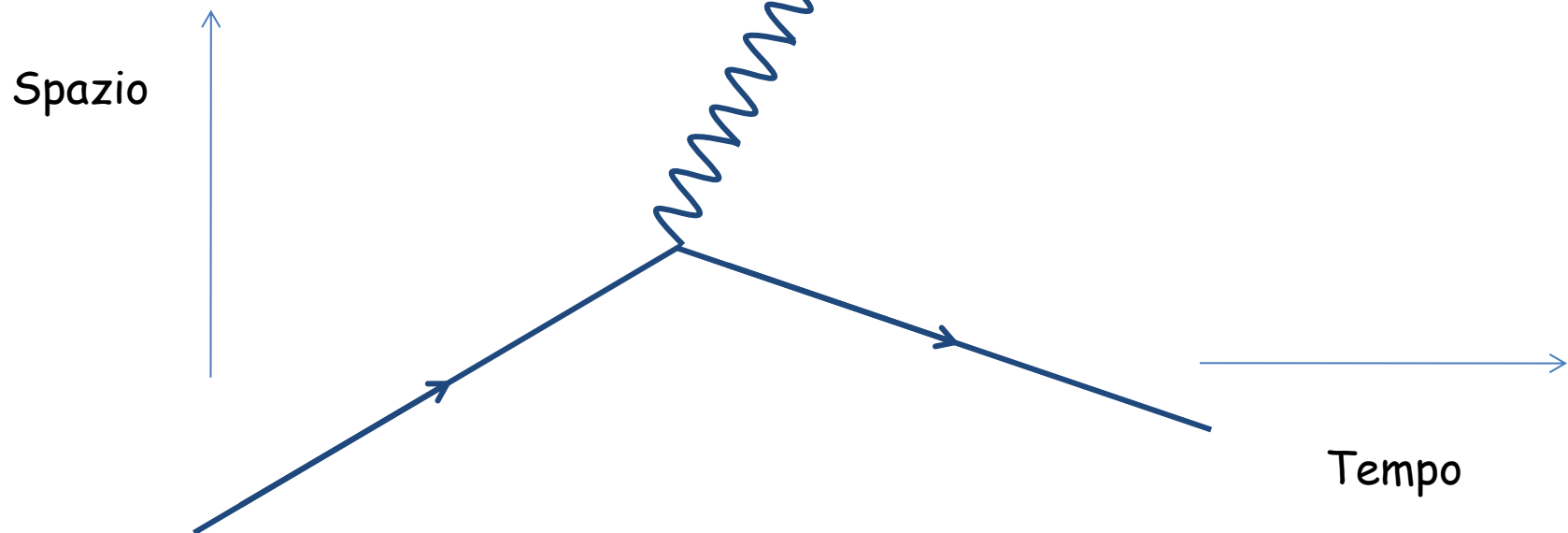
Un fotone si propaga liberamente



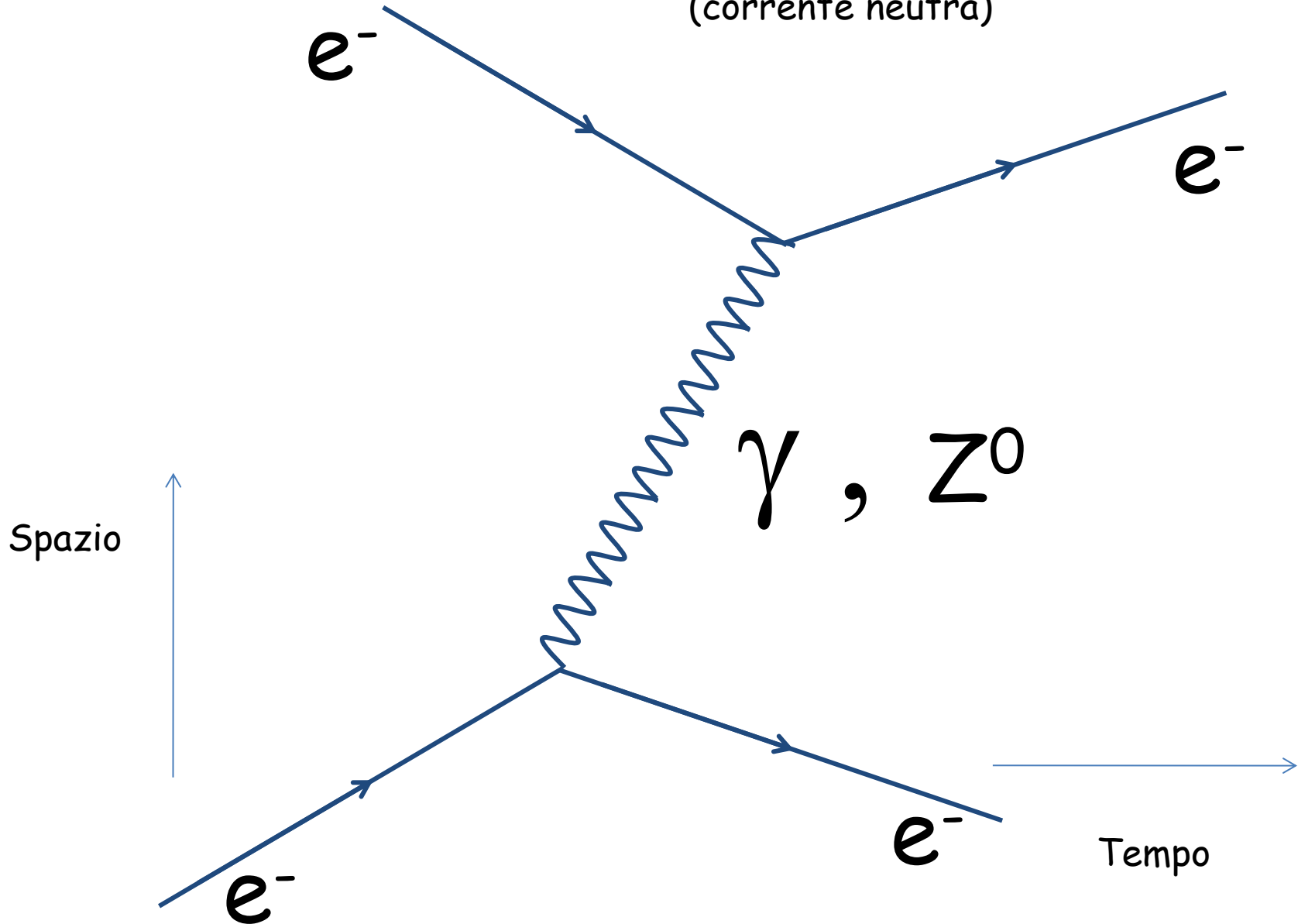
Prototipo di tutte le interazioni: il fotone si "accoppia" all'elettrone



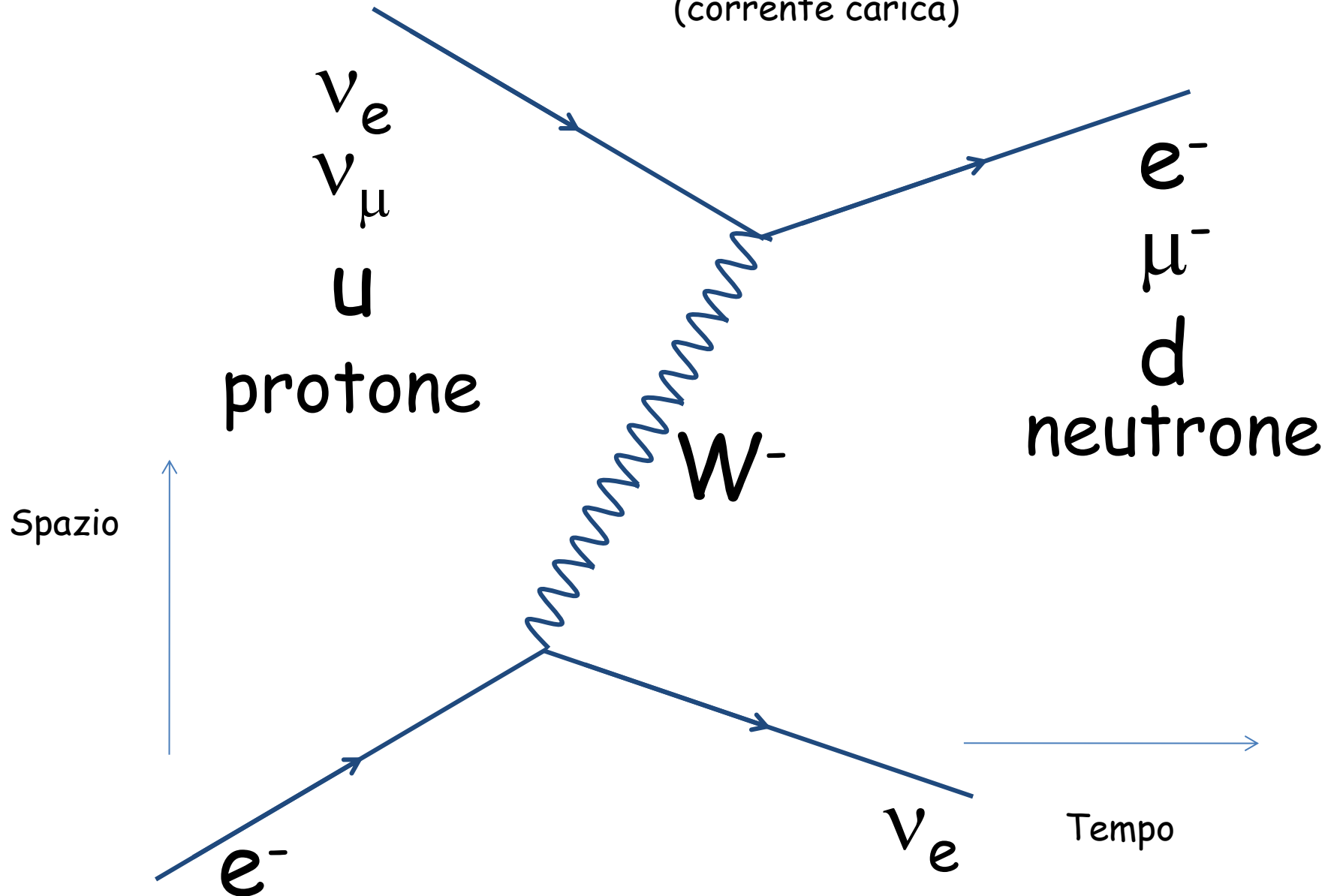
Prototipo di tutte le diffusioni: due elettroni
interagiscono e cambiano le loro velocità



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

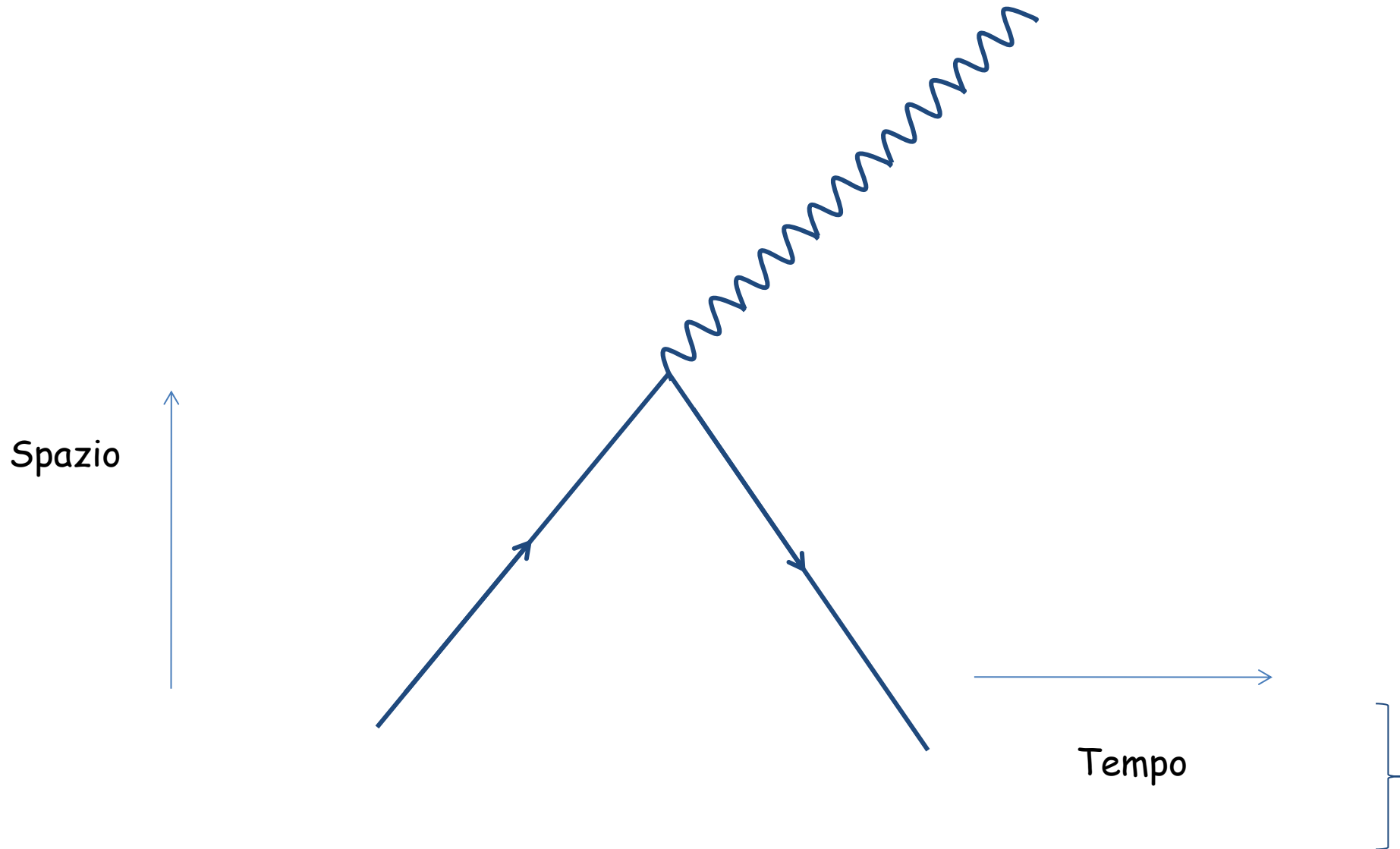


Spazio

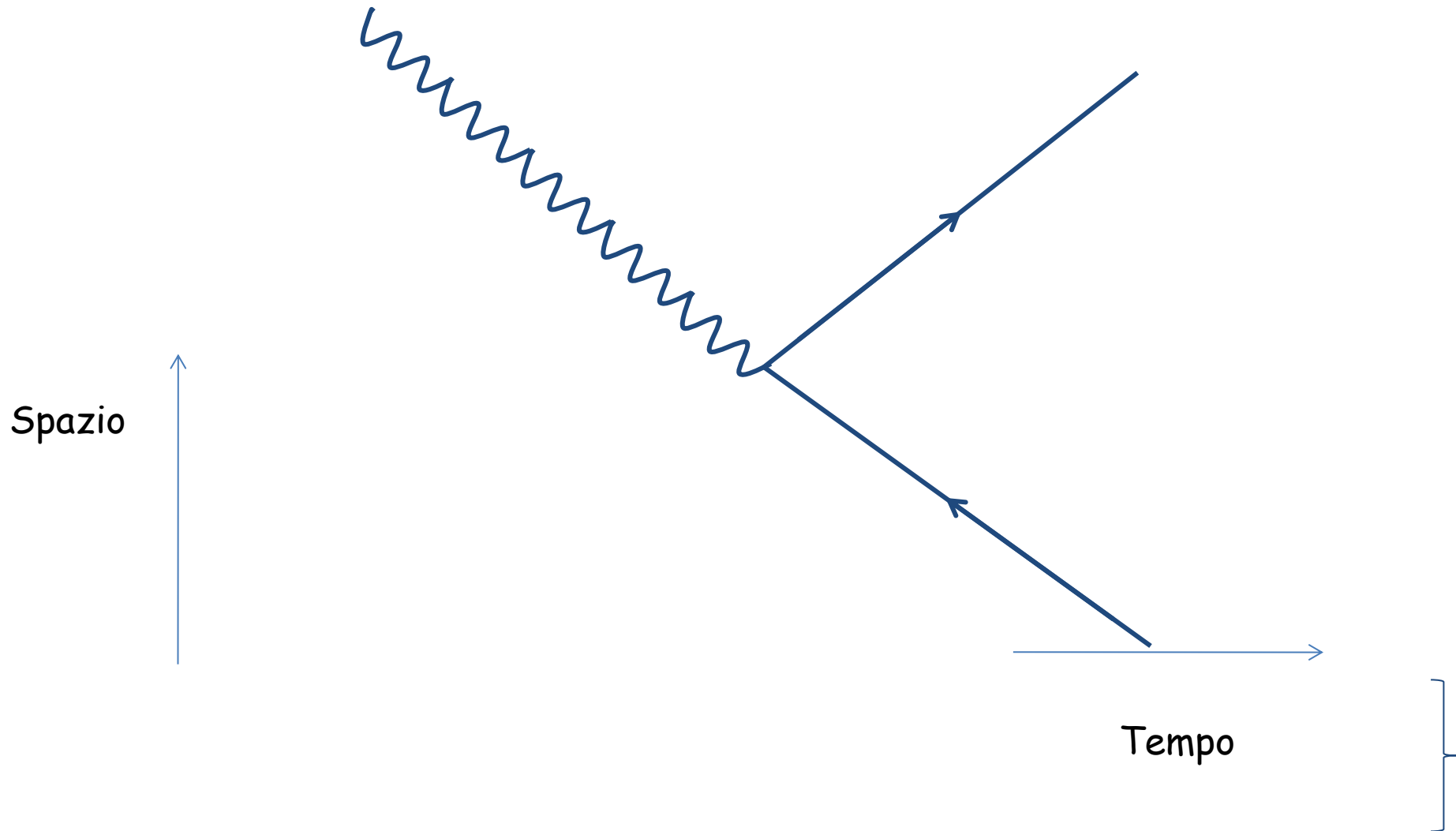


Tempo

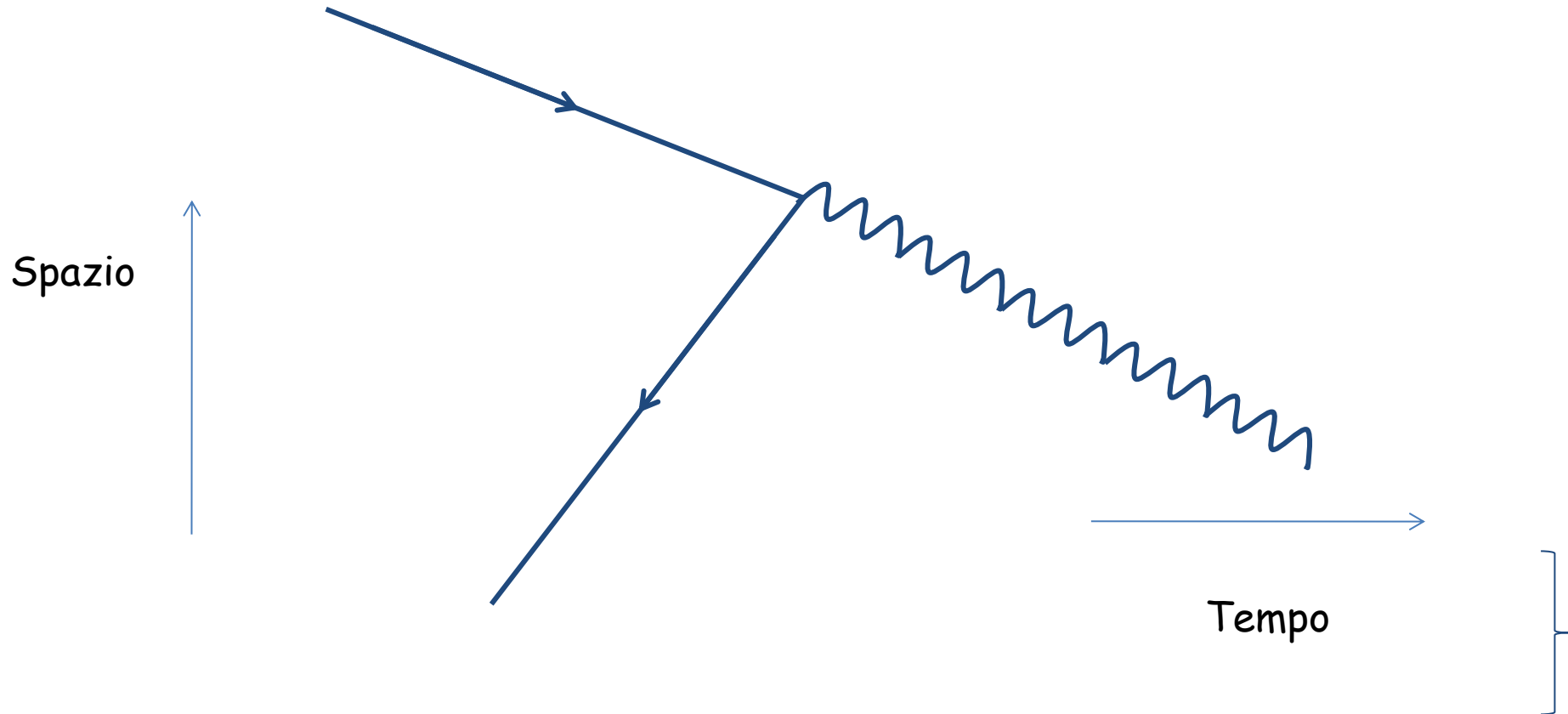
Emissione, assorbimento, produzione di coppie e annichilazione



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** $\cong 1.2 \times 10^{89}$ (atomi: $\sim 10^{82}$)
- ◆ Neutrini **solari**: flusso $\cong 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $E < 10 \text{ MeV}$
- ◆ Neutrini “**atmosferici**”: flusso $\cong 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; $E \cong 1\text{-}100 \text{ GeV}$
- ◆ 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:

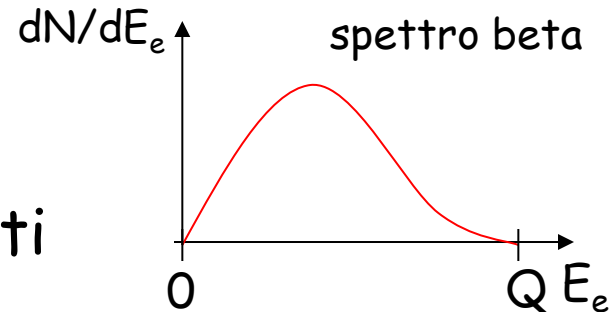
	Taglia	Spin	Carica	Massa	Momento magnetico
Elettrone	$< 10^{-16} \text{ cm}$	1/2	e	$m_e = 511 \text{ keV}$	$\mu_B \equiv e \hbar / 2 m_e$
Neutrino	$< 10^{-16} \text{ cm}$	1/2	0	$< 10^{-5} m_e$	$< 10^{-10} \mu_B$

Il concepimento ...

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



Q: energia cinetica dei prodotti



Original: Photocopy of Pauli 0393
Abschrift/15.12.56 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gesellschafts-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Ulrichstrasse

particella con:

carica nulla

spin 1/2

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

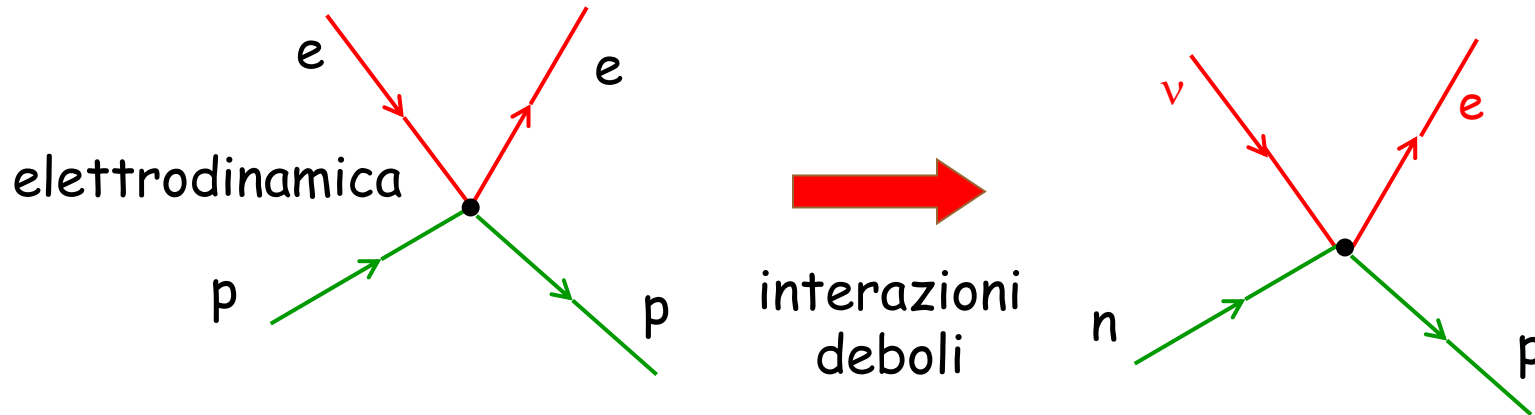


Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst
anzuhören bitte, Ihnen das näherem auseinanderzusetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifeltsten Ausweg
verfallen um den "Wechselstich" (1) der Statistik und den Energiemass
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten **elektrisch neutrale**
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche **den Spin 1/2 haben** und das Anschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
musste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls **nicht grösser als 0,01 Protonenmasse**. 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.

... e il battesimo

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



ANNO IV - VOL. II - N. 12

QUINDICINALE

31 DICEMBRE 1933 - XII

LA RICERCA SCIENTIFICA

ED IL PROGRESSO TECNICO NELL'ECONOMIA NAZIONALE

Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta"

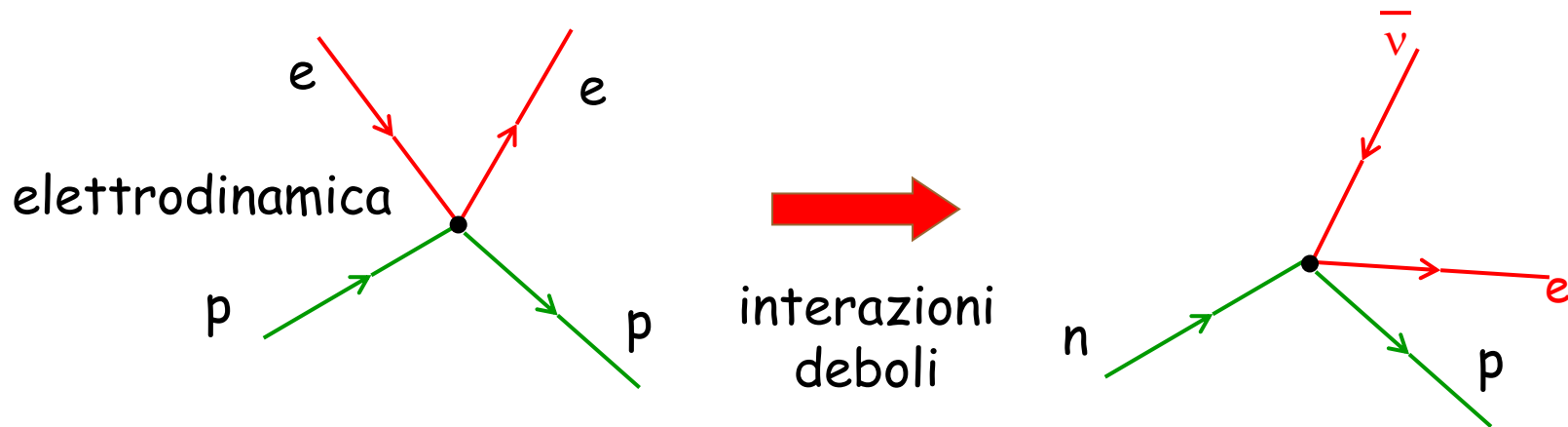
Nota del prof. ENRICO FERMI

Riassunto: Teoria della emissione dei raggi β delle sostanze radioattive, fondata sull'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione ma vengano formati, insieme ad un **neutrino**, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico di un atomo. Confronto della teoria con l'esperienza.

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 previsioni quantitative sui processi beta (1933)



ANNO IV - VOL. II - N. 12

QUINDICINALE

31 DICEMBRE 1933 - XII

LA RICERCA SCIENTIFICA

ED IL PROGRESSO TECNICO NELL'ECONOMIA NAZIONALE

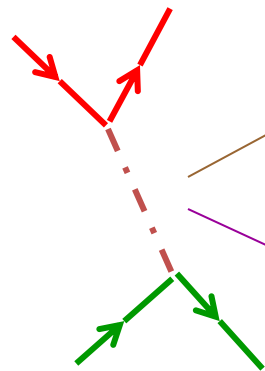
Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta"

Nota del prof. ENRICO FERMI

Riassunto: Teoria della emissione dei raggi β delle sostanze radioattive, fondata sull'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione ma vengano formati, insieme ad un **neutrino**, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico di un atomo. Confronto della teoria con l'esperienza.

