

# **Premio Nobel per la Fisica 2015**

**Takaaki Kajita, Arthur McDonald**

**Accademia delle Scienze di Torino**  
**11 dicembre 2015**

**Presentazione di**  
**Alessandro Bottino**

**Premio Nobel per la Fisica 2015**  
conferito congiuntamente a



**Takaaki Kajita**  
**Super-Kamiokande Collaboration**

University of Tokyo, Kashiwa, Japan



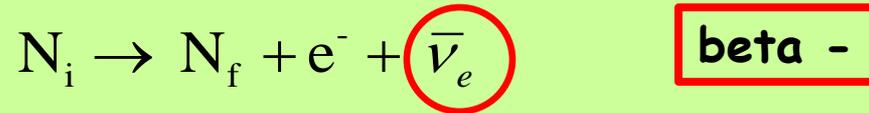
**Arthur B. McDonald**  
**Sudbury Neutrino Observatory  
Collaboration**

Queen's University, Kingston, Canada

**Motivazione: "For their key contributions to the experiments which demonstrated that neutrinos change identities. This metamorphosis requires that neutrinos have mass. "**

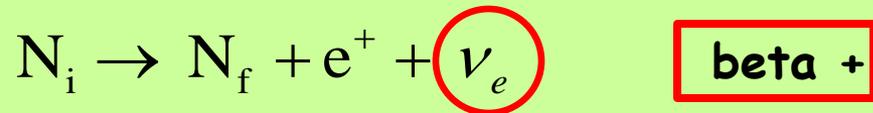
Qualche richiamo sui neutrini

Molti nuclei atomici instabili acquisiscono stabilita' emettendo radiazione beta:



(in caso di eccesso di neutroni nel nucleo iniziale)

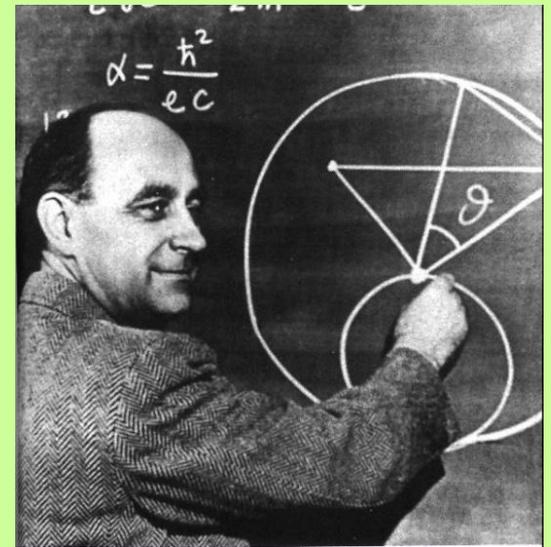
assieme all'elettrone viene anche emesso un neutrino:  
particella di carica nulla e massa piccola rispetto a quella dell'elettrone (ipotesi di Wolfgang Pauli 1930)



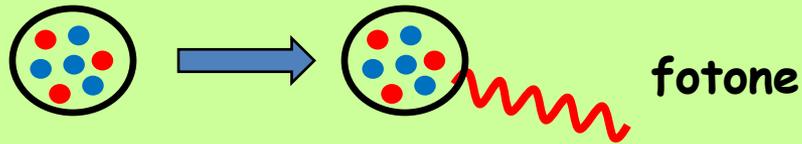
(in caso di eccesso di protoni nel nucleo iniziale)



emissione di coppia elettrone-neutrino in analogia con il caso elettromagnetico (FERMI)

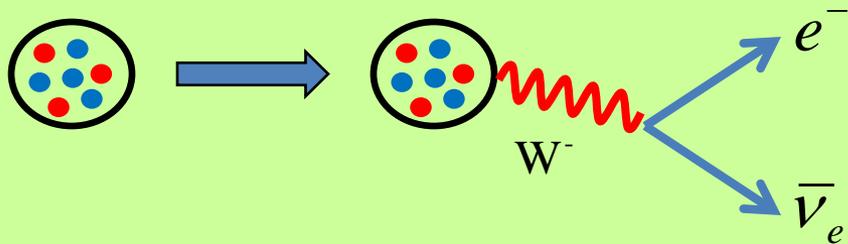


diseccitazione di un nucleo

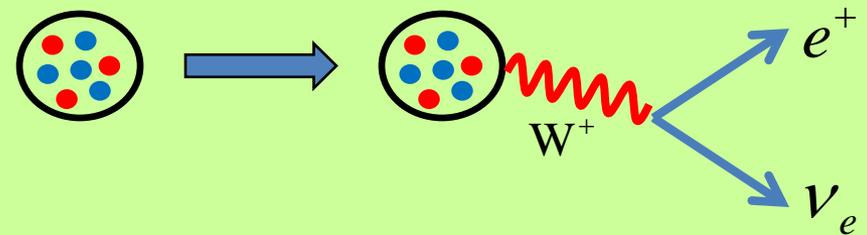


teoria dell'interazione debole (1933)

