

# UN VIAGGIO IN TRE TAPPE NEL MONDO DEI NEUTRINI

Prima tappa: Anni 30 – il neutrino entra sulla scena  
della fisica delle particelle

Seconda tappa: Neutrini – masse e oscillazioni

Terza tappa: I neutrini come mezzo di osservazione  
astronomica

Biblioteca Civica Archimede  
Settimo Torinese, 11 maggio 2011

Alessandro Bottino  
INFN/Università di Torino

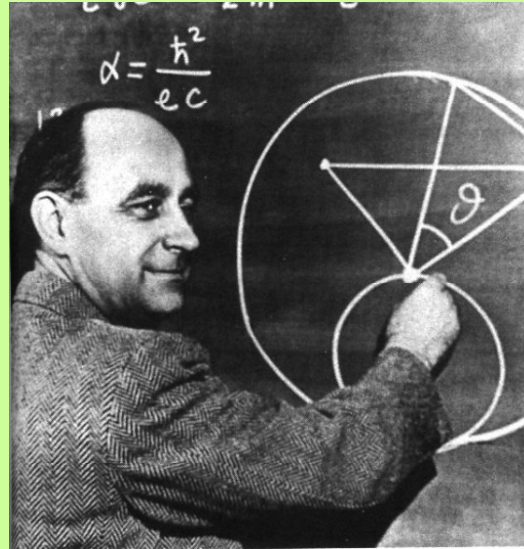
## **Prima tappa**

**Anni 30: il neutrino entra sulla scena  
della fisica delle particelle**



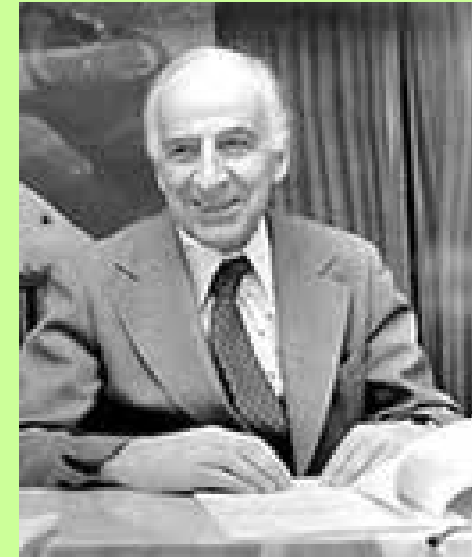
**Wolfgang Ernst Pauli**  
**(1900 – 1958)**

**ipotesi dell'esistenza  
del neutrino (1930)**



**Enrico Fermi**  
**(1901 – 1954)**

**teoria dell'interazione  
debole (1933)**



**Bruno Pontecorvo**  
**(1913 – 1993)**

**oscillazione del  
neutrino (1957)**

4 December 1930  
Gloriastr.  
Zürich

Physical Institute of the  
Federal Institute of Technology (ETH)  
Zürich

Dear radioactive ladies and gentlemen,

~~As the bearer of these lines, to whom I ask you to listen~~  
graciously, will explain more exactly, considering the 'false' statistics of N-14 and Li-6 nuclei, as well as the continuous  $\beta$ -spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem"\* of statistics and the energy theorem. Namely [there is] the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call neutrons,\*\* which have spin  $1/2$  and obey the exclusion principle, and additionally differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light: The mass of the neutron must be of the same order of magnitude as the electron mass and, in any case, not larger than 0.01 proton mass. The continuous  $\beta$ -spectrum would then become understandable by the assumption that in  $\beta$  decay a neutron is emitted together with the electron, in such a way that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

Now, the next question is what forces act upon the neutrons. The most likely model for the neutron seems to me to be, on wave mechanical grounds (more details are known by the bearer of these lines), that the neutron at rest is a magnetic dipole of a certain moment  $\mu$ . Experiment probably required that the ionizing effect of such a neutron should not be larger than that of a  $\gamma$  ray, and thus  $\mu$  should probably not be larger than  $e \cdot 10^{-13}$  cm.

But I don't feel secure enough to publish anything about this idea, so I first turn confidently to you, dear radioactives, with a question as to the situation concerning experimental proof of such a neutron, if it has something like about 10 times the penetrating capacity of a  $\gamma$  ray.

I admit that my remedy may appear to have a small a priori probability because neutrons, if they exist, would probably have long ago been seen. However, only those who wager can win, and the seriousness of the situation of the continuous  $\beta$ -spectrum can be made clear by the saying of my honored predecessor in office, Mr. Debye, who told me a short while ago in Brussels, "One does best not to think about that at all, like the new taxes." Thus one should earnestly discuss every way of salvation.—So, dear radioactives, put it to test and set it right.—Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen, since I am indispensable here on account of a ball taking place in Zürich in the night from 6 to 7 of December.—With many greetings to you, also to Mr. Back, your devoted servant,

W. Pauli

\*In the 1957 lecture, Pauli explains, "This reads: exclusion principle (Fermi statistics) and half-integer spin for an odd number of particles; Bose statistics and integer spin for an even number of particles."

Il 4 dicembre 1930 Pauli scrive ai partecipanti di un congresso di esperti di radioattività in Tübingen.

Cari Signore e Signori radioattivi...  
... come soluzione disperata al problema di...  
sono giunto a considerare la possibilità che  
possa esistere nel nucleo **una particella  
elettricamente neutra, che chiamerò  
"neutron"**.

Per il momento non oso pubblicare nulla  
circa questa idea e mi rivolgo a voi in modo  
confidenziale chiedendomi come vi possa  
essere una conferma sperimentale ...

Così, cari Signori radioattivi, esaminate e  
giudicate. Sfortunatamente non posso  
comparire personalmente a Tübinga, dal  
momento che **un ballo che avrà luogo nella  
notte del 6-7 dicembre rende la mia  
presenza qui indispensabile**.

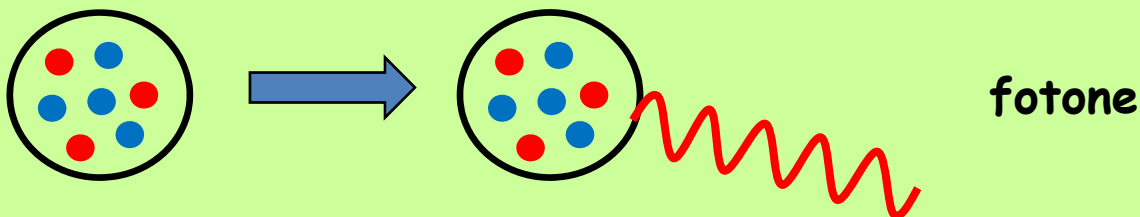
Il vostro umile servitore, W. Pauli

Emissione beta nucleare:

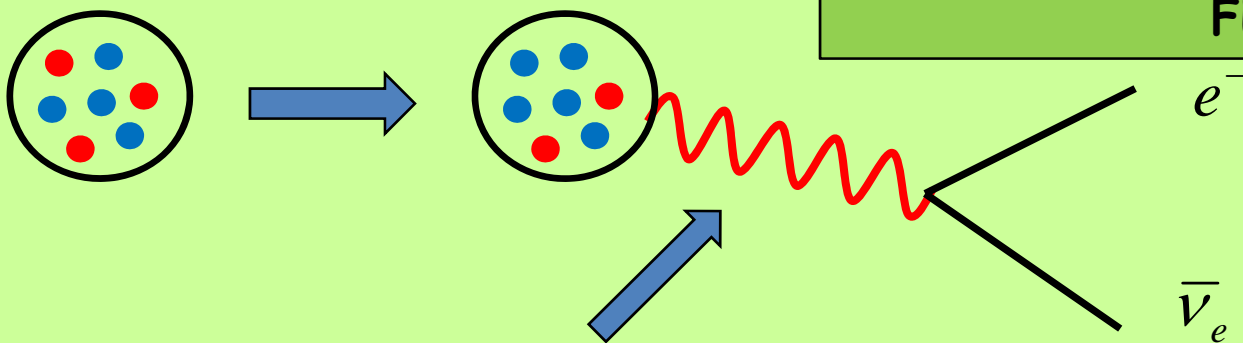
$$N_i \Rightarrow N_f + e^- + \bar{\nu}_e$$

viene anche emesso un neutrino: particella di carica nulla e massa piccola rispetto a quella dell'elettrone (ipotesi di PAULI)

diseccitazione di un nucleo



decadimento beta di un nucleo



emissione di coppia elettrone-neutrino in analogia con il caso elettromagnetic FERMI

questo sarà il **bosone W** del **modello standard** dell'interazione elettrodebole

$$n \Rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

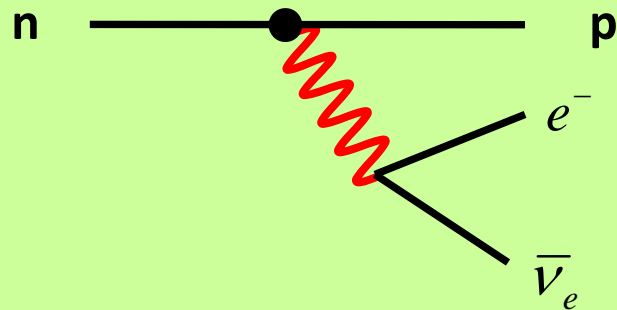
Fermi pubblica nel 1933 sulla "Rivista Scientifica" un articolo dal titolo: "Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi Beta"

- un suo manoscritto inviato alla rivista "Nature" viene respinto con il giudizio: "speculazioni astratte, troppo lontane dalla realta' fisica per essere di interesse per il lettore"
- versioni ampliate pubblicate su "Nuovo Cimento" (1933) e su "Zeitschrift fur Physik" (1934)

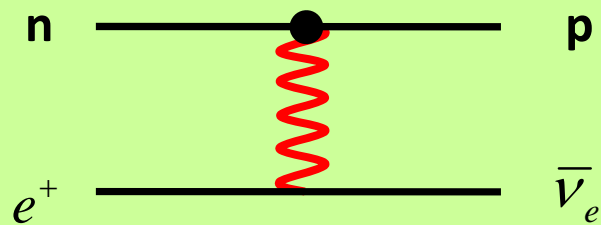


Steve Weinberg (Premio Nobel) in un suo lavoro fondamentale sul Modello Standard (1967):  
"La storia dei tentativi di unificazione di interazione elettromagnetica ed interazione debole e' molto lunga. Probabilmente il primo lavoro in questo senso e' E. Fermi, Zeitschrift fur Physik".