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

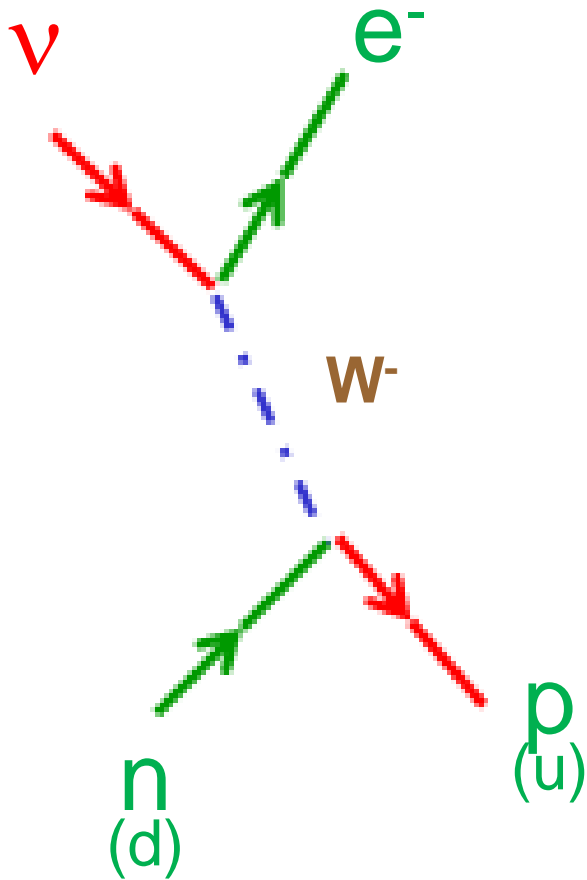
$$A \sim e^2/(k^2 + m_{W,Z}^2) \sim e^2/m_{W,Z}^2 \sim G_F$$

scambio di W : varia la carica del leptone (corrente carica)

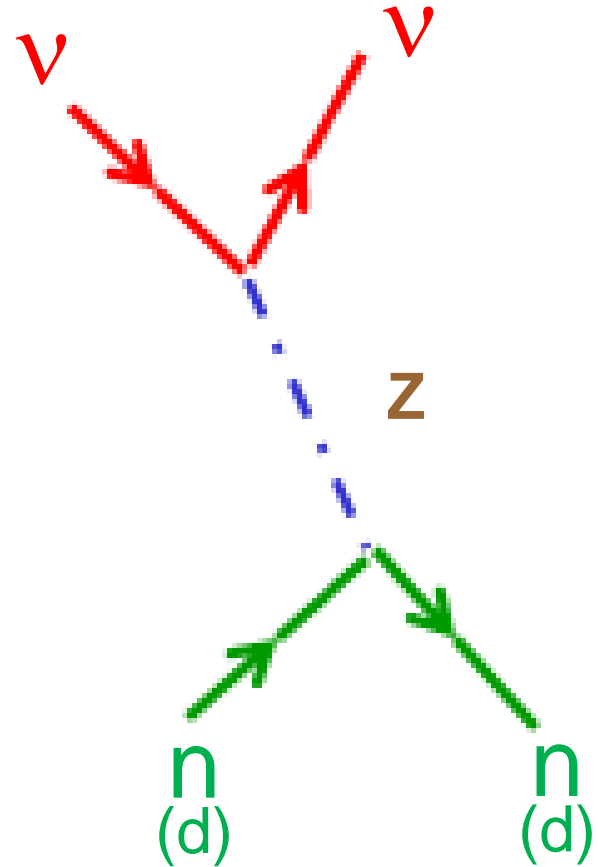
scambio di Z : il leptone viene diffuso (corrente neutra)

Modello Standard

Le correnti cariche e neutre

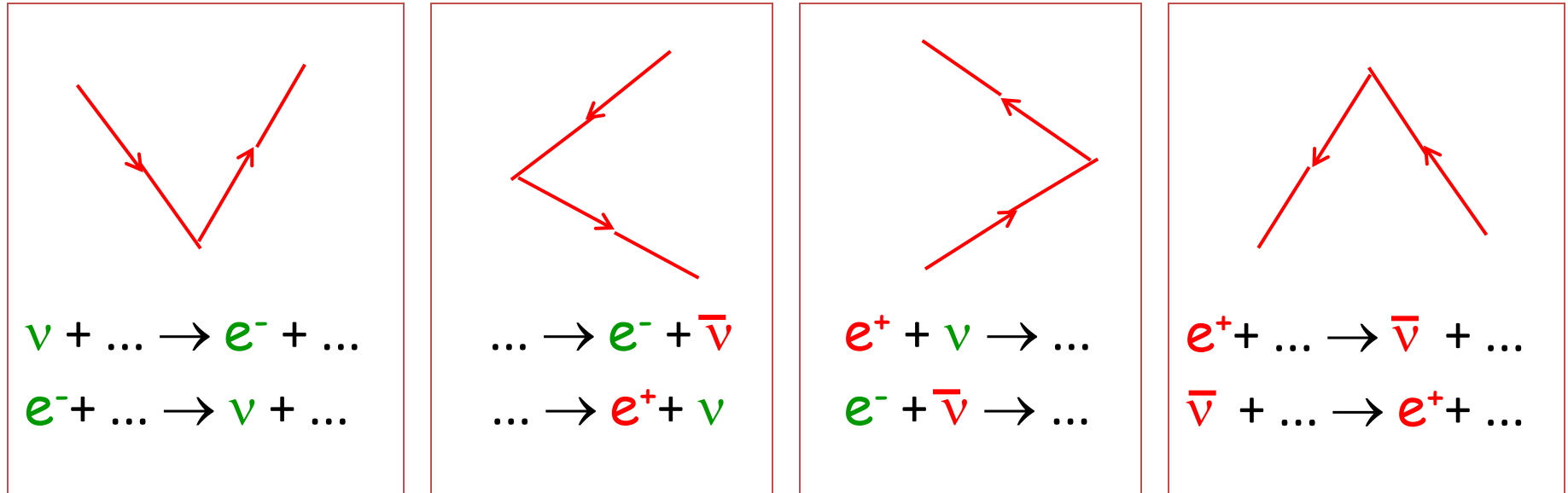


corrente carica



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:

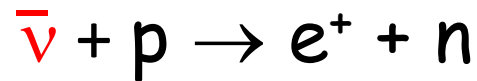
$$e^- \Leftrightarrow e^+ \quad ; \quad v \Leftrightarrow \bar{v}$$

es.: $(A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^- + \bar{v} \longrightarrow (A, Z) + v \rightarrow (A, Z+1) + e^-$
 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:

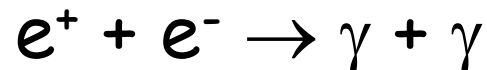


$$\sigma(1 \text{ MeV}) \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$$

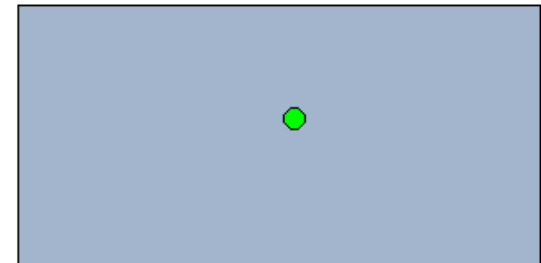
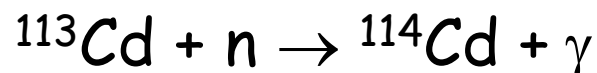
Libero cammino medio in $\text{H}_2\text{O} \sim 100$ anni luce



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



- 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

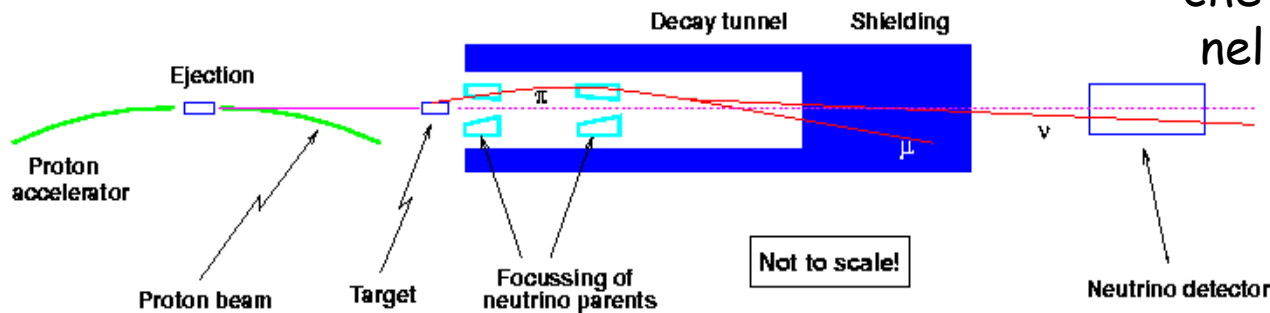
A ciascun leptone carico corrisponde un diverso tipo di neutrino:

 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**:

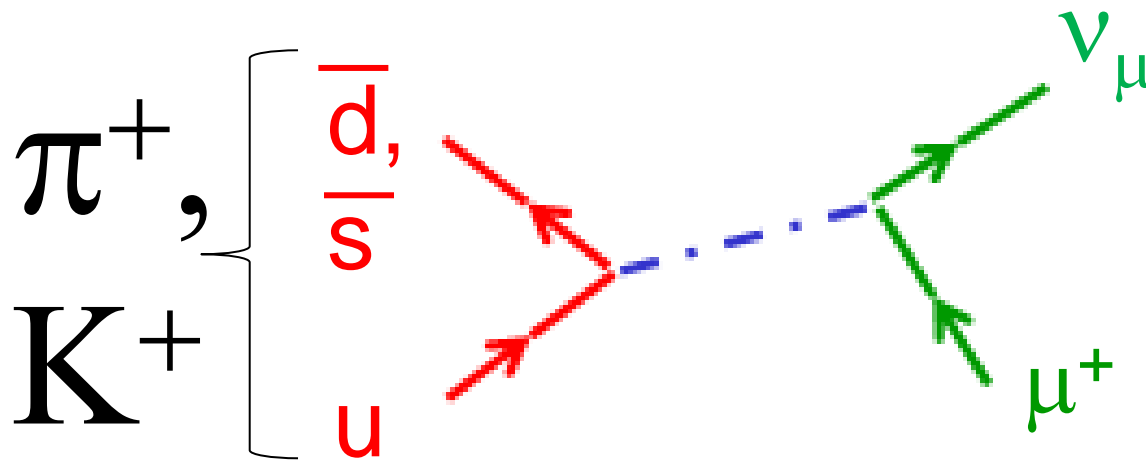
p su bersaglio $\rightarrow \pi, K \rightarrow \mu + \nu$



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:

$$\nu_e: \quad m < 2.0 \text{ eV}$$

$$\nu_\mu: \quad m < 0.19 \text{ MeV}$$

$$\nu_\tau: \quad m < 18.2 \text{ MeV}$$

da considerazioni di carattere cosmologico:



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

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

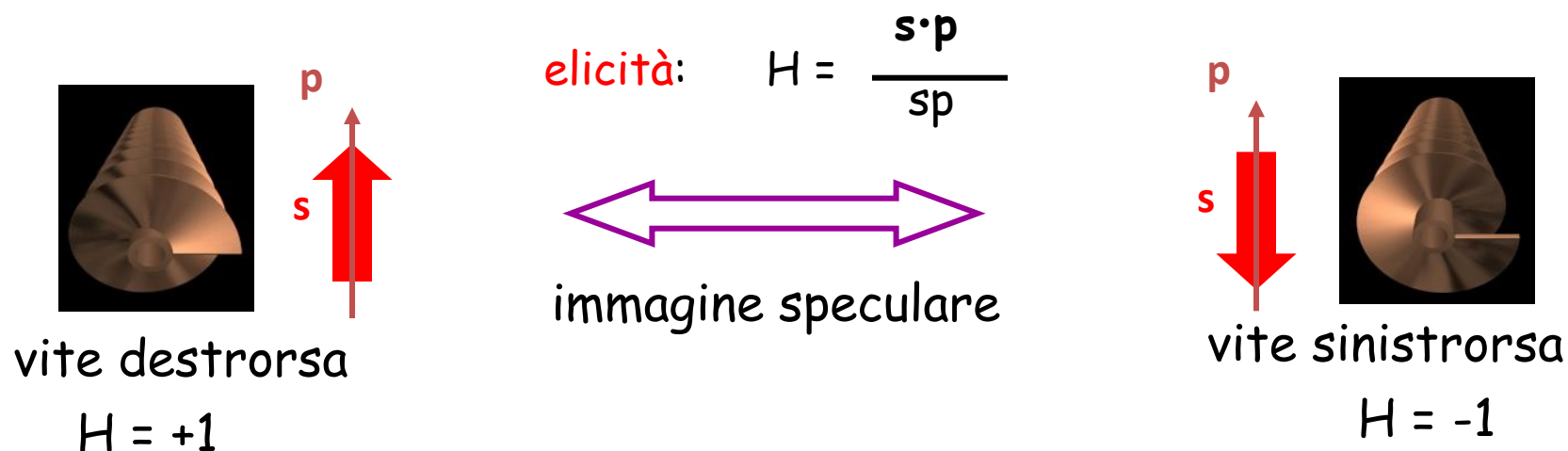
tre autostati di massa
distinti dai tre autostati di sapore

$$\nu_1 - \nu_2 - \nu_3$$

$$\nu_e - \nu_\mu - \nu_\tau$$

Il neutrino allo specchio

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



Goldhaber dimostra in un celebre esperimento (1957) che:

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

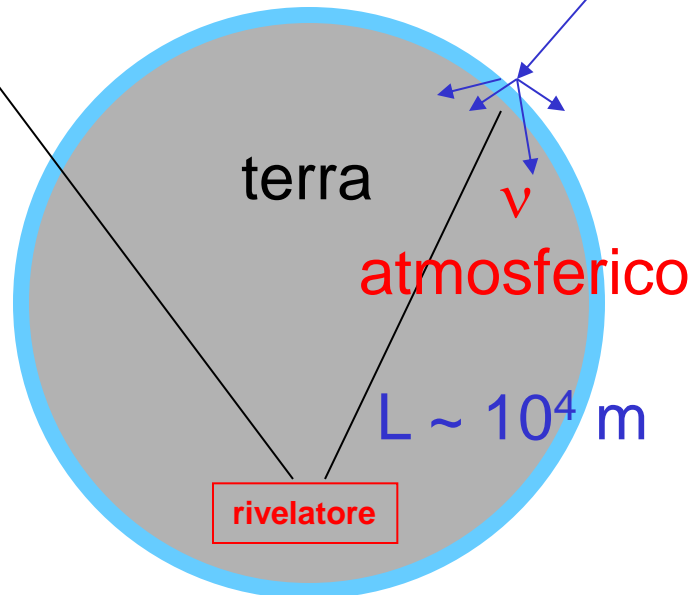


ν solare

$L \sim 1.5 \times 10^8 \text{ m}$



raggi cosmici
primari



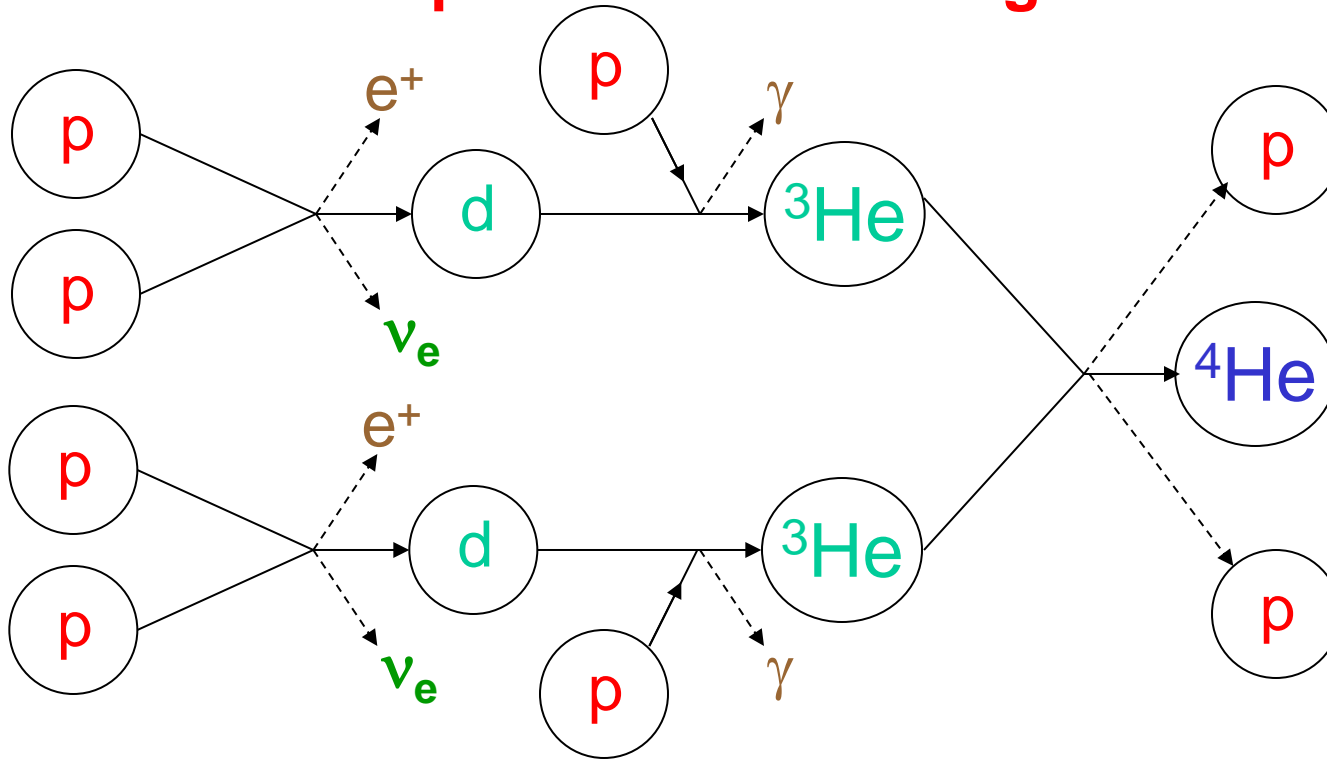
terra

ν
atmosferico

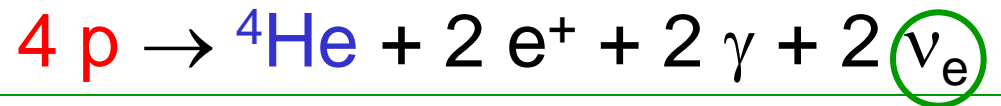
$L \sim 10^4 \text{ m}$

rivelatore

La produzione di energia nel sole



comlessivamente:



$Q = 25 \text{ MeV}$

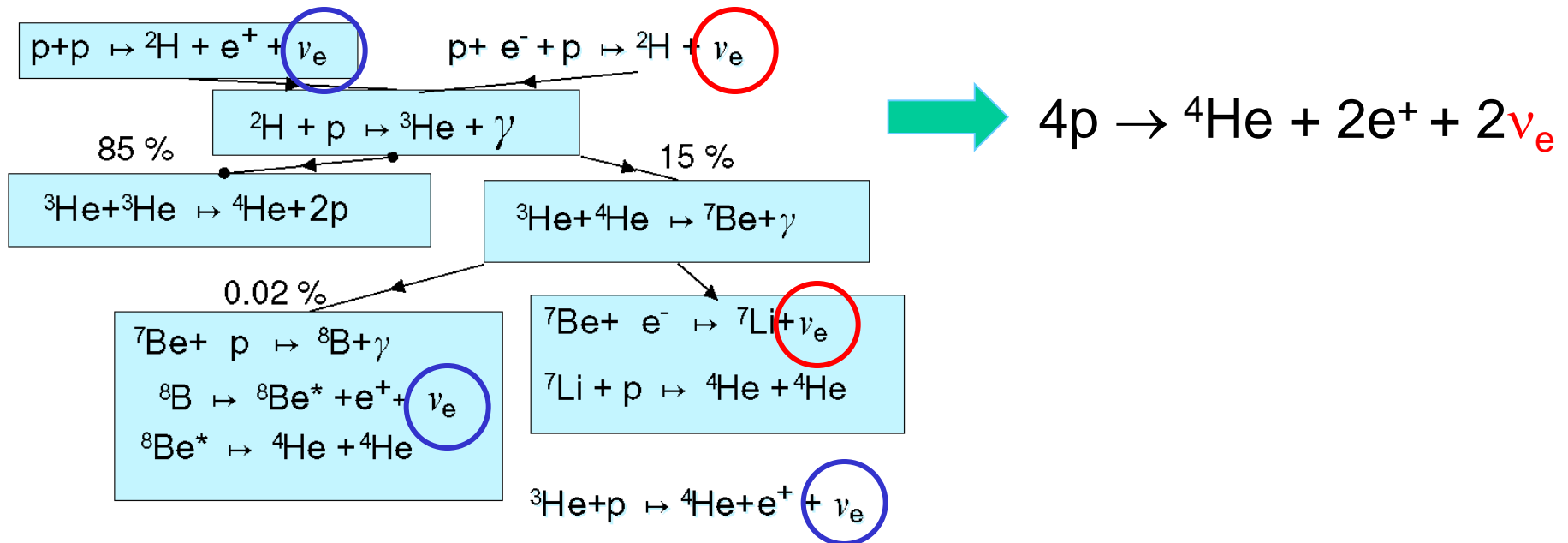
luminosità apparente del sole: $1.36 \text{ kW} / \text{m}^2$

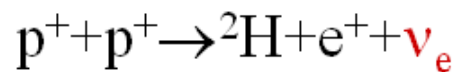
flusso neutrini solari $\cong 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

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

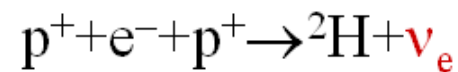
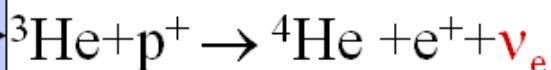
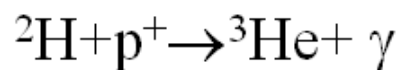
ciclo **protone-protone**



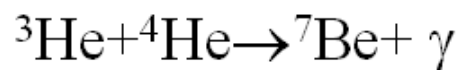
pp

99,77 %

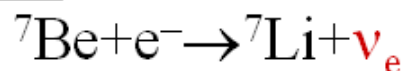
0,23 %

pep 10^{-5} %**hep**

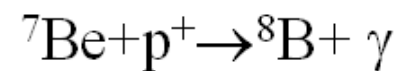
15,08 %

 **${}^7\text{Be}$**

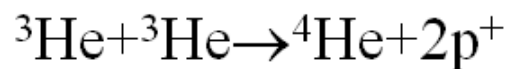
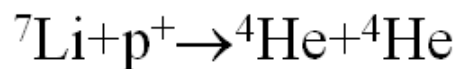
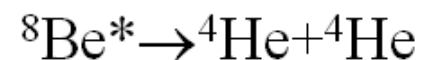
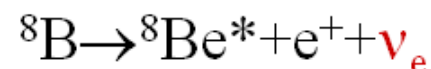
99,9 %



0,1 %

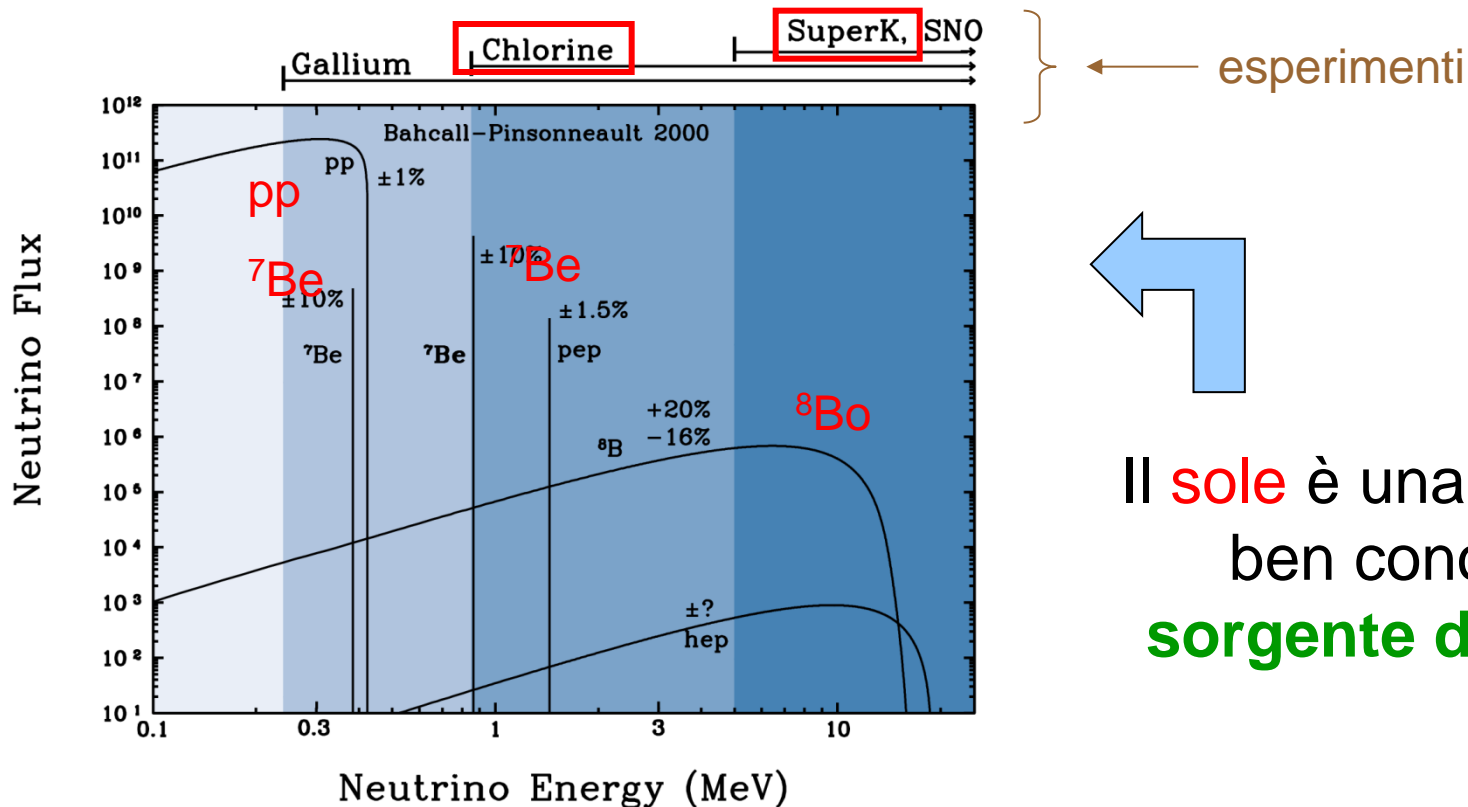
 **${}^8\text{B}$**

84,92 %

**ppI****ppII****ppIII**

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

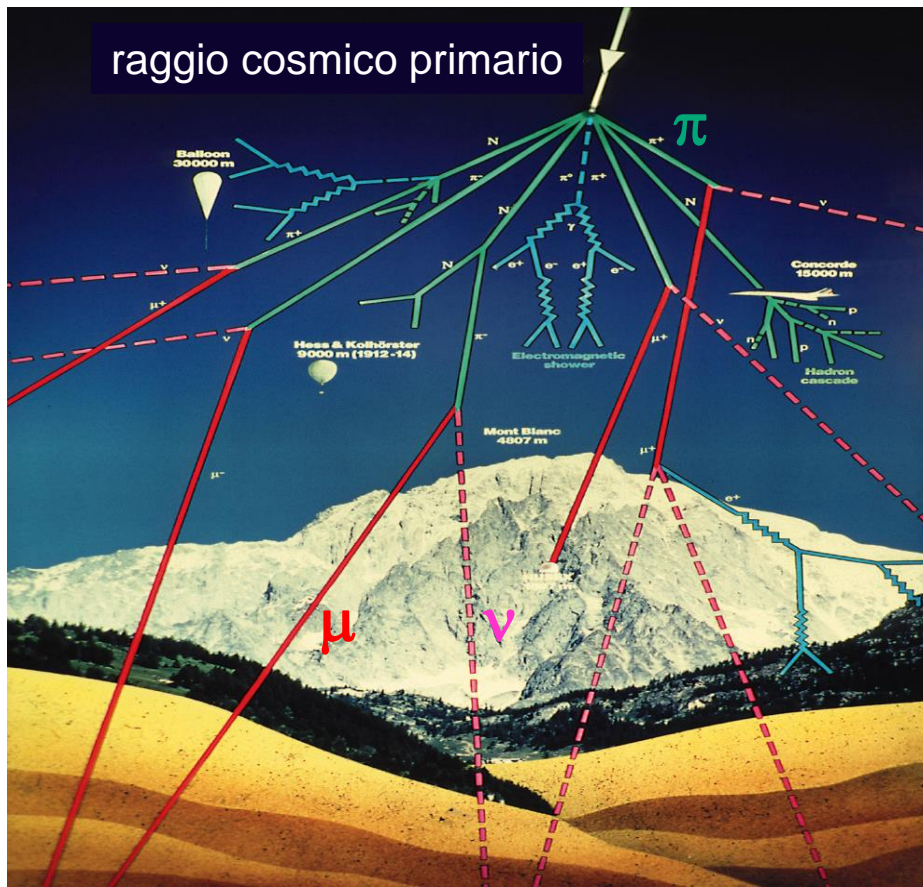


Il sole è una potente e ben conosciuta
sorgente di neutrini

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**)



$$p+N \rightarrow \pi + \text{adroni}$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

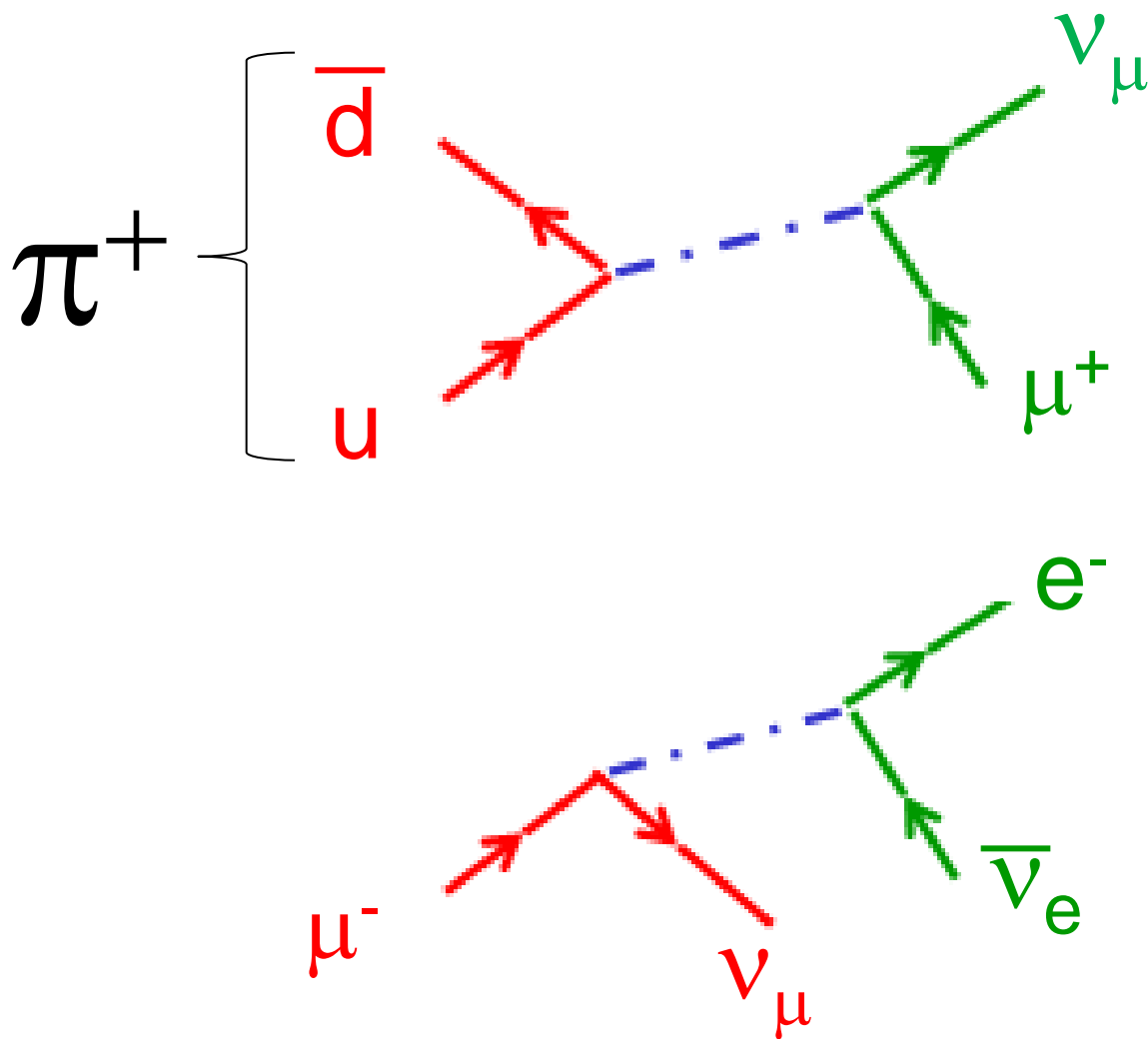


$$e^+ + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$



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:

$$\nu_e: \quad m < 2.0 \text{ eV}$$

$$\nu_\mu: \quad m < 0.19 \text{ MeV}$$

$$\nu_\tau: \quad m < 18.2 \text{ MeV}$$

da considerazioni di carattere cosmologico:



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

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

tre autostati di massa
distinti dai tre autostati di sapore

$$\nu_1 - \nu_2 - \nu_3$$

$$\nu_e - \nu_\mu - \nu_\tau$$

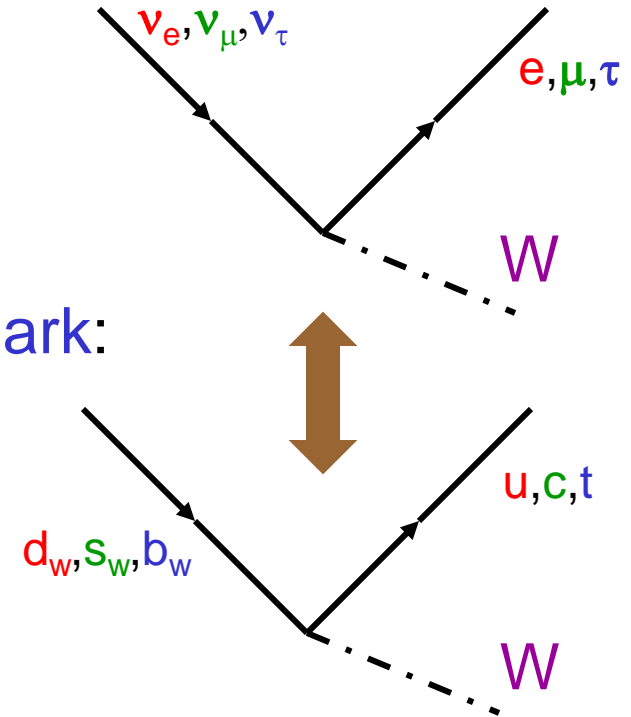
Gli autostati di sapore e gli autostati di massa

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

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

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**

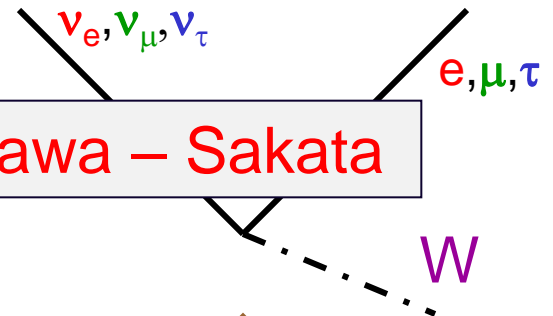
Questi parametri vanno misurati **sperimentalmente**

Gli autostati di sapore e gli autostati di massa

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

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

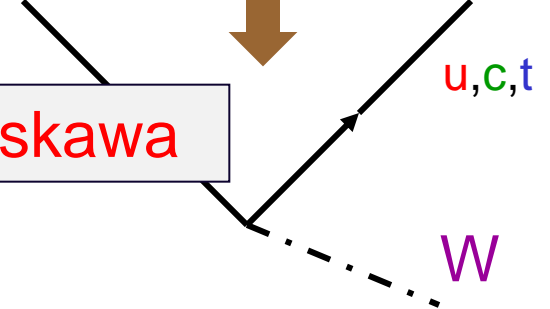
Matrice di Pontecorvo – Maki – Nakagawa – Sakata



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

$$\begin{bmatrix} d_w \\ u_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ u \end{bmatrix}$$

Matrice di Cabibbo – Kobayashi – Maskawa



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

Questi parametri vanno misurati **sperimentalmente**

Parametrizzazione standard

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{13}s_{23}c_{12}e^{i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{13}s_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - s_{13}c_{23}c_{12}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{13}c_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

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

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

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

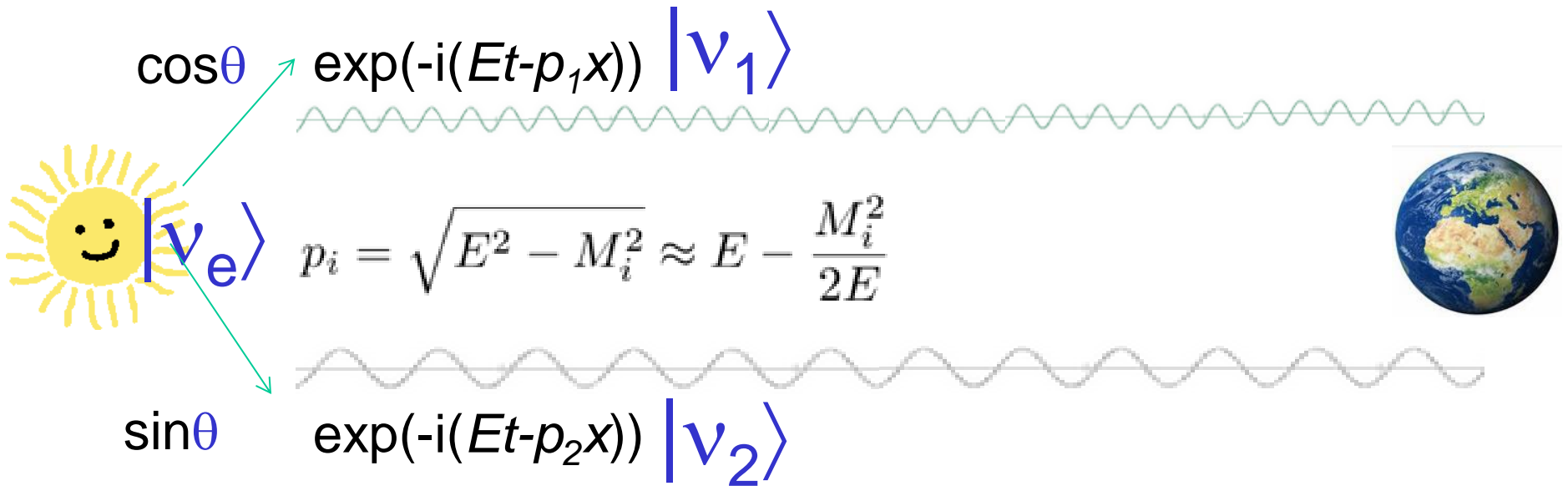
$$s_{13}^2 \equiv \sin^2 \theta_{13} = |U_{e3}|^2, \quad s_{23}^2 \equiv \sin^2 \theta_{23} = \frac{|U_{\mu 3}|^2}{1 - |U_{e3}|^2},$$

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

Approssimazione a due sapori Neutrini solari

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

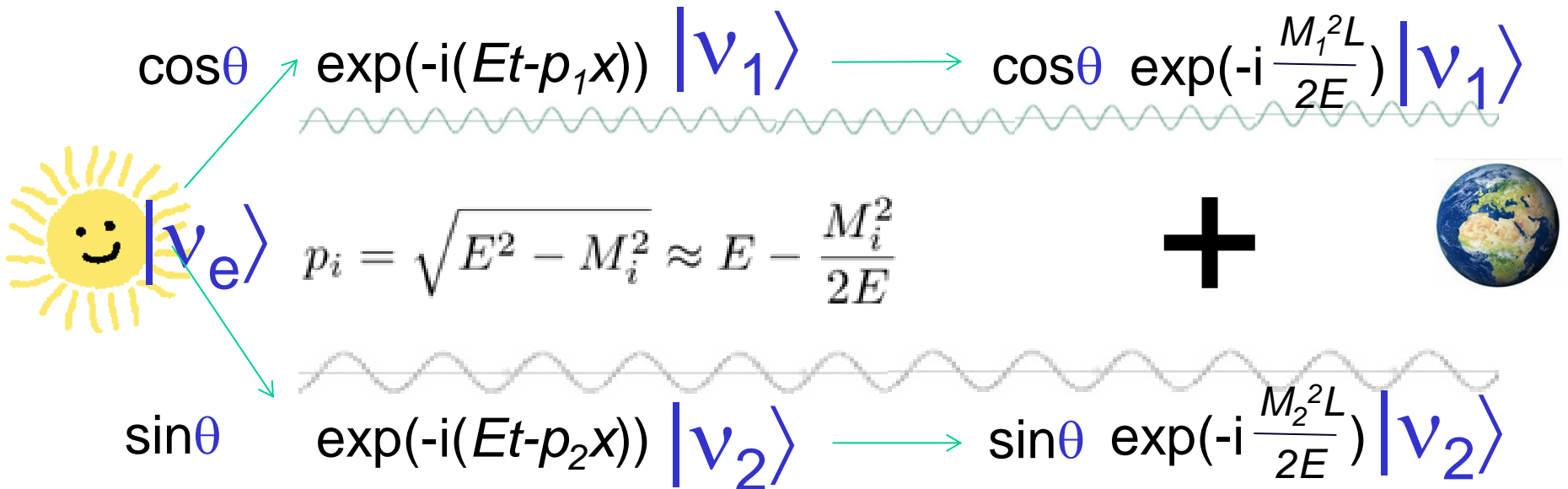
L



Approssimazione a due sapori Neutrini solari

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

L



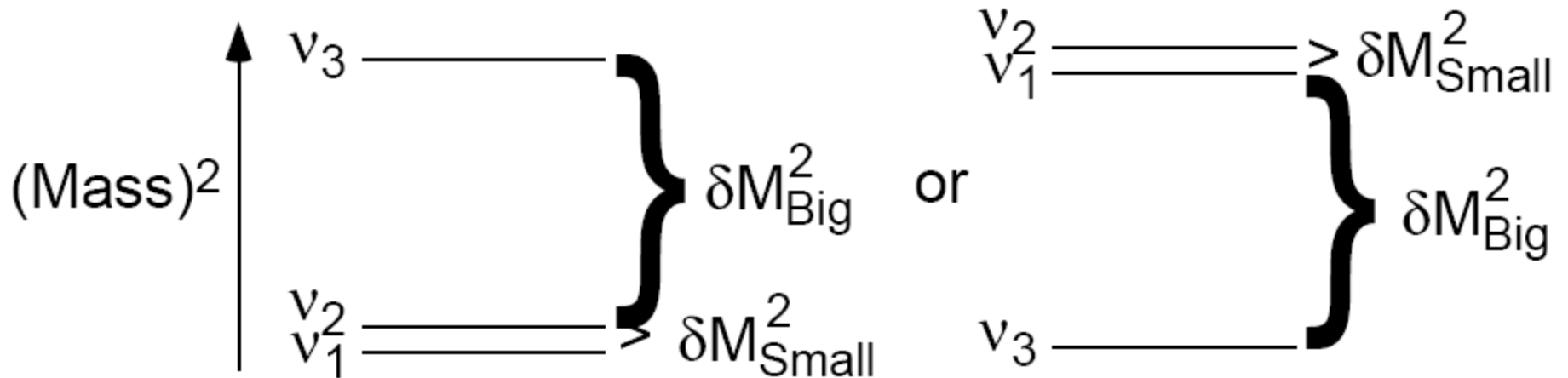
$\cos\theta \exp(-i(Et-p_1x)) |\nu_1\rangle \longrightarrow \cos\theta \exp(-i\frac{M_1^2 L}{2E}) |\nu_1\rangle$
 $\sin\theta \exp(-i(Et-p_2x)) |\nu_2\rangle \longrightarrow \sin\theta \exp(-i\frac{M_2^2 L}{2E}) |\nu_2\rangle$

$p_i = \sqrt{E^2 - M_i^2} \approx E - \frac{M_i^2}{2E}$

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

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

Possibili gerarchie delle masse

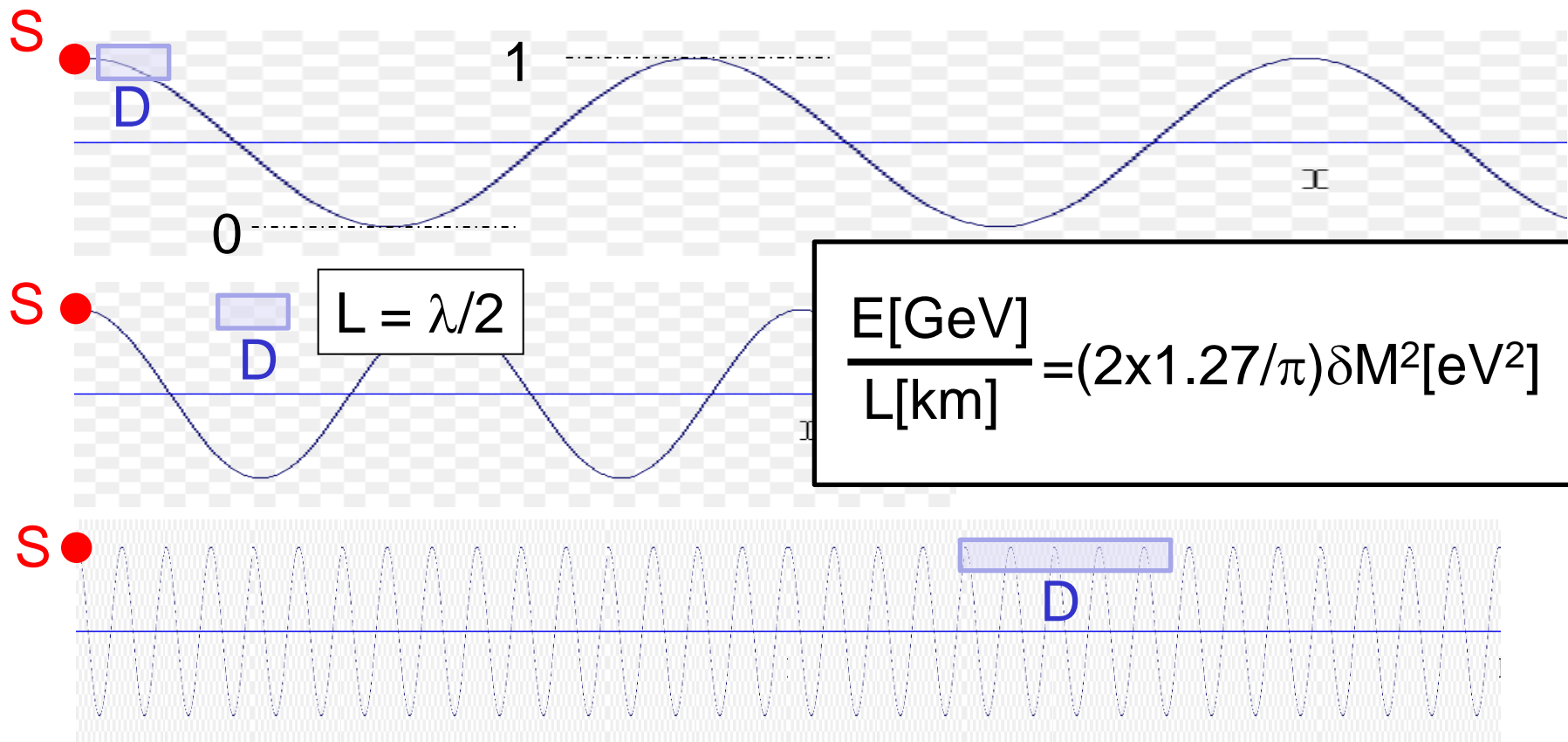


Approssimazione a due sapori

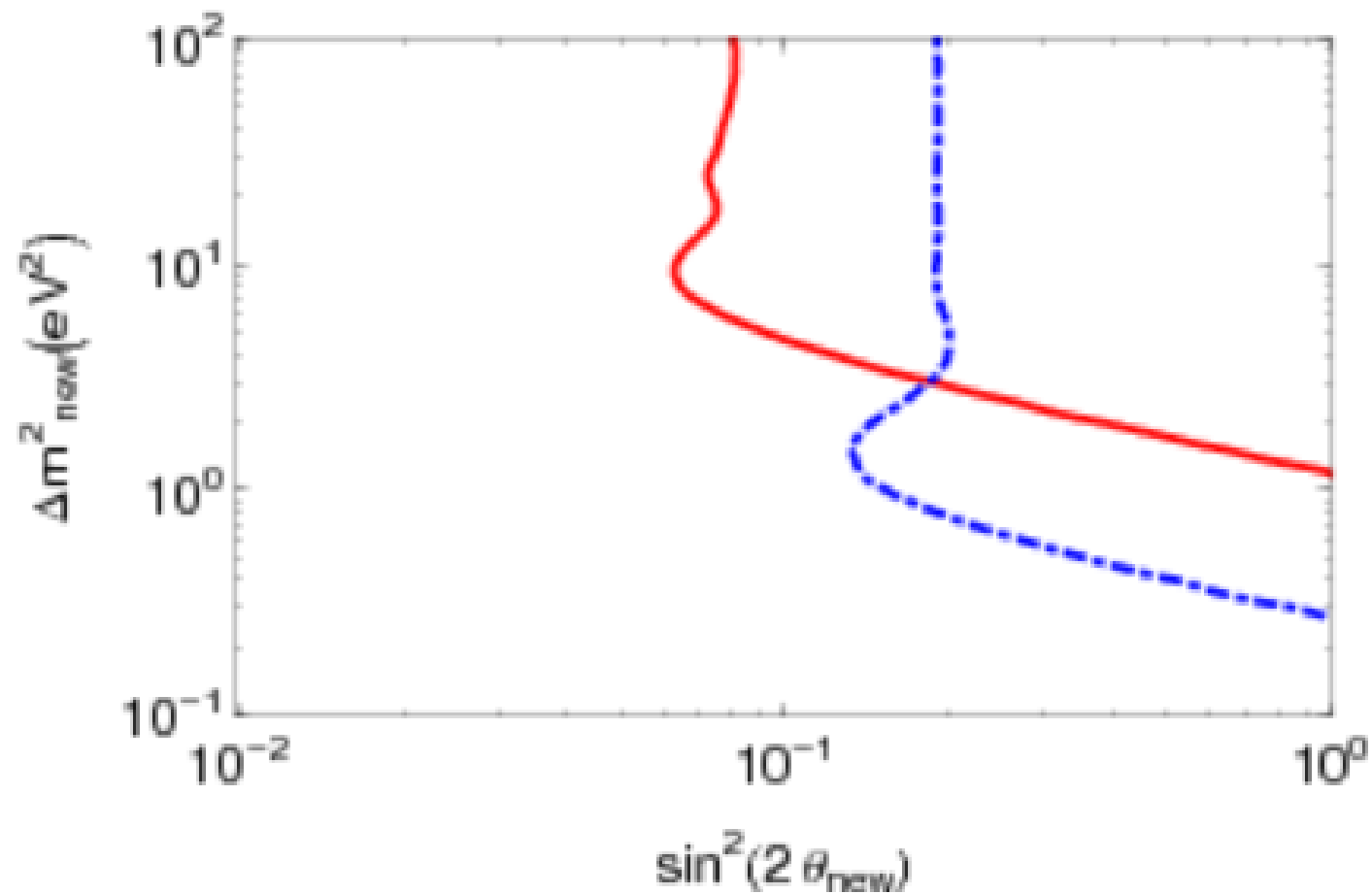
$$\delta M_{ij}^2 \equiv M_i^2 - M_j^2 \quad \begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix}$$

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

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



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)	$p+p \rightarrow d+e^++\nu_e$	10^8	10^{-3}	10^{11}	10^{-11}
atmosfera (scomparsa)	$p+N \rightarrow \pi + \text{adroni}$ $\pi^+ \rightarrow \mu^++\nu_\mu$ \downarrow $e^++\nu_e+\bar{\nu}_\mu$ $\pi^- \rightarrow \dots + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$	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)	$p+N \rightarrow \pi + \text{adroni}$ $\pi^+, K^+ \rightarrow \mu^++\nu_\mu$ $\pi^-, K^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$	10^3	10	10^2	10^{-2} “long baseline”
		1	1	1	1 “short baseline”

Le oscillazioni a tre sapori

il flusso totale è conservato

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

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

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

- 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 $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta}$

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

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

introducendo \hbar, c

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

“Never measure anything but frequency.”

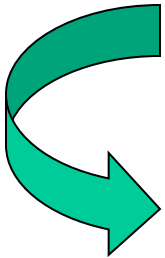
Isidor I. Rabi

Rivelazione di neutrini

Rivelare un neutrino è difficile:

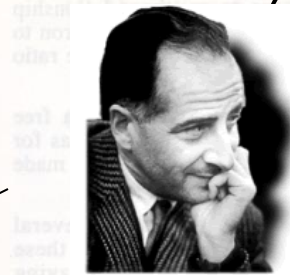
libero cammino medio di un neutrino di 1 MeV in acqua:

~100 anni luce



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

Metodi più usati:



INVERSE β PROCESS*

B.M.Pontecorvo

Chalk River Laboratories, Chalk River, Ontario

$(A, Z) + \nu \rightarrow (A, Z+1) + e^-$ decadimento beta inverso

$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$ diffusione elastica su elettrone

$\nu + X \rightarrow \begin{matrix} e \\ \mu \end{matrix} + X'$ corrente carica

$\nu + X \rightarrow \nu + X^{(\prime)}$ corrente neutra

I neutrini solari: gli esperimenti

♦ esperimenti < 2000

Radiochimici

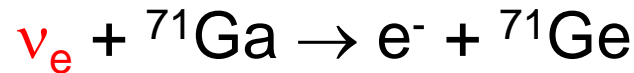
non in tempo reale
non spettro

Soglie:

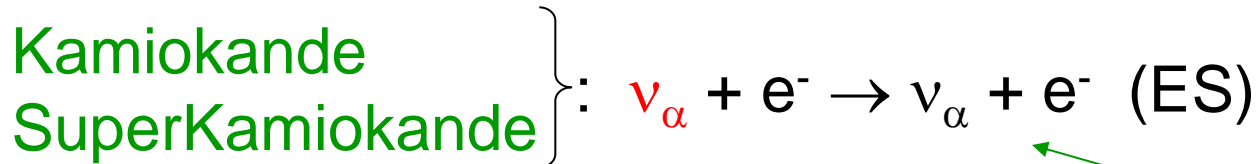


0.814 MeV

Gallex
SAGE
GNO



0.233 MeV



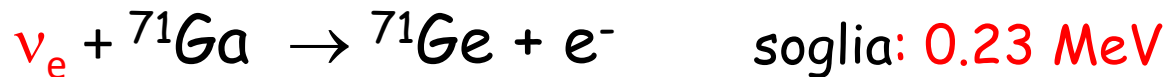
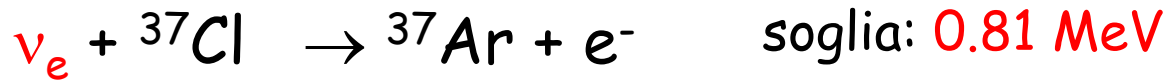
7.5-5.5 MeV

Čerenkov

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

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

Reazioni:

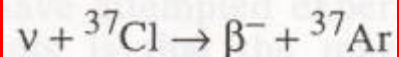


Sono radioattivi ma con vite medie lunghe (decine di giorni)

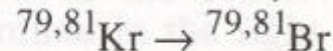
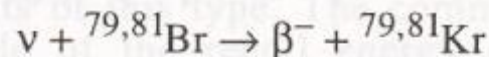
Pontecorvo, 1946

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)



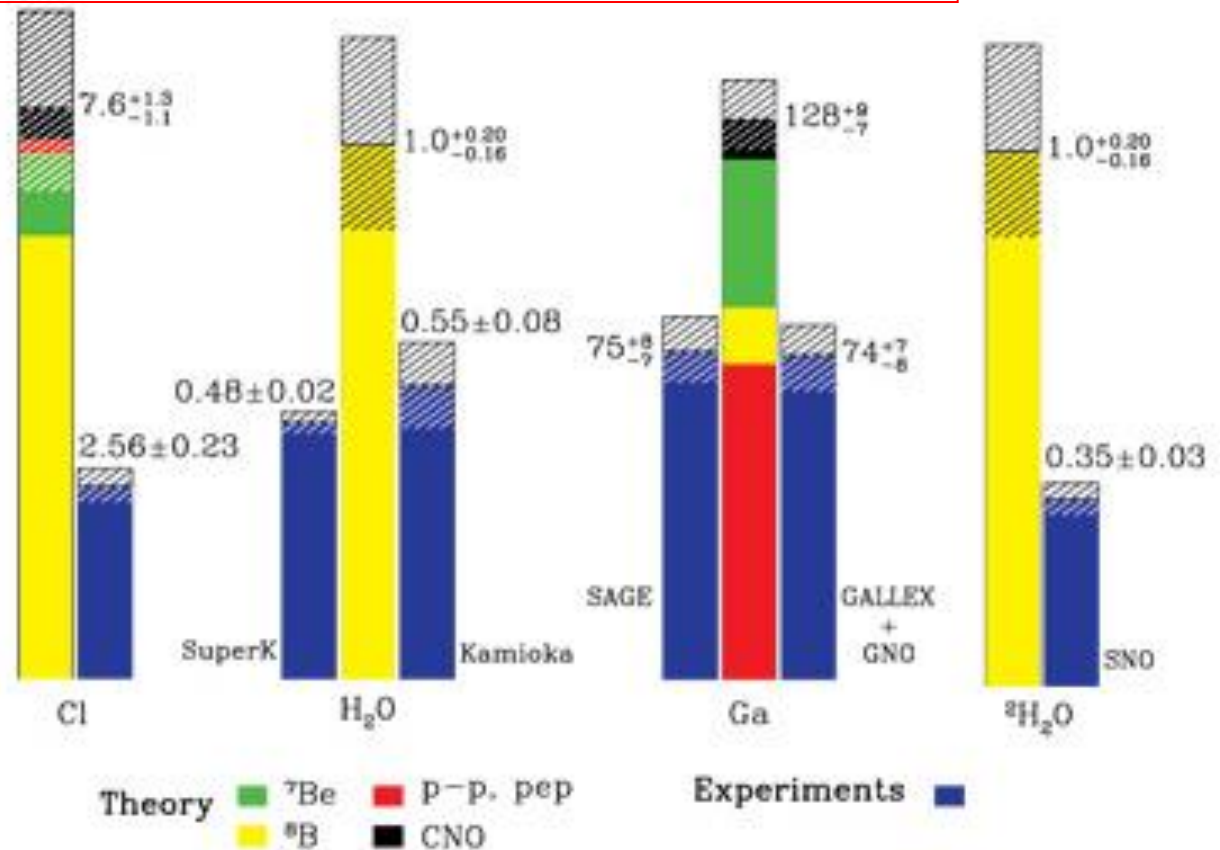
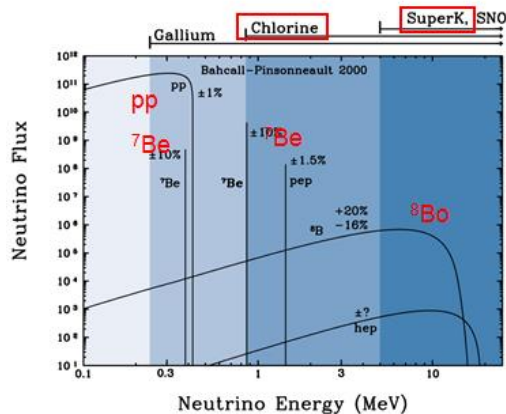
(34 h; emission of positrons of 0.4 MeV).

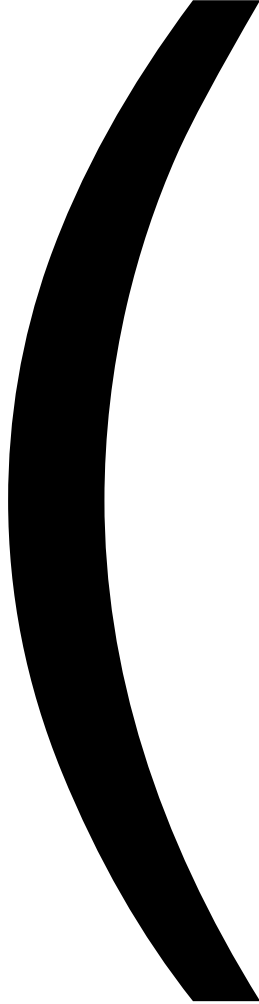
The experiment with Chlorine, for example, would consist in irradiating with neutrinos a large volume of Chlorine or Carbon Tetra-Chloride, for a time of the order of one month, and extracting the radioactive ${}^{37}\text{Ar}$ from such volume by boiling. The radioactive argon would be introduced inside 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**

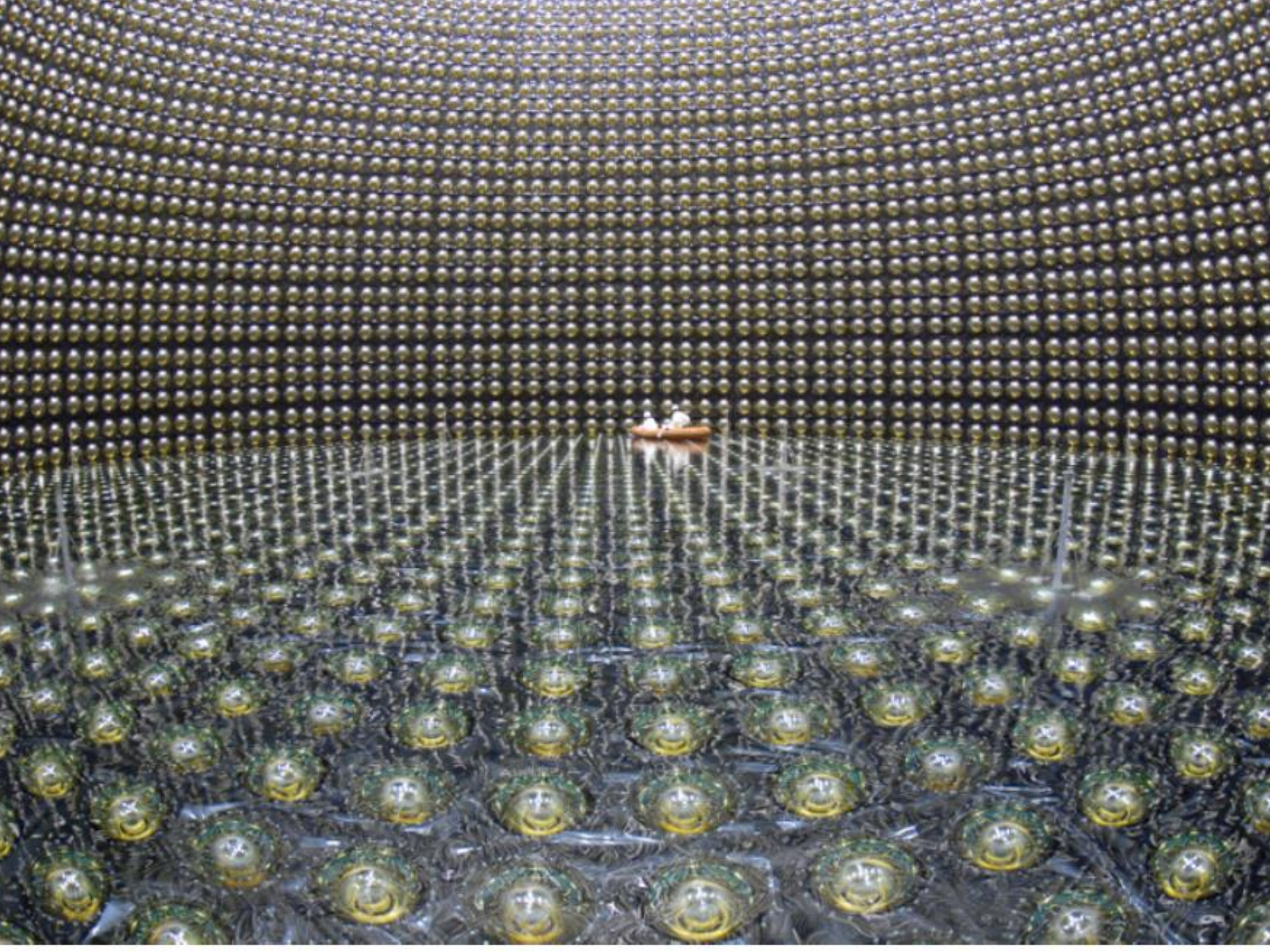
deficit sistematico in tutti gli esperimenti





In Giappone...