decadimento  $\beta^-$  di un nucleo



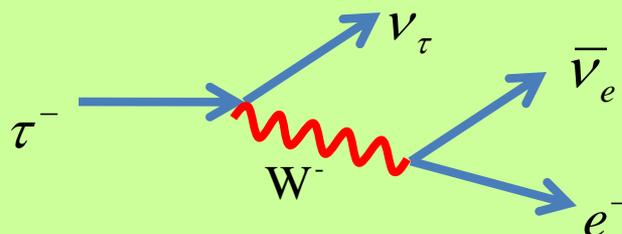
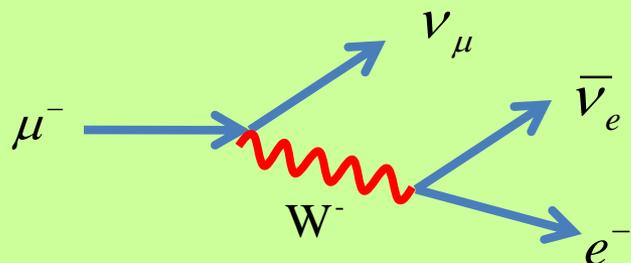
decadimento  $\beta^+$  di un nucleo



Nel 1957 **Fred Reines e Clyde Cowan** mostrano sperimentalmente che **il neutrino esiste**:  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$

Altre evidenze sperimentalmente indicano che **in natura esistono 3 leptoni carichi** (i leptoni sono particelle che non partecipano all'interazione forte) e **3 neutrini a loro corrispondenti in modo biunivoco**

L'elettrone  $e^-$  è stabile; i leptoni  $\mu^-$  e  $\tau^-$  sono instabili



I 3 neutrini  $\nu_e$   $\nu_\mu$   $\nu_\tau$  associati rispettivamente a  $e^-$ ,  $\mu^-$ ,  $\tau^-$  si dicono neutrini di **sapore definito** - i leptoni sono organizzati in famiglie

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

+ loro  
antiparticelle

I neutrini sono prodotti da:

sorgenti naturali

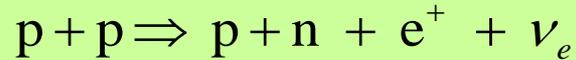
- sorgenti astrofisiche (**sole**, supernove, ...)
- urti di raggi cosmici con nuclei dell'atmosfera terrestre (**neutrini atmosferici**)
- emissione dalla terra (**geoneutrini**)
- neutrini fossili** (fondo cosmico di neutrini generati dal Big Bang)

sorgenti artificiali

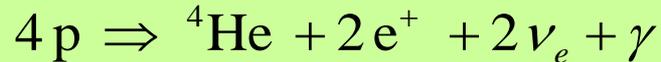
- reattori nucleari
- macchine acceleratrici di particelle

# Neutrini solari

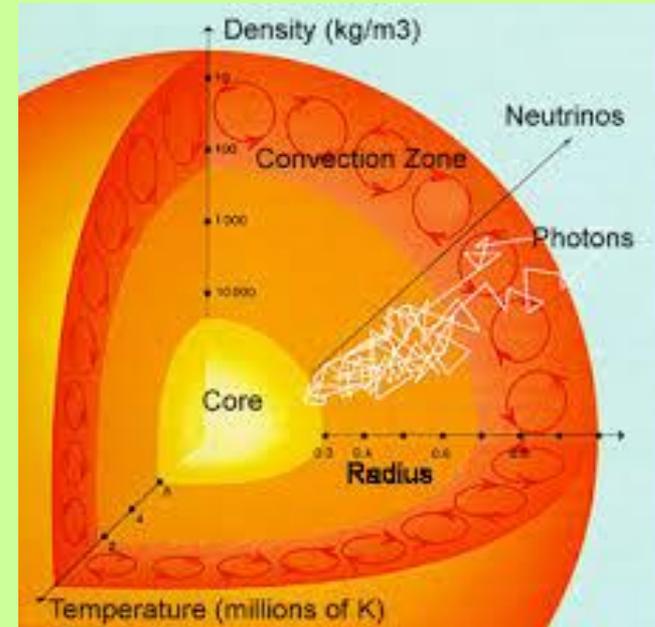
Il sole e' una potente sorgente di neutrini  $\nu_e$  prodotti in **reazioni di fusione termonucleare**, prevalentemente avviate dal processo



