

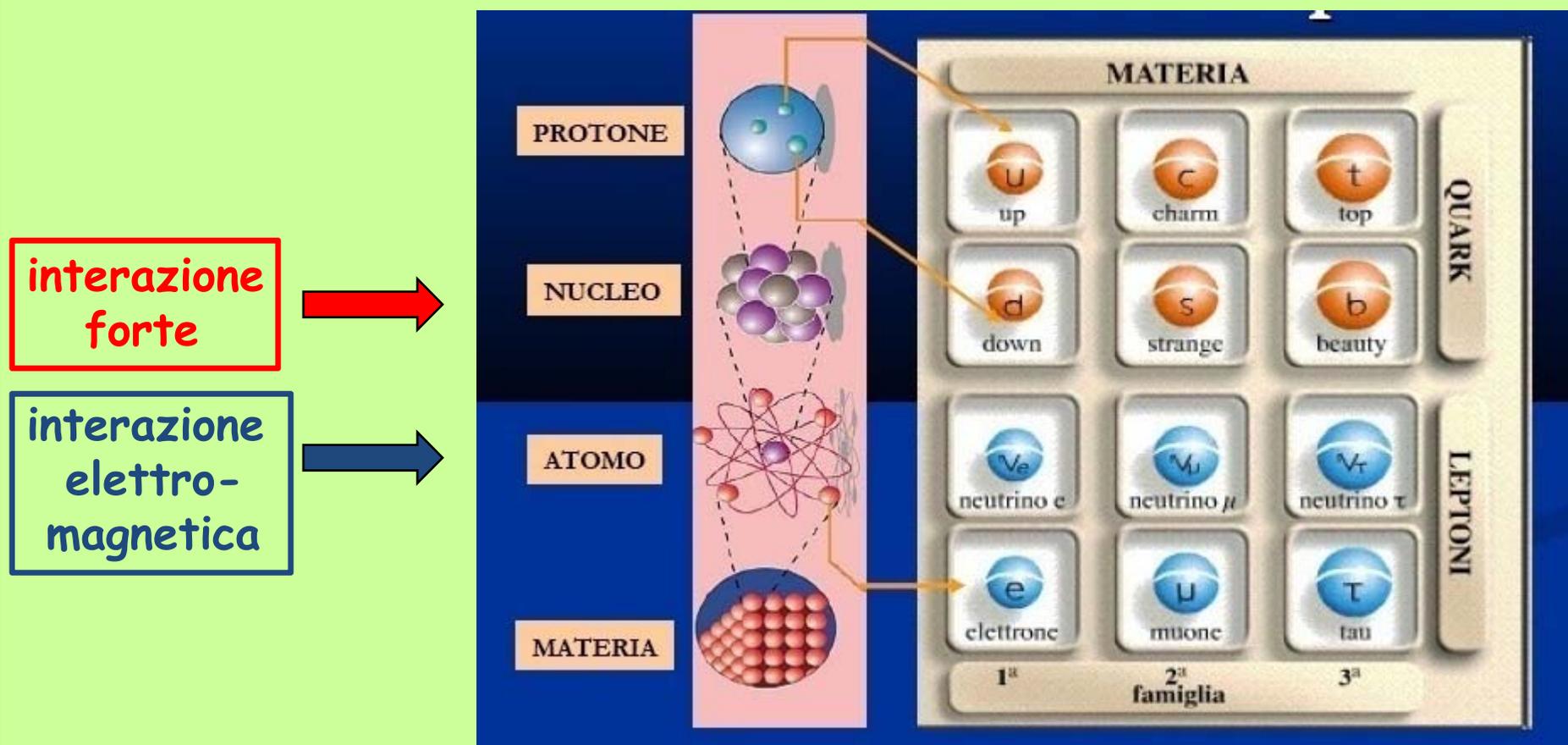
Il neutrino: veloce, ma non troppo

Una particella che, "inventata" nel 1930,
continua ad affascinarci

Biblioteca Civica Archimede
Settimo Torinese, 30 marzo 2012

Alessandro Bottino
INFN/Università di Torino

Tutte le particelle che conosciamo sono riconducibili ai seguenti costituenti (quarks e leptoni)

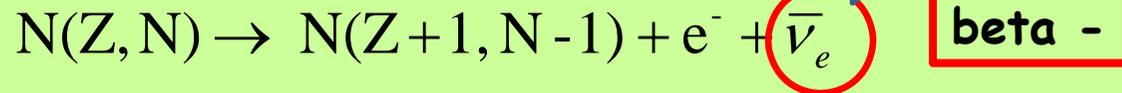


e ai corrispondenti anti-quarks e anti-leptoni:

$$q \rightarrow \bar{q}; \quad e^- \rightarrow e^+, \quad \nu_e \rightarrow \bar{\nu}_e, \quad \dots$$

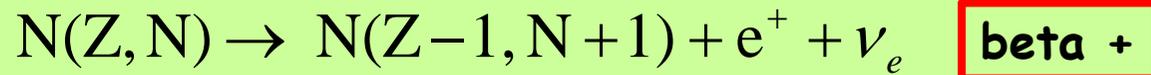
Neutrini ed interazione debole

Molti nuclei atomici instabili acquisiscono stabilita' emettendo radiazione beta:



(ossia, all'interno del nucleo: $n \Rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$)

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



(ossia all'interno del nucleo: $p \Rightarrow n + e^+ + \nu_e$)



Questi processi sono dovuti **all'interazione debole**

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 β -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 β -spectrum would then become understandable by the assumption that in β 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 μ . Experiment probably required that the ionizing effect of such a neutron should not be larger than that of a γ ray, and thus μ 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 γ 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 β -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.

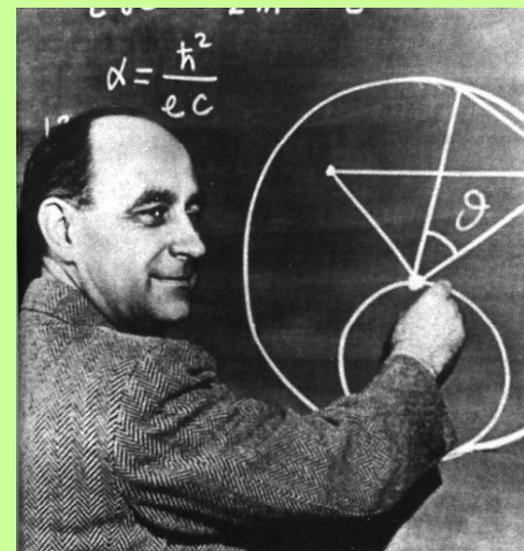
**Cari Signore e Signori radioattivi...
... come soluzione disperata al problema di...
sono giunto a considerare la possibilità che
possa esistere nel nucleo una particella
elettricamente neutra, che chiamerò
"neutron".**

**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 ...**

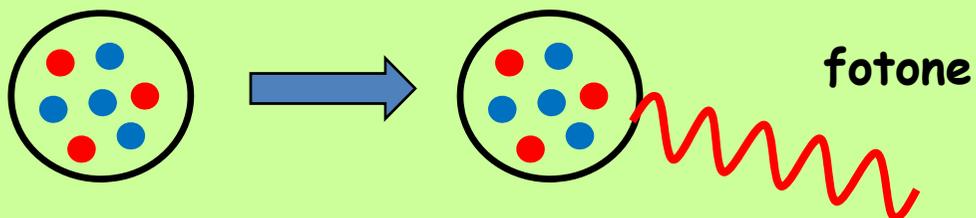
**Così, cari Signori radioattivi, esaminate e
giudicate. Sfortunatamente non posso
comparire personalmente a Tübingen, dal
momento che un ballo che avrà luogo nella
notte del 6-7 dicembre rende la mia
presenza qui indispensabile.**

Il vostro umile servitore, W. Pauli

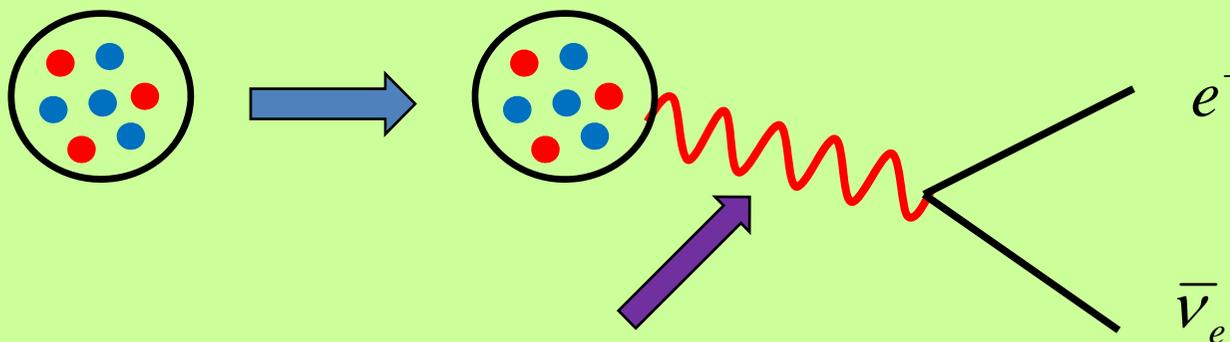
emissione di coppia elettrone-neutrino in analogia con il caso elettromagnetico
FERMI



diseccitazione di un nucleo



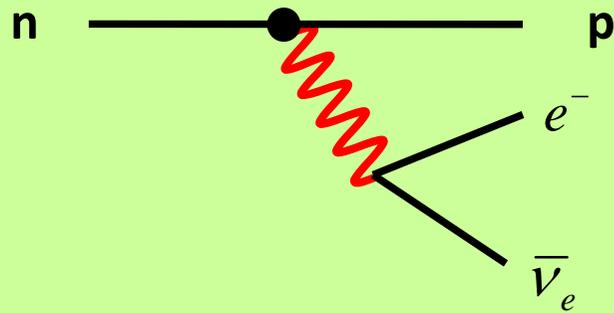
decadimento beta di un nucleo



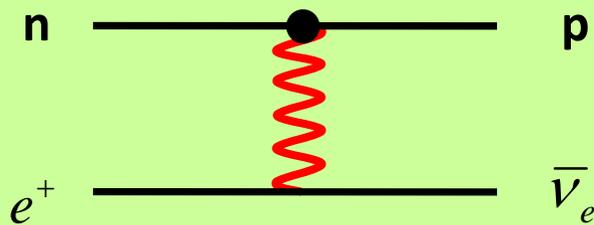
questo sarà il **bosone W** del **modello standard** dell'interazione elettrodebole

teoria dell'interazione debole (1933)