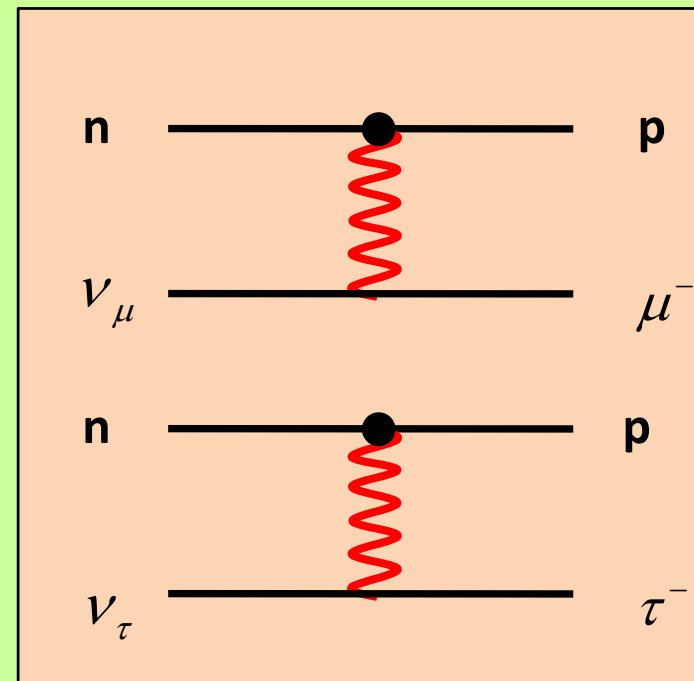
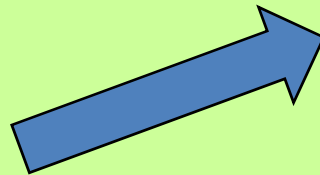
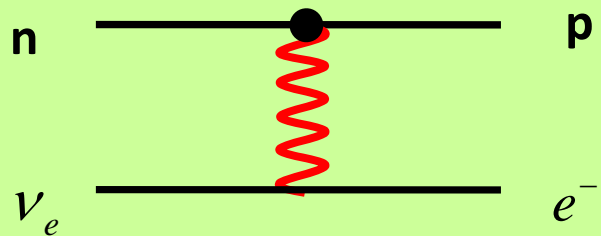
rappresentiamo il **decadimento del neutrone** con il diagramma



schema analogo per **urto di positrone su neutrone**

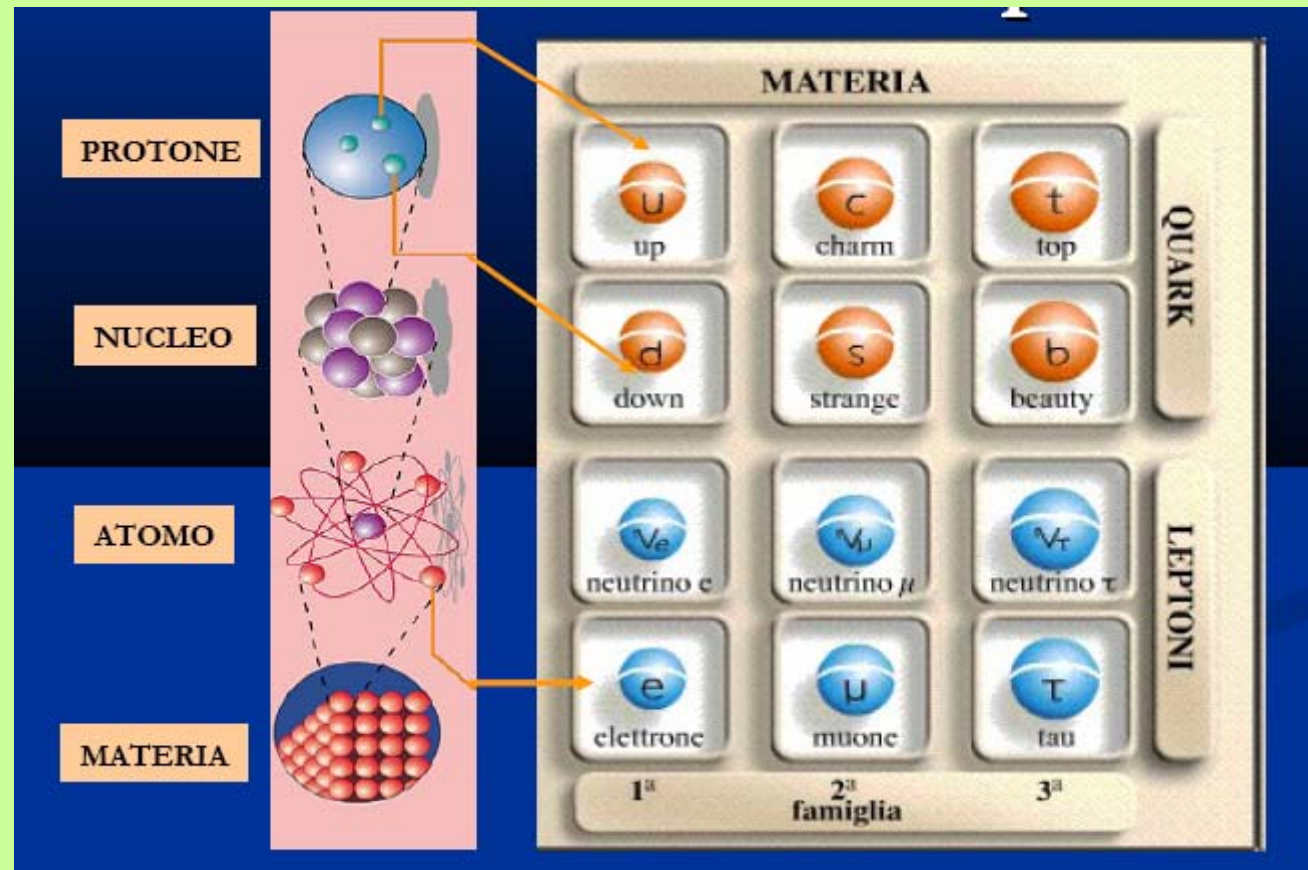


oppure urto **neutrino-neutrone**



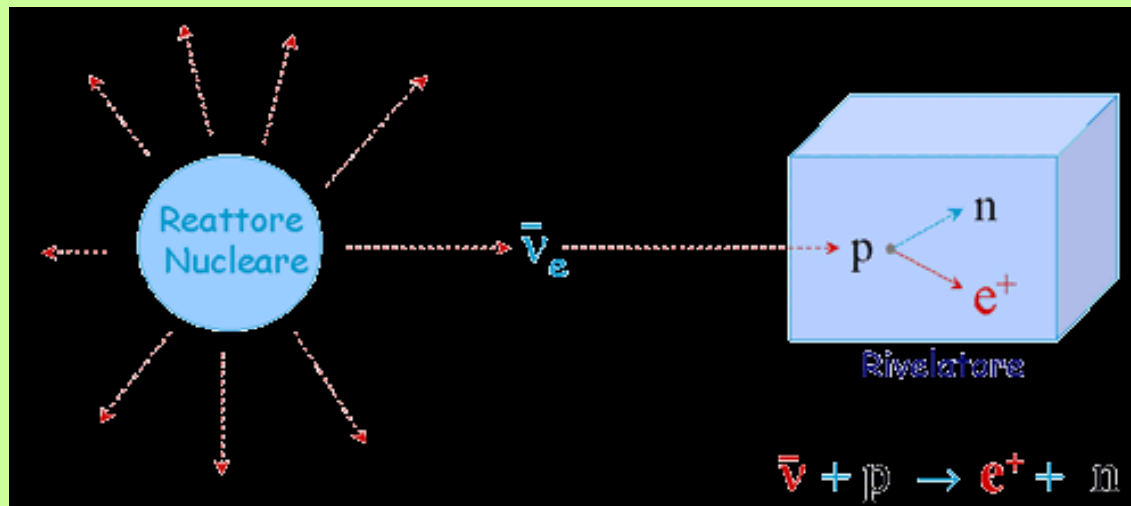
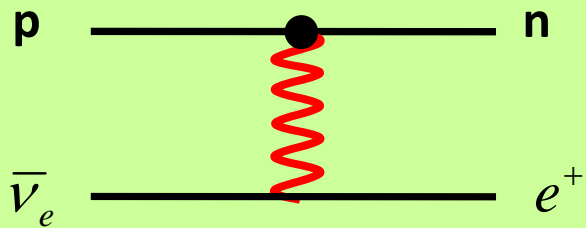
esistono 3 tipi di neutrini di diverso "sapore"