(Super)kamiokande (SK)

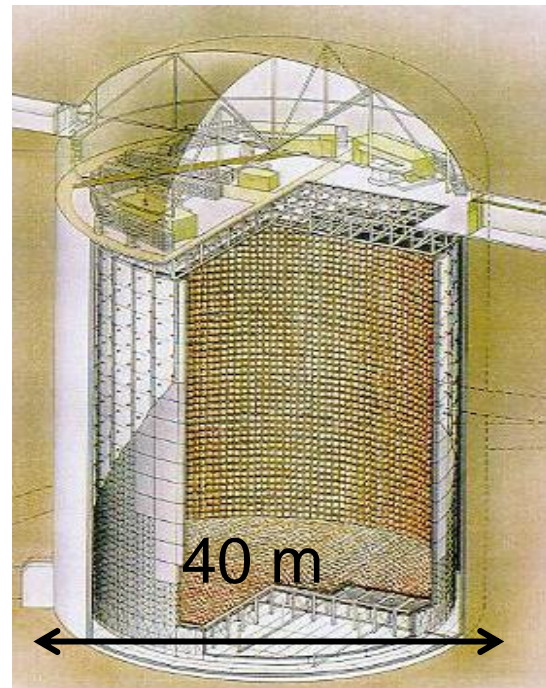
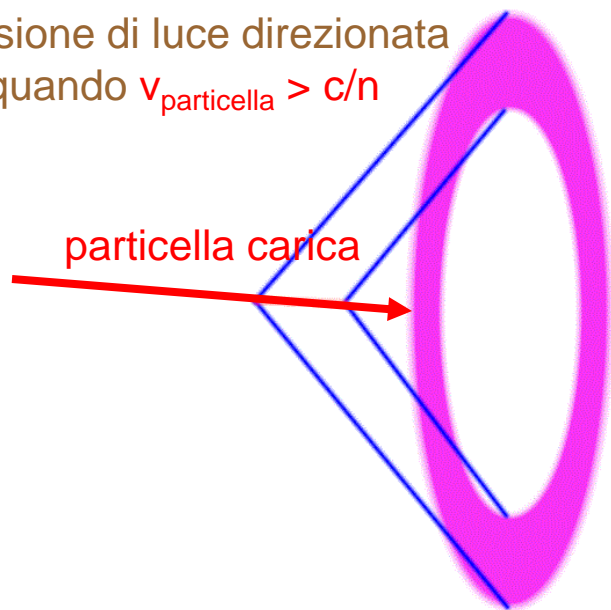
Kamioka: sito minerario
giapponese profondo ~1000 m

SK è una tanica sotterranea
contenente **50 kton di acqua**

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

i più grandi
al mondo

emissione di luce direzionata
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 di questo fondo e la scoperta
che ne segue è un classico esempio di
serendipity



NEUTRINO'98

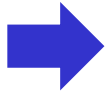
NEUTRINO'98 in Kamioka !

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)



NEUTRINO'98 WELCOME



A street in Takayama



ν 98, @Takayam

June 1998

Atmospheric neutrino results
from Super-Kamiokande & Kamiokande

— Evidence for ν_μ oscillations —

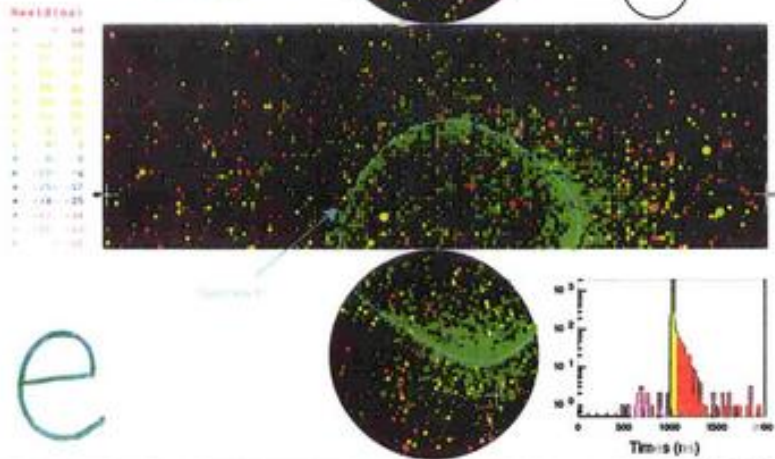
T. Kajita

Kamioka observatory, Univ. of Tokyo

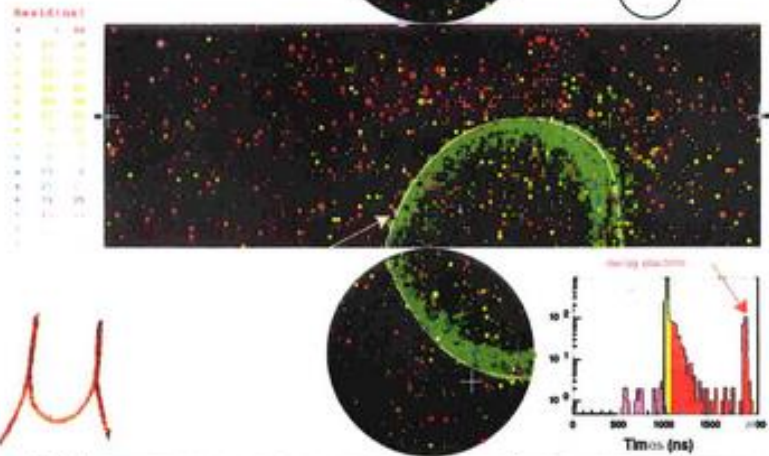
for the $\left\{ \begin{array}{l} \text{Kamiokande} \\ \text{Super-Kamiokande} \end{array} \right\}$ Collaborations

10.11.2019 10:00:00
 10.11.2019 10:00:00
 10.11.2019 10:00:00

4500 Mg/Vol

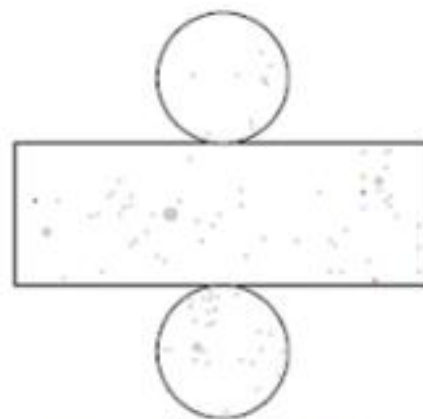
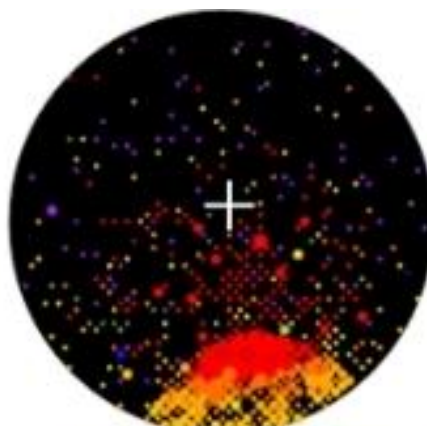


2007-07-07 09:00:00
 2007-07-07 09:00:00
 2007-07-07 09:00:00



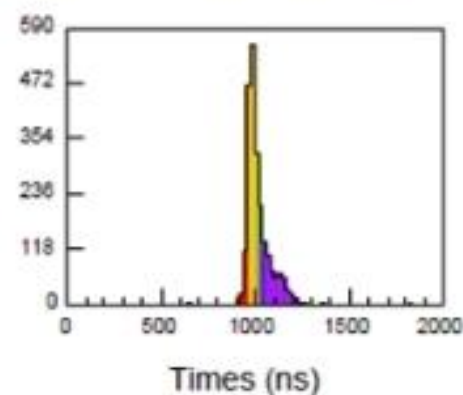
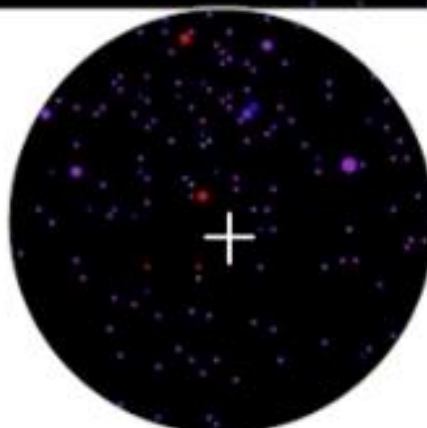
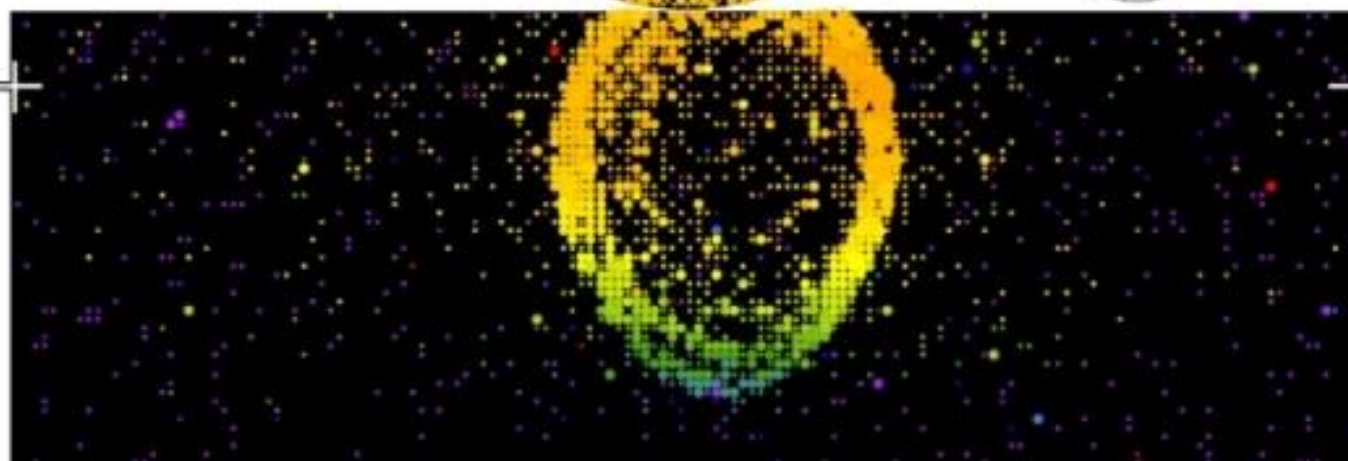
Super-Kamiokande

Run 3062 Event 475360
96-11-08:12:07:30
Inner: 2305 hits, 7763 pR
Outer: 5 hits, 4 pR (in-time)
Trigger ID: 0x03
D wall: 601.2 cm
PC mu-like, $p = 1088.0 \text{ MeV/c}$



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

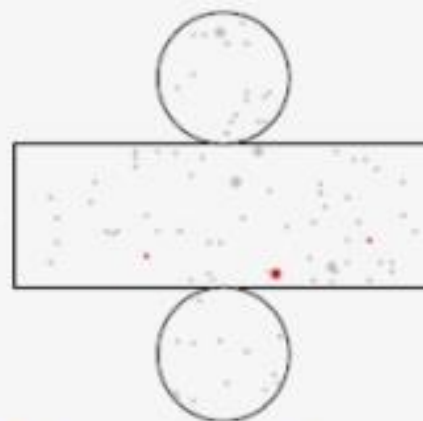
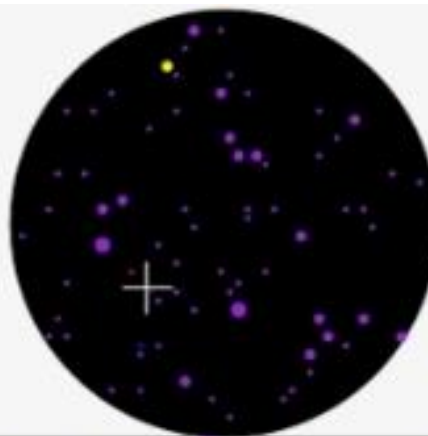
Inner: 1763 hits, 4003 pE

Outer: 2 hits, 5 pE (in-time)

Trigger ID: 0x03

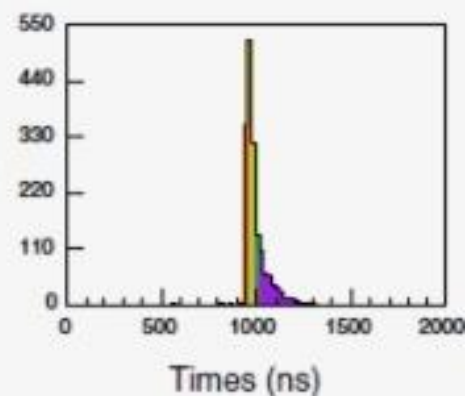
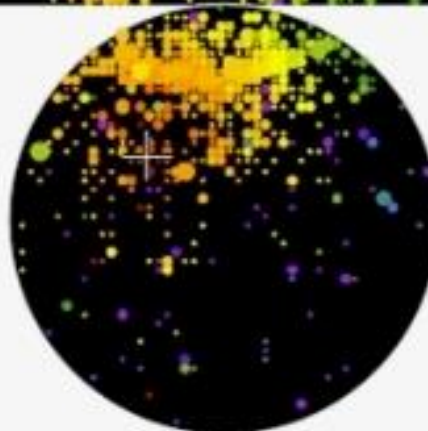
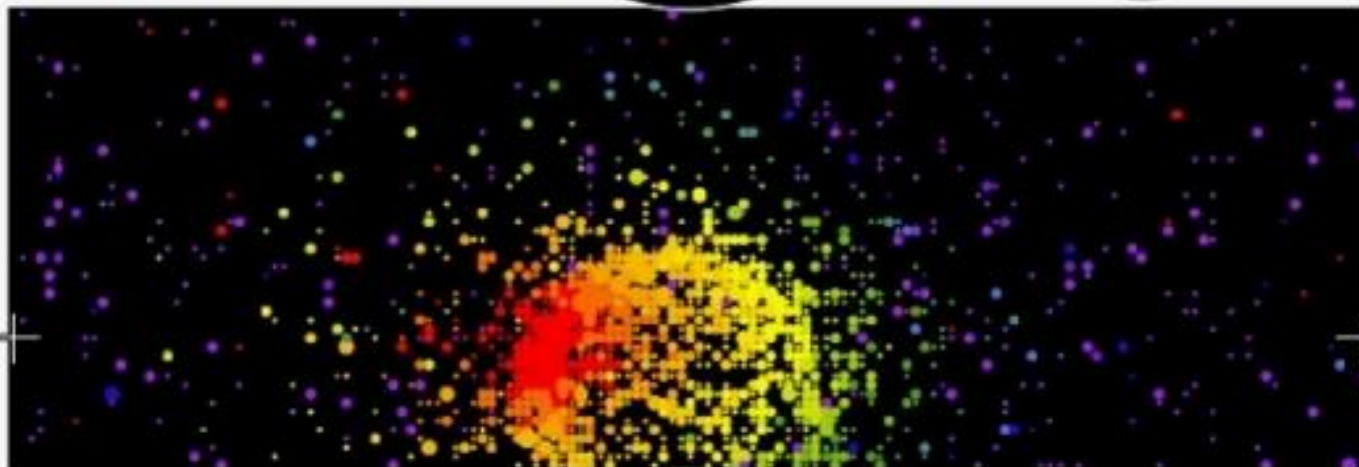
D wall: 897.4 cm

PC e-like, $p = 463.8 \text{ MeV}/c$



Time (ns)

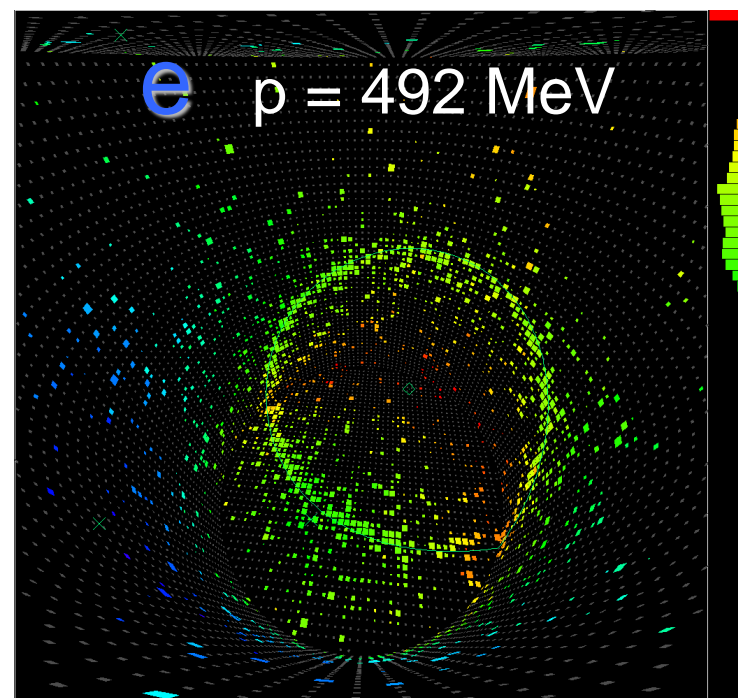
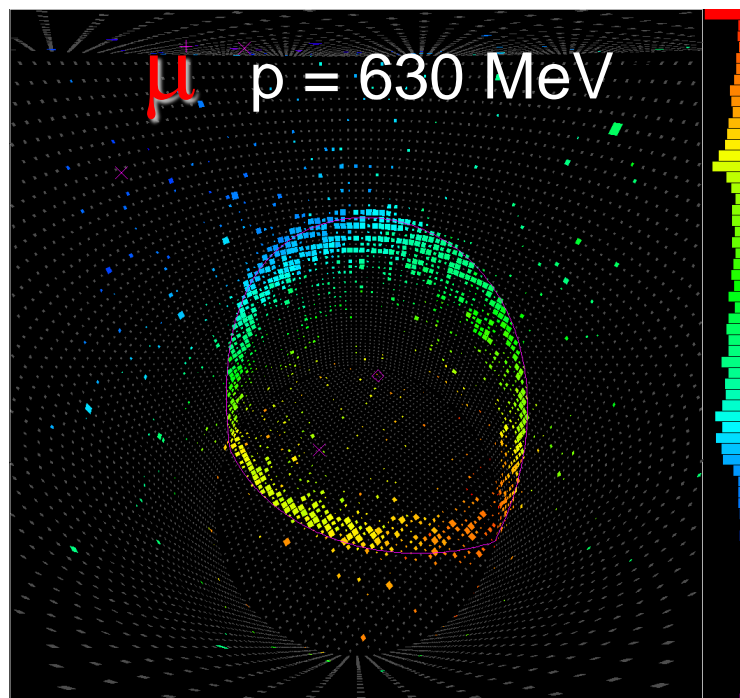
- < 950
- 950- 963
- 963- 968
- 968- 973
- 973- 978
- 978- 983
- 983- 988
- 988- 993
- 993- 998
- 998-1003
- 1003-1008
- 1008-1013
- 1013-1018
- 1018-1023
- 1023-1028
- >1028



Superkamiokande (SK): oscillazioni dei neutrini atmosferici

I segnali

SK distingue μ da e



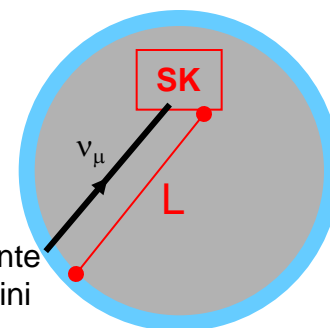
μ ed e di alta energia sono generati dai **corrispondenti neutrini** che interagiscono nel rivelatore o nella roccia vicina

misurando E e **direzione** del **leptone carico** si risale a:

$E_\nu - L_\nu$: analisi in E/L



sorgente
neutrini



Superkamiokande (SK): oscillazioni dei neutrini atmosferici

I risultati (1)

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

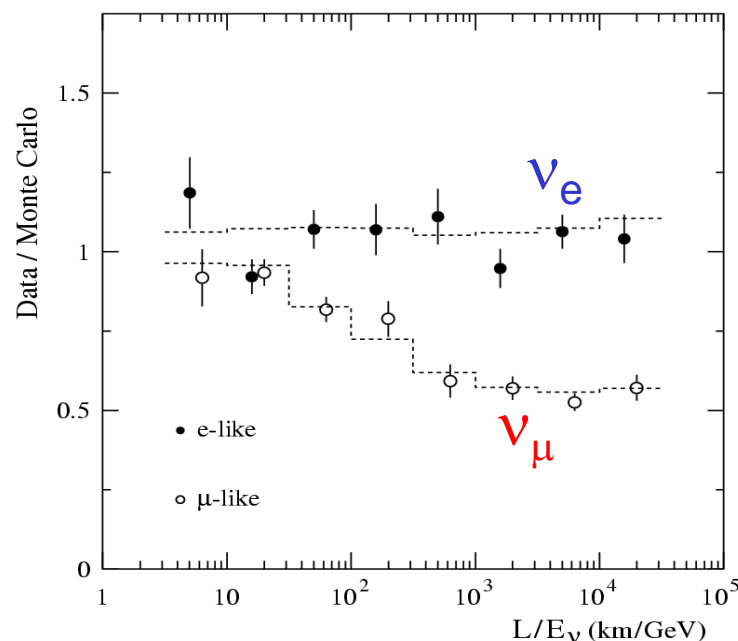
$$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$$

Il flusso di ν_e corrisponde alle aspettative

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

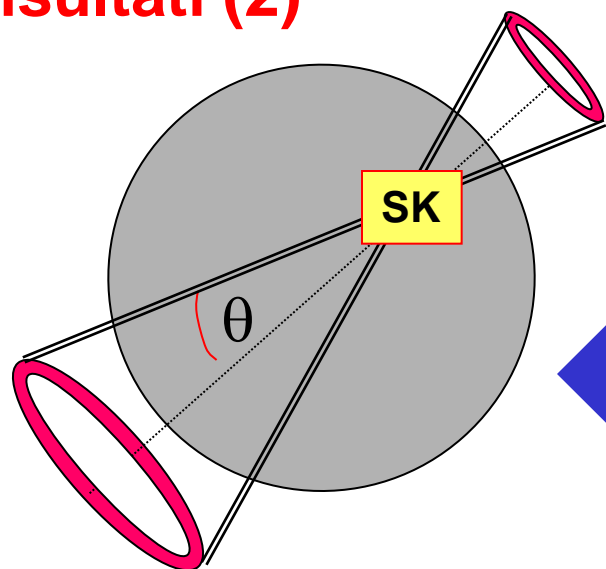
riduce incertezza sistematica

- 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 $2\pi d(\cos\theta)$

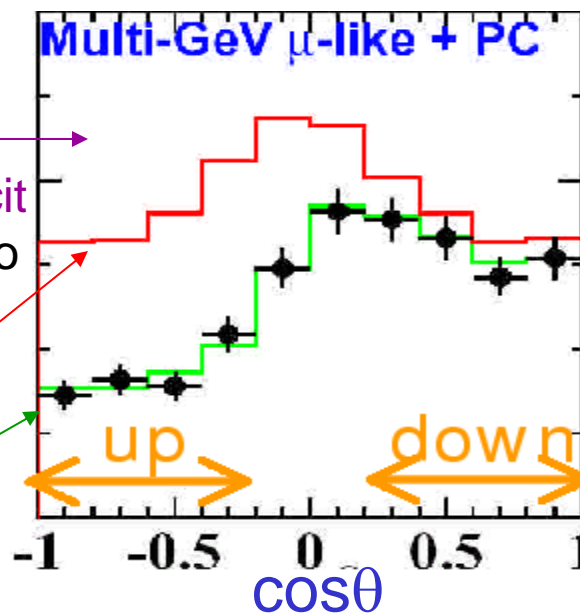
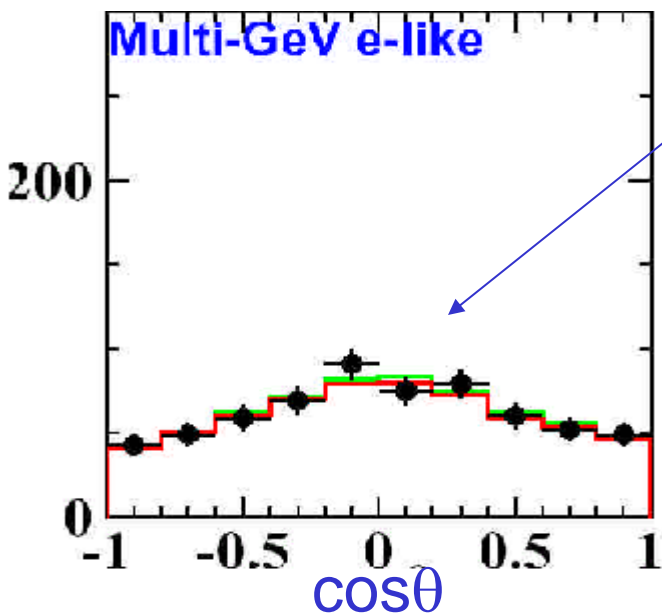
INVECE:

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

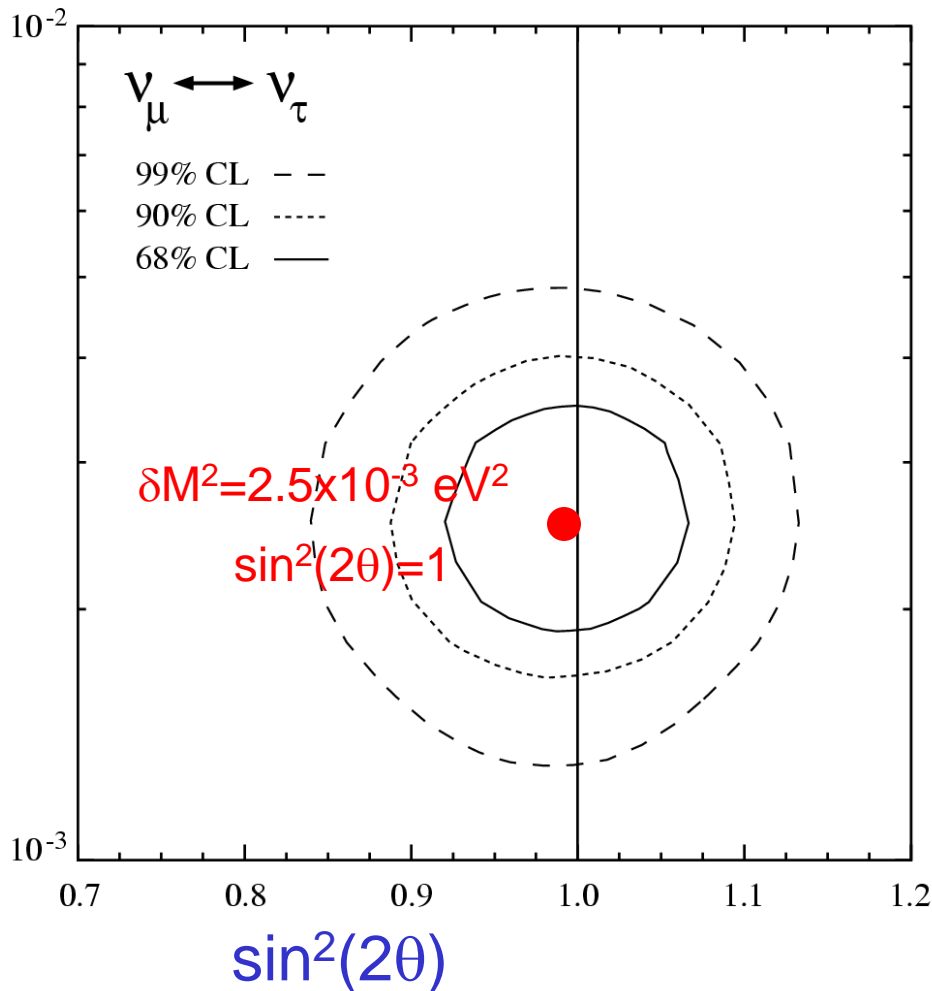
con oscillazioni



Superkamiokande (SK): oscillazioni dei neutrini atmosferici

I risultati (3)

δM^2



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

$$\sin^2(2\theta) \sim 1$$
$$\theta \sim \pi/4$$

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. $\langle E_\mu \rangle \approx 100 \text{ GeV}$
MACRO and other experiments
- Muons produced by neutrino interactions inside the detector or stopping muons $\langle E_\mu \rangle \approx 5 \text{ GeV}$

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

	data/predict R=data/predict	No oscillations	With oscillations $10^{-3} < \delta m^2 < 10^{-2}$
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)

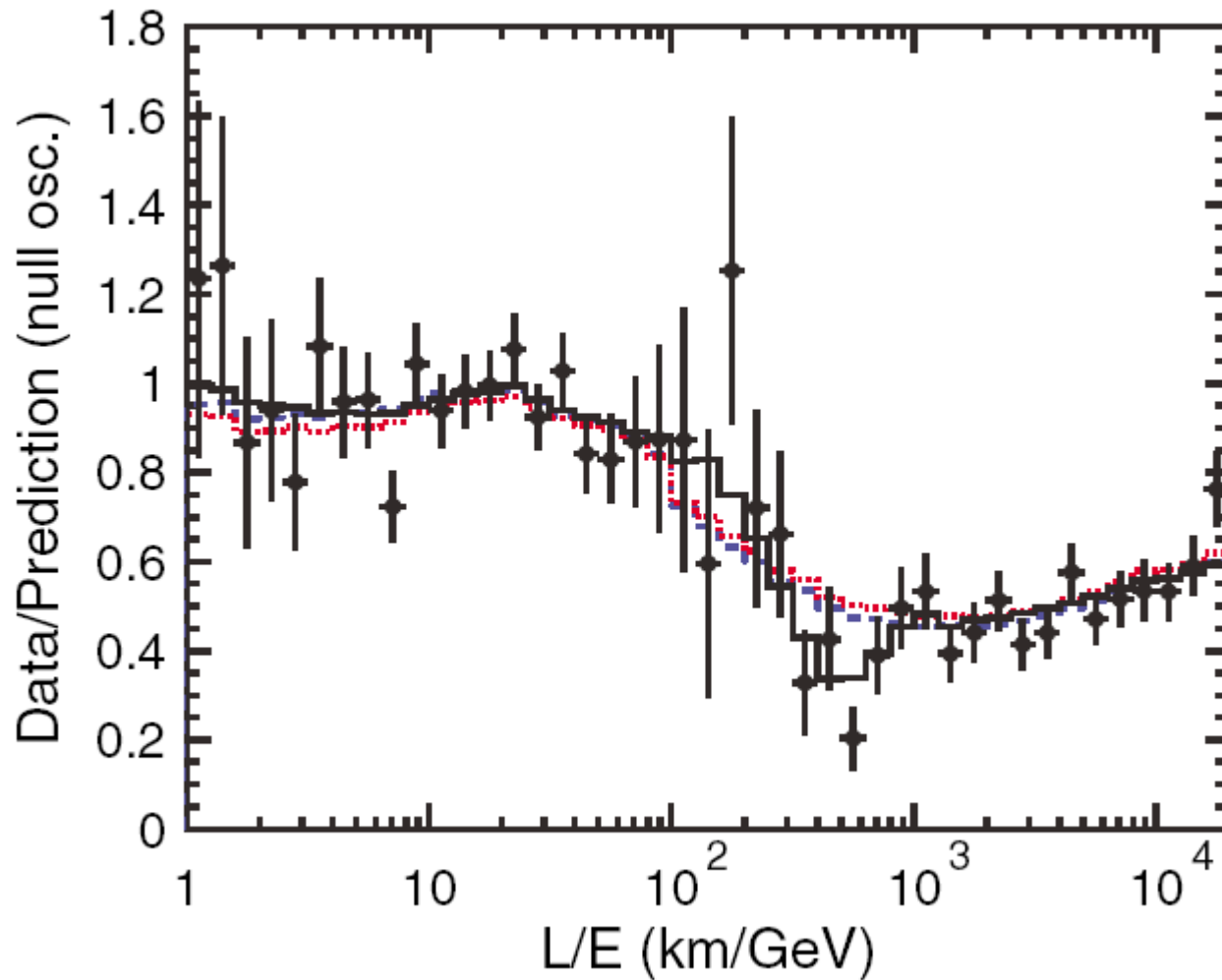
(Received 27 April 2004; published 3 September 2004)

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; $1.9 \times 10^{-3} < \Delta m^2 < 3.0 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ and $\sin^2 2\theta > 0.90$ at 90% confidence level.