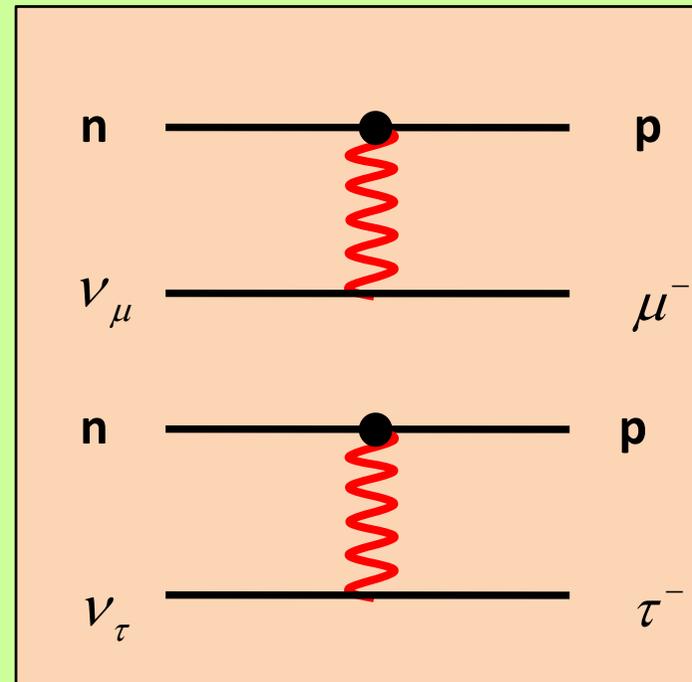
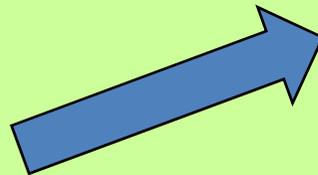
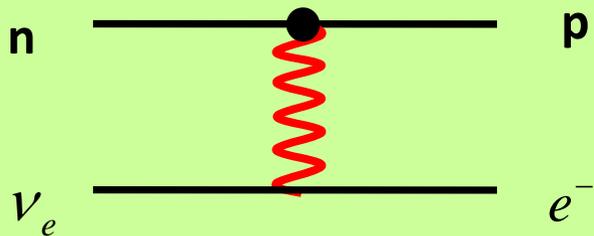
rappresentiamo il **decadimento del neutrone** con il diagramma



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



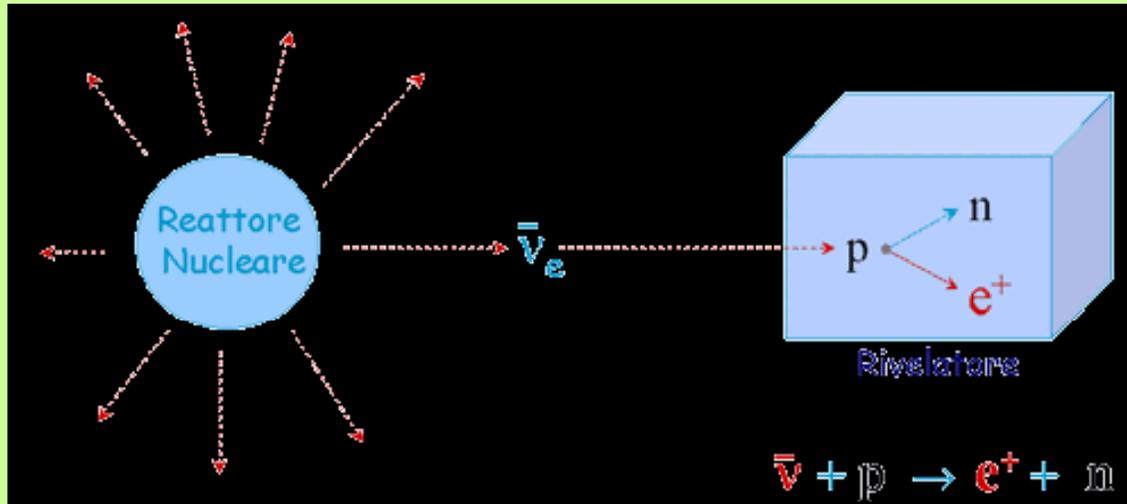
oppure urto **neutrino-neutrone**



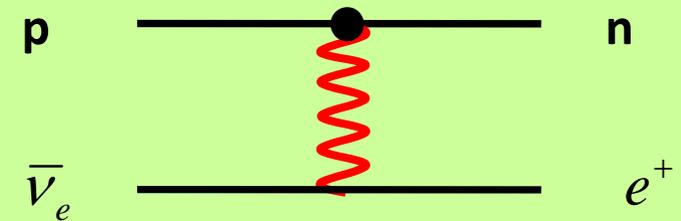
esistono 3 tipi di neutrini di diverso "sapore"

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

antineutrino $\bar{\nu}_e$ generato dal reattore

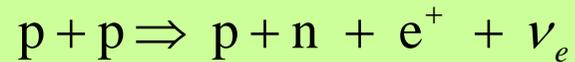


e rivelato mediante il processo

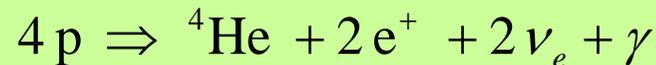


Neutrini solari

Il sole e' una potente sorgente di neutrini ν_e prodotti in **reazioni di fusione termonucleare**, avviate dal processo debole

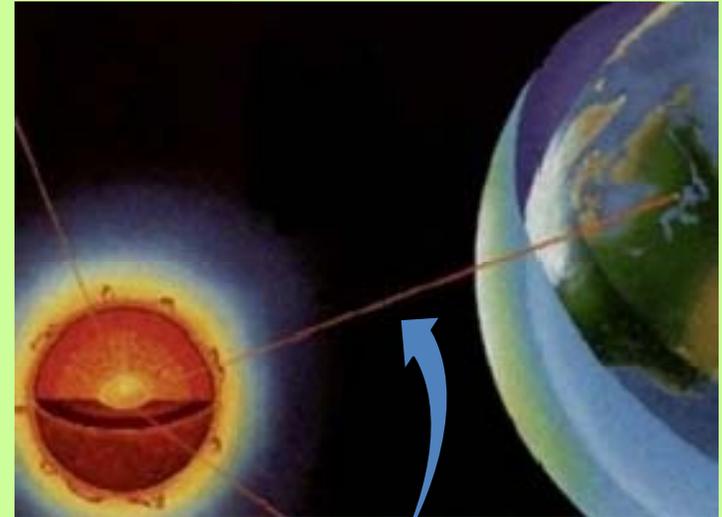


con risultato netto finale



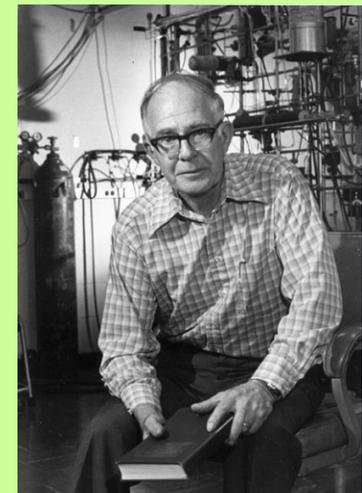
I neutrini hanno energia media 1 MeV ed un flusso sulla terra $\approx 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$

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



esperimento pilota (**Homestake experiment**):
il flusso di neutrini ν_e 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 da Supernove

Esplosione di una supernova: in pochi secondi una stella esplode emettendo nello spazio una grande quantità di materia, fotoni e neutrini.