con risultato netto finale

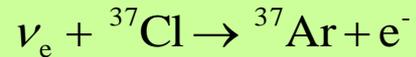


I neutrini hanno **energia media 1 MeV** ed un **flusso sulla terra**  $\approx 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

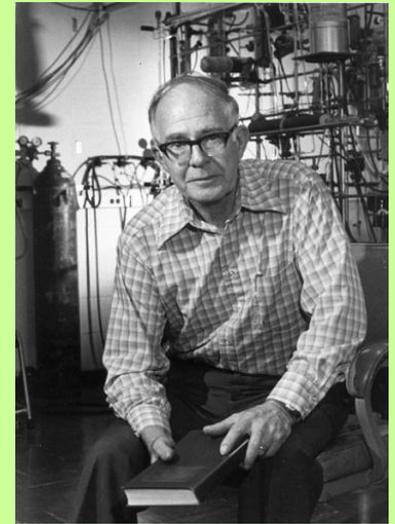


distanza Sole - Terra  $\approx 150 \cdot 10^6 \text{ Km}$

**Esperimento di Homestake:** i neutrini solari vengono rivelati mediante il processo (suggerito da Bruno Pontecorvo)



133 tonnellate di  ${}^{37}\text{Cl}$  sotto forma di tetracloroetilene (615 tonn.): un evento ogni 2 giorni



Raymond Davis Jr  
(Nobel 2002)

progetto iniziato nel 1964 - primi risultati presentati nel 1968 (ulteriori raccolte di dati nel periodo 1970-1994):

il flusso misurato di  $\nu_e$  è circa un terzo di quello predetto in base al modello solare (John Bahcall)  $\longrightarrow$  problema del deficit dei neutrini solari osservati

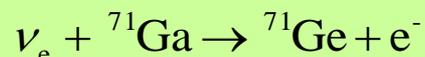
Altri esperimenti su neutrini solari verificano un importante deficit nei neutrini osservati rispetto a quelli predetti dal modello solare:

### Esperimenti radiochimici

**GALLEX/GNO** ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso (1991-2003)

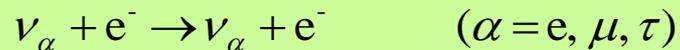
**SAGE** nel Baksan Neutrino Observatory (1990-2001)

in questi esperimenti i neutrini sono rivelati mediante la reazione



### Esperimenti con rivelatori a luce Cherenkov in acqua

In questi esperimenti i neutrini vengono rivelati in tempo reale osservando la radiazione Cherenkov emessa dai leptoni carichi prodotti dai neutrini



**Kamiokande** nella miniera di Kamioka, Giappone (1987-1995)

**Super-Kamiokande** (1996-2001)

## Dilemma

★ il modello solare sovrastima grossolanamente i flussi dei neutrini  $\nu_e$  emessi?

oppure

★ i neutrini  $\nu_e$  si perdono per strada?

questa seconda opzione è legata alla possibilità che il neutrino solare  $\nu_e$ , dal momento della sua produzione (termonucleare) nel Sole al momento della sua osservazione in un laboratorio sulla Terra, si trasformi (oscilli) in un neutrino di diverso sapore :  $\nu_\mu$  oppure  $\nu_\tau$

la possibilità di oscillazione del neutrino venne considerata per la prima volta da Bruno Pontecorvo nel 1967

## Come nasce la possibilità che i neutrini oscillino?

per semplificarci un po' la vita: consideriamo solo due "sapori"