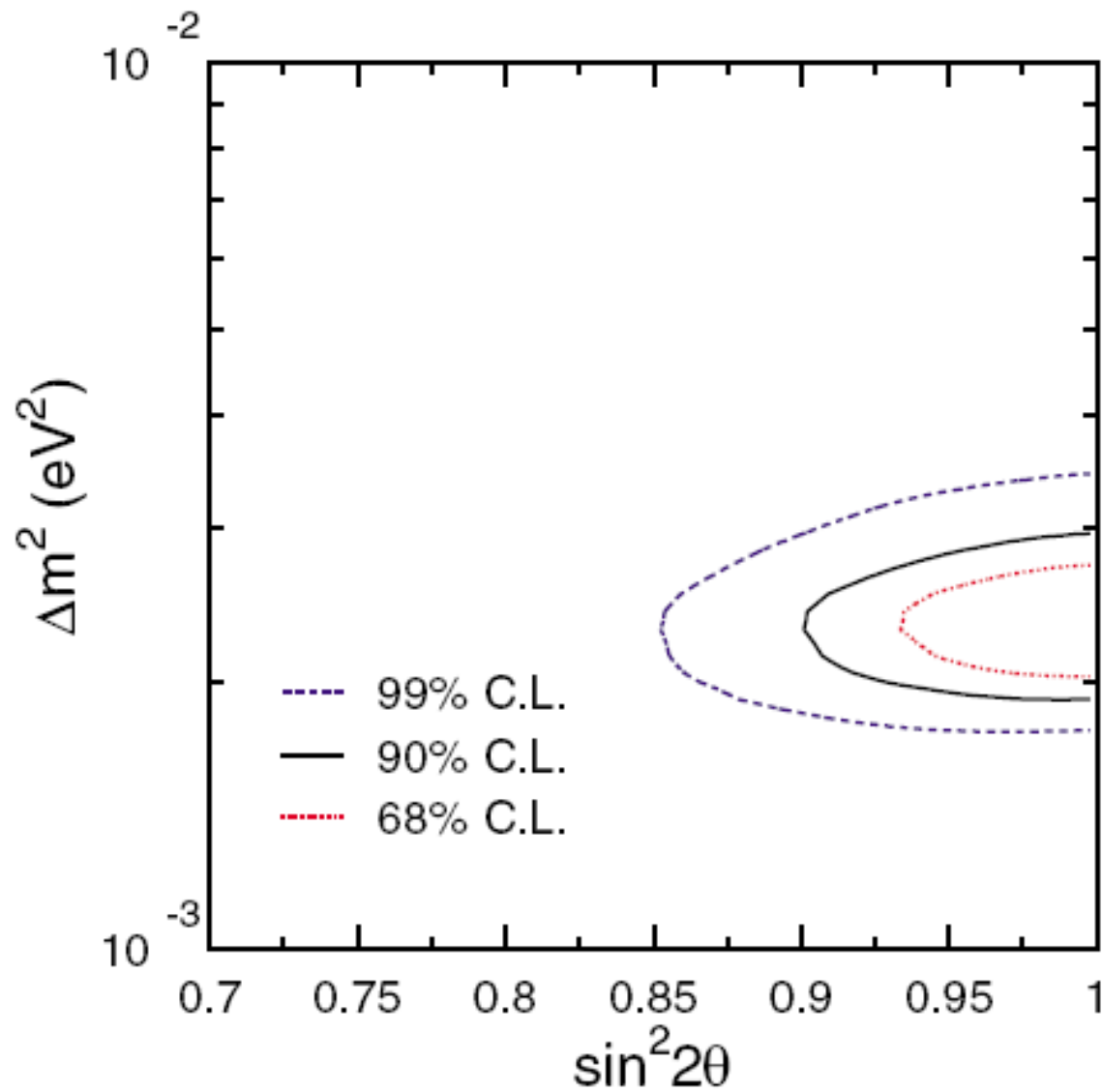
DOI: 10.1103/PhysRevLett.93.101801

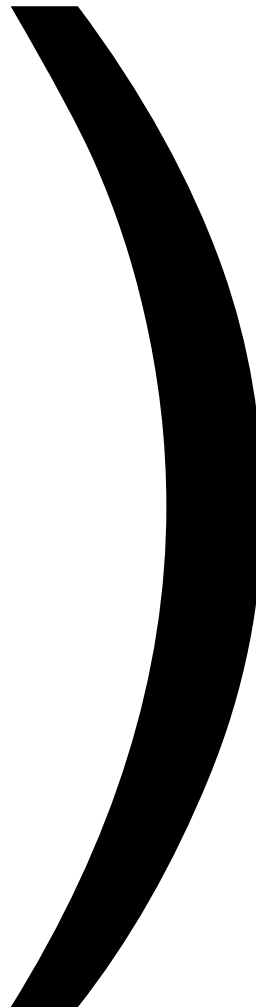
PACS numbers: 14.60.Pq, 96.40.Tv

Superkamiokande (SK): misure più raffinate



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

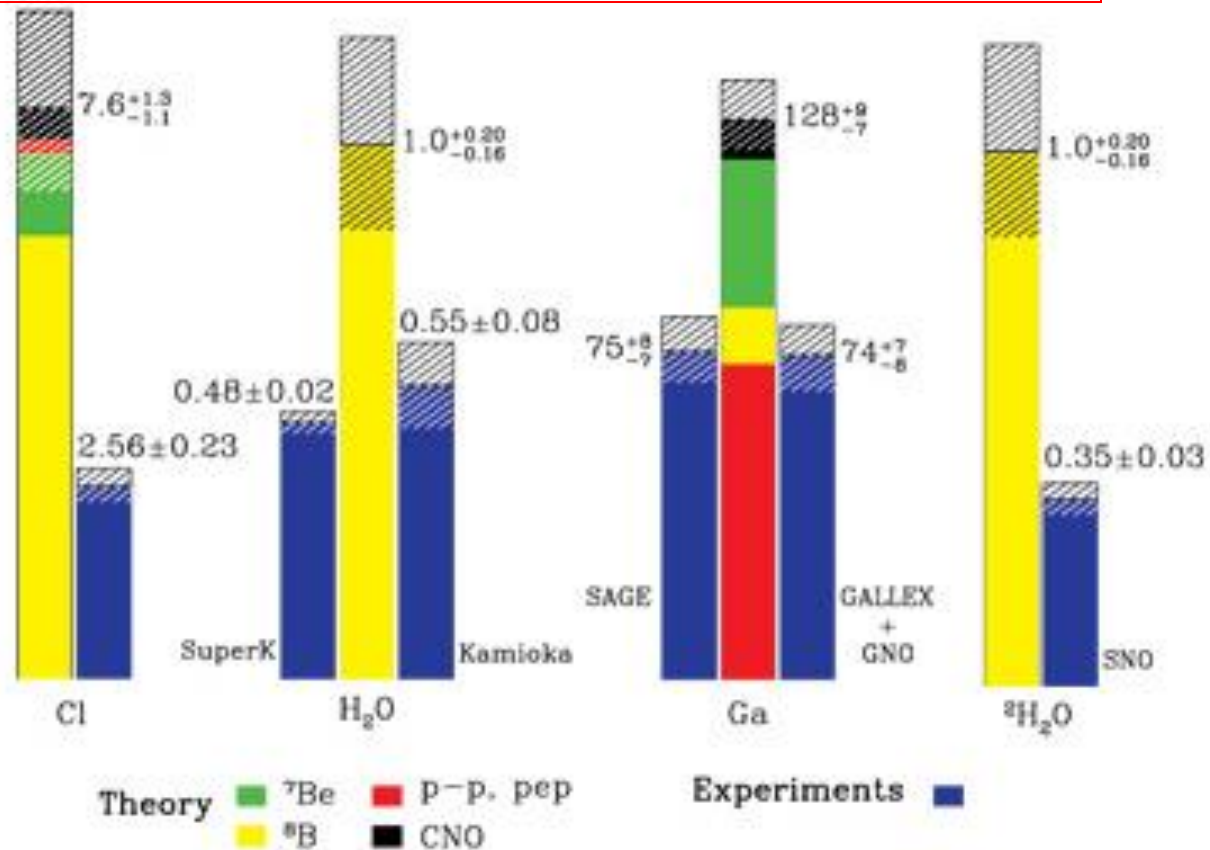




Il cosiddetto “solar neutrino puzzle”

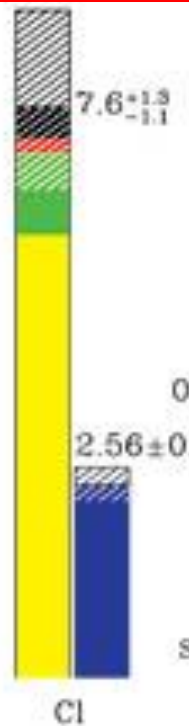
Flussi di neutrini **misurati** confrontati con **previsioni del SSM**

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)

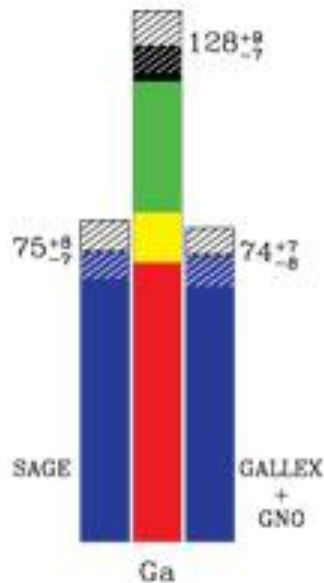


ipotizzarono che il deficit fosse dovuto
alla oscillazione di neutrini $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$

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 sapori** nella **materia** (effetto **MSW**)

densità di elettroni

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

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

angolo di mixing
nel vuoto

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

r : distanza dal centro del sole

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

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

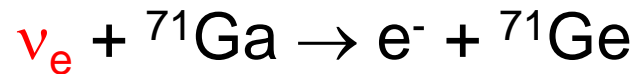
non in tempo reale
non spettro

Soglie:

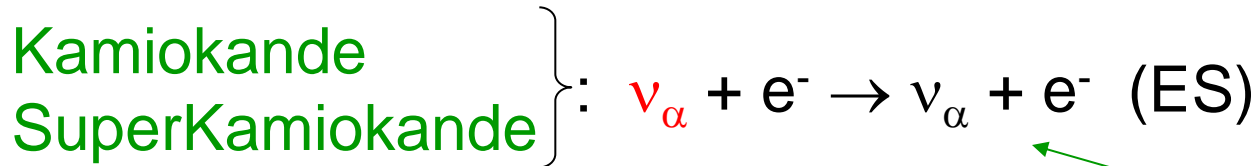


0.814 MeV

Gallex
SAGE
GNO



0.233 MeV



7.5-5.5 MeV

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

I neutrini solari: gli esperimenti

◆ esperimenti storici

Homestake: $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$ 0.814 MeV

Gallex
SAGE
GNO } : $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow e^- + {}^{71}\text{Ge}$ 0.233 MeV

Kamiokande
SuperKamiokande } : $\nu_\alpha + e^- \rightarrow \nu_\alpha + e^- \text{ (ES)}$ 7.5-5.5 MeV

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

SNO: $\left\{ \begin{array}{ll} \nu_\alpha + e^- \rightarrow \nu_\alpha + e^- & \text{(ES)} \\ \nu_e + d \rightarrow p + p + e^- & \text{(CC)} \\ \nu_\alpha + d \rightarrow p + n + \nu_\alpha & \text{(NC)} \end{array} \right.$ 6.75 MeV

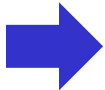




NEUTRINO'98

* 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.

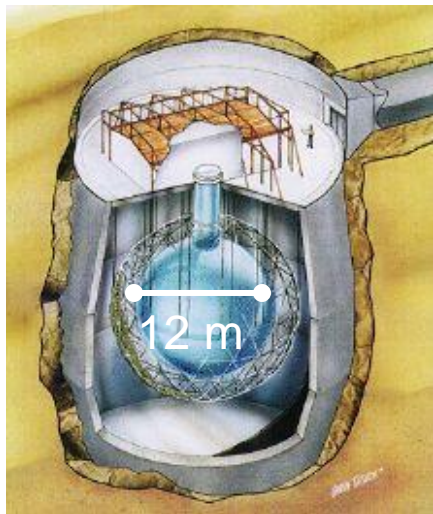
Main Features:

- 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 D₂O, shielded by 7,000 tonnes of H₂O.
- 9,600 8" Hamamatsu PMTs, TTS = 1.6 ns.

Participating institutions:

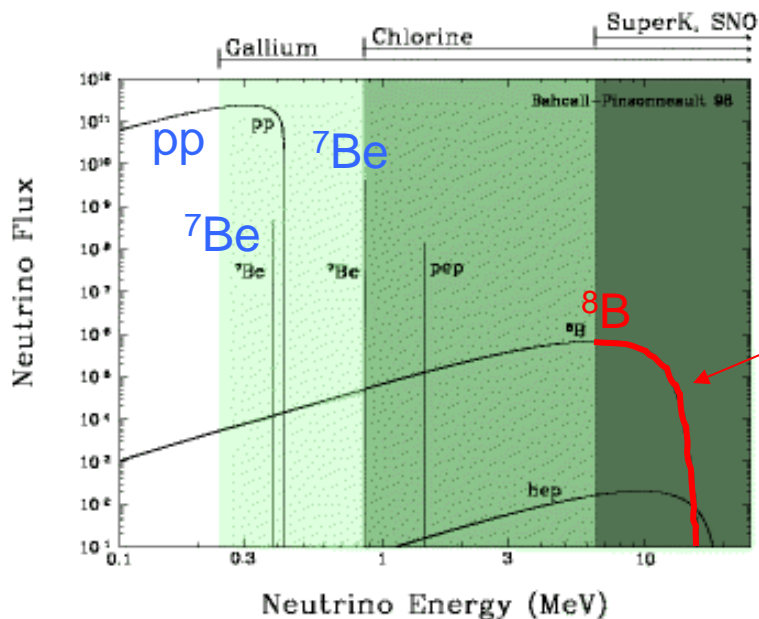
Canada	Queen's University Guelph University Laurentian University Univ of British Columbia Centre for Research in Particle Physics
USA	Univ of Pennsylvania Univ of Washington Los Alamos National Lab Lawrence Berkeley National Lab Brookhaven National Lab
UK	Oxford University

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

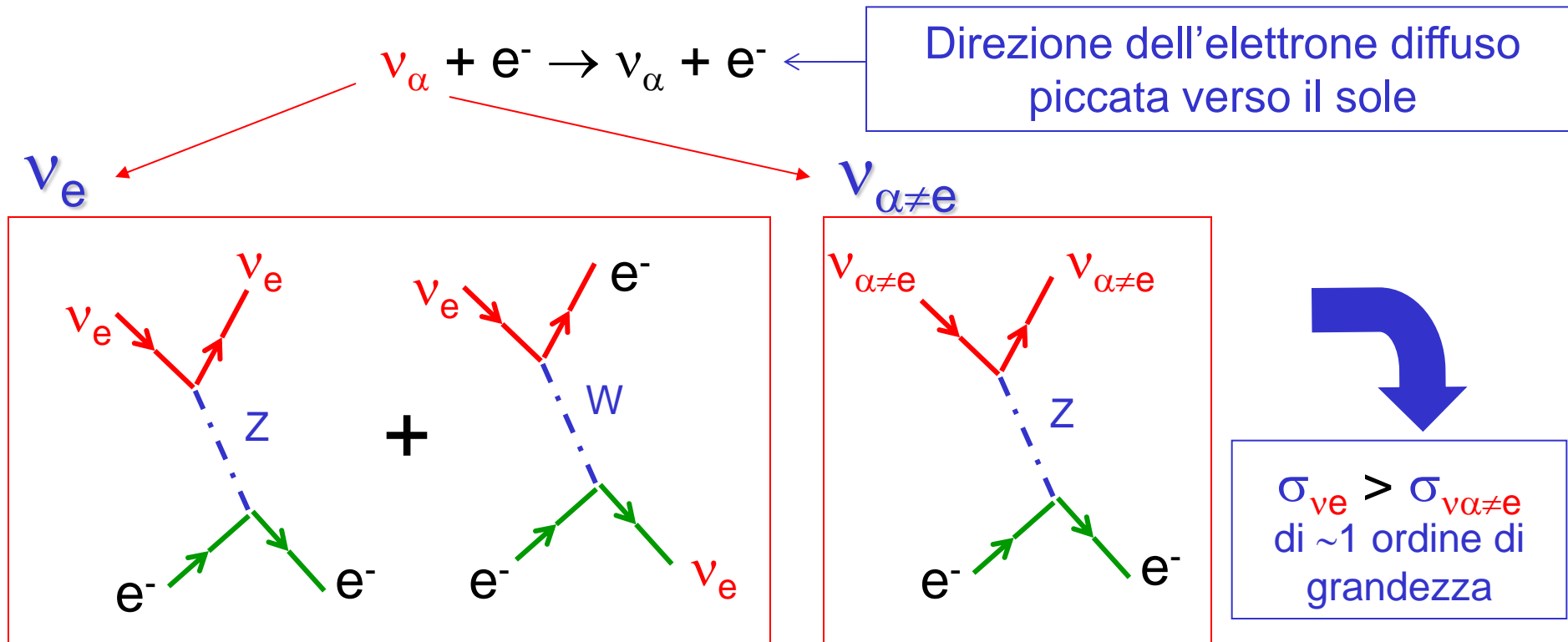


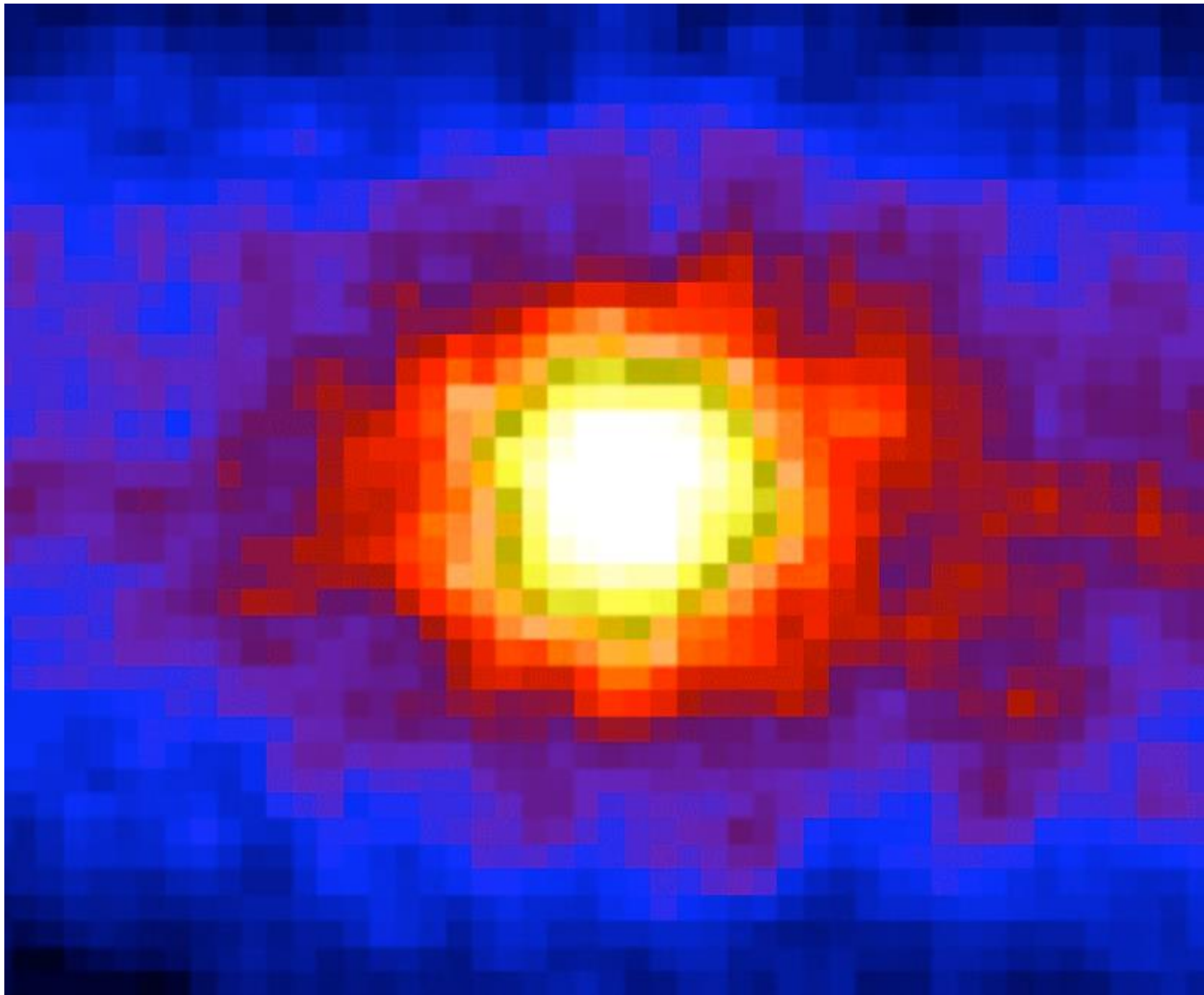
SNO e **SK** vedono la stessa
porzione (minima) di
spettro dei neutrini solari,
(soglia a circa **7 MeV**)

Subdury Neutrino Observatory (SNO)

Evidenza di oscillazioni dei neutrini solari (1)

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

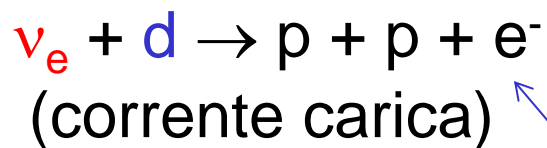




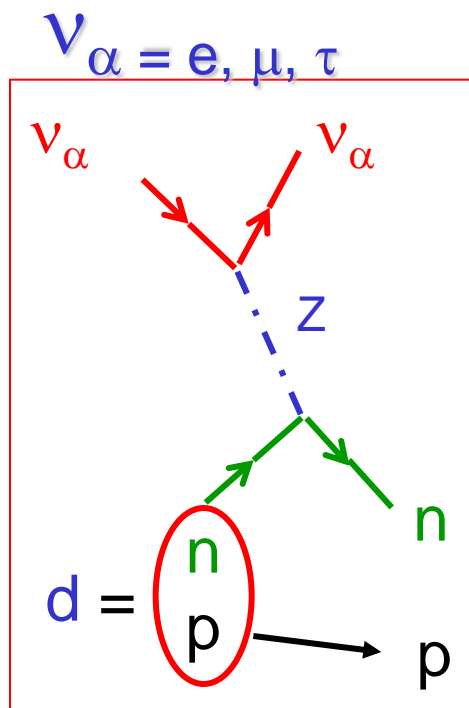
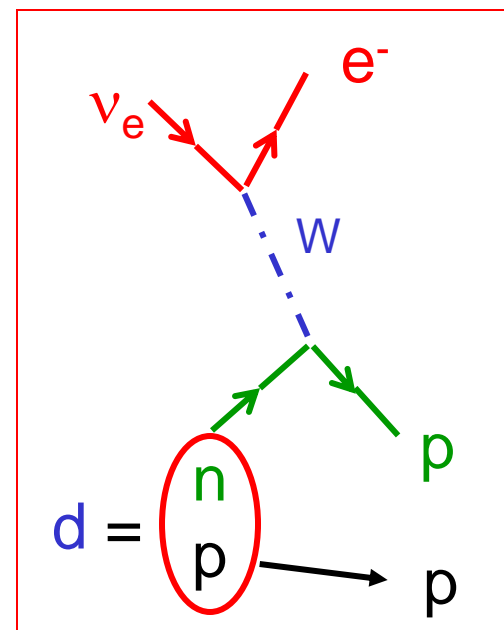
Subdury Neutrino Observatory (SNO)

Evidenza di oscillazioni dei neutrini solari (2)

SNO distingue il contributo dei soli ν_e



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



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



Cattura radiativa del
neutrone su deuterio

DETECTION REACTIONS

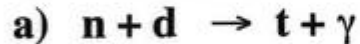
1) Inverse beta decay (Charged Current)



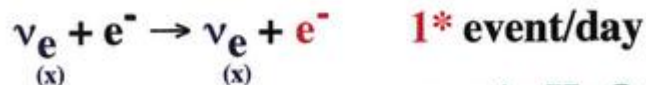
2) Deuteron disintegration (Neutral Current)



Neutron Observation:



3) Electron Scattering (ES)



same as in H₂O

* 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

⁹B 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 (^8B)

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

\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 (^8B)

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

SNO_{CC}

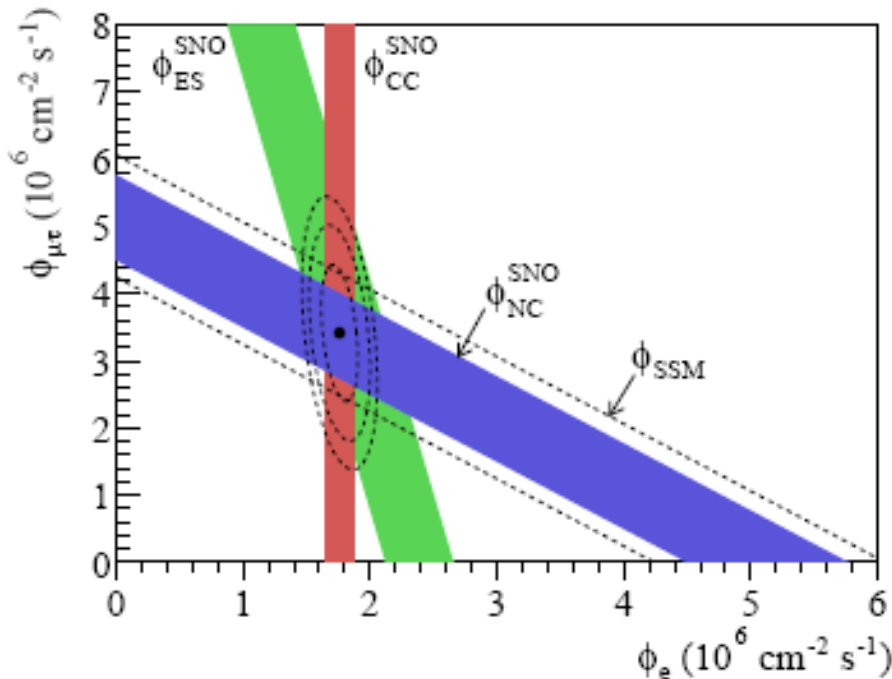
$\text{SNO}_{\text{CN}} - \text{SNO}_{\text{CC}}$

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

exp

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

theo



*The
Bahcall's
Glory*



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

Q. R. Ahmad,^{1,7} R. C. Allen,⁴ T. C. Andersen,⁶ J. D. Anglin,¹⁰ J. C. Barton,^{11,*} E. W. Beier,¹² M. Benicovich,¹⁰ J. Bigu,⁷ S. D. Biller,¹¹ R. A. Black,¹¹ I. Blevis,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. B  hler,⁴ J. Cameron,¹¹ Y. D. Chan,⁸ H. H. Chen,^{4,7} M. Chen,¹⁴ X. Chen,^{8,11} 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. Frati,¹² N. Gagnon,^{11,9,17} 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. Harman,¹⁷ W. B. Handler,¹⁴ R. U. Haq,⁷ C. K. Hargrove,⁵ P. J. Harvey,¹⁴ R. Hazara,¹⁷ K. M. Heeger,¹⁷ W. J. Heintzelman,¹² J. Heise,^{2,9} R. L. Helmer,^{16,2} J. D. Hepburn,¹⁴ H. Heron,¹¹ J. Hewett,⁷ A. Hime,⁹ M. Howe,¹⁷ J. G. Hykawy,⁷ M. C. P. Isaac,⁸ P. Jagam,⁶ N. A. Jelley,¹¹ C. J. Jellings,¹⁴ G. Jonkmans,^{7,1} K. Kazkaz,¹⁷ P. T. Keener,¹² J. R. Klein,¹² A. B. Knick,¹¹ R. J. Komar,² R. Kouzes,¹³ T. K  tter,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,^{8,17,2,9} 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. Saetler,⁷ K. K. Schaffer,¹⁷ M. H. Schwendener,⁷ A. Schillke,⁸ H. Seifert,^{7,17,9} M. Shatky,⁵ J. J. Simpson,⁶ C. J. Sims,¹¹ D. Sinclair,^{5,16} P. Skensved,¹⁴ A. R. Smith,⁸ M. W. E. Smith,¹⁷ T. Spreitzer,¹² N. Starinsky,⁵ T. D. Steiger,¹⁷ R. G. Stokstad,⁸ L. C. Stonehill,¹⁷ R. S. Storey,¹⁰ B. Sur,^{1,14} R. Tafirout,⁷ N. Tagg,^{6,11} N. W. Tanner,¹¹ R. K. Taplin,¹¹ M. Thomman,¹¹ P. M. Thomewell,¹¹ P. T. Trent,¹¹ Y. I. Tserkovnyak,² R. Van Berg,¹² R. G. Van de Water,^{9,12} 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. Yeh³

(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, Oxon OX11 0QX, United Kingdom

and University of Sussex, Physics and Astronomy Department, Brighton BN1 9QJ, 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

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

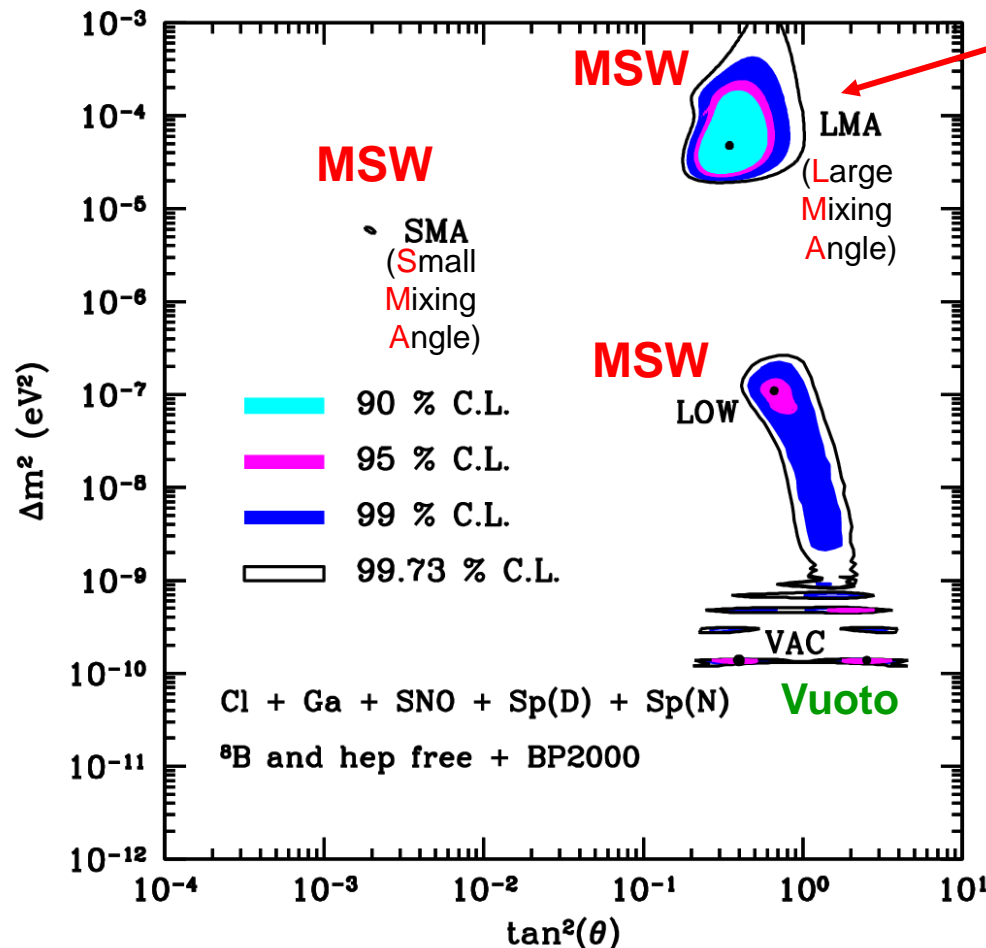
— Nelson Mandela

Possibili valori di δM^2 e angolo di mixing.