Supernova SN1987: 23 febbraio 1987 - nella Grande Nube di Magellano ad una distanza di $51,8 \text{ Kpc} = 1,61 \cdot 10^{18} \text{ Km}$



in pochi secondi



Vennero anche misurati i neutrini provenienti da SN1987 in diversi laboratori sotterranei: **Kamiokande, IMB, Baksan, LSD**

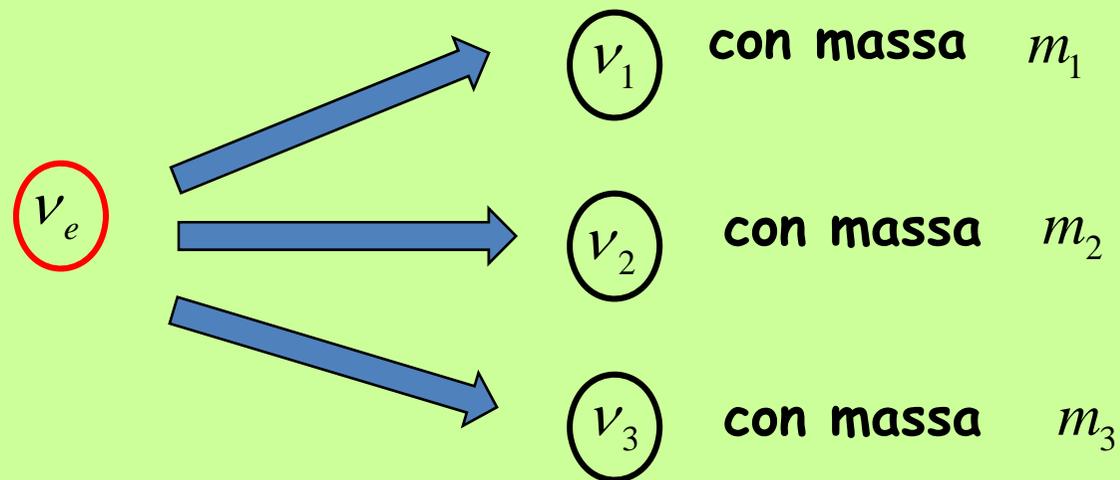
Oscillazioni del neutrino

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

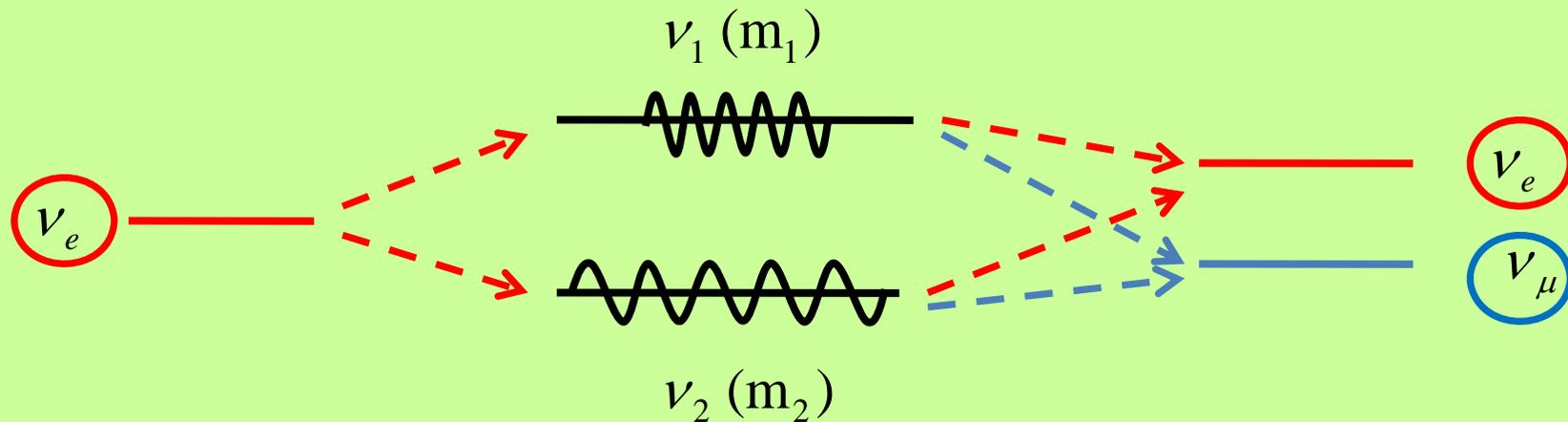
Attenzione:

- un neutrino di sapore definito **non ha un valore determinato di massa**
- una misura di massa puo' dare **uno dei 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 ν_e puo' trasformarsi in ν_μ