## Prima rivelazione di neutrino (Fred Reines e Clyde Cowan, 1957)



**Seconda tappa**

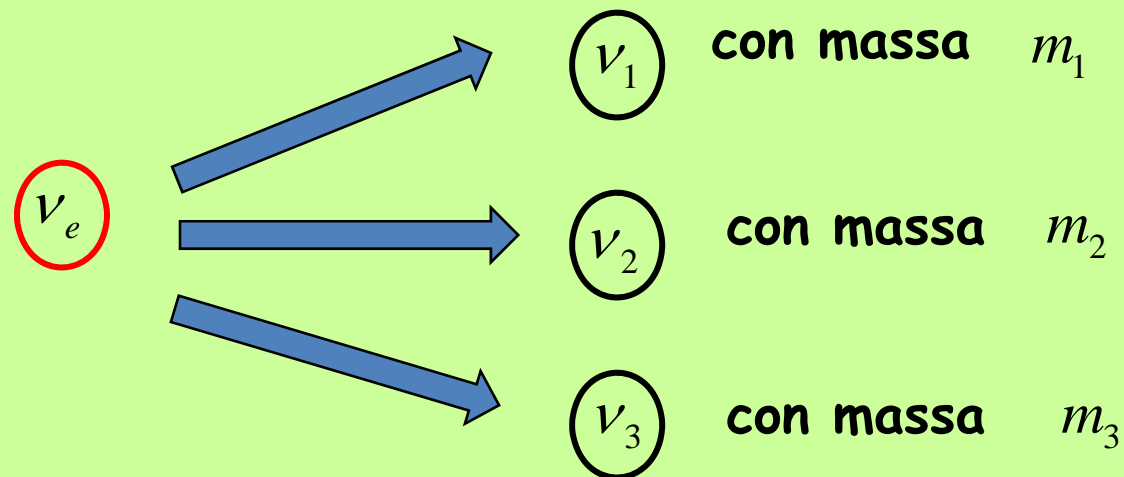
**Neutrini - masse e oscillazioni**

Qual e' il valore di massa di un neutrino di "sapore" definito?

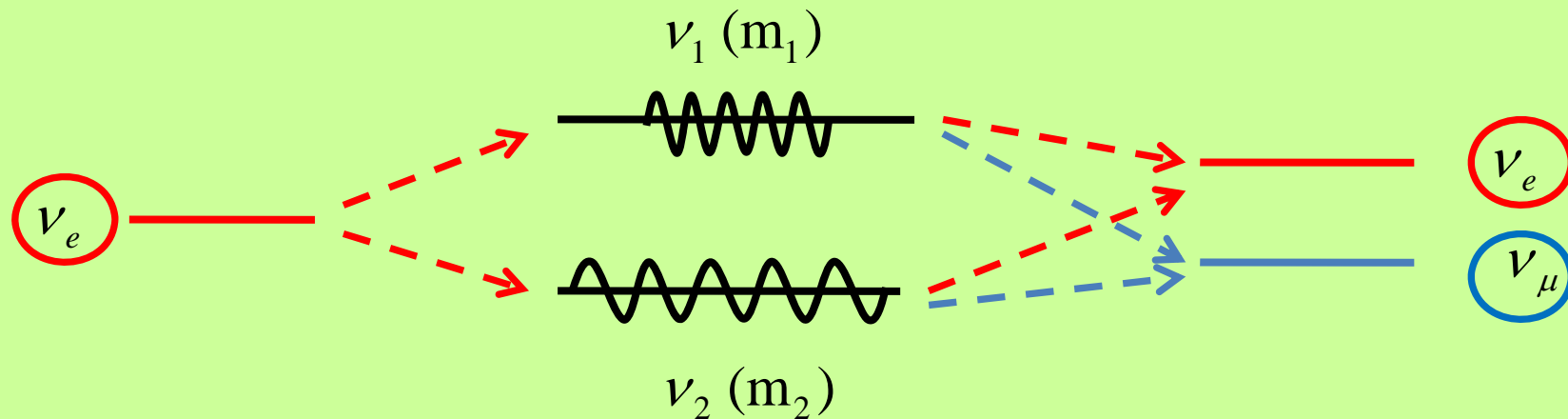
Ipotesi di Pontecorvo:

- un neutrino di sapore definito non ha un valore determinato di massa
- una misura di massa puo' dare uno su 3 possibili valori di massa ciascuno con una probabilita' definita
- queste proprieta' comportano il fenomeno di trasformazione del neutrino di un sapore in neutrino di diverso sapore (oscillazione)

Per esempio:



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



nella sua evoluzione temporale il neutrino  $\nu_e$  può 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

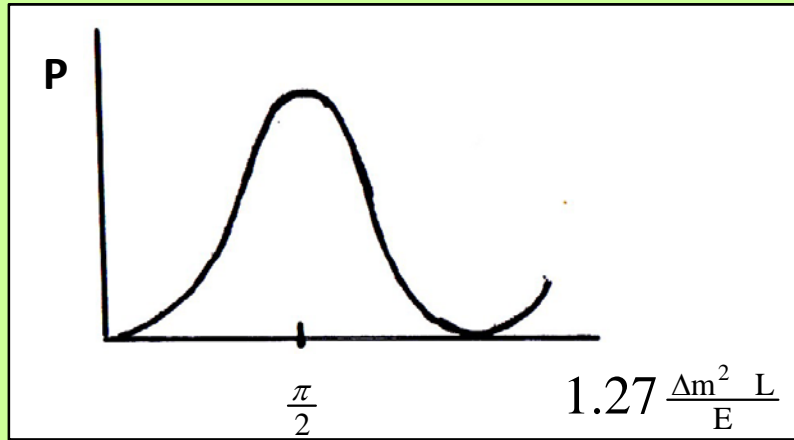
masse in  $\text{eV}/(c)^2$

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

**E = energia in GeV**

**L = distanza in km**

**masse in eV/(c)<sup>2</sup>**



**sensibilita' in  $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$**

$$\Delta m^2 \approx \frac{E}{L}$$

**neutrini solari**

$L \approx 10^{11}$  km,  $E = 0.2 - 15$  MeV

**neutrini atmosferici**

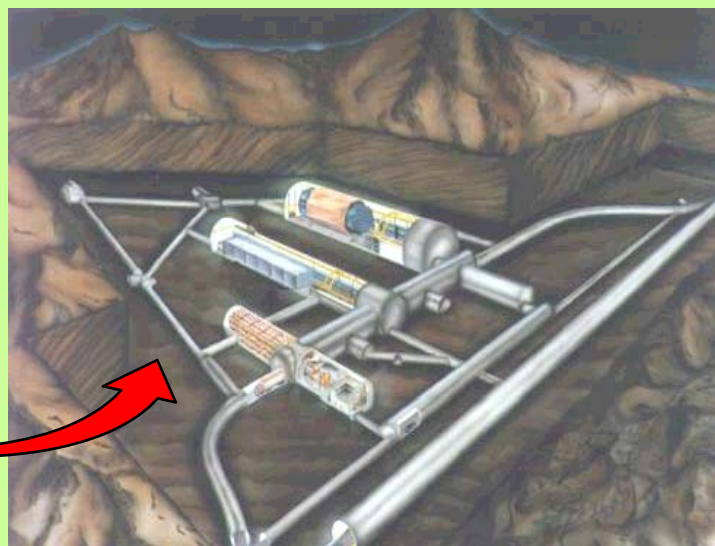
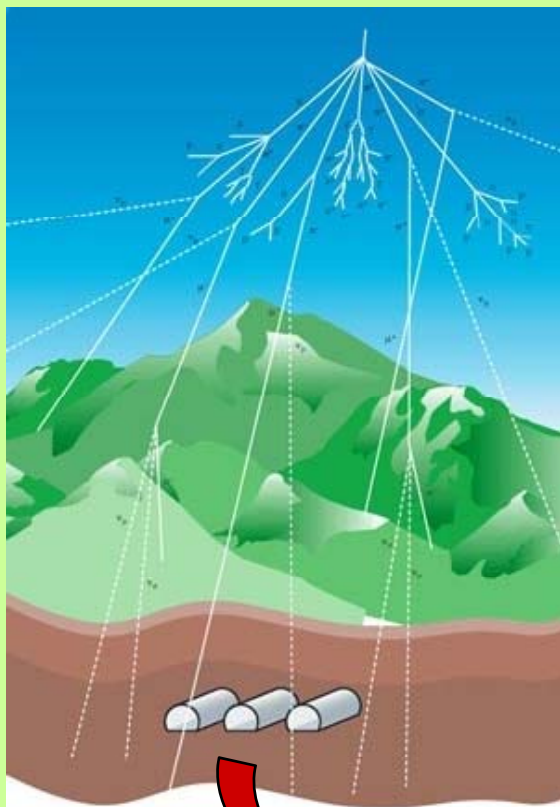
$L \approx 20 - 10^4$  km,  $E = 0.1 - 100$  GeV

**neutrini da reattori nucleari**

$E \approx 1$  MeV,  $L$  variabile

**neutrini da acceleratori nucleari**  $E$  variabile,  $L$  variabile

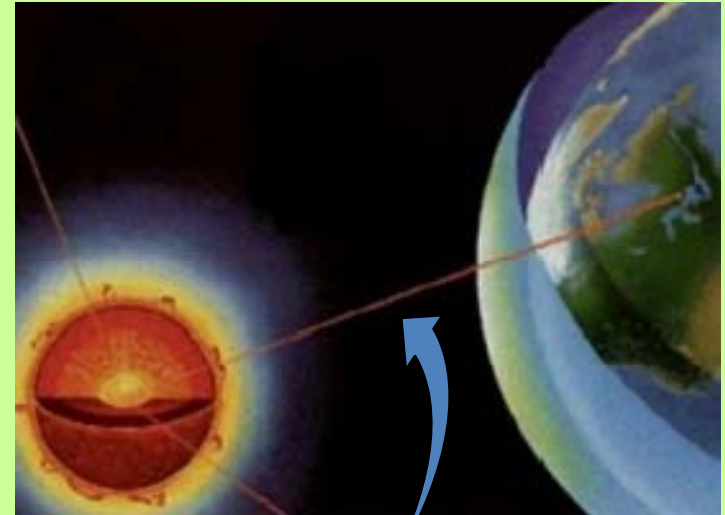
le misure di rivelazione devono essere fatte in ambienti  
protetti dai raggi cosmici  
(laboratori sotterranei - Laboratorio del Gran Sasso)