Oscillazione a due sapori $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu \nu_\tau$, 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**

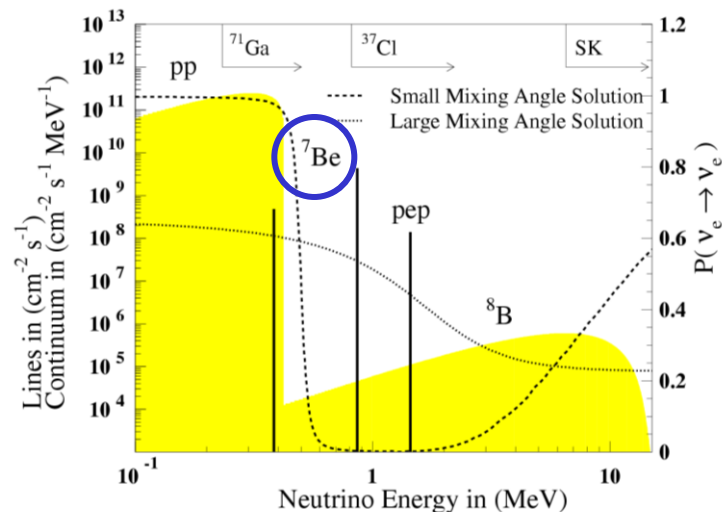
Esperimenti per discriminare:

KamLAND (Giappone)

Borexino (Gran Sasso)



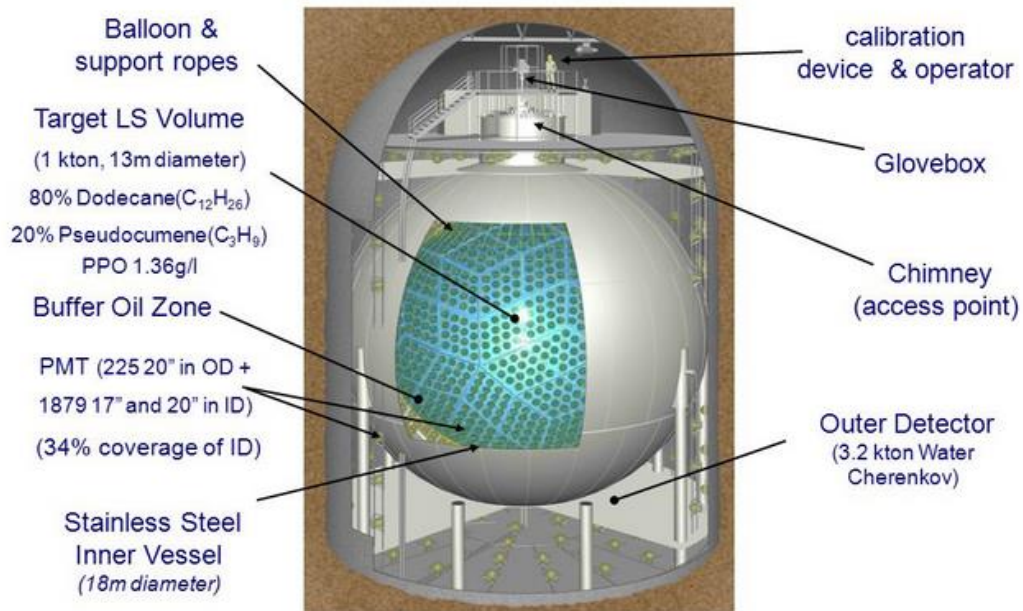
test della soluzione **LMA**



Esperimento risolutore: KamLAND

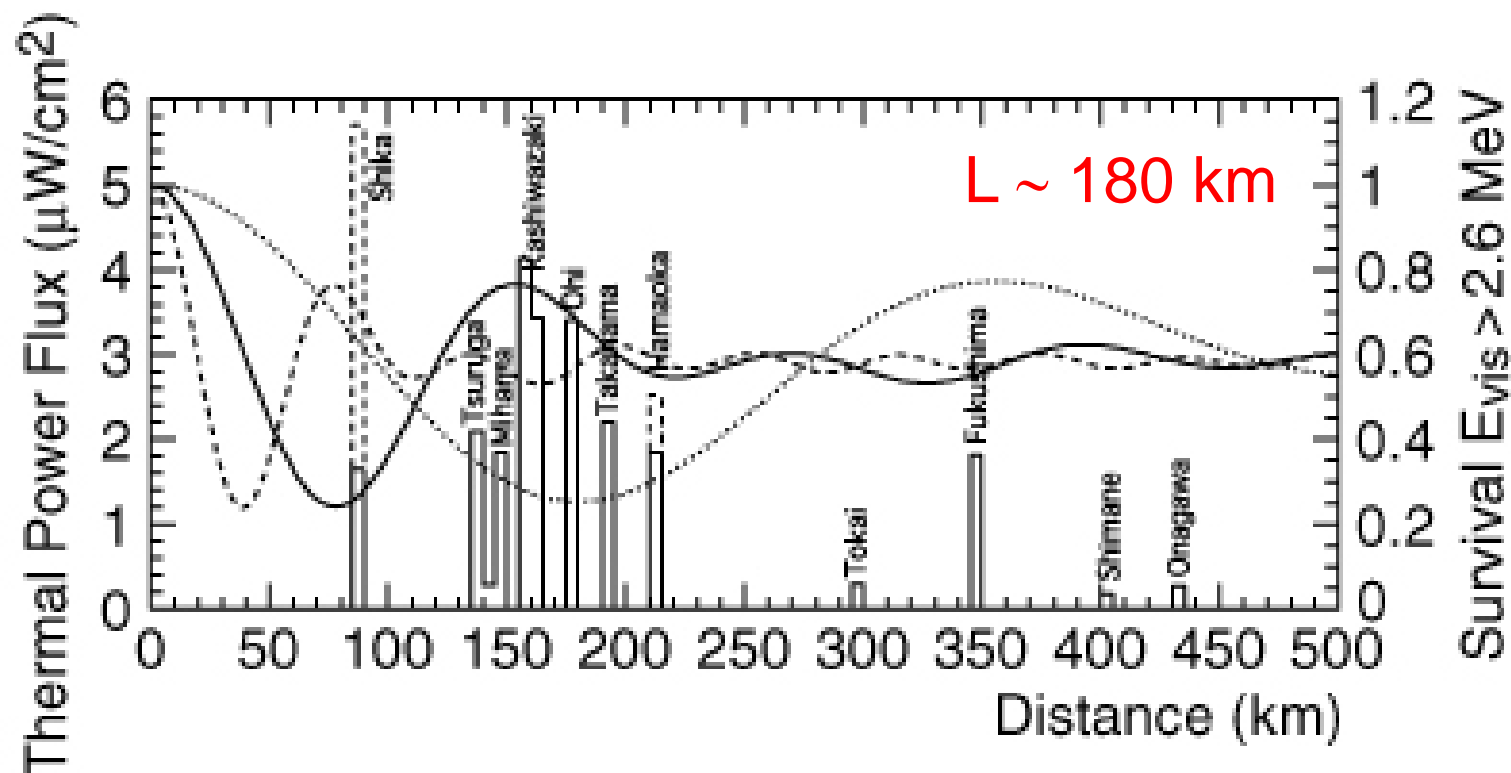
Sorgente di neutrini: reattori nucleari

Rivelatore: scintillatore liquido



KamLAND

Evidenza di oscillazioni dei neutrini da reattore



Istogramma continuo: potenza reattori al momento dell'inizio dell'esperimento

Istogramma tratteggiato: potenza prevista in tempi successivi

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

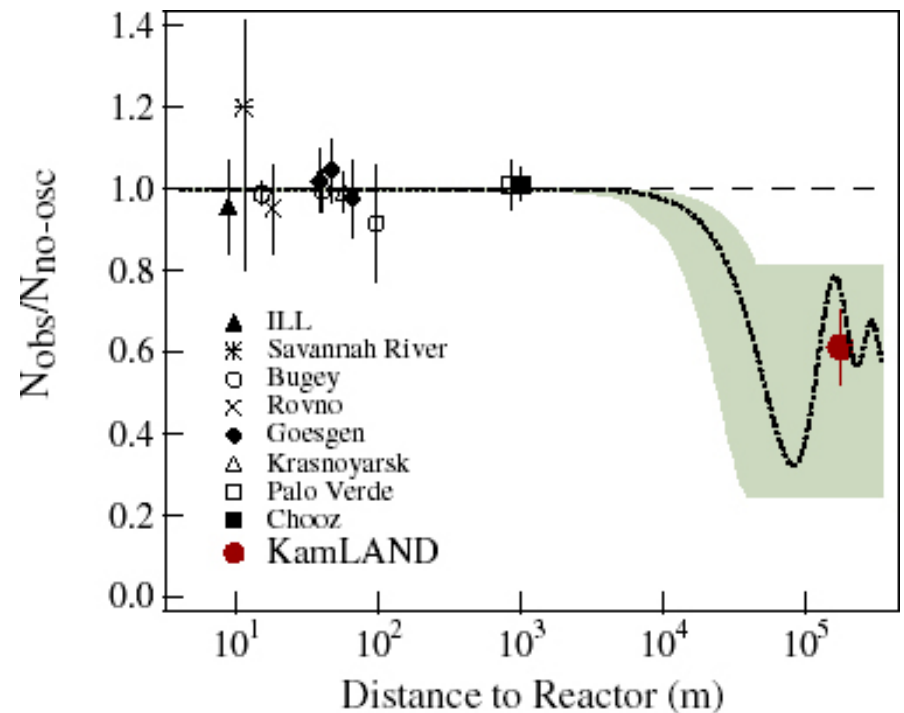
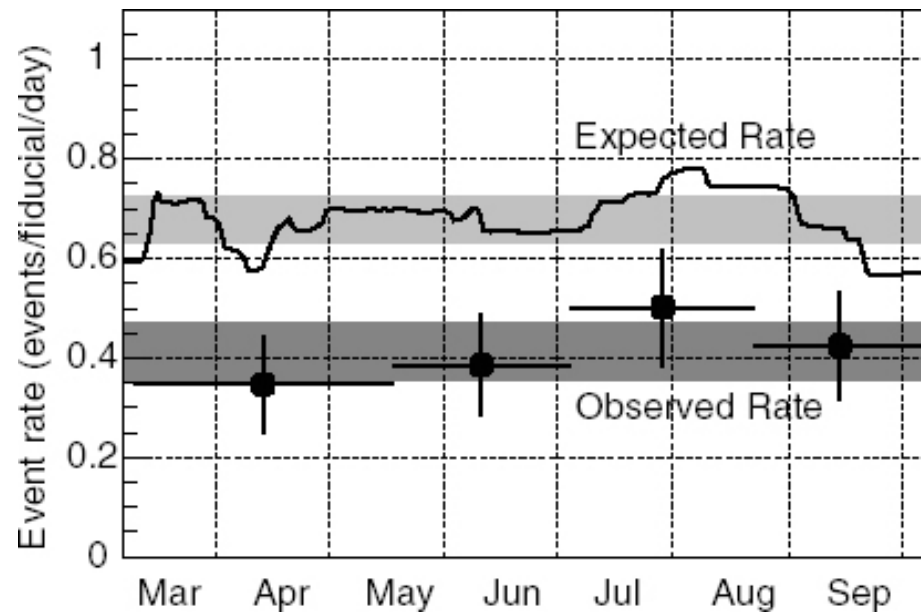
Linea tratteggiata: $\delta M^2 = 3 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$

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

$\sin^2 2\theta = 0.84$

KamLAND

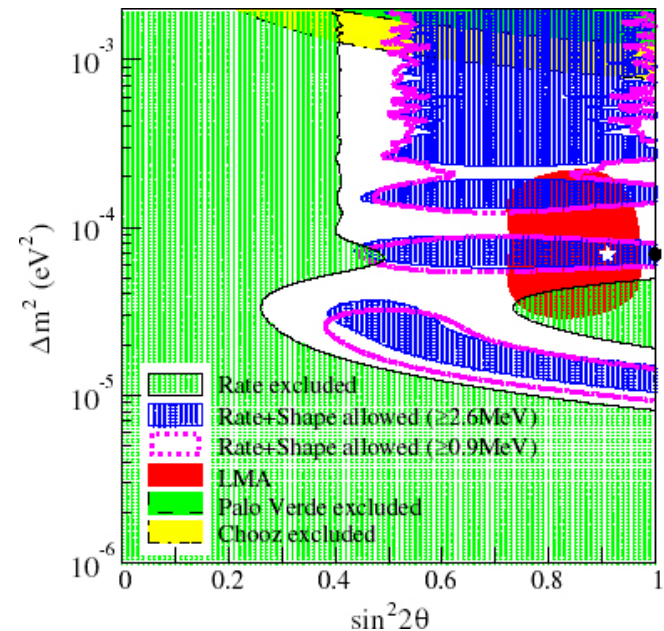
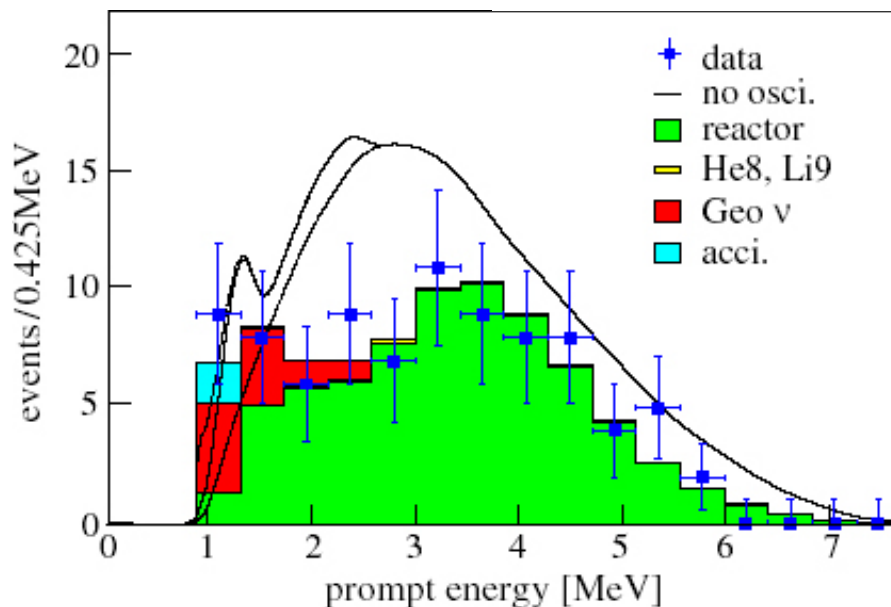
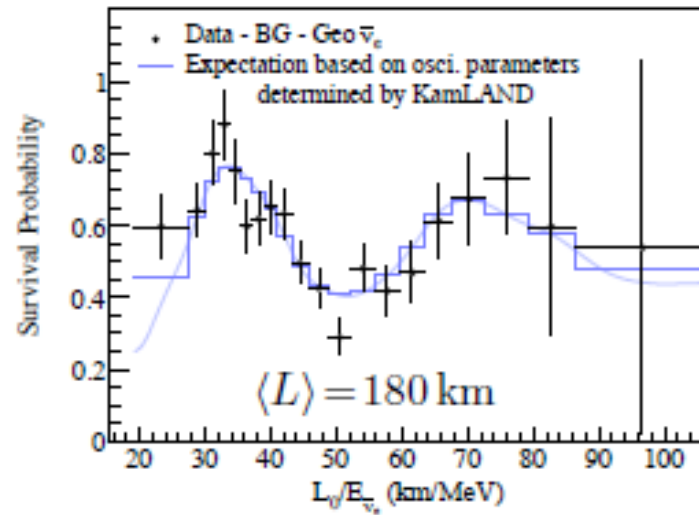
Evidenza di oscillazioni dei neutrini da reattore



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

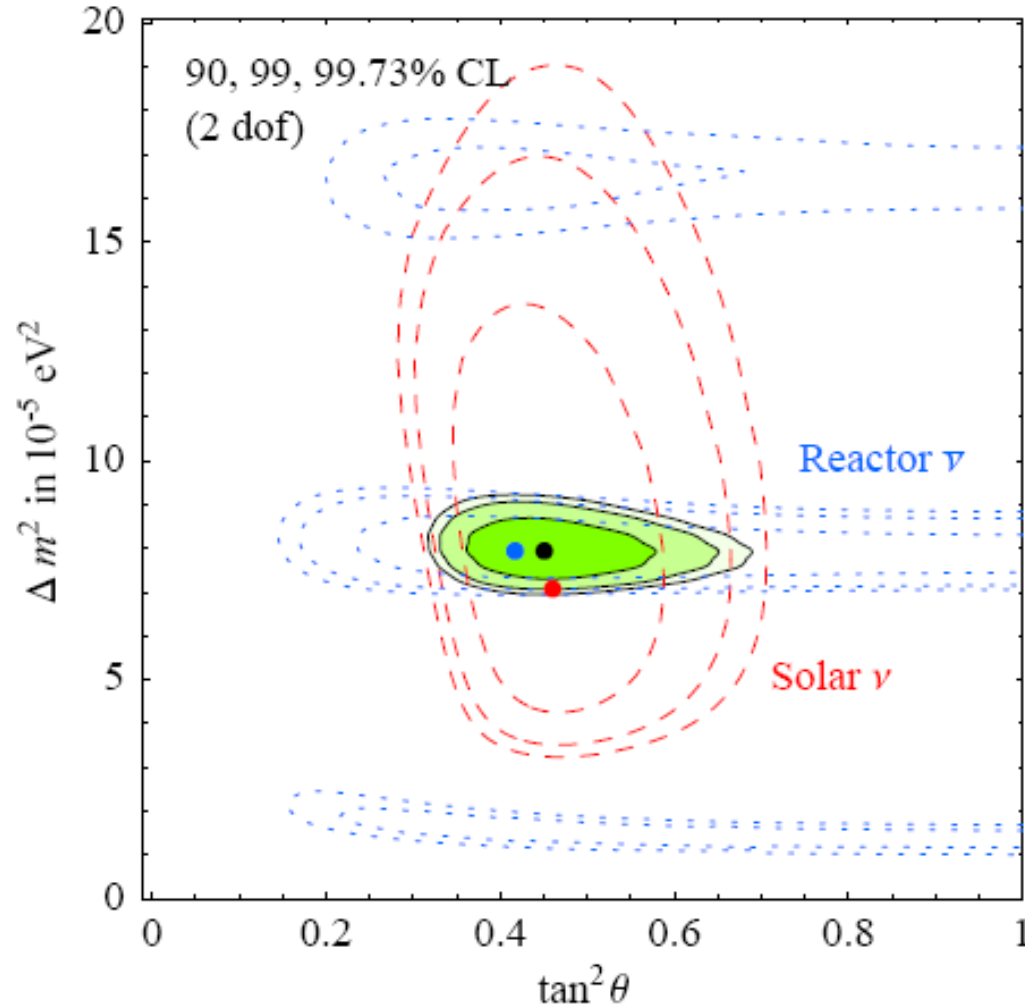
KamLAND

Evidenza di oscillazioni dei neutrini da reattore

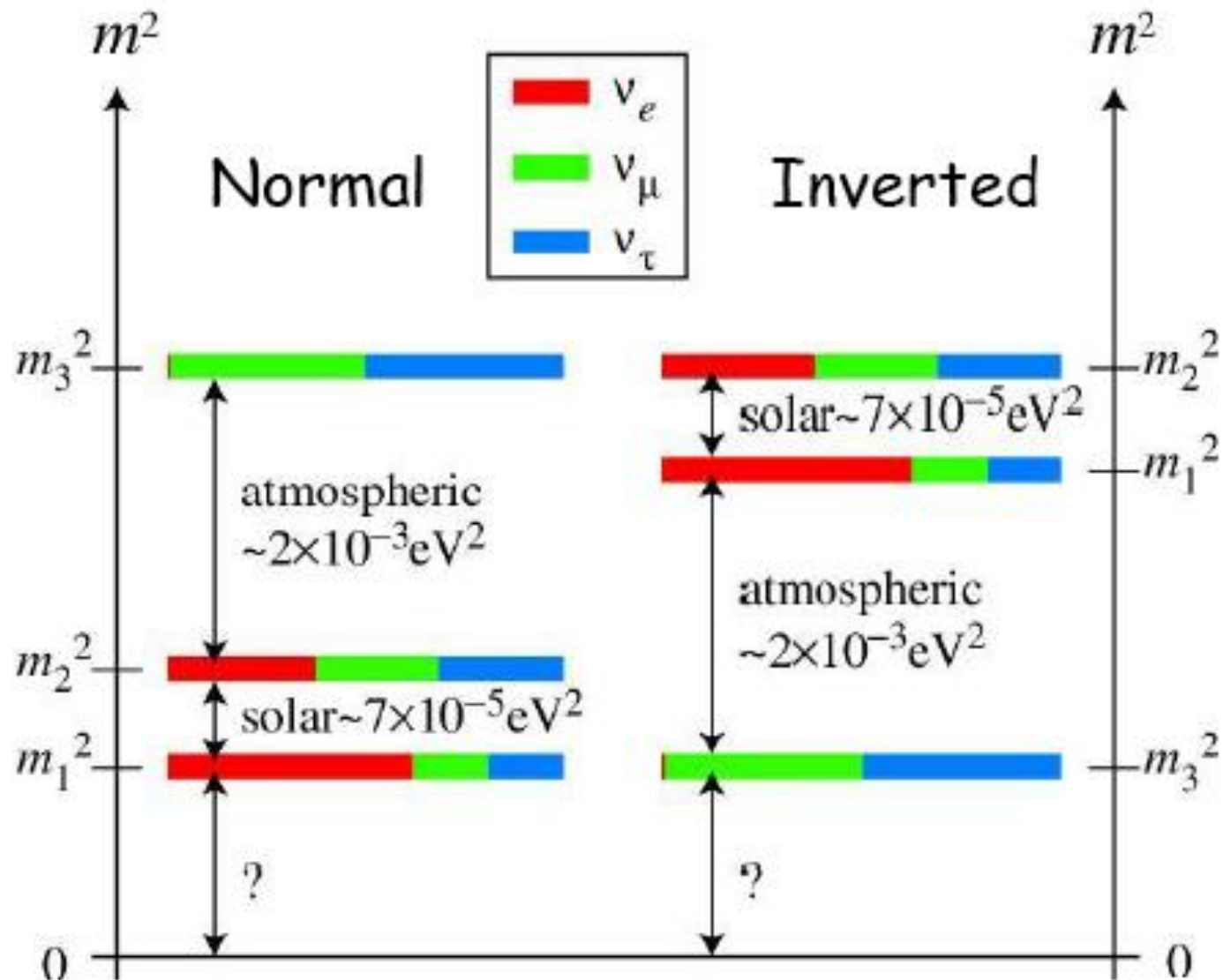


Analisi congiunta KamLAND + ν solari

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



Che cosa sappiamo oggi, e cosa rimane da scoprire

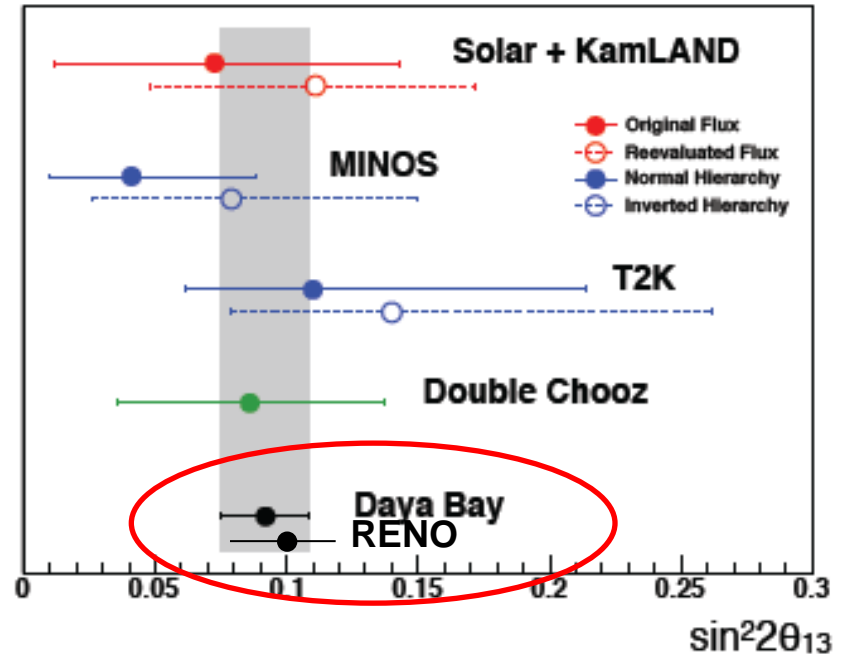
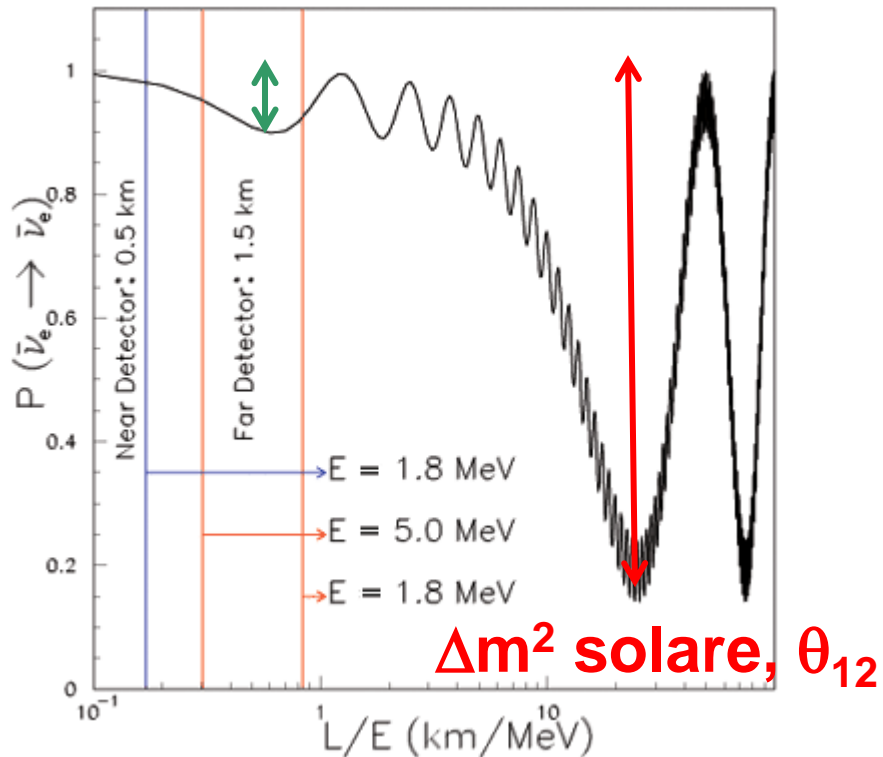


Tre ingredienti fondamentali hanno completato il quadro

- 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 sapori (**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}



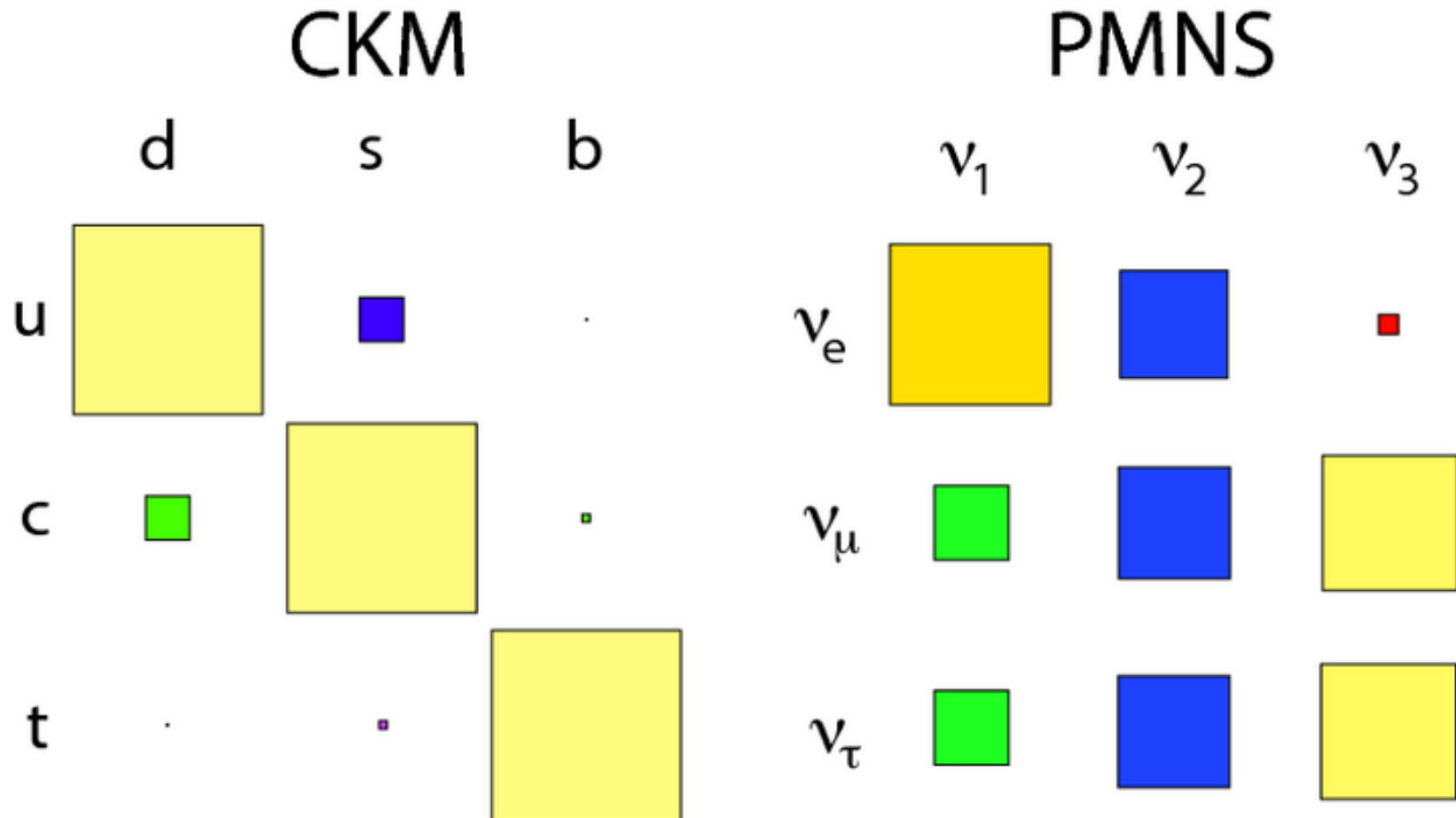
$\theta_{13} \neq 0$ at 6σ

Tri-bi maximal mixing?