Probabilita' 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

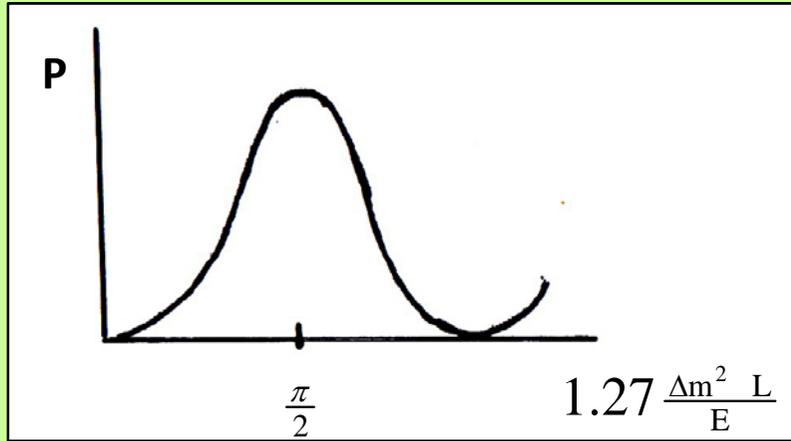
masse in eV/(c)²

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

E = energia in GeV

L = distanza in km

masse in eV/(c)²



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

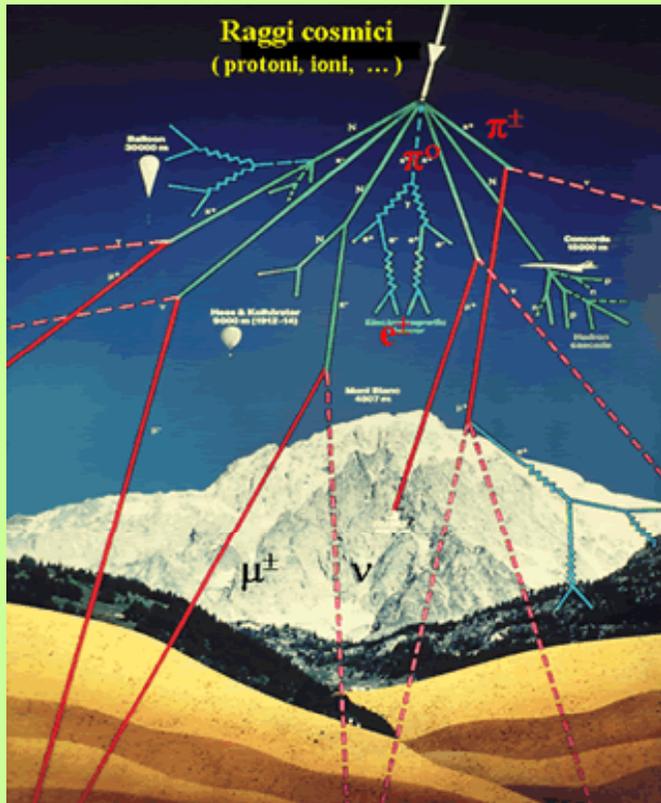
$$\Delta m^2 \approx \frac{E}{L}$$

neutrini solari

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

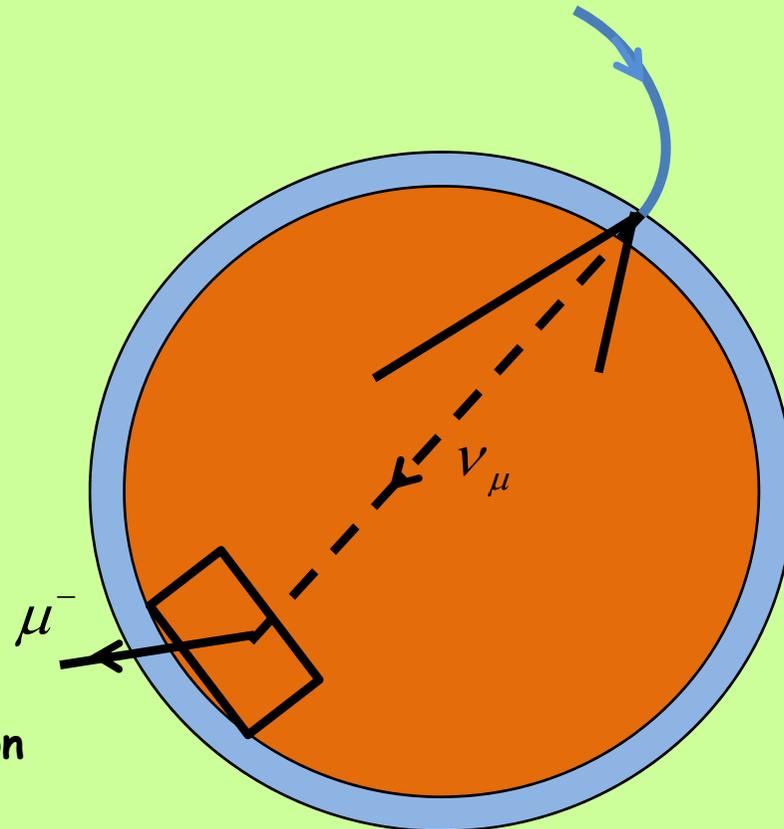
neutrini atmosferici

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



Neutrini atmosferici

raggi cosmici



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

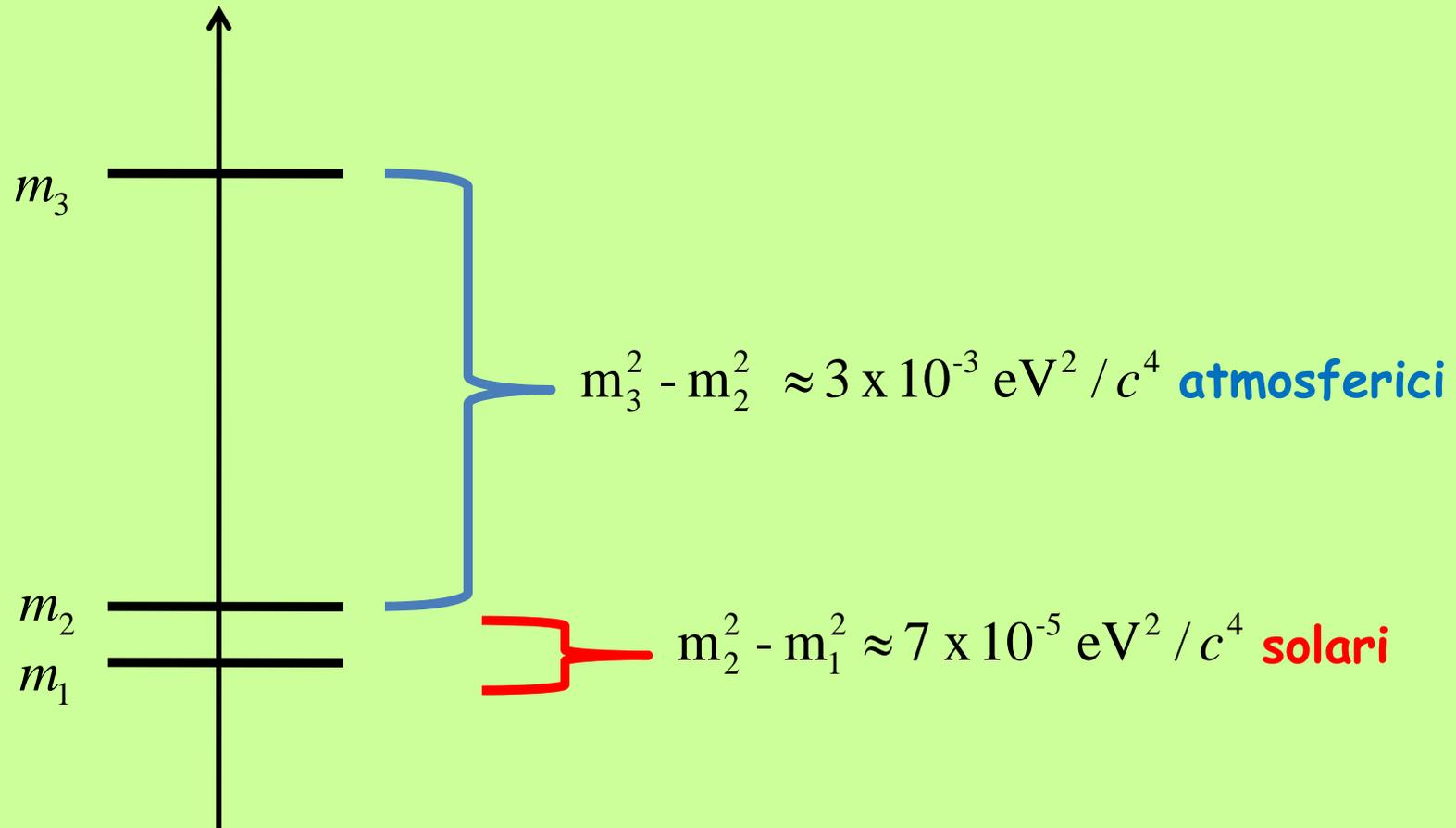


Masatoshi Koshiba
(Nobel 2002)

Super-Kamiokande (Giappone)
MACRO (GS)

atmosfera terrestre: spessore 20 km
diametro terrestre: 13.000 km

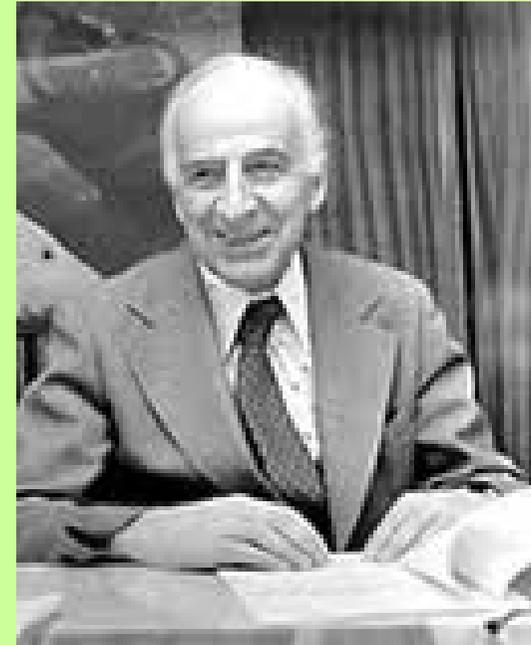
Riassumendo, masse di neutrini:



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

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

La prima comprensione
intuitiva della
oscillazioni del
neutrino e' dovuta a
Pontecorvo (1967)



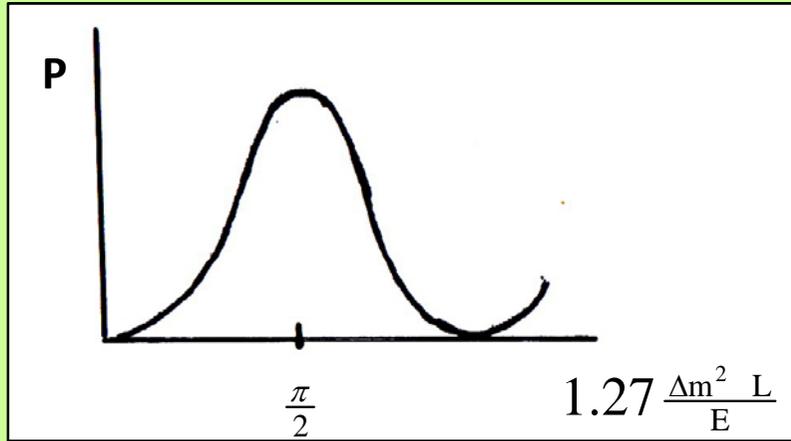
Bruno Pontecorvo
(1913 – 1993)

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

E = energia in GeV

L = distanza in km

masse in eV/(c)²



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

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

neutrini solari

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

neutrini atmosferici

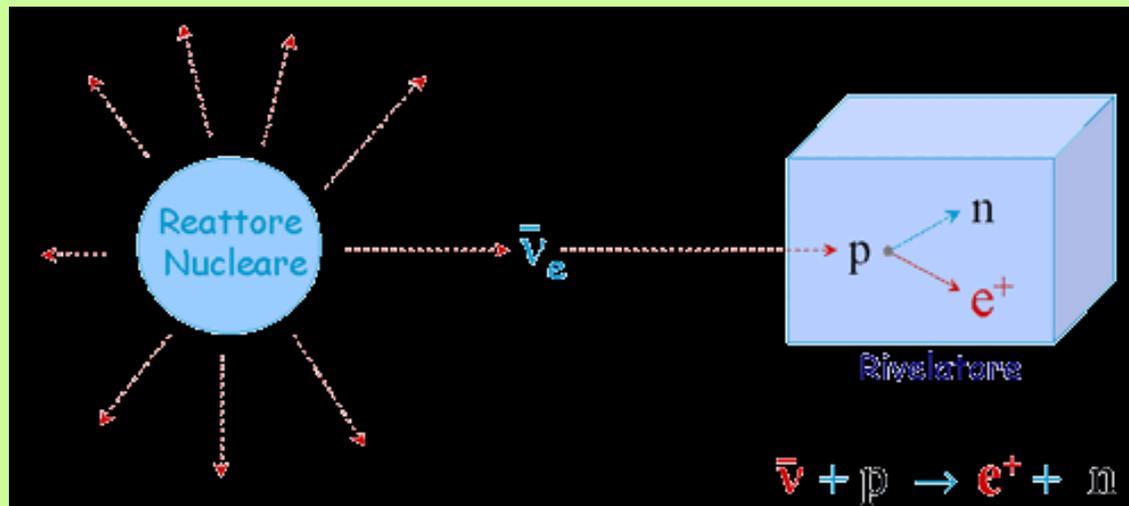
$$L \approx 20 - 10^4 \text{ km}, E = 0.1 - 100 \text{ GeV}$$

neutrini da reattori nucleari

$$E \approx 1 \text{ MeV}, L \text{ variabile}$$

neutrini da acceleratori nucleari E variabile, L variabile

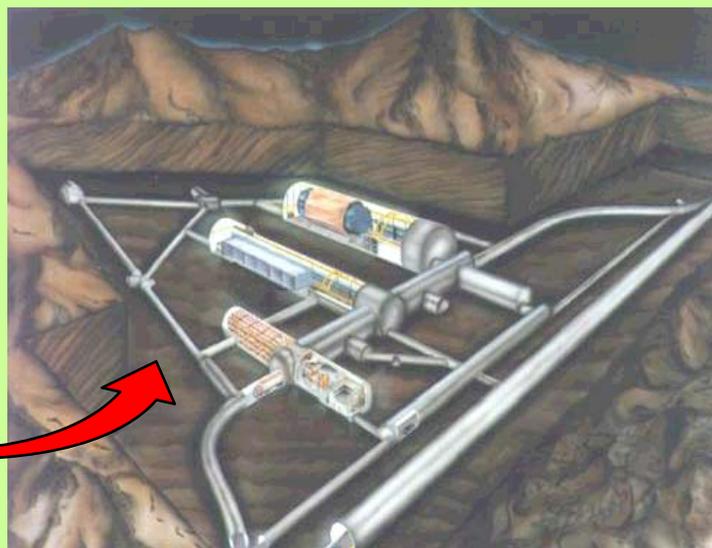
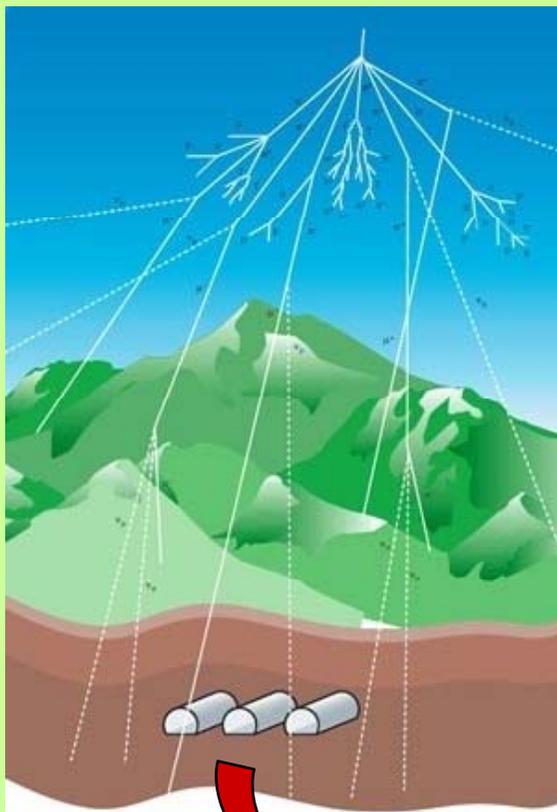
(Anti)-neutrini **da reattori nucleari** generati da
fissioni nucleari di U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{241}