Supponiamo che il neutrino di **sapore definito**, per esempio  $\nu_e$ , **non** abbia un valore di massa definito, ma **sia una sovrapposizione di stati con massa definita**

$$|\nu_e\rangle = a_1 |\nu_{m_1}\rangle + a_2 |\nu_{m_2}\rangle$$

$p_1 = |a_1|^2 =$  **probabilità** che lo stato  $\nu_e$  abbia massa  $m_1$

$p_2 = |a_2|^2 =$  **probabilità** che lo stato  $\nu_e$  abbia massa  $m_2$

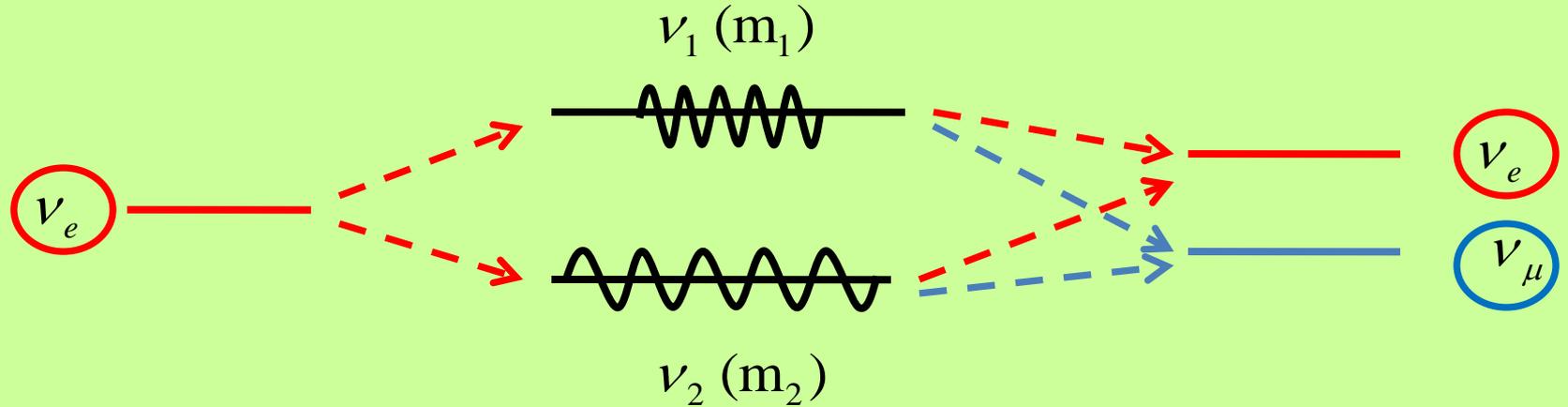
$$p_1 + p_2 = 1$$

analogamente:

$$|\nu_\mu\rangle = b_1 |\nu_{m_1}\rangle + b_2 |\nu_{m_2}\rangle$$

**In questo caso quali implicazioni per l'evoluzione temporale dei neutrini di sapore definito?**

Semplifichiamoci un po' la vita: consideriamo solo due "sapori"



nella sua evoluzione temporale il neutrino  $\nu_e$  puo' trasformarsi in  $\nu_\mu$