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} |U_{e1}|^2 & |U_{e2}|^2 & |U_{e3}|^2 \\ |U_{\mu1}|^2 & |U_{\mu2}|^2 & |U_{\mu3}|^2 \\ |U_{\tau1}|^2 & |U_{\tau2}|^2 & |U_{\tau3}|^2 \end{pmatrix} \stackrel{?}{=} \begin{pmatrix} 2/3 & 1/3 & 0 \\ 1/6 & 1/3 & 1/2 \\ 1/6 & 1/3 & 1/2 \end{pmatrix}$$

Inspiegabile differenza tra settore adronico e leptonic



Attuale quadro delle conoscenze in dettaglio

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{13}s_{23}c_{12}e^{i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{13}s_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - s_{13}c_{23}c_{12}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{13}c_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

parameter	Ref. [1]		Ref. [2] (MINOS updated)	
	best fit $\pm 1\sigma$	3σ interval	best fit $\pm 1\sigma$	3σ interval
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5}\text{eV}^2]$	$7.65^{+0.23}_{-0.20}$	7.05–8.34	$7.67^{+0.22}_{-0.21}$	7.07–8.34
$\Delta m_{31}^2 [10^{-3}\text{eV}^2]$	$\pm 2.40^{+0.12}_{-0.11}$	$\pm(2.07\text{--}2.75)$	-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

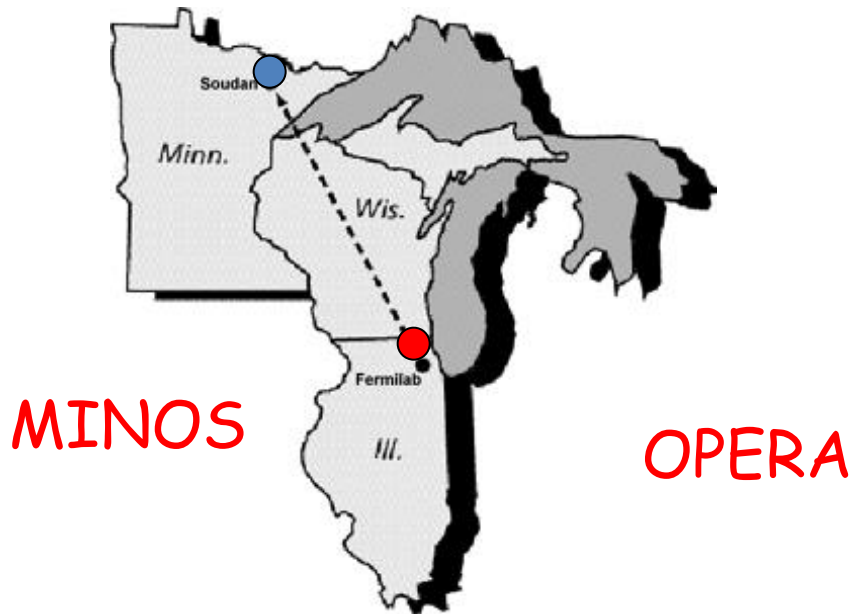
Oscillazioni con neutrini artificiali da acceleratori

➤ 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

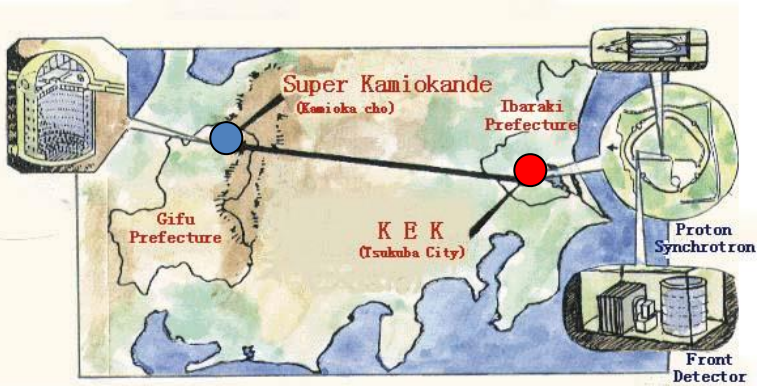


CERN → Gran Sasso
732 km



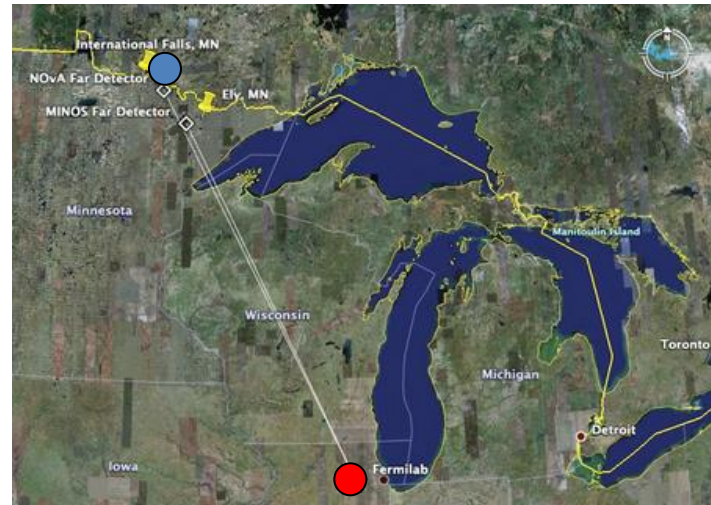
Attuale generazione

JPark → SK
290 km



T2K

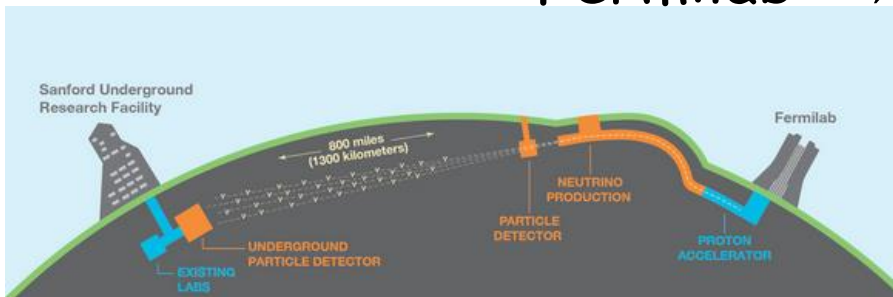
Fermilab → Northern Minnesota
810 km



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 leptónico

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |A(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)|^2 = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2(\delta M_{ij}^2 \frac{L}{4E}) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin(\delta M_{ij}^2 \frac{L}{2E}) . \\ &= \frac{1}{8} \cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin \delta \\ &\quad \text{(per } \alpha=\mu \text{ e } \beta=e) \end{aligned}$$

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

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

$$\text{Se } \sin \delta \neq 0 \longrightarrow P(\overline{\nu}_\mu \rightarrow \overline{\nu}_e) \neq P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$$

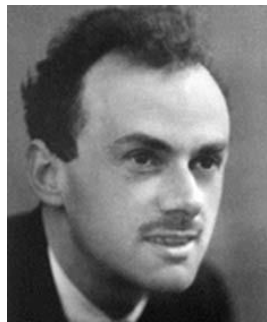
Neutrino e antineutrino

DIRAC o MAJORANA?

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

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

AIP



Il Nuovo Cimento, **14** (1937) 171

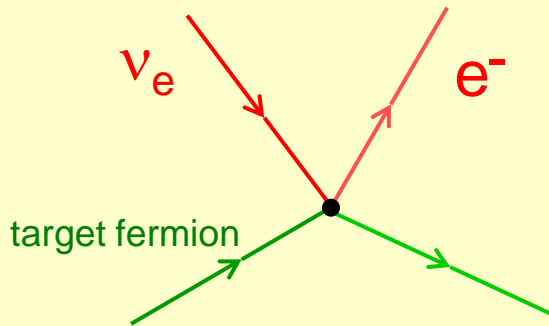
TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE E DEL POSITRONE

Nota di ETTORE MAJORANA

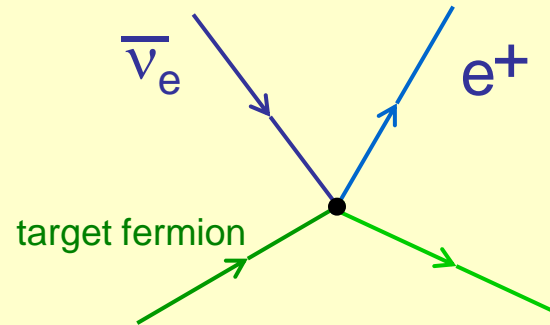
Sunto. - Si dimostra la possibilità di pervenire a una piena simmetrizzazione formale della teoria quantistica dell'elettrone e del positrone facendo uso di un nuovo processo di quantizzazione. Il significato delle equazioni di DIRAC ne risulta alquanto modificato e non vi è più luogo a parlare di stati 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



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

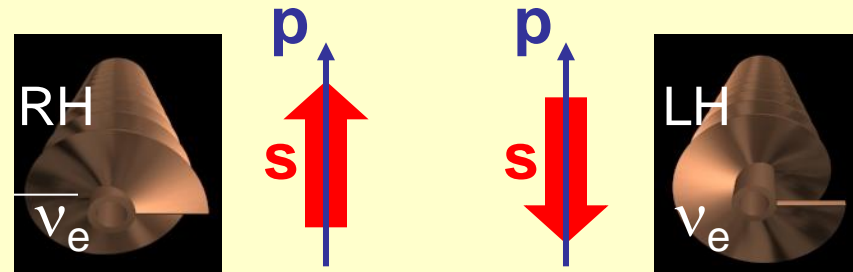


Due modi per spiegare questa fenomenologia:

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	$(\frac{m_\nu}{E})^2$

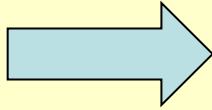
Majorana

		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 dipende dal riferimento,
mentre il **numero leptonico** no



Esperimento "gedanken"



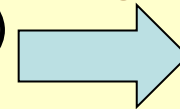
Protone
di alta
energia



Antineutrino
di 1 GeV

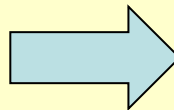


Protone
a riposo



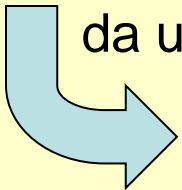
Si produce un **positrone**
per corrente carica

- ① Un antineutrino RH ($E=1\text{GeV}$ $m=1\text{ev}$)
interagisce con un **protone a riposo**



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

- ② Lo **stesso** antineutrino è inseguito
da un **protone molto energetico**



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

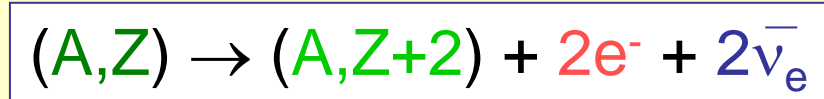
Risposta di **MAJORANA**: conta **H**

Risposta di **DIRAC**: conta **L**

Doppio decadimento beta

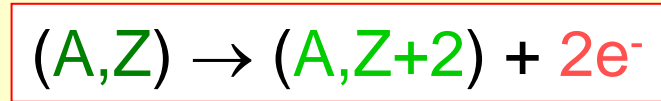
Due modi di decadimento sono discussi:

①



2ν Double Beta Decay
Permesso dal **Modello Standard**
Già osservato – $\tau \sim 10^{19-24}$ y

②



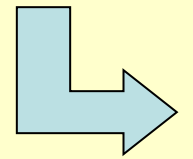
neutrinoless Double Beta Decay (0ν-DBD)
Mai osservato
 $\tau > 10^{25-26}$ y



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

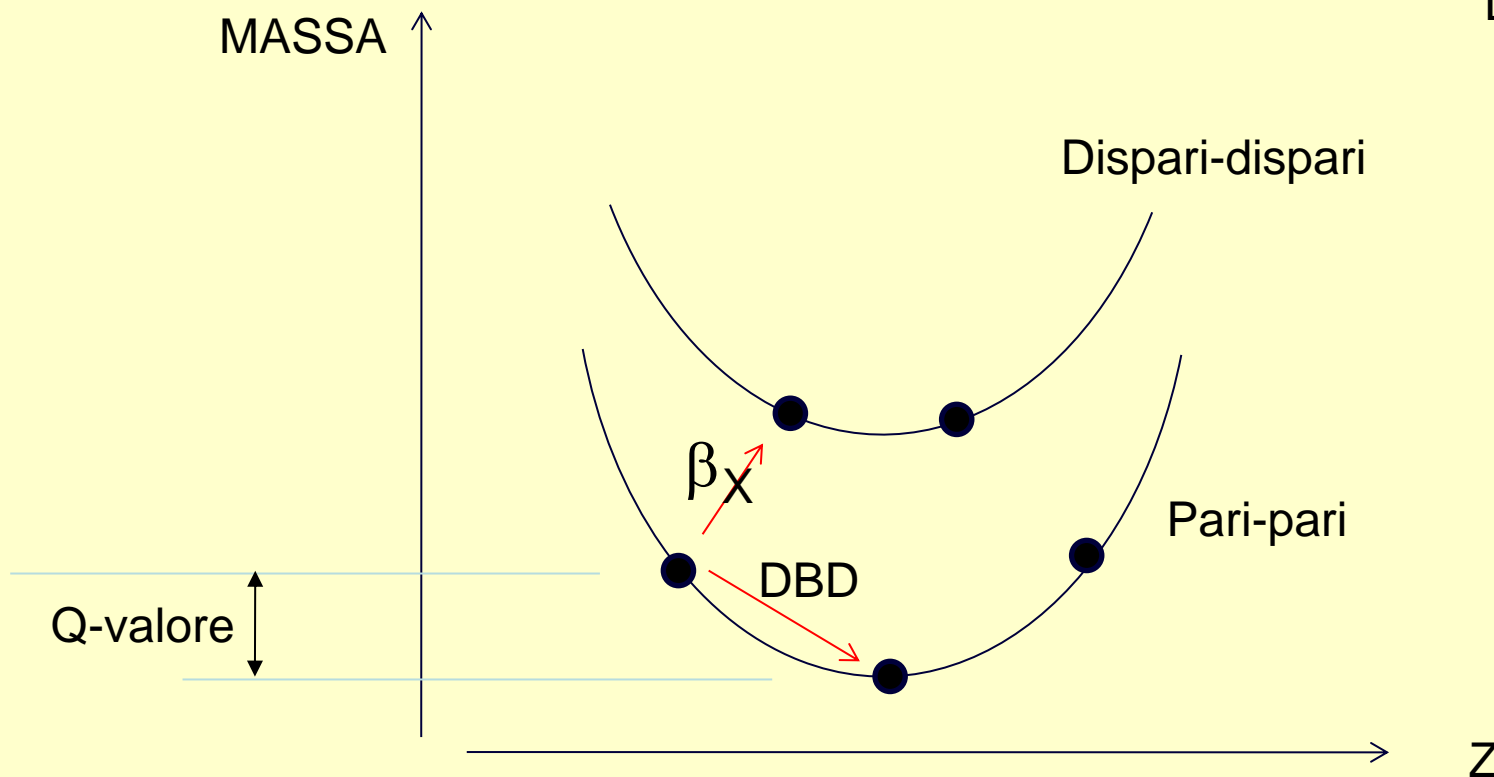
Formula di Weiszaecker per l'energia di legame dei nuclei

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

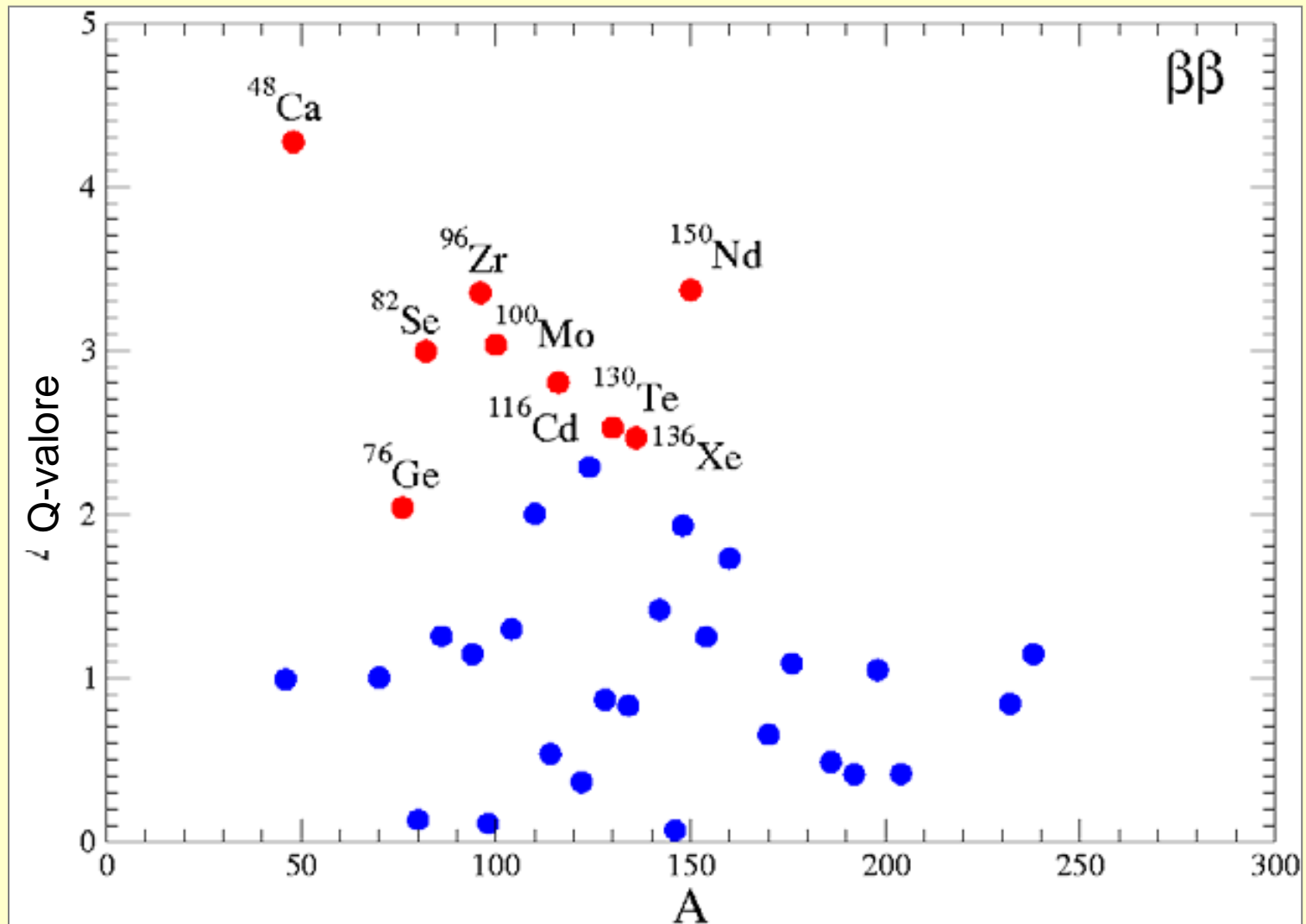
Pari-pari

Dispari-dispari

Massa nucleare in funzione di Z con A fissato



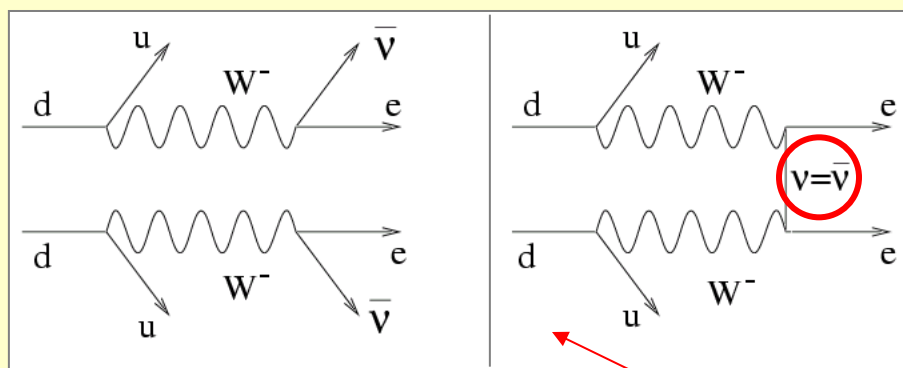
Quanti nuclei in questa situazione?



Double Beta Decay (DBD) e la fisica del neutrino

DBD è un processo debole del **secondo ordine** ← Bassi tassi di conteggio

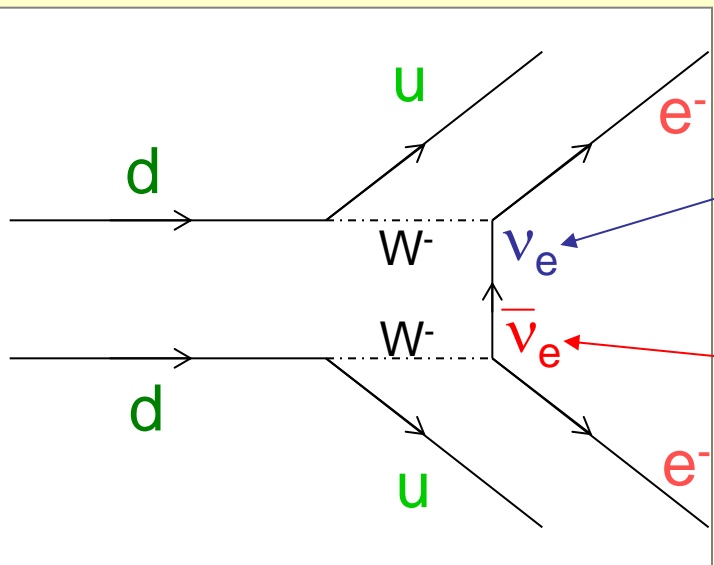
Diagrammi per i due processi discussi prima:



Processo Standard
Due decadimenti beta simultanei

0 ν -DBD
Un neutrino virtuale
scambiato tra i due vertici

Proprietà del neutrino e 0ν -DBD



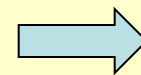
Un neutrino **LH** ($L=1$)
è assorbito

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:

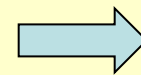
Le **elicità** possono essere accommodate grazie alla
massa finita, **MA** il numero leptonico è conservato



**0ν -DBD
è proibito**

- SE i neutrini sono particelle di **MAJORANA** massive:

Le **elicità** possono essere accommodate grazie alla
massa finita, **E** il numero leptonico non è rilevante



**0ν -DBD
è permesso**

Observation of **0ν -DBD**



$$m_\nu \neq 0$$

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

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 0ν -DBD Spazio delle fasi Elementi di matrice nucleare Massa di Majorana effettiva

$$1/\tau = G(Q, Z) |M_{\text{nuc}}|^2 \langle M_{\beta\beta} \rangle^2$$

Quello che gli **sperimentali** cercano di misurare

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

parametro che contiene la **fisica del neutrino**

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

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 **0ν-DBD** Spazio delle fasi Elementi di matrice nucleare Massa di Majorana effettiva

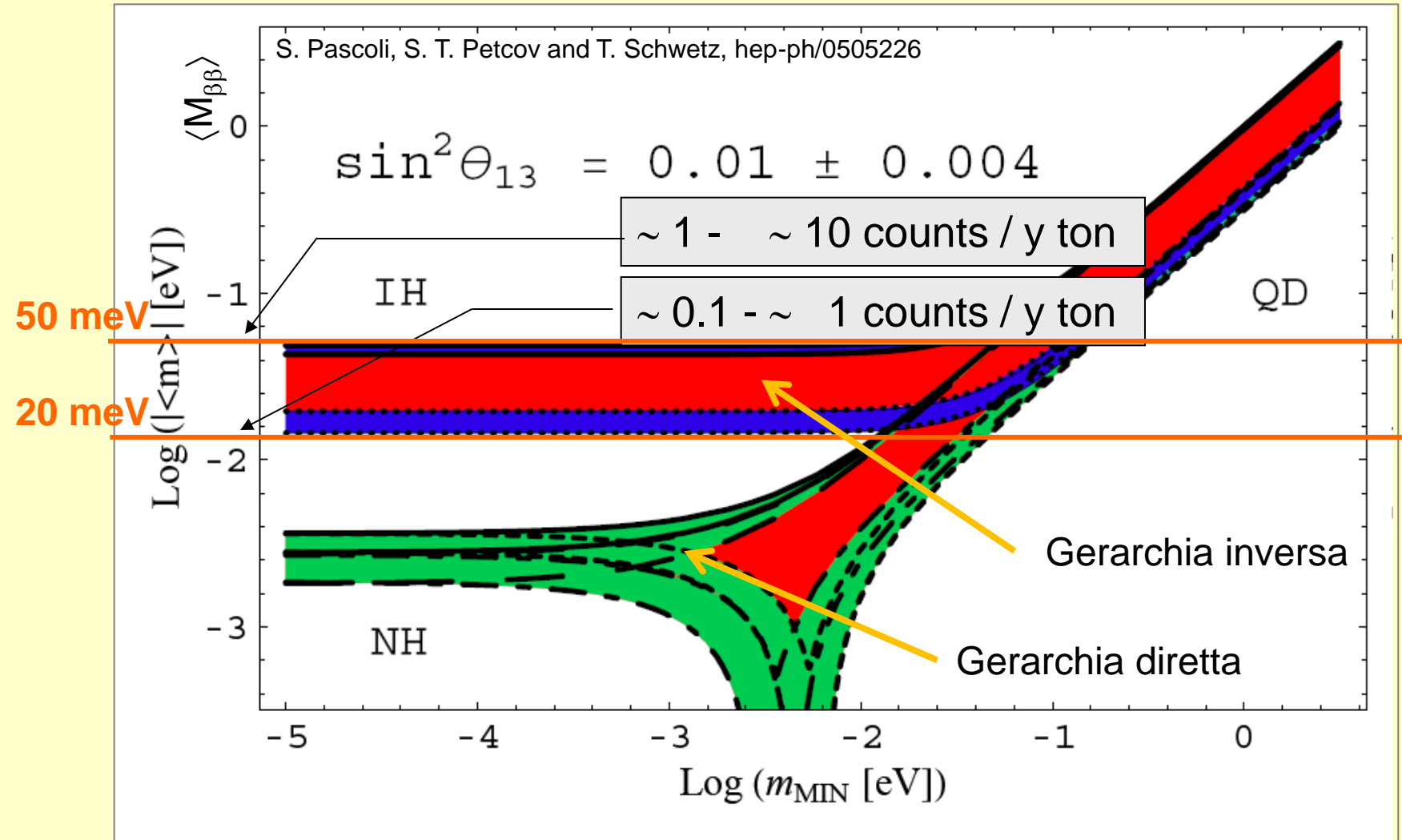
Quello che
cerchiamo

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

contiene
neutrino

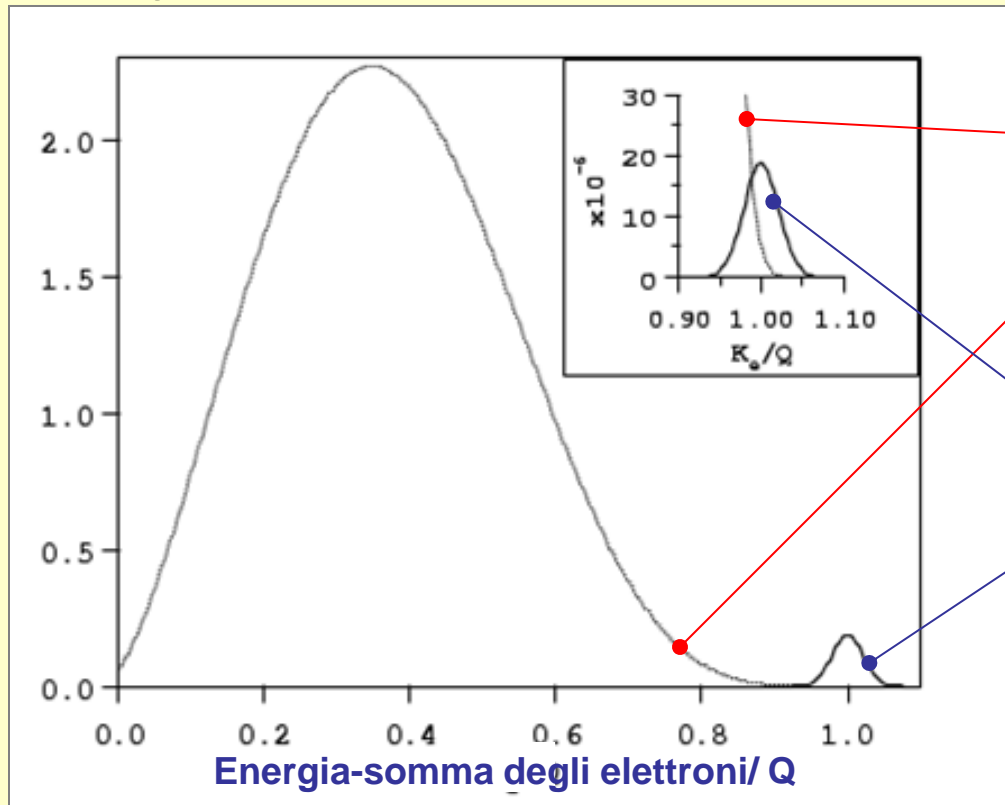
$$\langle M_{\beta\beta} \rangle = \left| |U_{e1}|^2 M_1 + e^{i\alpha_1} |U_{e2}|^2 M_2 + e^{i\alpha_2} |U_{e3}|^2 M_3 \right|$$