Energia degli antineutrini circa 1 MeV

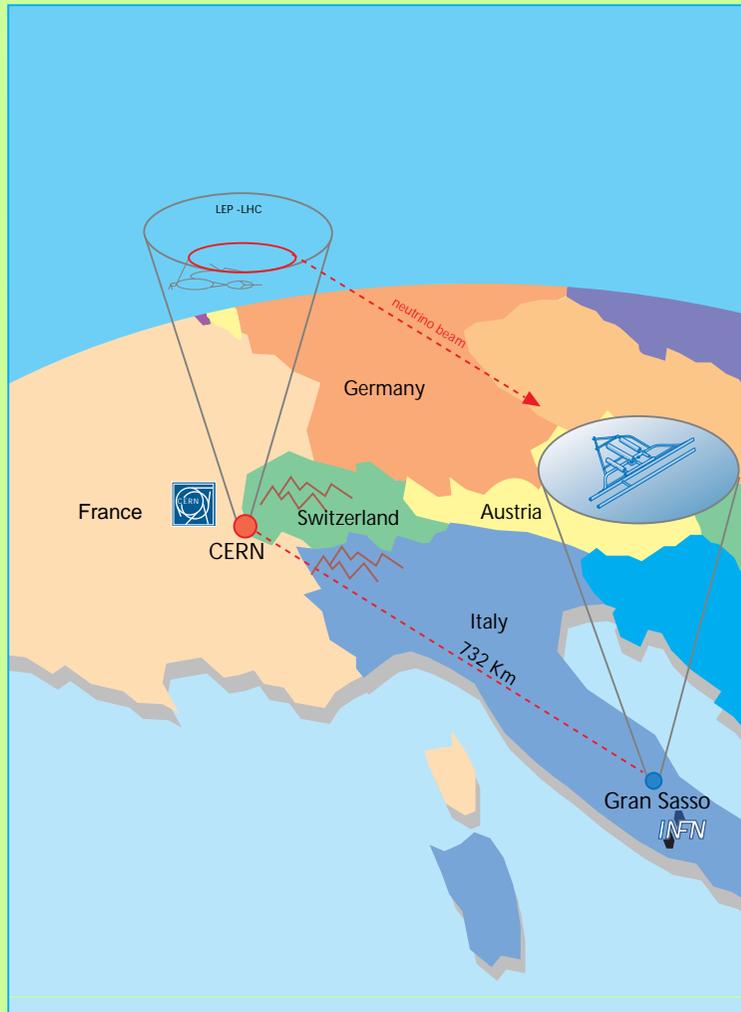
distanze variabili - negli esperimenti eseguiti o
in corso $L = 10 \text{ m}$, 1 km , 100 km

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

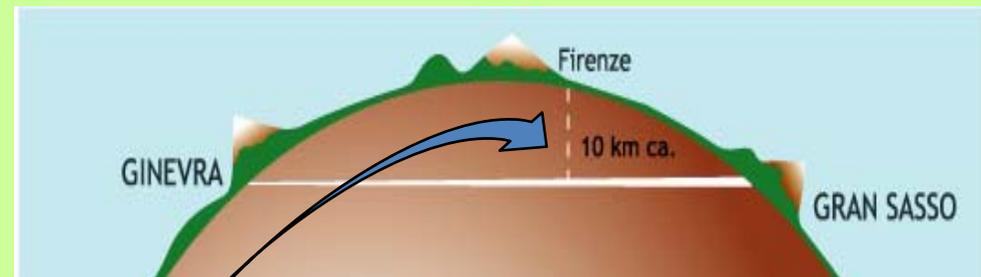


CNGS CERN to Gran Sasso Neutrino Project

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

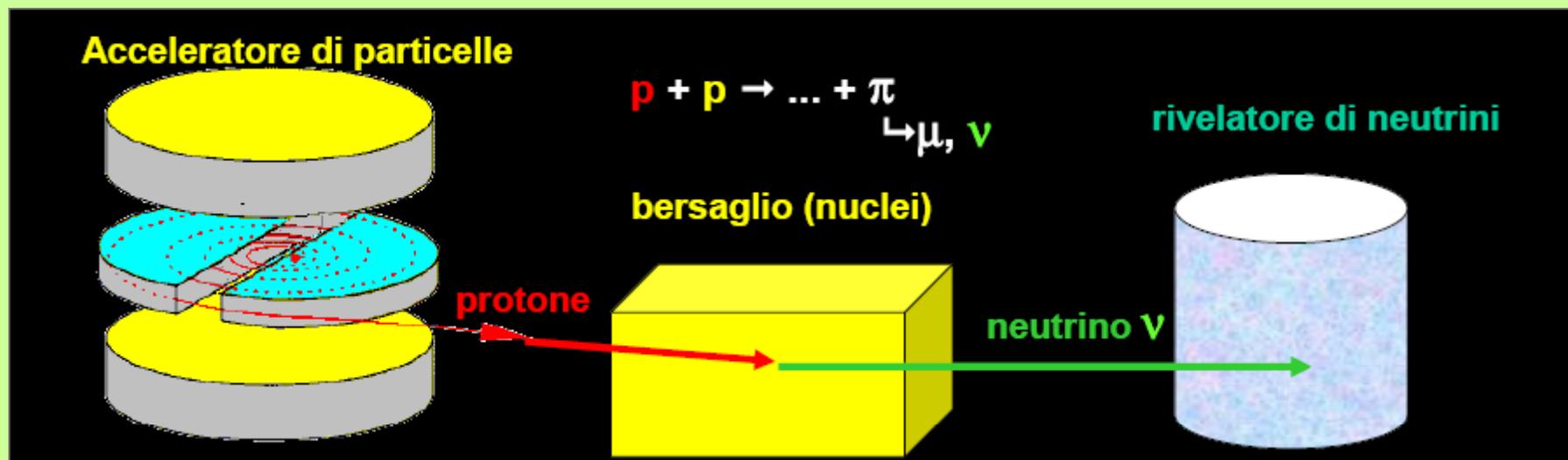


Fascio di ν_{μ} prodotto al CERN e rivelato al LNGS dopo un viaggio di 731 km - tempo di percorrenza circa 2.4 millisecondi



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

Neutrini da acceleratori



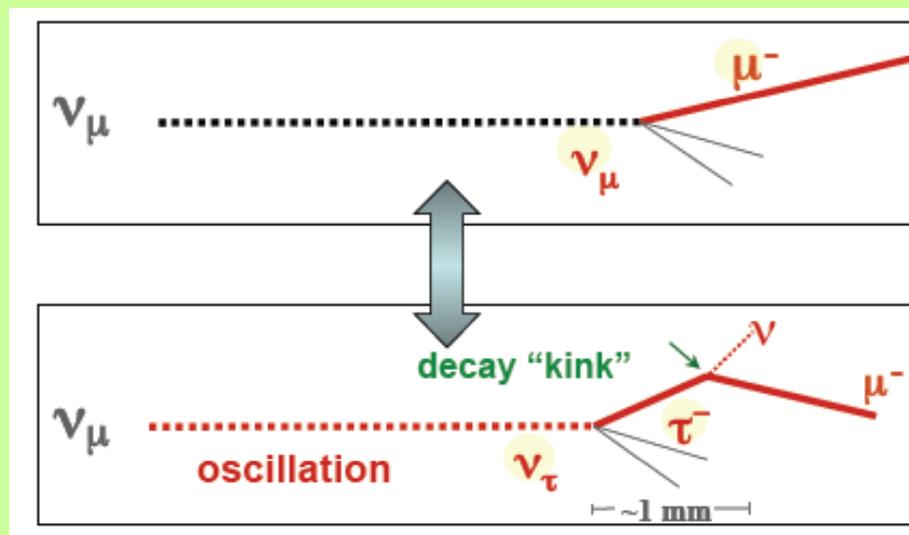
Esperimento OPERA al Gran Sasso



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

se avviene l'oscillazione:

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



Tempo di percorrenza dei fotoni dal CERN al laboratorio del Gran Sasso

$$(\Delta t)_\gamma \cong 731 \text{ Km} / (300.000 \text{ Km} \cdot \text{sec}^{-1}) = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ sec} \equiv 2.4 \text{ msec}$$