## Neutrini solari

il sole e' una potente sorgente di neutrini  $\nu_e$ , prodotti in reazioni di fusione termonucleare, con energie attorno ad 1 MeV

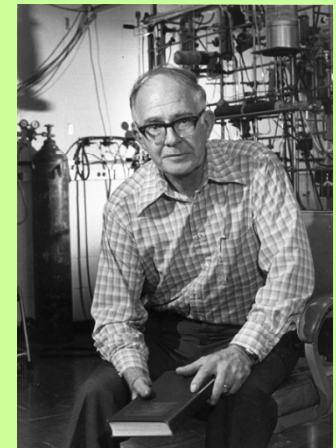
flusso sulla terra  $\approx 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



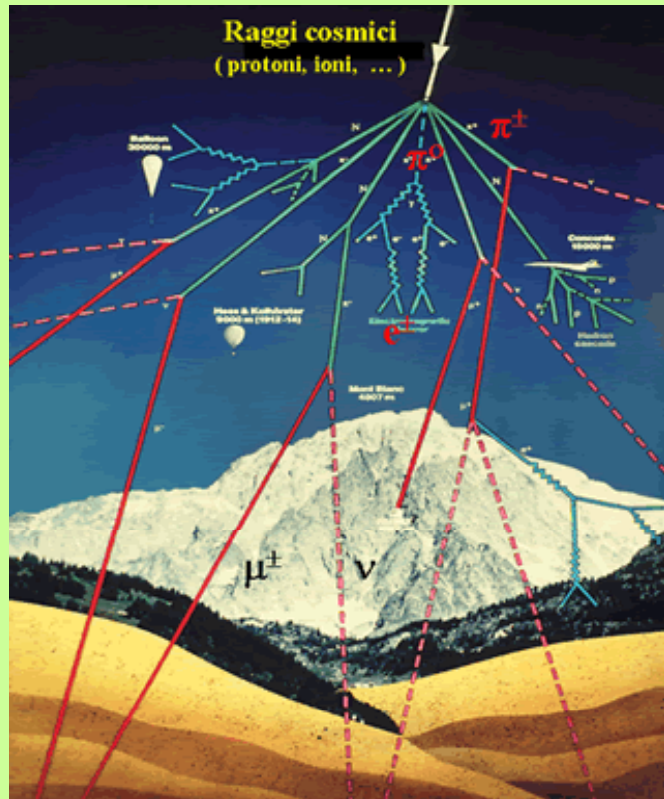
distanza Sole - Terra  $\approx 10^{11} \text{ km}$

esperimento pilota (**Homestake experiment**):  
il flusso di neutrini misurato e' solo un terzo di quello atteso sulla base del modello solare (**deficit dei neutrini solari**) - Kamioka, Gallex, Sage, SNO, Borexino

Raymond Davis Jr  
(Nobel 2002)

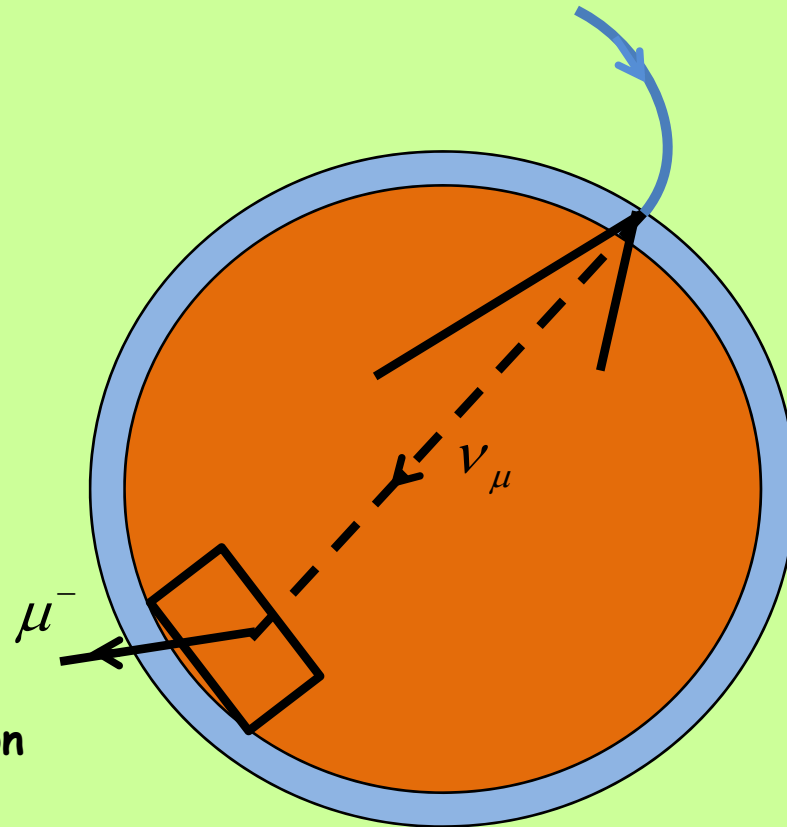






## Neutrini atmosferici

raggi cosmici



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

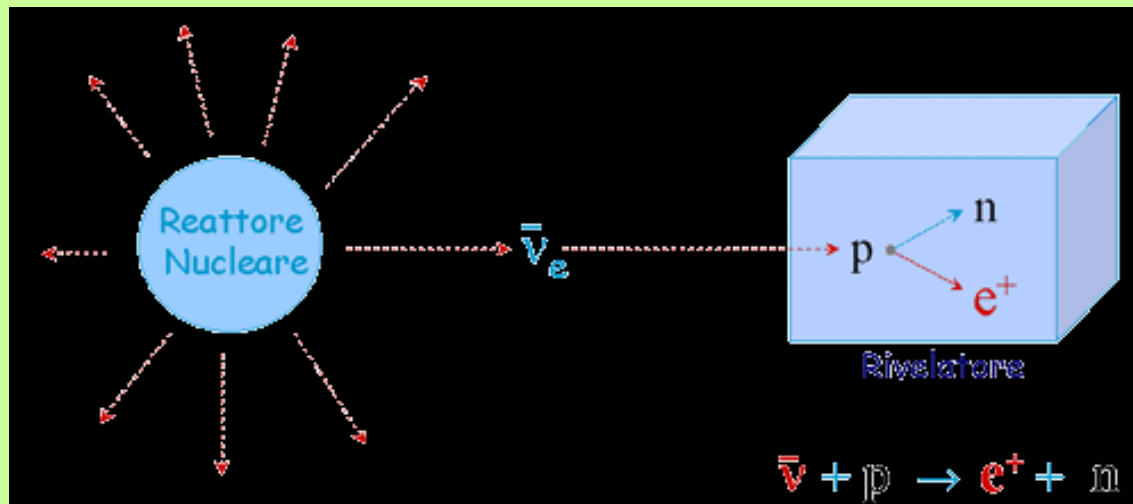


Super-Kamiokande (Giappone)  
MACRO (GS)

Masatoshi Koshiba  
(Nobel 2002)

atmosfera terrestre: spessore 20 km  
diametro terrestre: 13.000 km

(Anti)-neutrini **da reattori nucleari** generati da  
fissioni nucleari di  $U^{235}$ ,  $U^{238}$ ,  $Pu^{239}$ ,  $Pu^{241}$