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

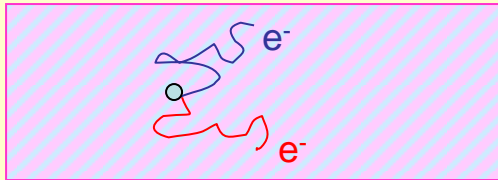
Caratteristiche aggiuntive:

- **distribuzione di energia di elettrone singolo**
- **distribuzione angolare**

Approcci sperimentali

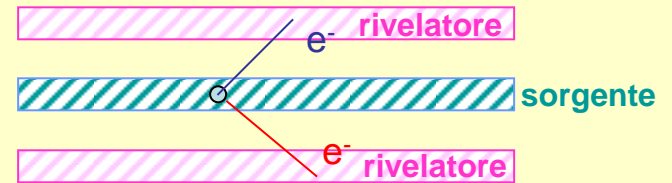
Due tecniche principali:

①



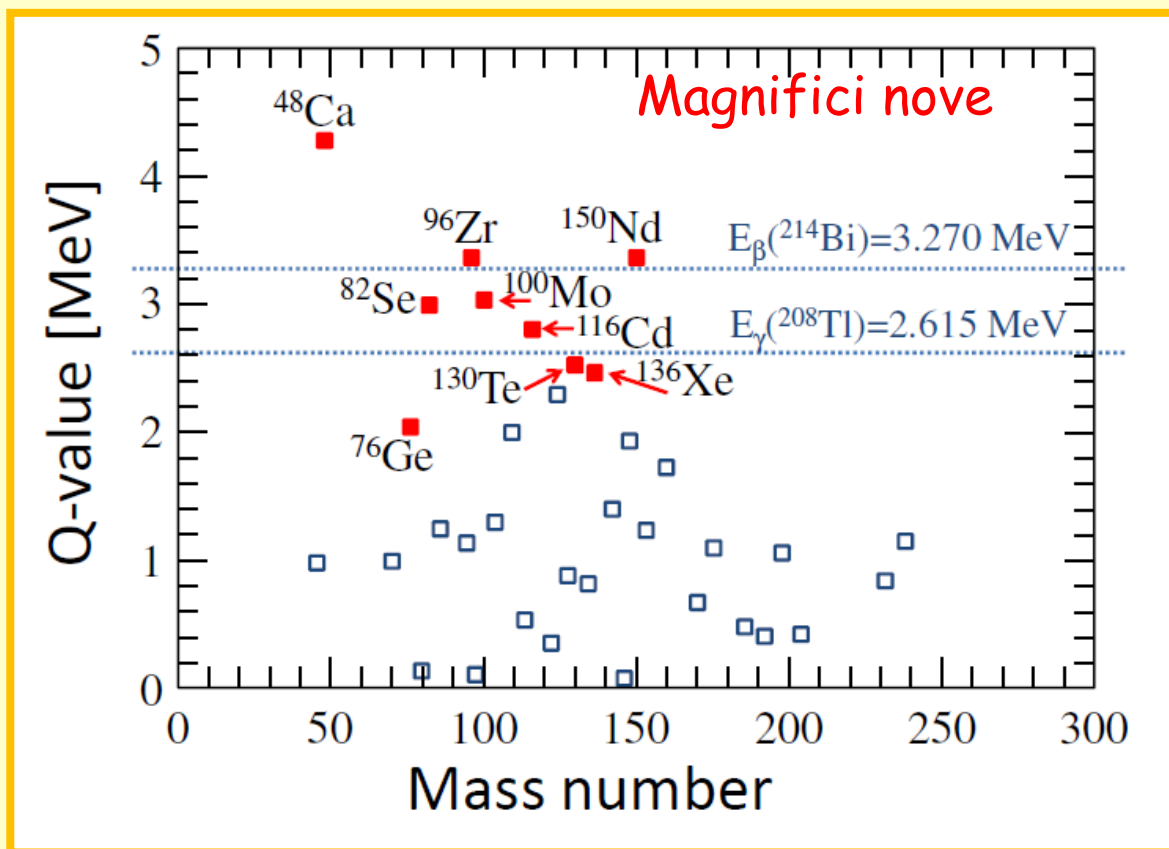
Sorgente \equiv Rivelatore
(tecnica calorimetrica)

②

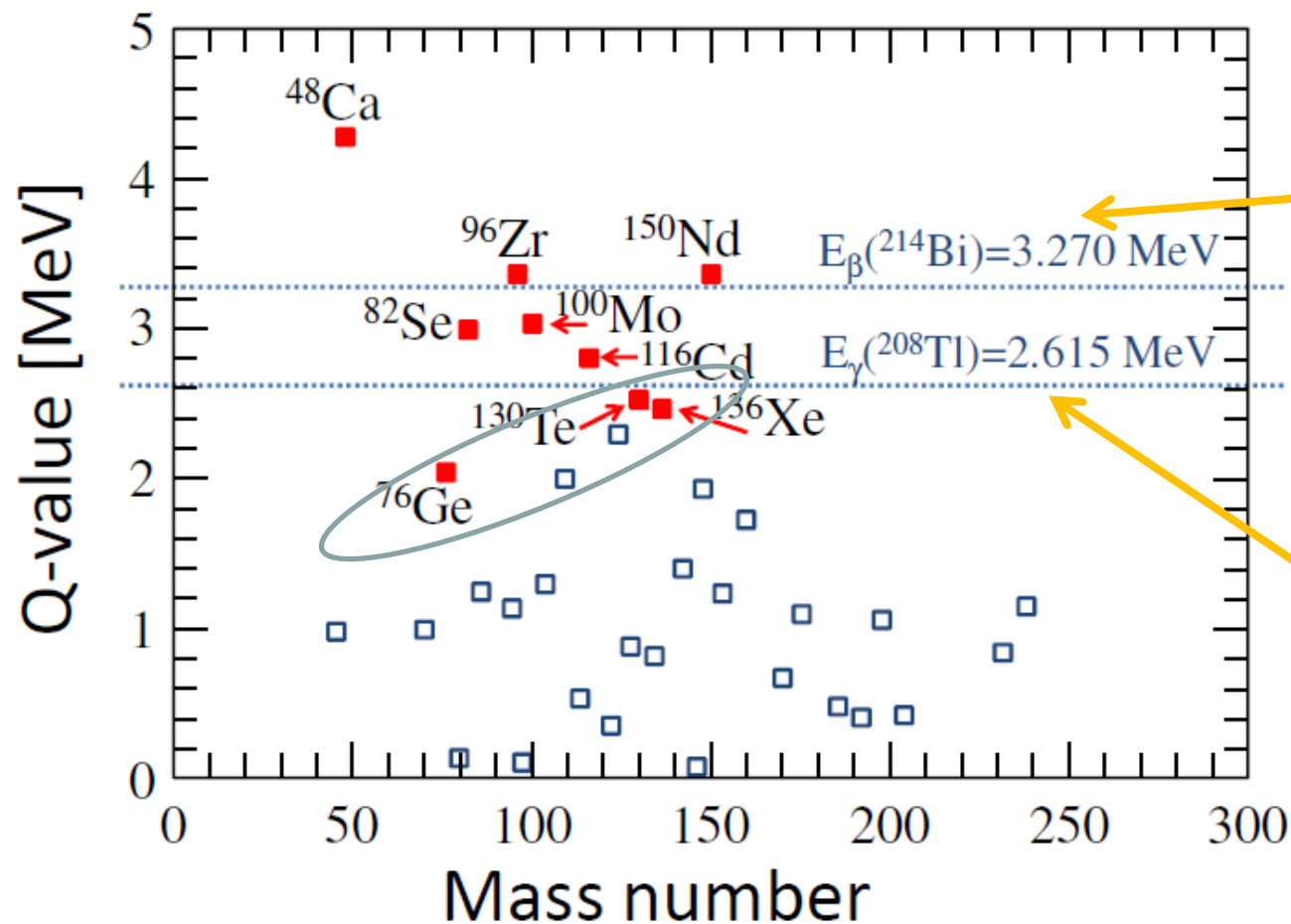


Sorgente \neq Rivelatore

Fattori che guidano la selezione dei candidati



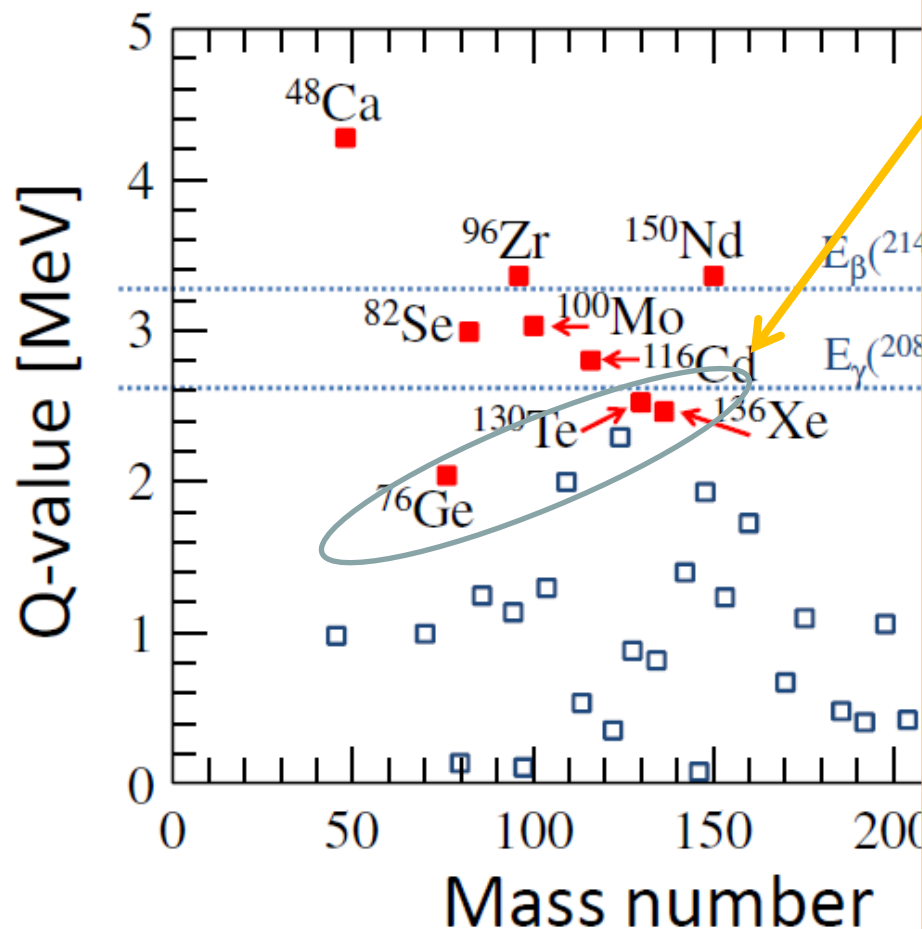
Candidati e tecniche



Punto finale
della
radioattività
indotta dal
 ^{222}Rn

Punto finale
della
radioattività γ

Candidati e tecniche



Eccellenti tecnologie sono praticabili nell'approccio calorimetrico

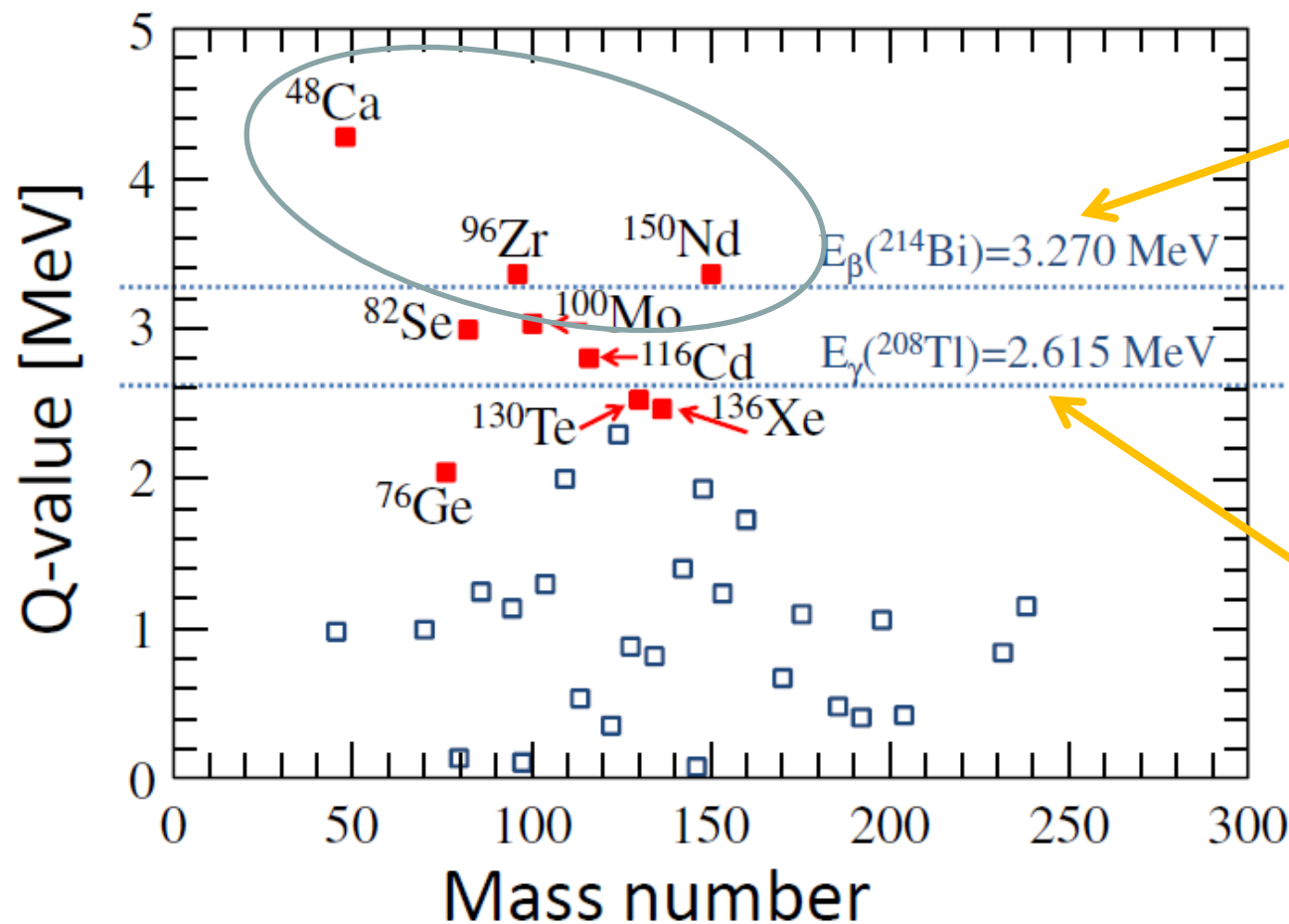
- Diodi $\text{Ge} \Rightarrow ^{76}\text{Ge}$ (**GERDA**, **MAJORANA**) - $\Delta E \ll 1\%$
- Bolometri $\Rightarrow ^{130}\text{Te}$ (cristalli TeO_2) (**CUORE**) - $\Delta E \ll 1\%$
- TPCs (**EXO**, **NEXT**), inclusione in grandi volumi di scintillatori (**KamLAND-Zen**)
 $\Rightarrow ^{136}\text{Xe}$

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

MA

Meno favorevole in termini di fondo

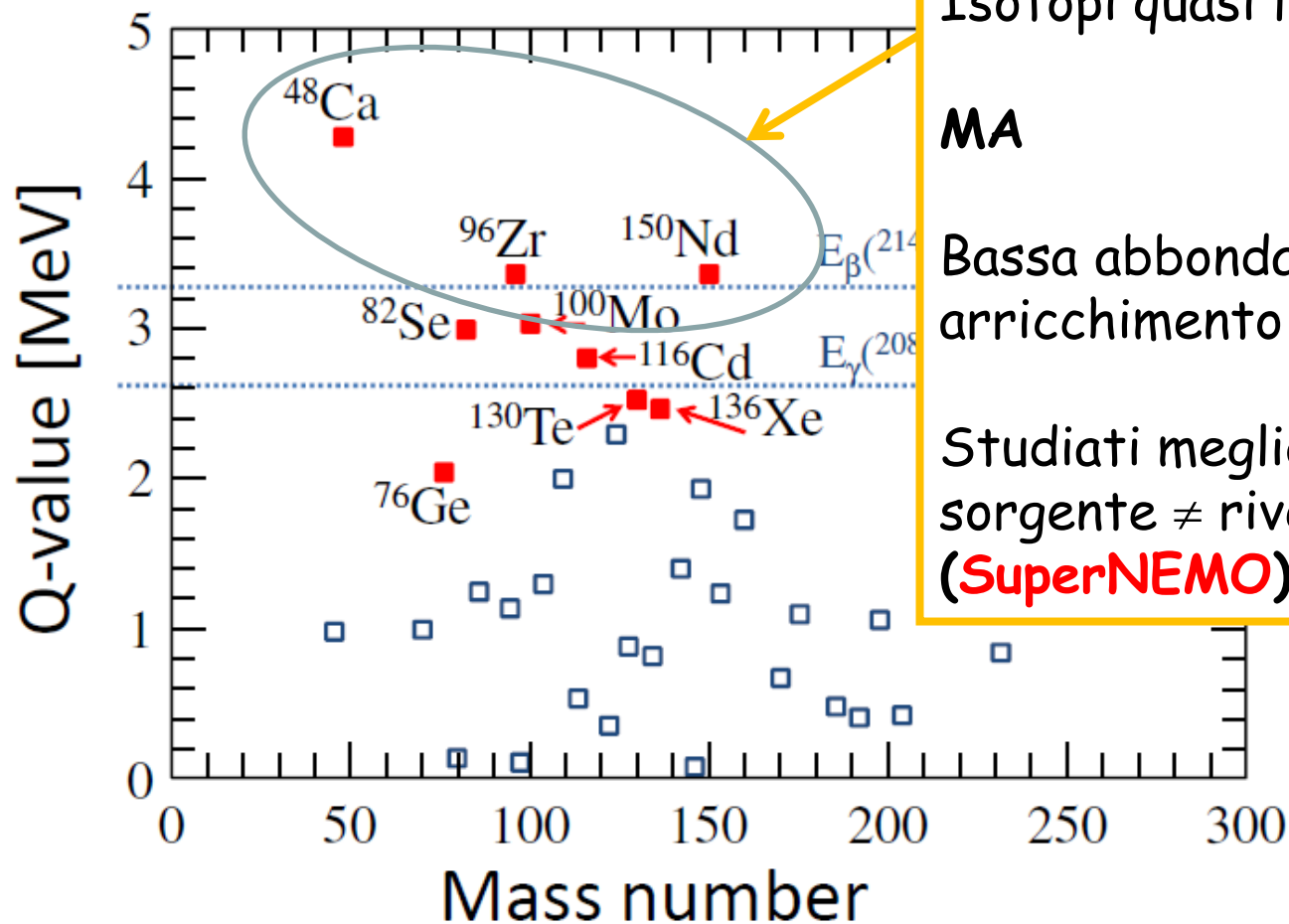
Candidati e tecniche



Punto finale
della β -induced
radioattività
indotta dal
 ^{222}Rn

Punto finale
della γ
radioattività γ

Candidati e tecniche



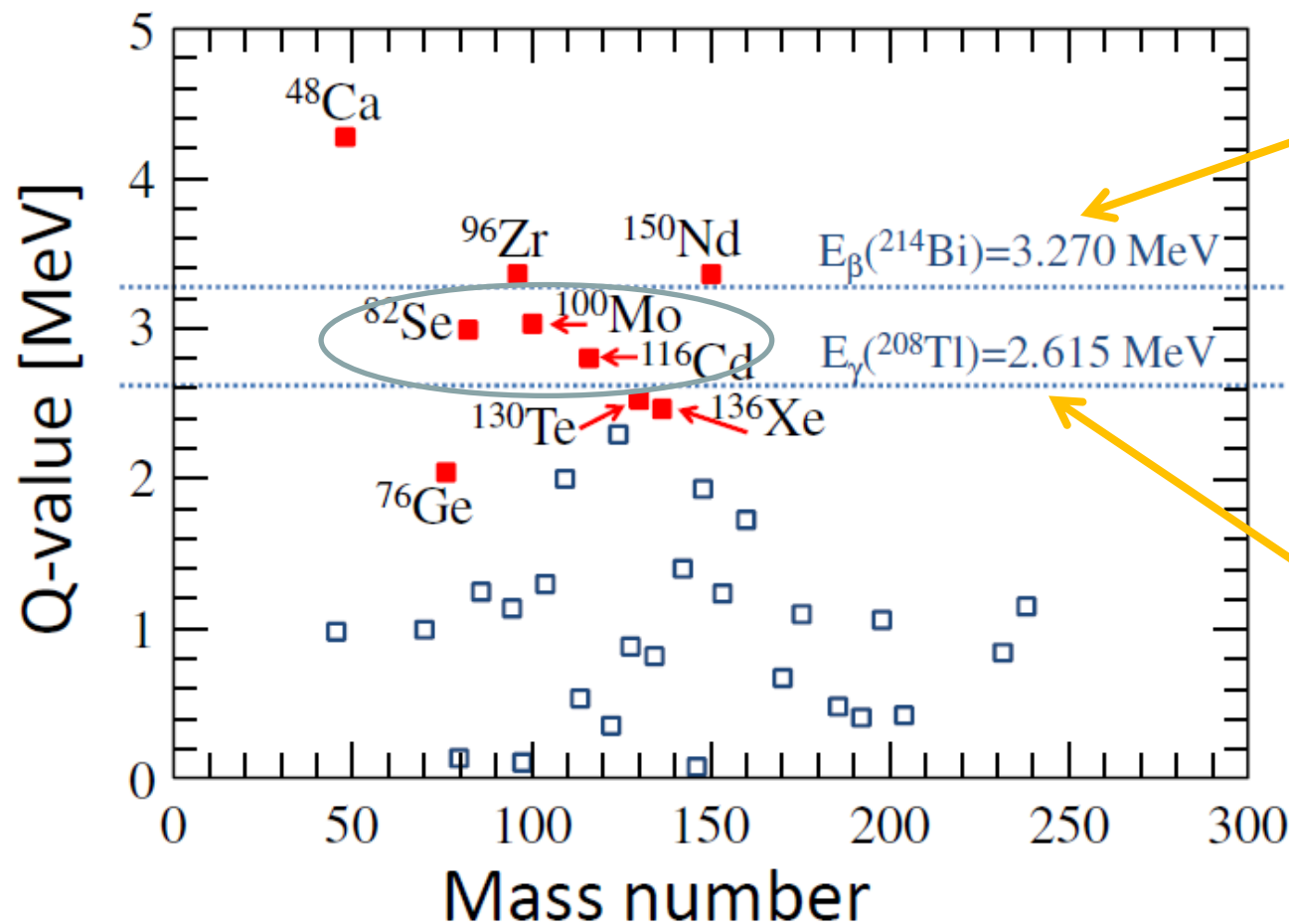
Isotopi quasi liberi da fondo!

MA

Bassa abbondanza isotopica e arricchimento difficile

Studiati meglio con approccio sorgente \neq rivelatore
(**SuperNEMO**)

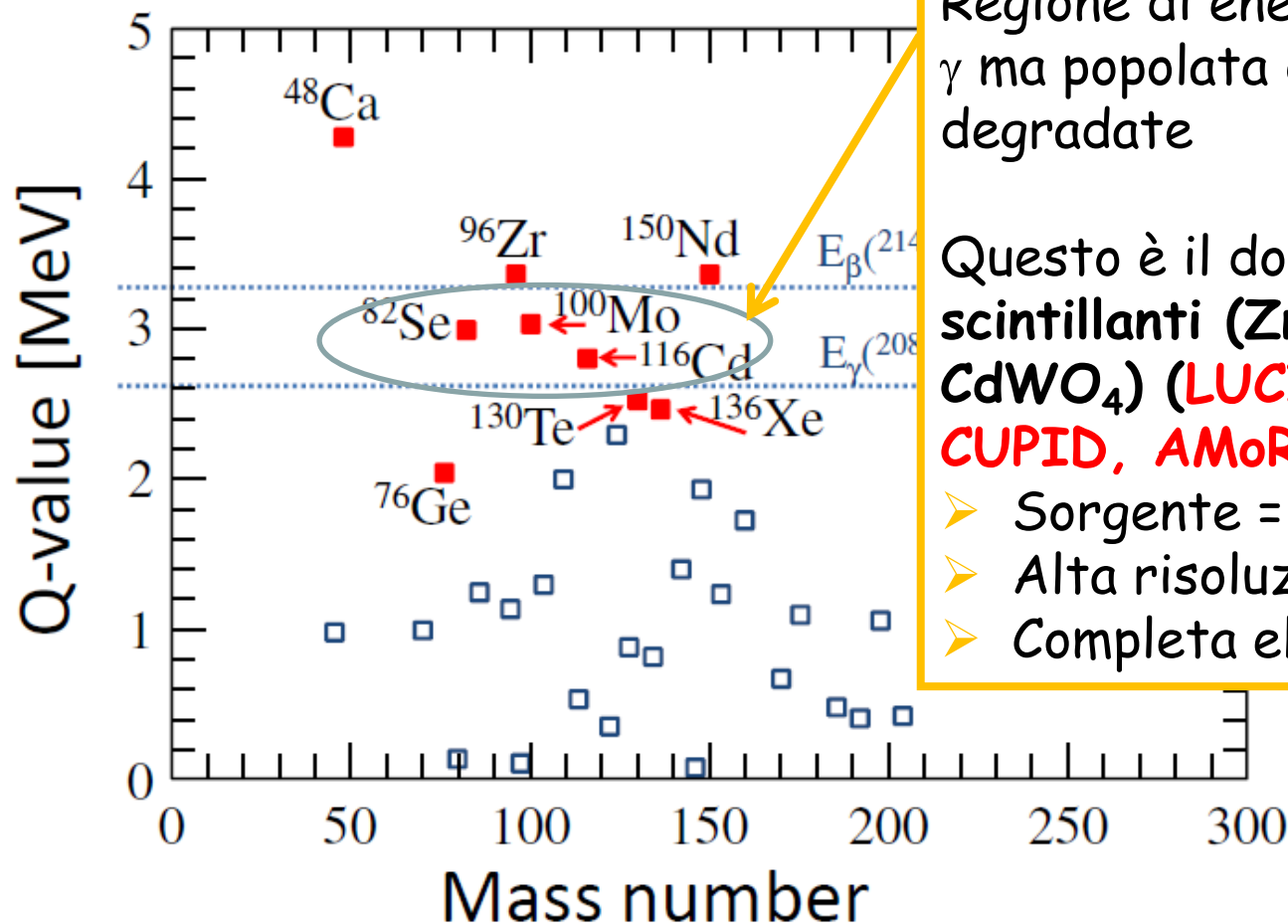
Candidati e tecniche



Punto finale
della
radioattività
indotta dal
 ^{222}Rn

Punto finale
della
radioattività γ

Candidati e tecniche

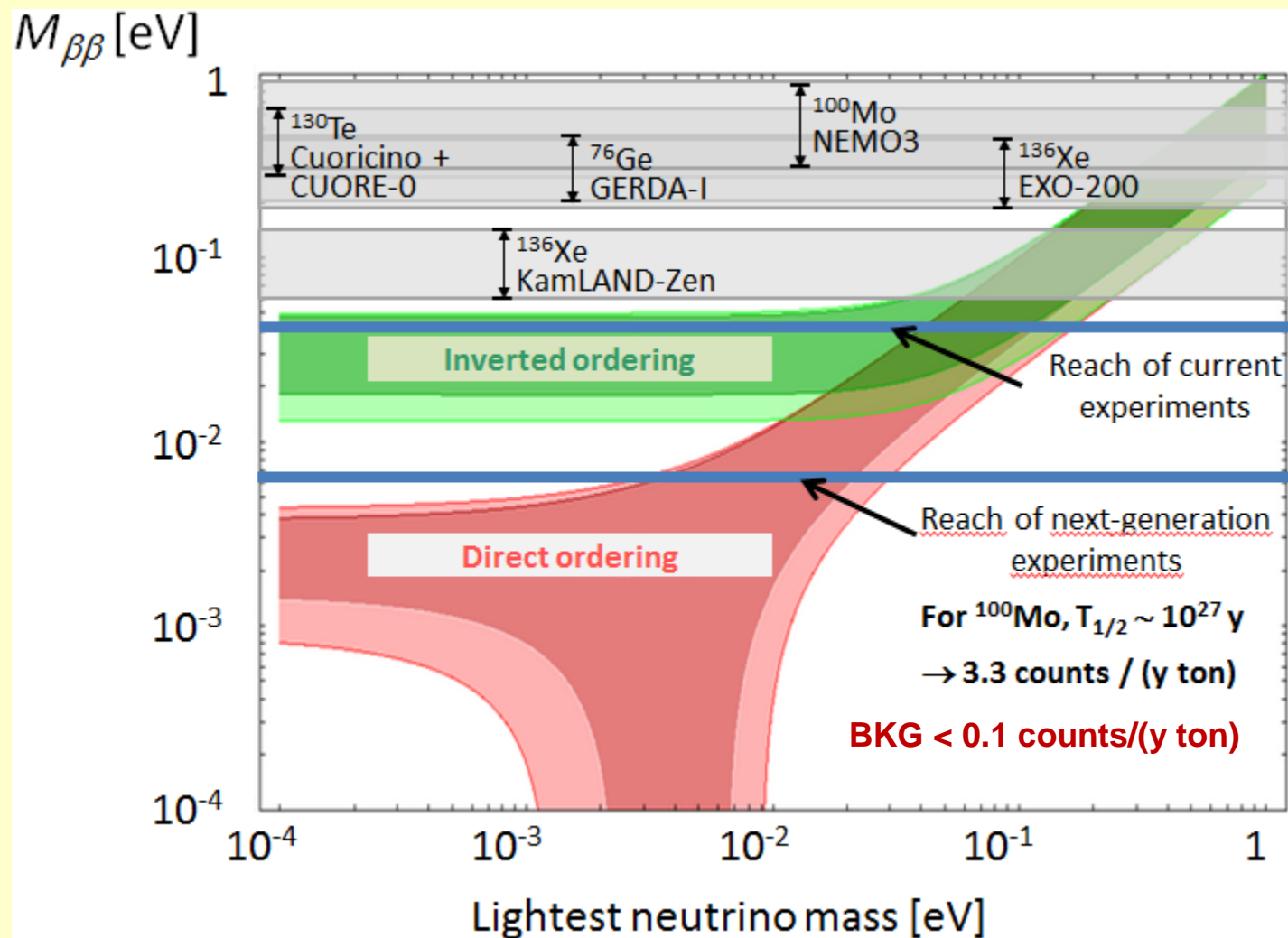


Regione di energia libera dal fondo γ ma popolata da α superficiali degradate

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 ?
- Perché 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?
- Sappremo mai vedere i neutrini del fondo cosmico?
- Provengono neutrini dai siti di accelerazione dei raggi cosmici?
- Esistono i neutrini sterili ?