La misura del **tempo di percorrenza dei neutrini** dal CERN al Laboratorio del Gran Sasso da parte della Collaborazione OPERA fornisce

$$(\Delta t)_\gamma - (\Delta t)_\nu = 61 \text{ nanosec} \equiv 61 \cdot 10^{-9} \text{ sec}$$

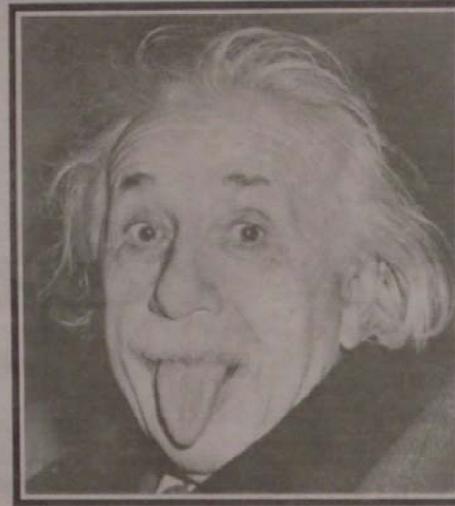
e quindi i **neutrini sarebbero piu' veloci dei fotoni**, con un effetto frazionario

$$[(\Delta t)_\gamma - (\Delta t)_\nu] / (\Delta t)_\gamma = 2.5 \cdot 10^{-5}$$

la notizia suscita scalpore in tutto il mondo (23 settembre 2011)

TUTTO È RELATIVO ANCHE LE NOSTRE CERTEZZE

(soprattutto di questi tempi...)



ANCHE UN GENIO COME ALBERT EINSTEIN PUÒ SBAGLIARE

I ricercatori del Cern hanno registrato che i neutrini possono viaggiare più veloci della velocità della luce. Limite considerato invalicabile secondo la teoria della fisica di Einstein. Si tratta di una vera e propria rivoluzione. Questo ci insegna che tutti possono sbagliare e che dobbiamo metterla di avere certezze che crediamo inerrabili ma dobbiamo rivalutare il valore positivo del dubbio. Concettualmente che avere certezze è uno stato di infelicità mentre il dubbio è fonte di felicità e serenità. Il valore del dubbio è cosmico, perché è coerente con la nostra condizione naturale di essere imperfetti.



“NESSUNO È PERFETTO, NEPPURE EATALY...”

... ma se ci dite dove abbiamo sbagliato possiamo evitare l'errore per il futuro. Al banco informazioni ci sono moduli dedicati oppure mandate un email a suggerimenti@eataly.it Grazie!

“Come sono antipatici quelli che non sbagliano mai!”

- EATALY HA SELETO I PARTNER
- EATALY HA SELETO LA TECNOLOGIA **FIVER**
- PER IL CONTROLLO QUALITÀ DEI PRODOTTI **LABOR**
- EATALY AMERICA HA SCELTO **Electrolux**
- EATALY HA SELETO I PARTNER **INTEA**
- IL SERVIZIO CLIENT PER TELEFONO E SUL WEB **servizio**



LUOGO DEL DUBBIO E DELL'ARMONIA

- EATALY FANTASMI**
Via Roma, 300 001 84 101 001 001 001
001 001 001 001 001 001 001 001
suggerimenti@eataly.it
- EATALY INCONTRO**
Via Lapage, 2 San Vignone 201 001 001 001
001 001 001 001 001 001 001 001
- EATALY INTERIORE**
Via Padova, 174 361 001 001 001
001 001 001 001 001 001 001 001
- EATALY MONTECATINI**
S. M. 001 001 001 001 001 001 001 001
001 001 001 001 001 001 001 001
- ESPOSIZIONE**
Via Carlo Farini, 100 001 001 001 001
001 001 001 001 001 001 001 001
- EATALY ROMA**
Via Veneto, 100 001 001 001 001
001 001 001 001 001 001 001 001

Tempo di percorrenza dei fotoni dal CERN al laboratorio del Gran Sasso

$$(\Delta t)_\gamma \cong 731 \text{ Km} / (300.000 \text{ Km} \cdot \text{sec}^{-1}) = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ sec} \equiv 2.4 \text{ msec}$$

La misura del **tempo di percorrenza dei neutrini** dal CERN al Laboratorio del Gran Sasso da parte della Collaborazione OPERA fornisce

$$(\Delta t)_\gamma - (\Delta t)_\nu = 61 \text{ nanosec} \equiv 61 \cdot 10^{-9} \text{ sec}$$

e quindi i **neutrini sarebbero piu' veloci dei fotoni**, con un effetto frazionario

$$[(\Delta t)_\gamma - (\Delta t)_\nu] / (\Delta t)_\gamma = 2.5 \cdot 10^{-5}$$

Questo effetto non e' piccolo: su distanze di ordine cosmologico comporta grandi differenze nei tempi di percorrenza.

Nel caso della SN19787 i neutrini sarebbero dovuti arrivare sulla Terra 4 anni prima dei fotoni !

Argomento di Cohen-Glashow

(29 settembre 2011)

un neutrino superluminale perde energia emettendo coppie
elettrone-positrone

pertanto **Opera dovrebbe vedere un deficit di neutrini** alle
energie a cui sono emessi i neutrini del CERN

questo, stando ai risultati di OPERA, non avviene

<http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2011/PR19.11E.html>

OPERA experiment reports anomaly in flight time of neutrinos from CERN to Gran Sasso

UPDATE 23 February 2012

The OPERA collaboration has informed its funding agencies and host laboratories that it has identified two possible effects that could have an influence on its neutrino timing measurement. These both require further tests with a short pulsed beam. If confirmed, one would increase the size of the measured effect, the other would diminish it. The first possible effect concerns an oscillator used to provide the time stamps for GPS synchronizations. It could have led to an overestimate of the neutrino's time of flight. The second concerns the optical fibre connector that brings the external GPS signal to the OPERA master clock, which may not have been functioning correctly when the measurements were taken. If this is the case, it could have led to an underestimate of the time of flight of the neutrinos. The potential extent of these two effects is being studied by the OPERA collaboration. New measurements with short pulsed beams are scheduled for May.

Esperimento ICARUS presso il Laboratorio del Gran Sasso:

- 1) **Non osserva** coppie elettrone - positrone dovute a neutrini superluminali
- 2) Misura 7 neutrini provenienti dal CERN, con **tempi di percorrenza compatibili con i tempi di percorrenza della luce**

Tenuto conto:

- a) dell'argomento della supernova SN1987
- b) dei problemi strumentali segnalati da OPERA
- c) dei risultati di ICARUS

possiamo concludere che **nessun effetto superluminale sembra essere associato ai neutrini!**



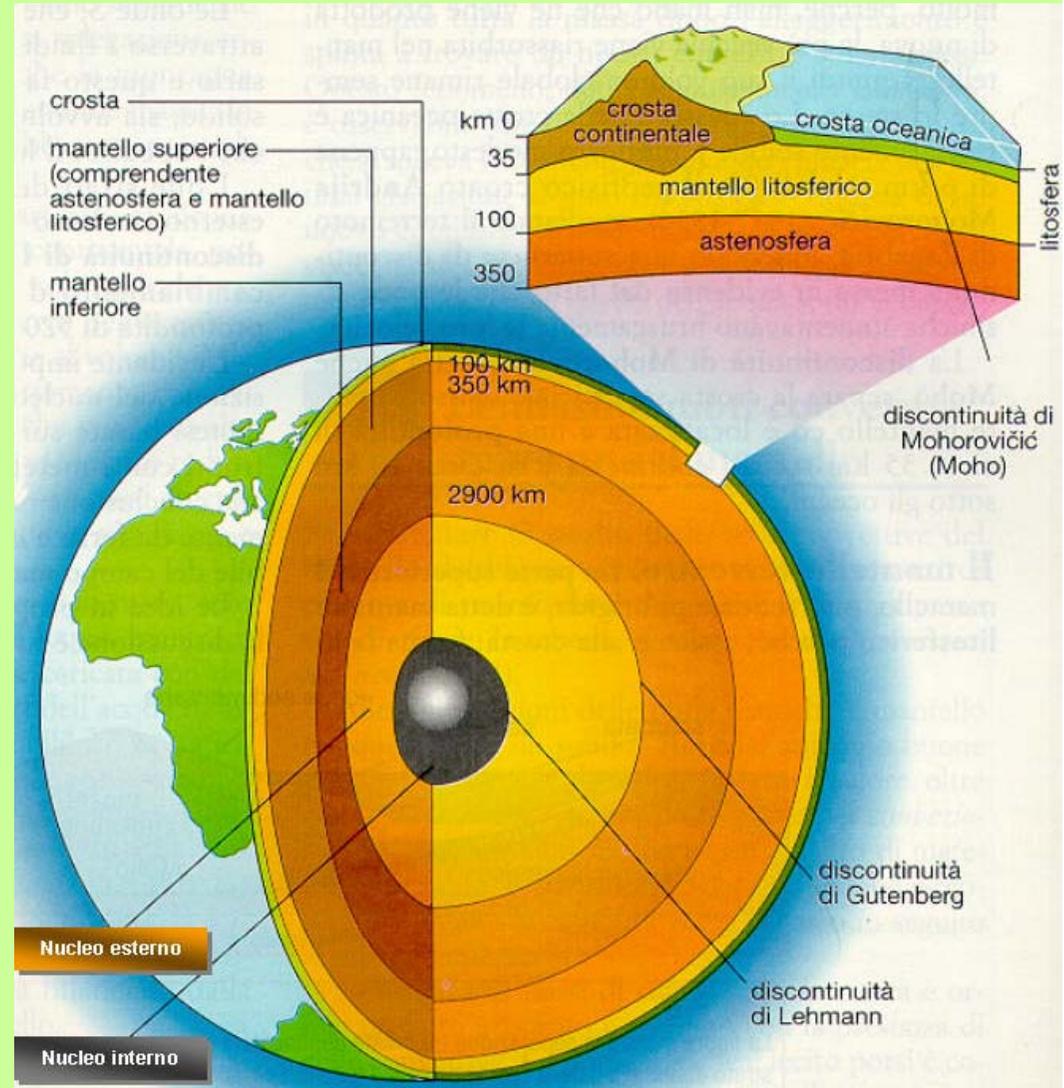
Geoneutrini

(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)