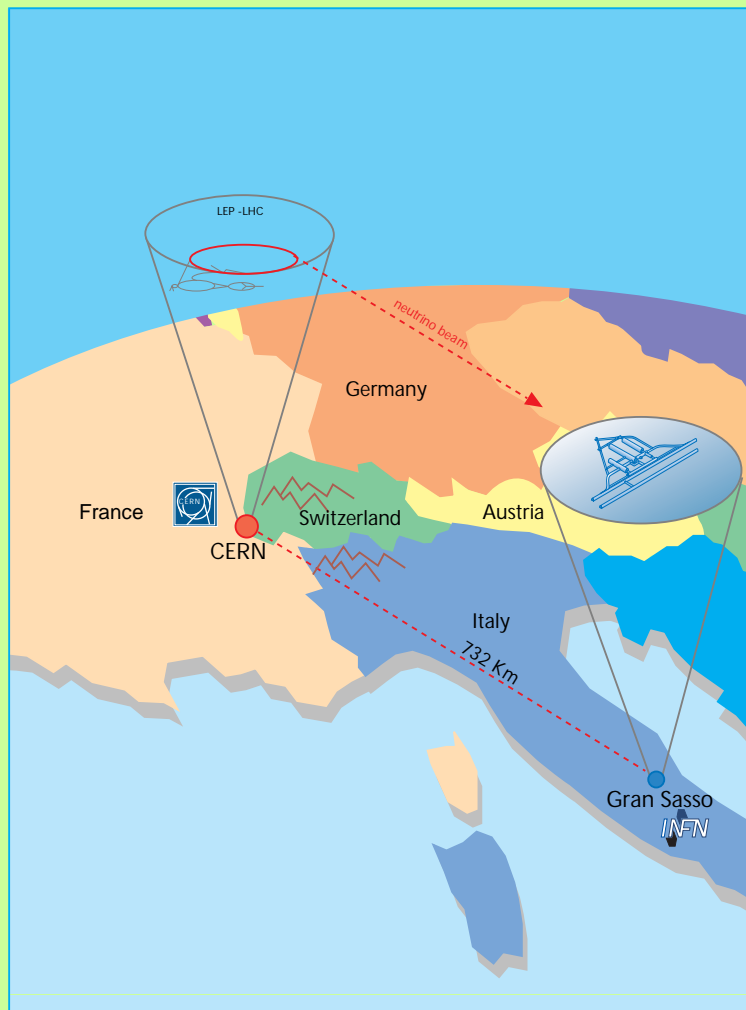


Energia degli antineutrini circa 1 MeV

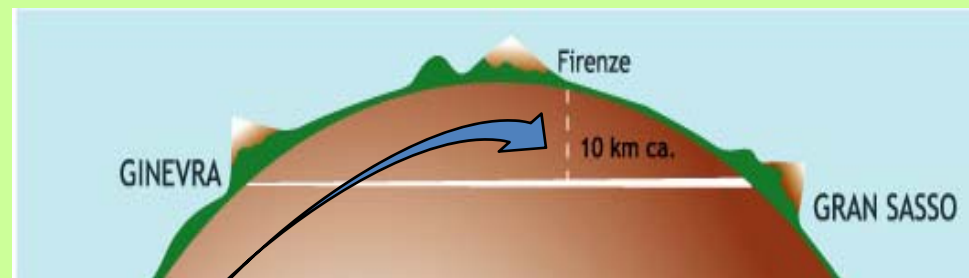
distanze variabili - negli esperimenti eseguiti o  
in corso  $L = 10 \text{ m}$ ,  $1 \text{ km}$ ,  $100 \text{ km}$

# CNGS CERN to Gran Sasso Neutrino Project

$$\nu_{\mu} \longrightarrow \nu_{\tau}$$

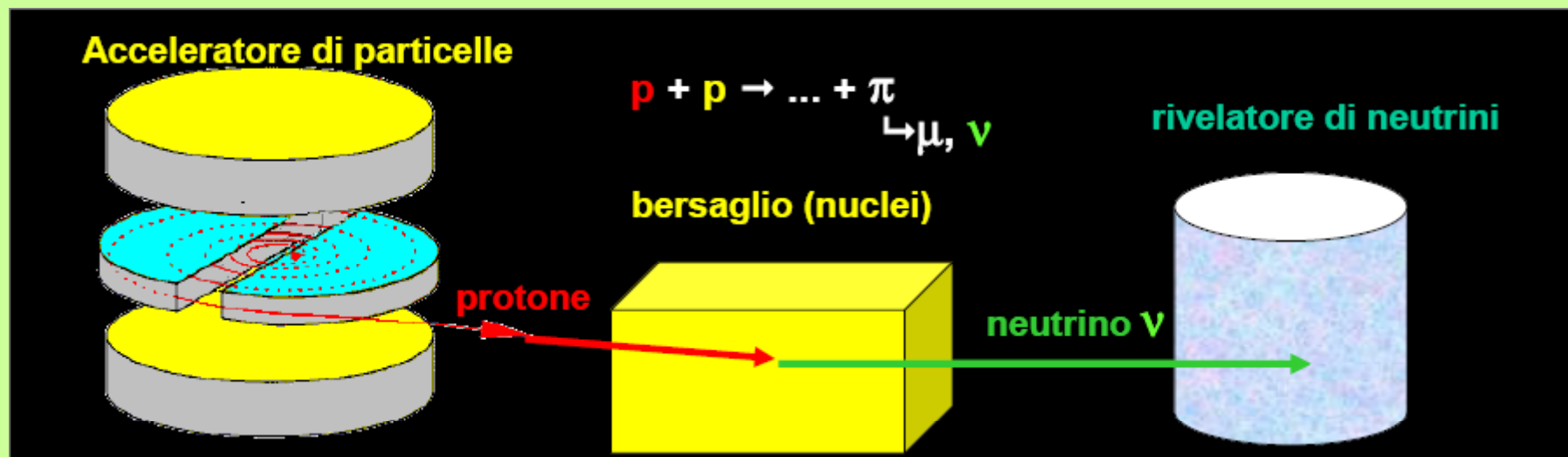


Fascio di  $\nu_{\mu}$  prodotto al CERN e rivelato al LNGS dopo un viaggio di 730 km - tempo di percorrenza circa 3 millisecondi



massima profondita' circa 10 km  
(raggio della terra circa 6400 km)

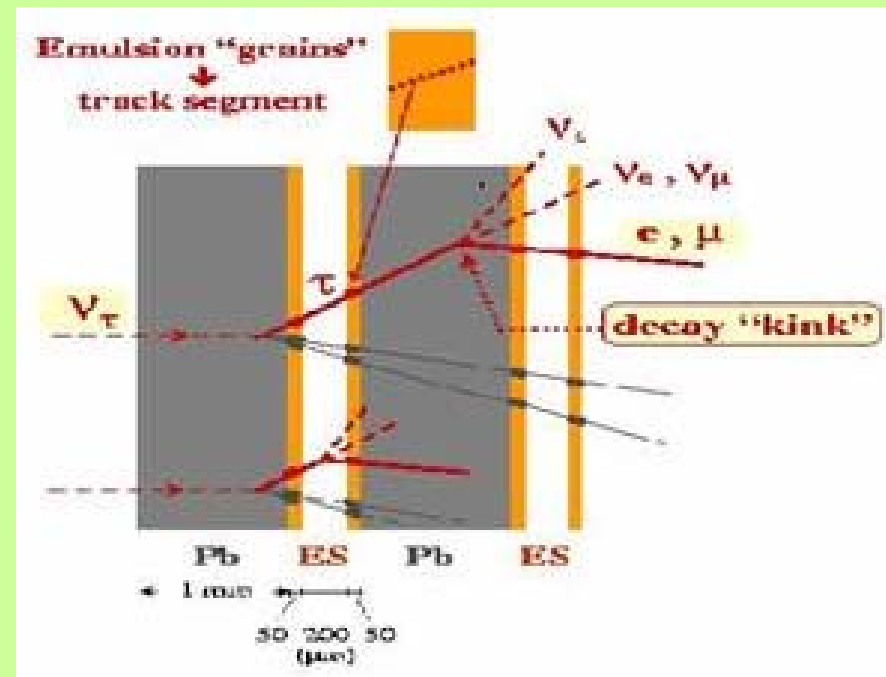
## Neutrini da acceleratori



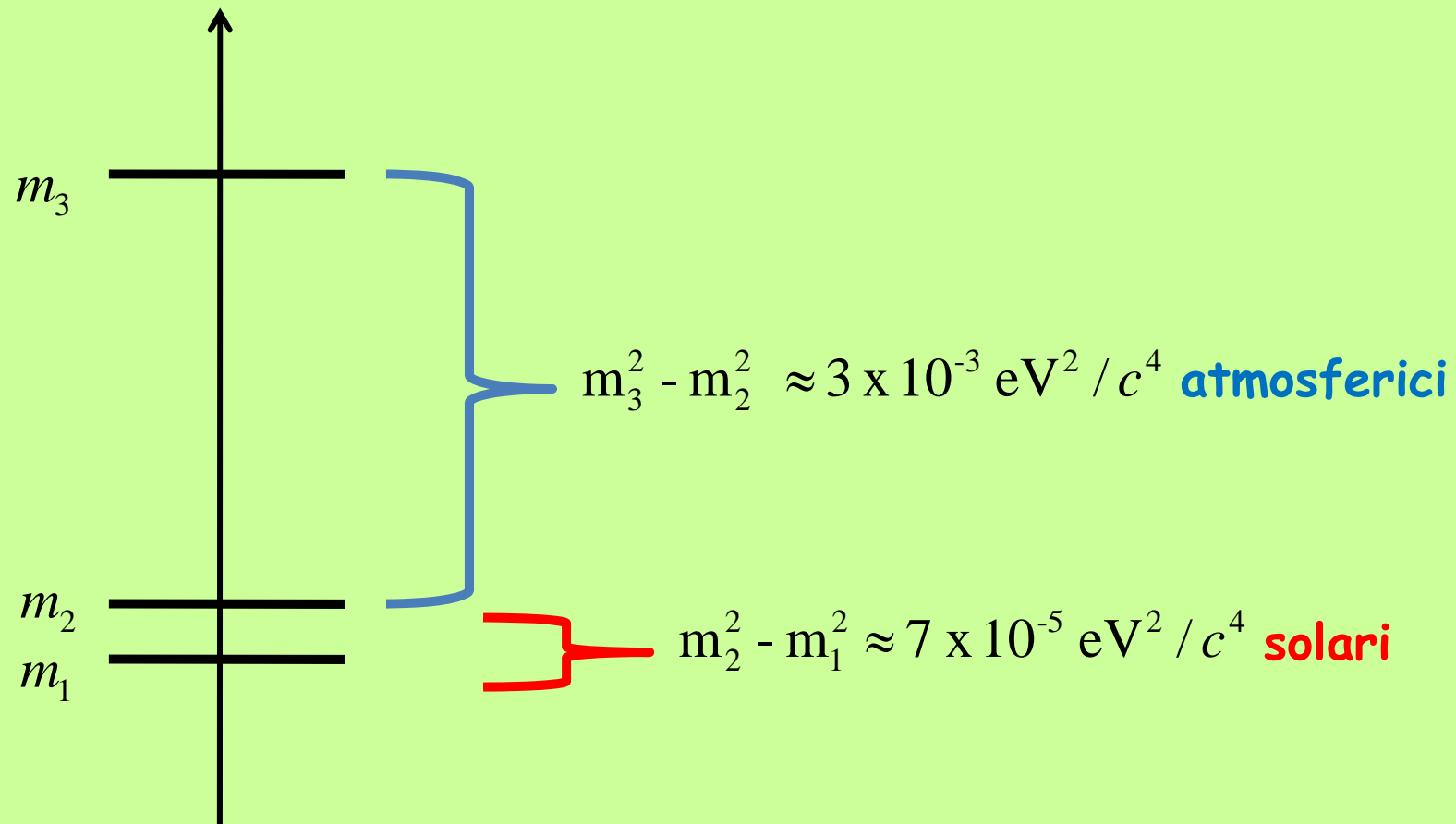
## Esperimento OPERA al Gran Sasso



$$\nu_{\mu} \longrightarrow \nu_{\tau}$$



## Riassumendo, masse di neutrini:



Non esiste una determinazione dei valori assoluti delle masse.  
Da misure di decadimenti beta e da considerazioni cosmologiche:

$$\text{massa del neutrino} < (0.1 - 1) \text{ eV}/c^2$$



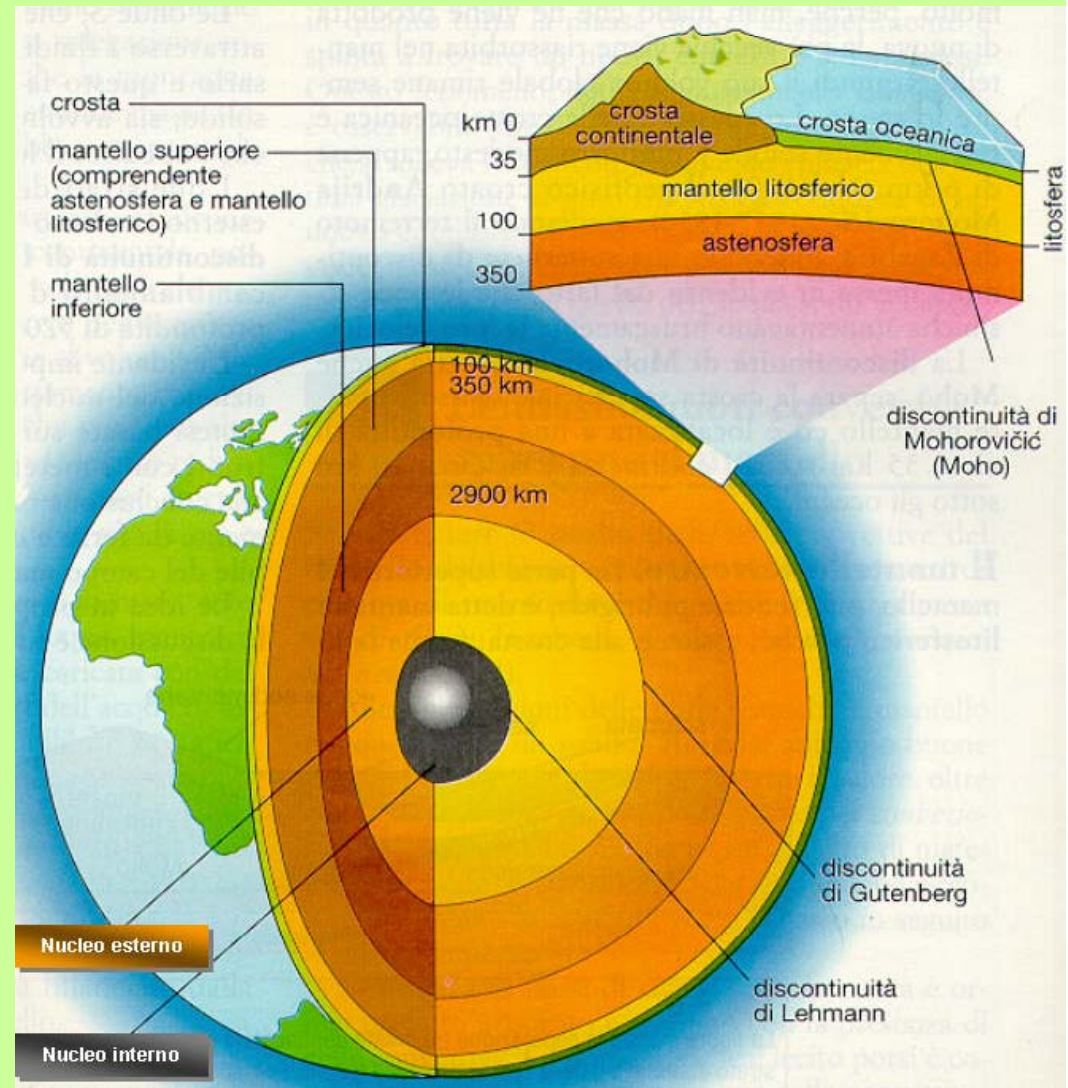
## Geoneutrini

(Anti)neutrini generati dalle catene di decadimento  
dei nuclei radioattivi  $U^{238}$ ,  $Th^{232}$ ,  $K^{40}$  nella terra

Questi decadimenti sono una  
delle maggiori fonti di calore  
generato dalla Terra

Quindi i geoneutrini sono anche  
di grande interesse geologico

I geoneutrini sono stati  
misurati in Giappone  
(KamLAND) e in Italia  
(Borexino, LNGS)

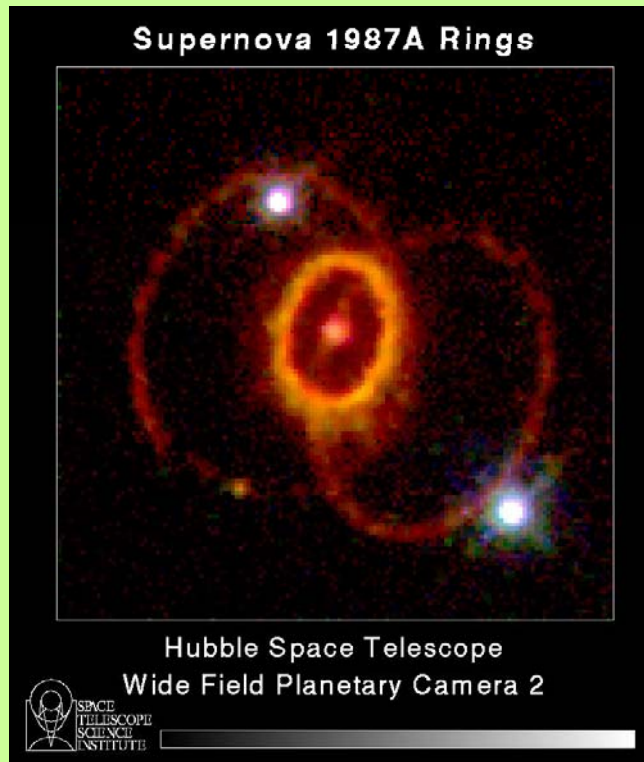




**Terza tappa**

**I neutrini come mezzo di osservazione astronomica**

## NEUTRINI DA SUPERNOVE

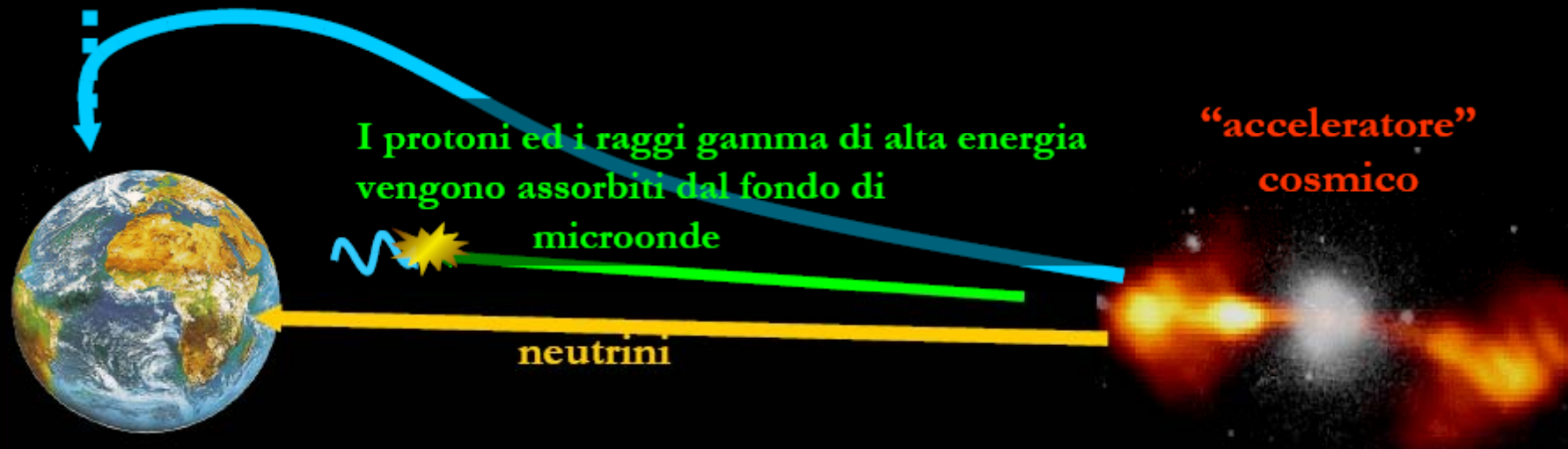


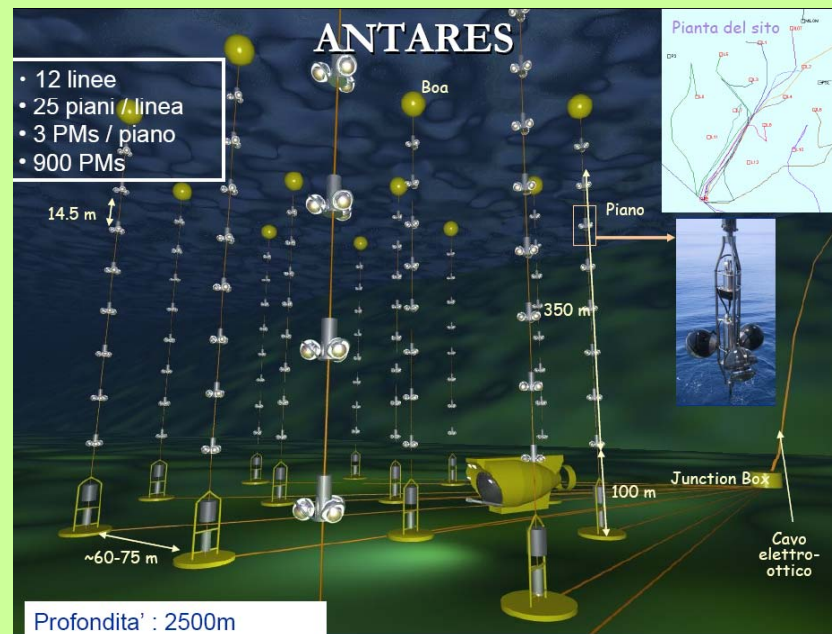
Nella fase di esplosione di una stella massiccia che porta alla formazione di una supernova vengono emessi molti neutrini -