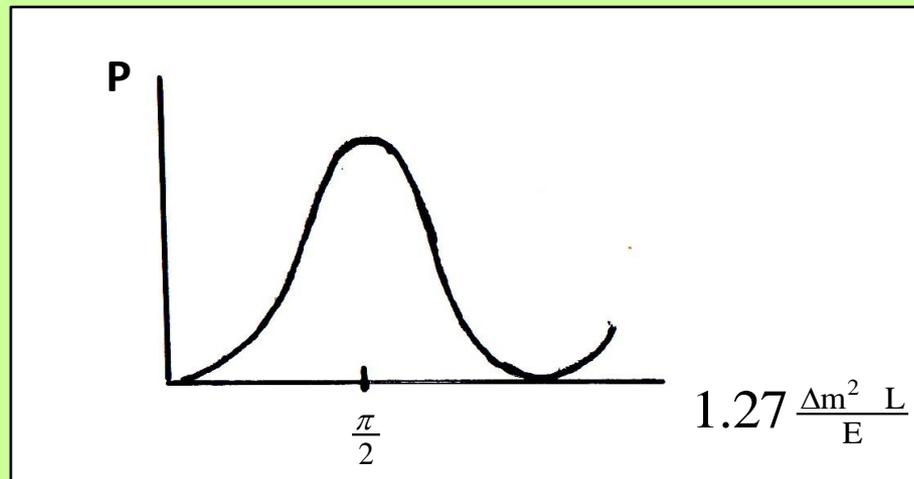
# Probabilità di trasformazione

$$\nu_e \longrightarrow \nu_\mu$$

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

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$

E = energia in GeV  
L = distanza in km  
masse in eV/(c)<sup>2</sup>



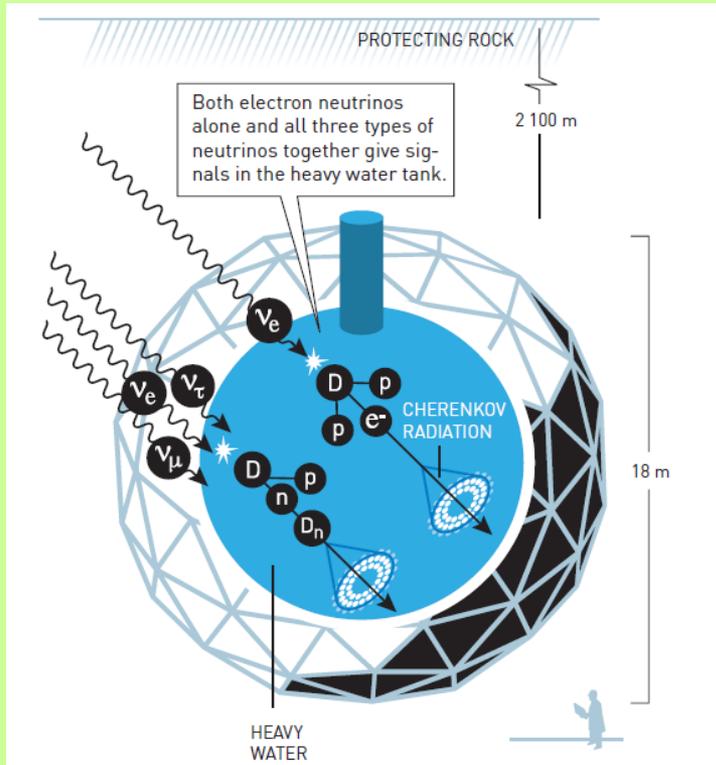
neutrini solari

$$L \approx 10^8 \text{ km}, E = 0.2 - 15 \text{ MeV}$$

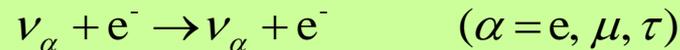
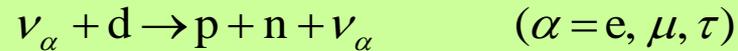
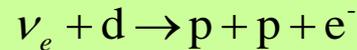
il fenomeno di oscillazione è **accentuato** quando il neutrino attraversa **zone di elevata densità di materia** (come nel sole)

Come stabilire se nel caso dei neutrini solari avviene il fenomeno di oscillazione?

La risposta è data dalle misure eseguite nel laboratorio sotterraneo Sudbury Neutrino Observatory (Ontario, Canada) con un rivelatore contenente mille tonnellate di acqua pesante  $D_2O$



si utilizzano le reazioni:



vengono misurati indipendentemente:

- il flusso di  $\Phi_{\nu_e}$

- il flusso totale  $\Phi_{tot}$  dovuto a  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

Risultati:



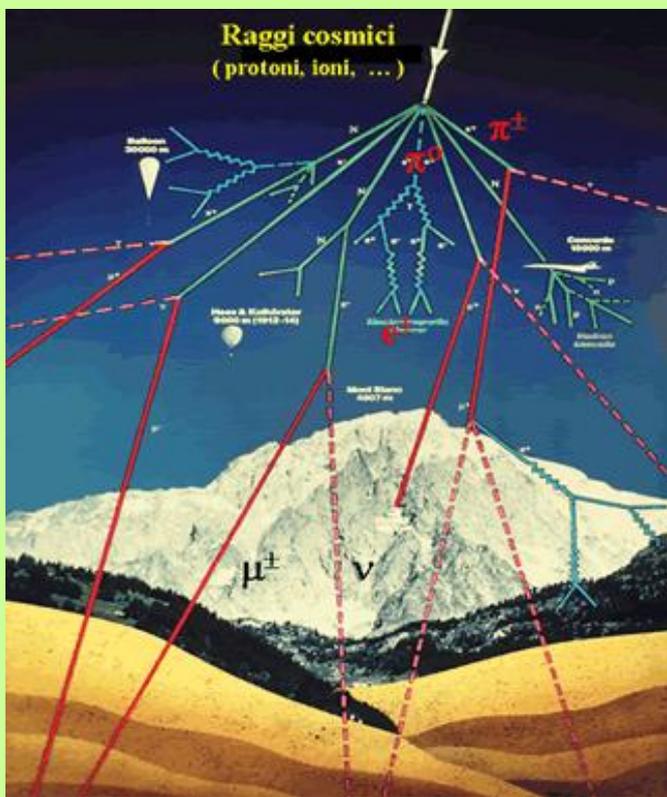
$\Phi_{tot}$

in ottimo accordo con le previsioni del modello solare



$$\Phi_{\nu_e} \approx \frac{1}{3} \Phi_{tot}$$

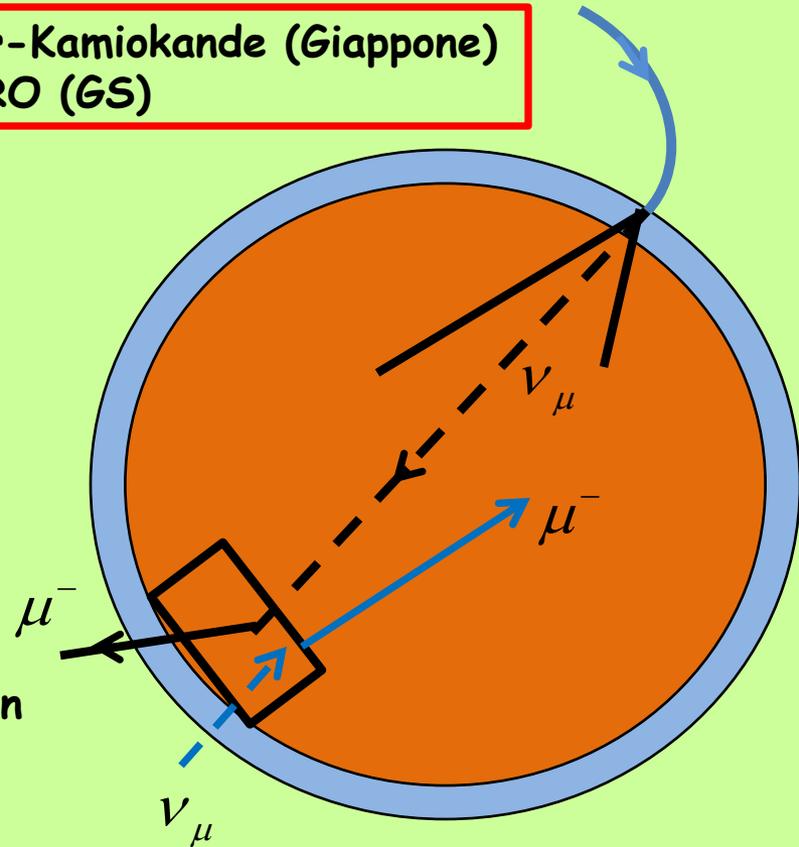
**Conclusione: il deficit di neutrini solari è dovuto alle loro oscillazioni**



# Neutrini atmosferici

raggi cosmici

Super-Kamiokande (Giappone)  
MACRO (GS)



Neutrini atmosferici: generati da interazioni di raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera con energia di 100 MeV - 100 GeV

Risultato 
$$asimmetria \equiv \frac{N_{up} - N_{down}}{N_{up} + N_{down}} \approx -\frac{1}{3}$$

atmosfera terrestre: spessore 20 km  
diametro terrestre: 13.000 km

In accordo con quanto osservato con gli esperimenti:  
Soudan 2 (USA) e MACRO (Lab. Gran Sasso)

## Valori delle masse neutriniche

★ dalle misure di neutrini solari:  $m_2^2 - m_1^2 \approx 7.9 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 / c^4$

★ dalle misure di neutrini atmosferici:  $m_3^2 - m_2^2 \approx 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 / c^4$

★ non esistono ancora misure assolute delle masse neutriniche, ma **solo limiti superiori**; dallo studio dei decadimenti beta e da **misure cosmologiche** si trova

$$\sum_i m_i < (0.5 - 1) \text{ eV}/c^2$$

# Uno sguardo al futuro: i neutrini come messaggeri di informazione di astrofisica



Oggi ho fatto qualcosa di molto brutto,  
proponendo **una particella che non puo'  
essere rivelata**; e' qualcosa che un teorico  
non dovrebbe mai fare

Wolfgang Pauli



Un'intuizione geniale seguita da un commento  
**fortunatamente errato !**