I neutrini come mezzo di **osservazione astronomica**

Astronomia neutrinica

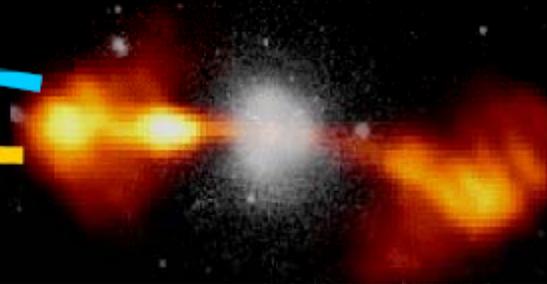
direzione apparente del protone

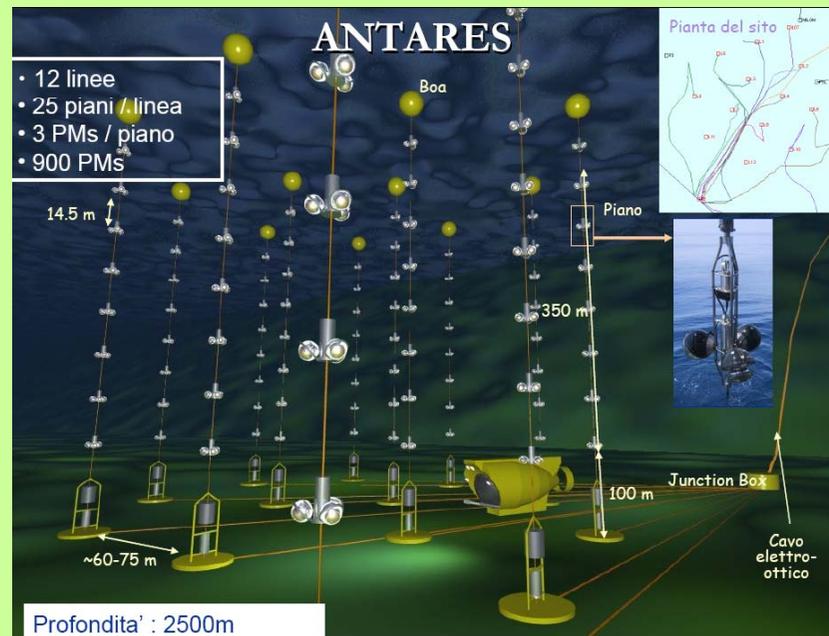
I protoni di bassa energia possono raggiungere la Terra ma sono deflessi dai campi magnetici galattici e intergalattici

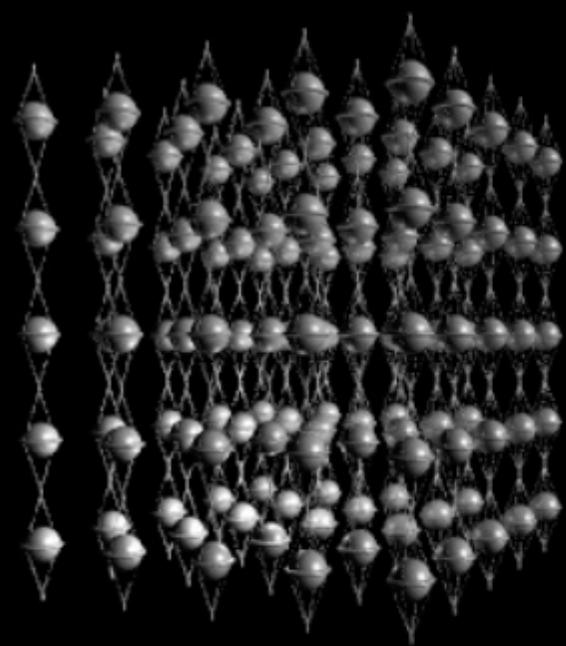
**I protoni ed i raggi gamma di alta energia vengono assorbiti dal fondo di
microonde**

**“acceleratore”
cosmico**

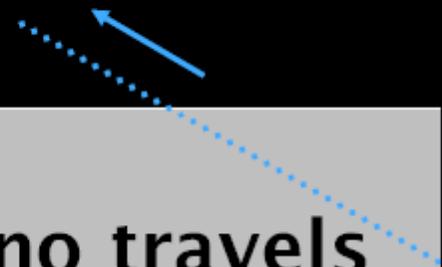
neutrini



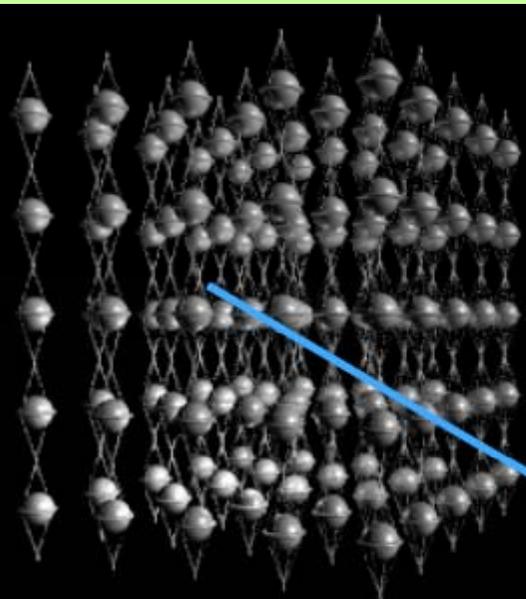




detector



neutrino travels
through the earth



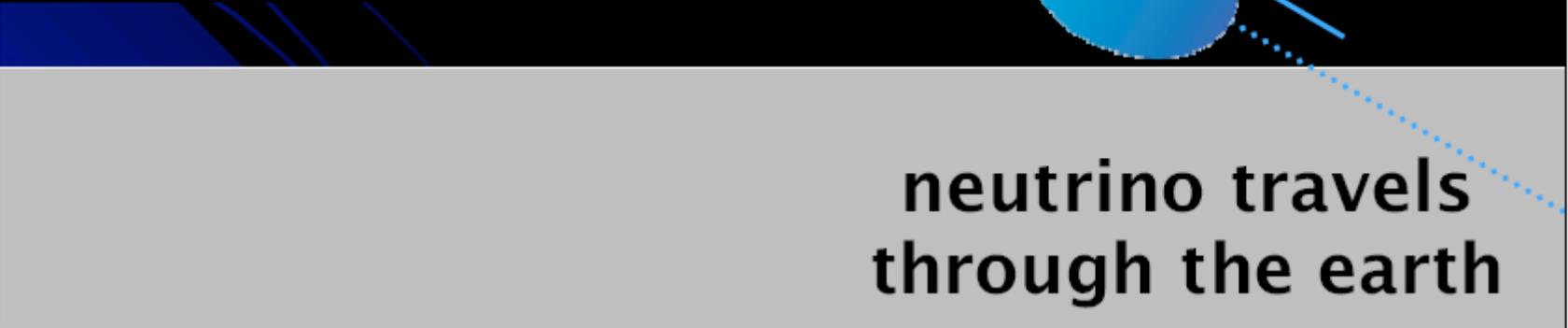
- infrequently, a cosmic neutrino crashes into an atom in the ice and produces a nuclear reaction