Nell'esplosione di supernova SN 1987 nella Nube di Magellano neutrini emessi vennero misurati in diversi esperimenti:  
Kamiokande, IMB, Baksan, LSD

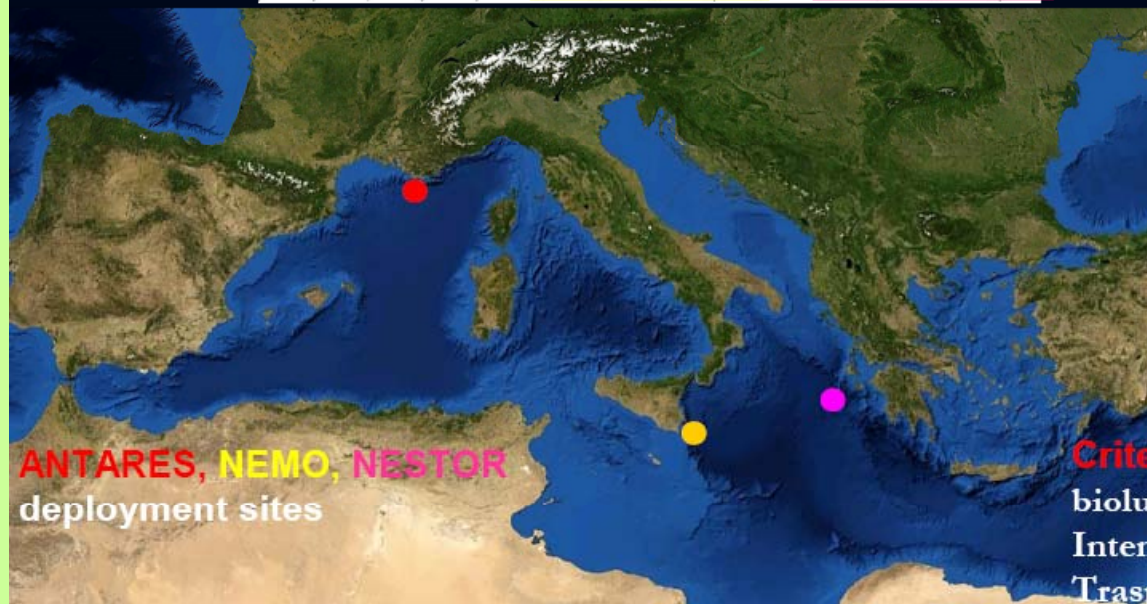
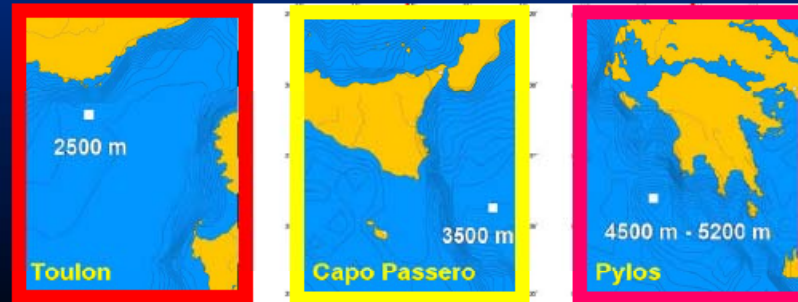
direzione apparente del protone

I protoni di bassa energia possono raggiungere la Terra ma sono deflessi dai campi magnetici galattici e intergalattici





## Siti possibili



**ANTARES, NEMO, NESTOR**  
deployment sites

**Criteri di scelta:**  
bioluminescenza,  
Intensita' correnti,  
Trasparenza dell'acqua:





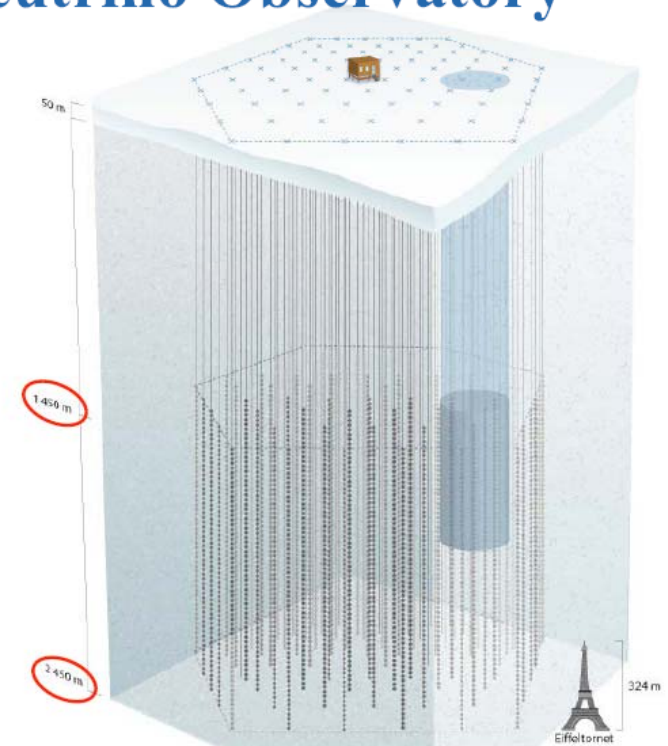
## IceCube Neutrino Observatory

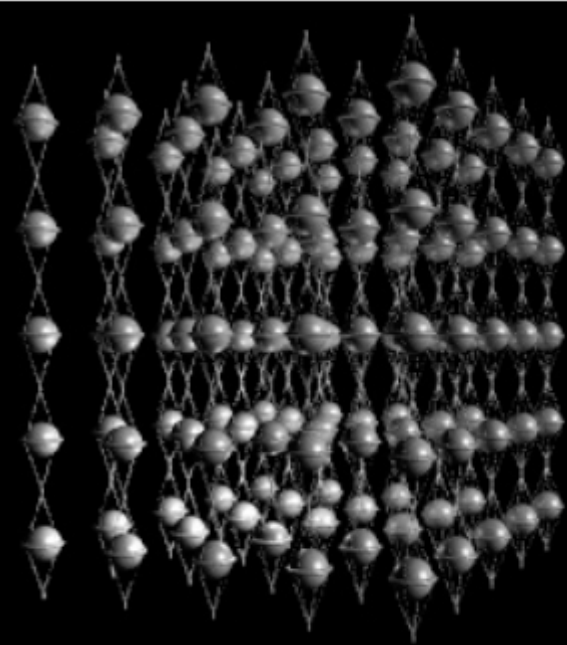
### IceCube

70+ Strings with 60 optical modules  
 17 meters between optical modules  
 125 meters between strings  
 1 Giga Ton Detector