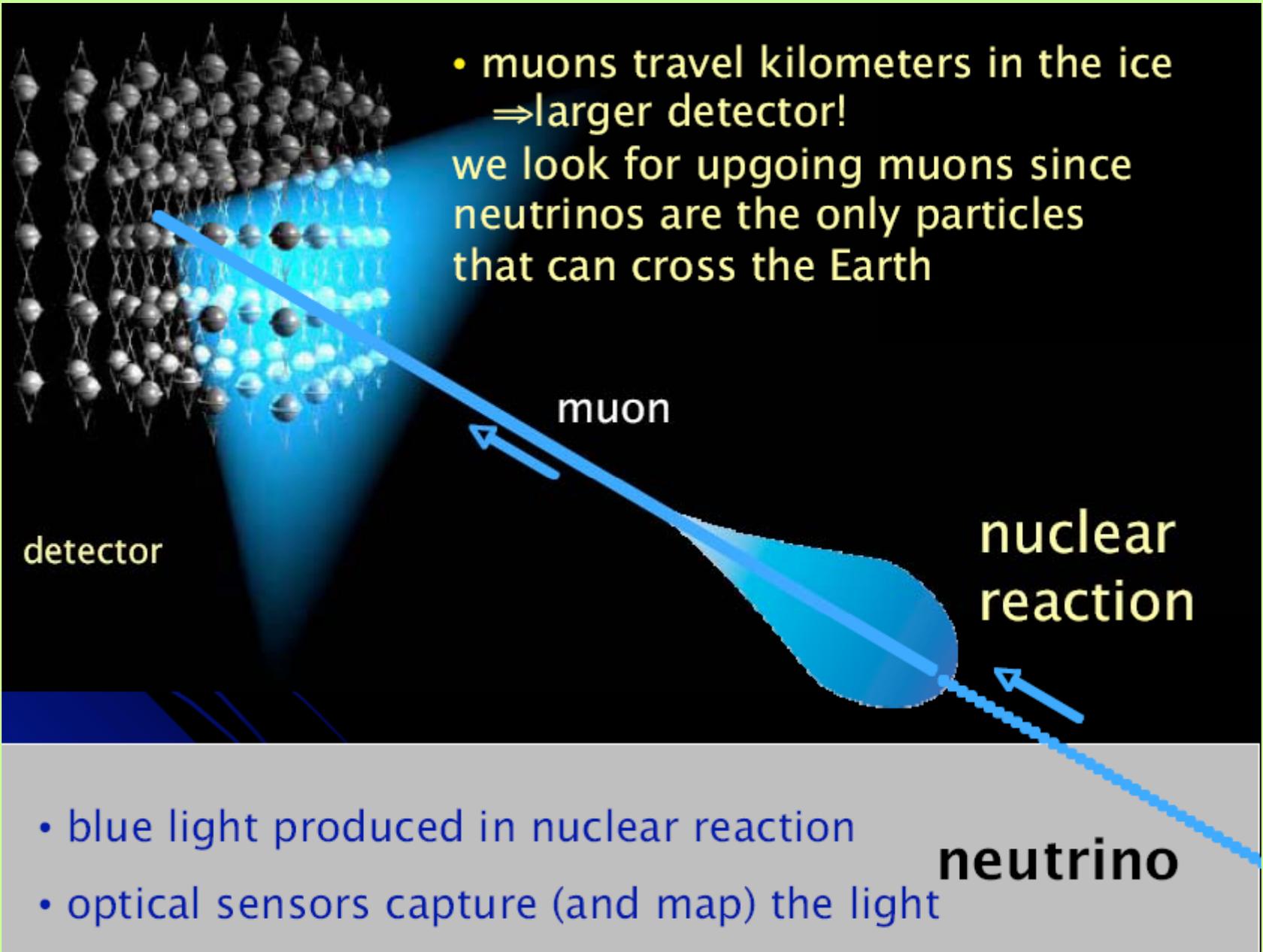
detector

muon

nuclear reaction

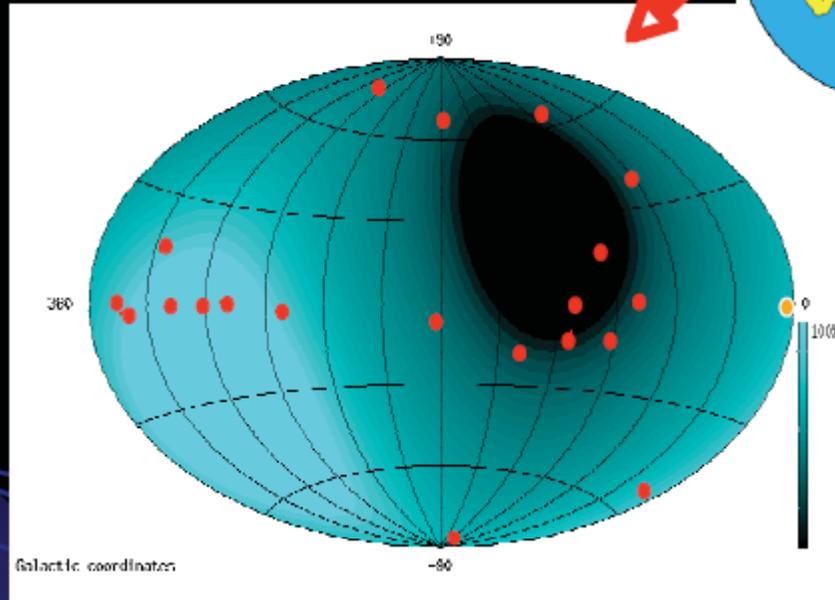
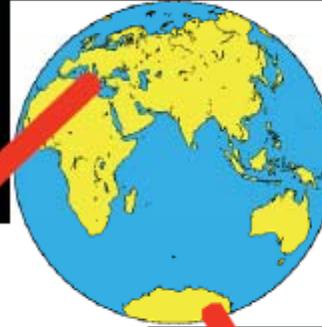
neutrino travels through the earth



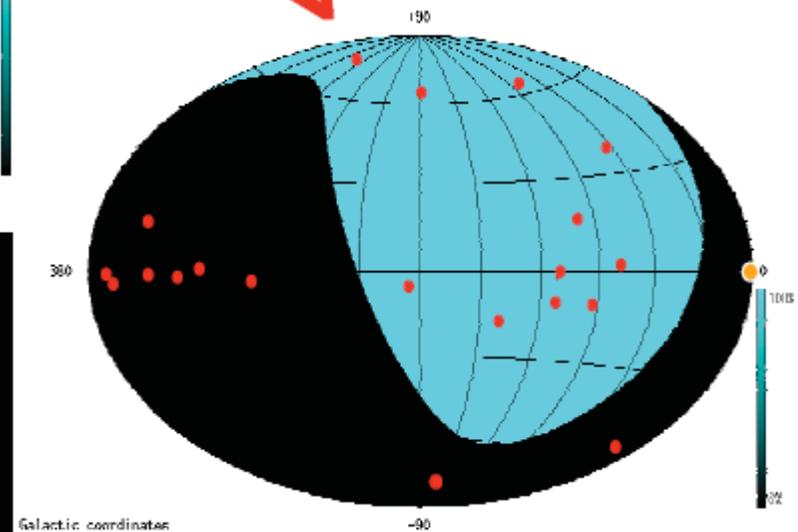


Why 2 large detectors in 2

hemispheres?



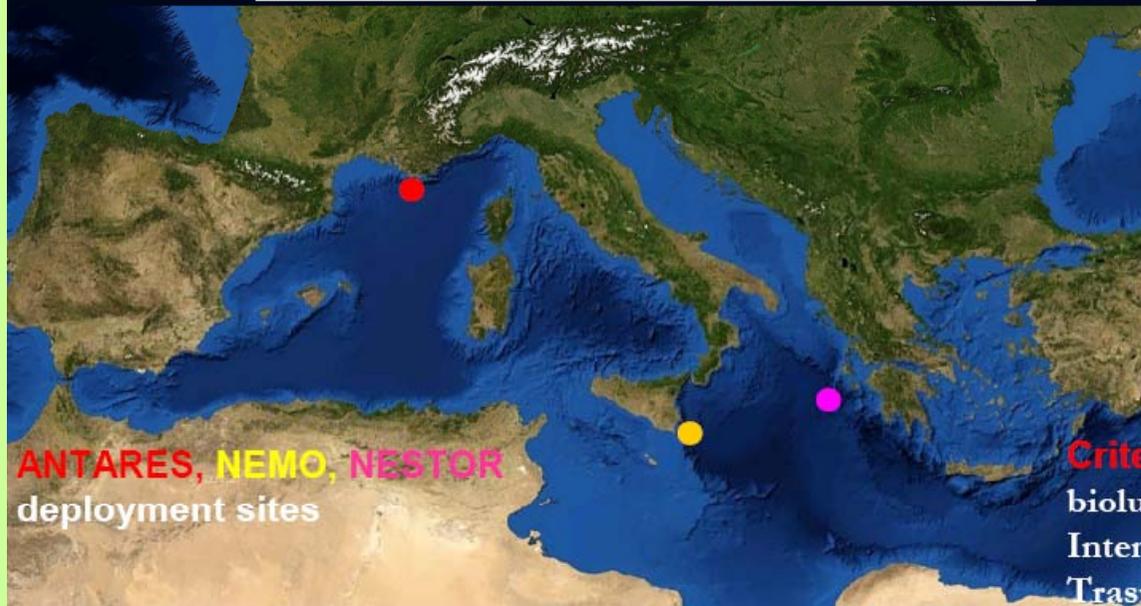
AMANDA, IceCube
South Pole



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

TeV γ sources

Siti possibili



ANTARES, NEMO, NESTOR
deployment sites

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



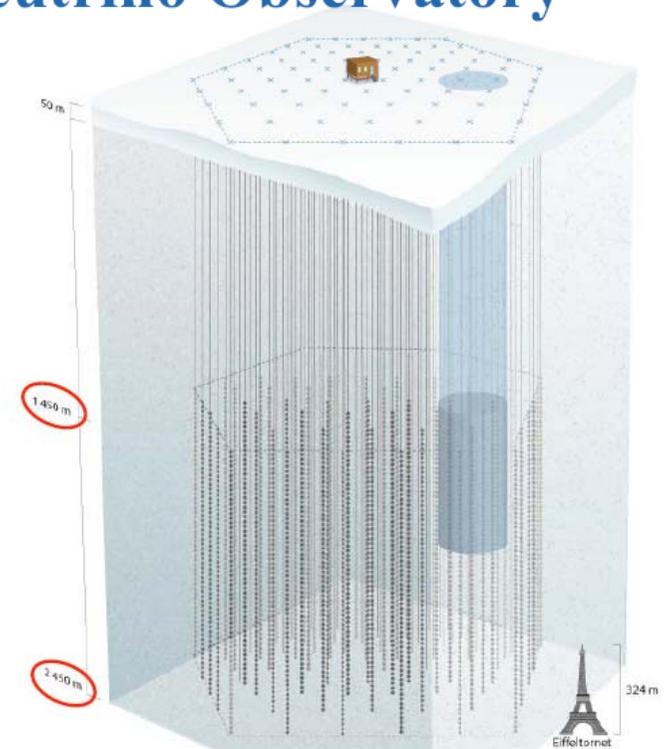
IceCube Neutrino Observatory

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



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 !