### Air shower array

80 Pairs of Ice Cherenkov Tanks



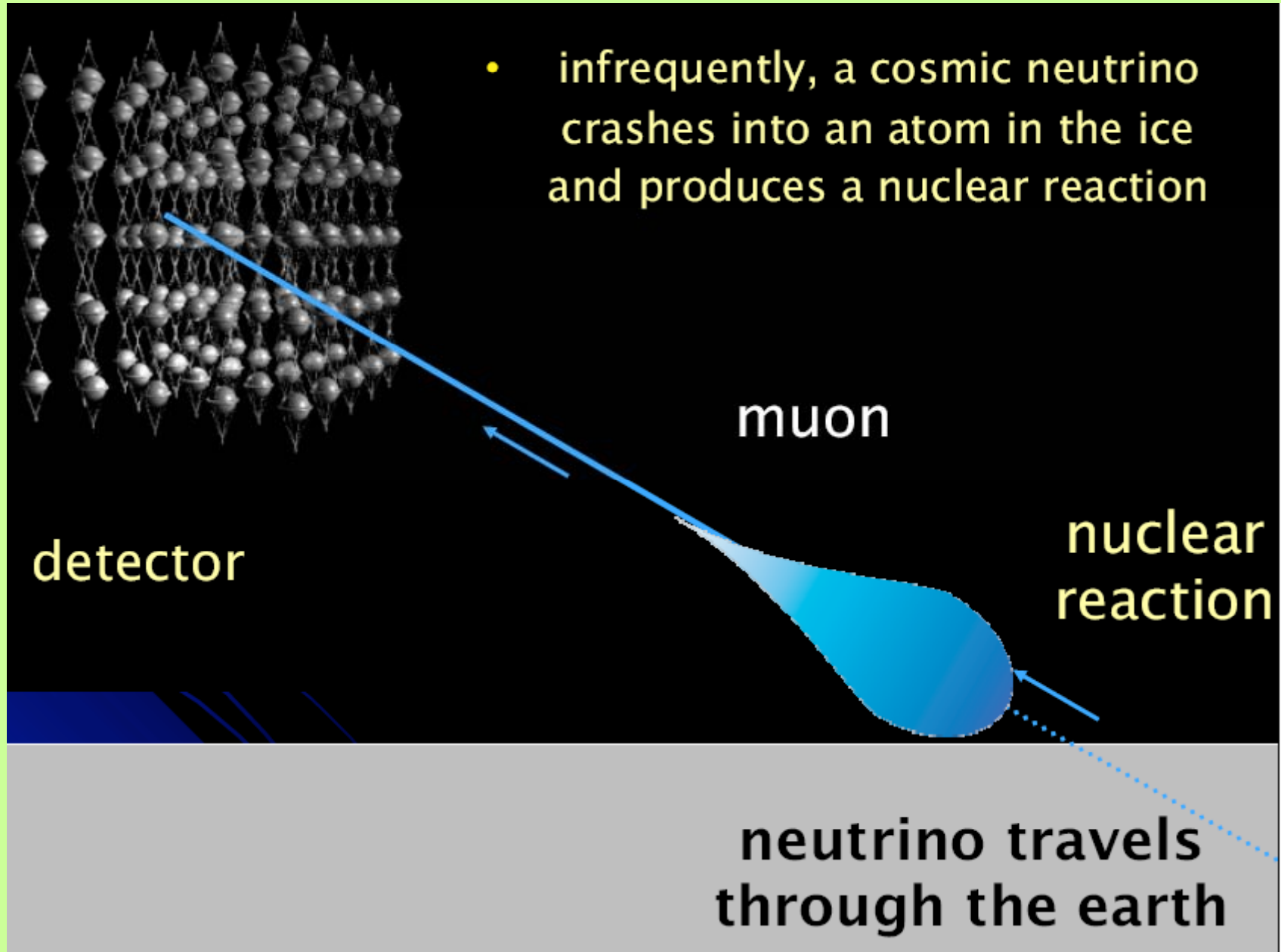


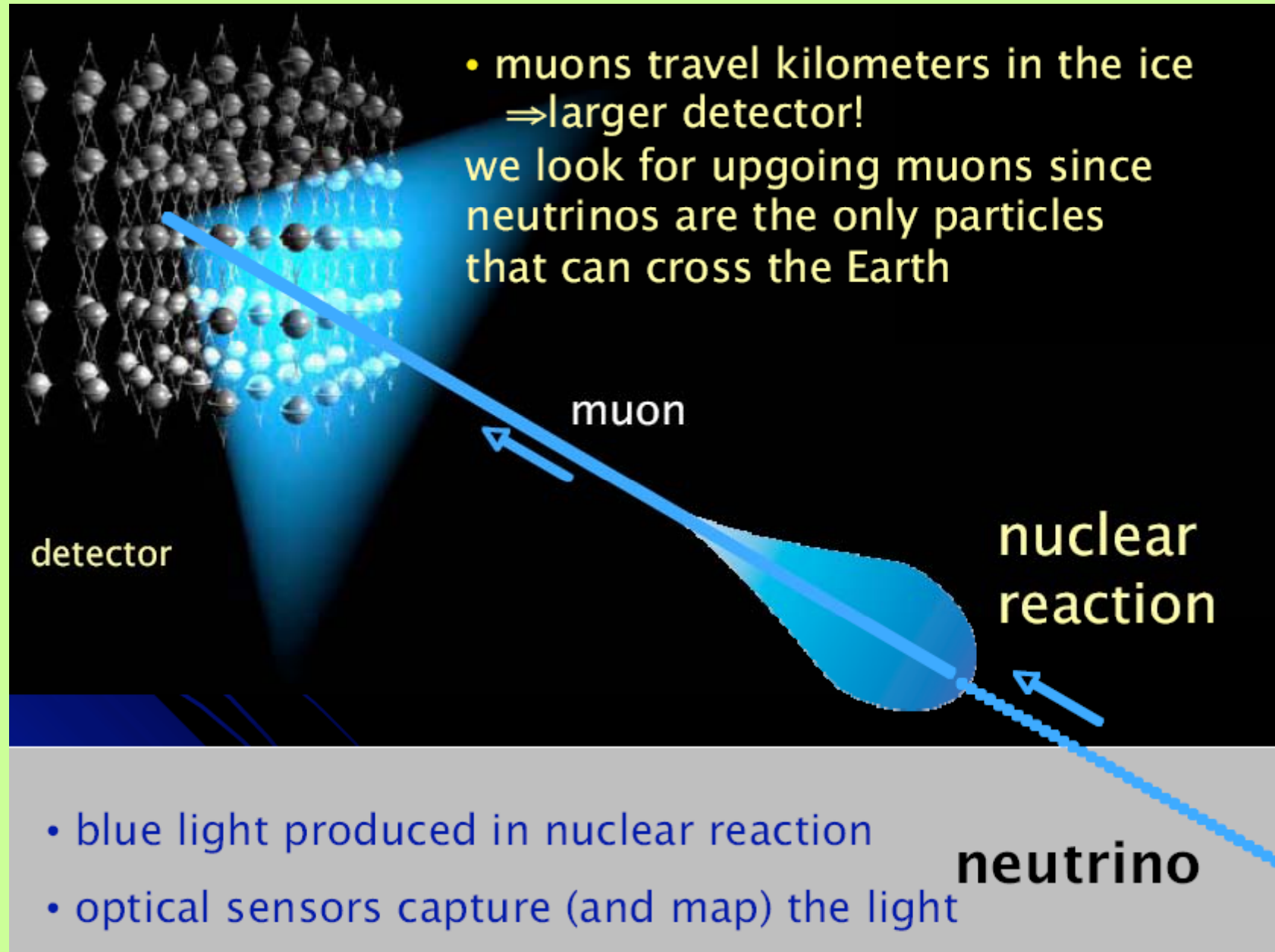
detector



neutrino travels  
through the earth

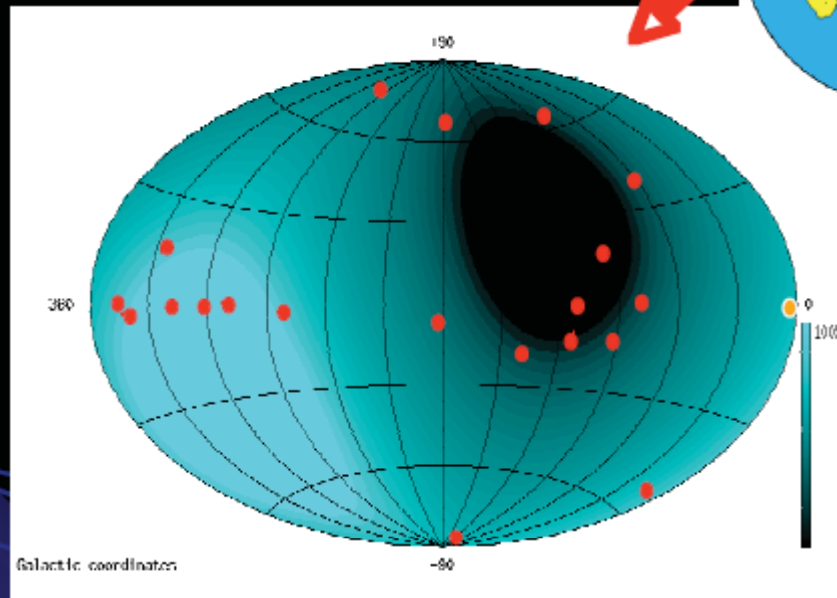
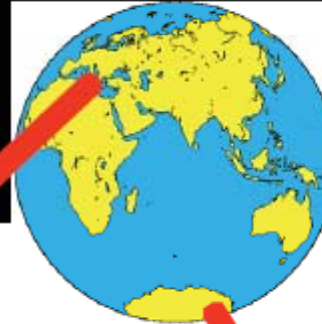




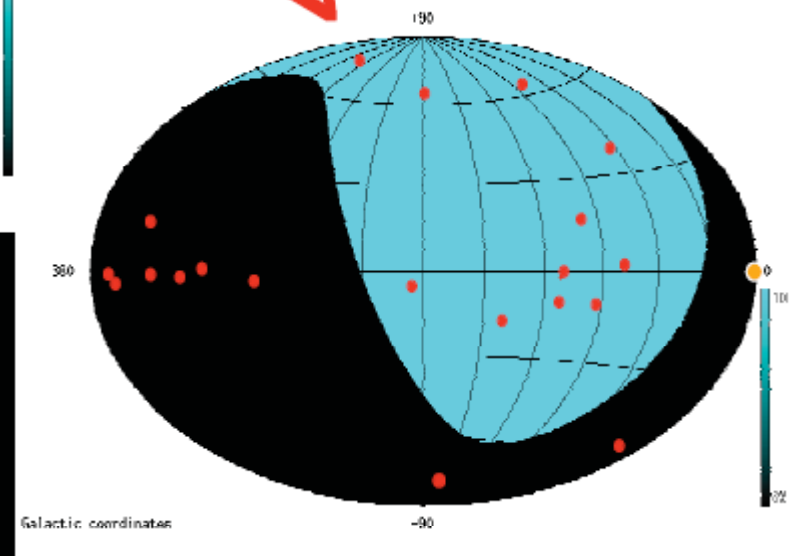


Why 2 large detectors in 2

hemispheres?



AMANDA, IceCube  
South Pole



Mediterranean  
France 43° North  
2/3 of time: Galactic Centre

TeV  $\gamma$  sources

Un altro argomento di grande interesse:  
neutrini in cosmologia ...  
forse in una prossima occasione?