

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

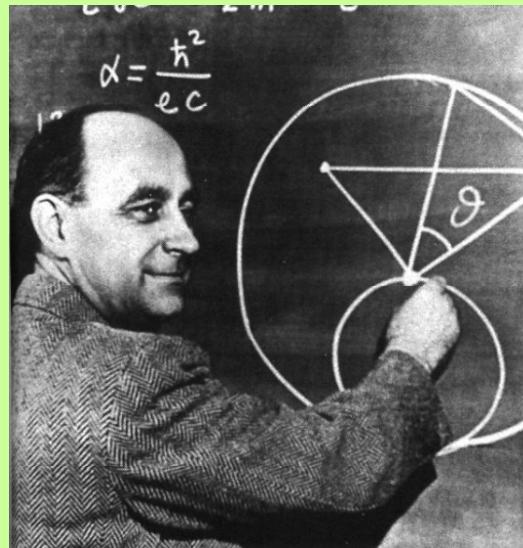
Prima tappa

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



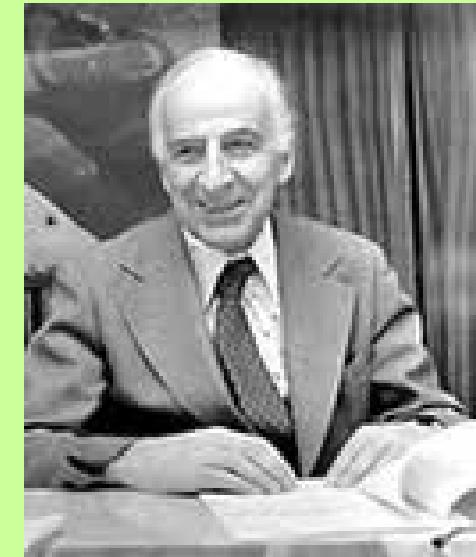
Wolfgang Ernst Pauli
(1900 – 1958)

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 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 quan-
ta in that they do not travel with the velocity of light:
The mass of the neutron must be of the same order of magni-
tude 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 neu-
trons. 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 prob-
ably 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.

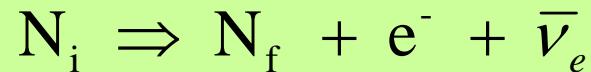
Cari Signore e Signori radioattivi...
... come soluzione disperata al problema di...
sono giunto a considerare la possibilità che
possa esistere nel nucleo **una particella**
elettricamente neutra, che chiamero'
"neutron".

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.

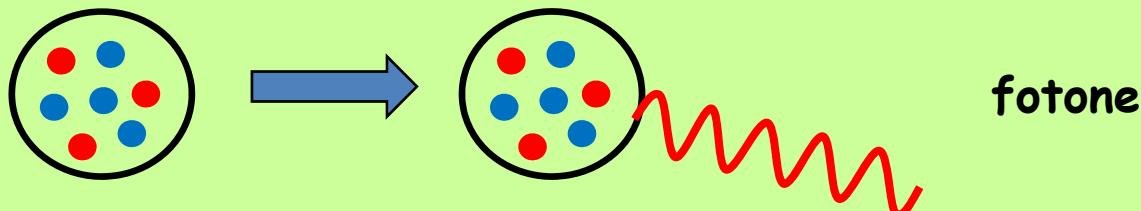
Il vostro umile servitore, W. Pauli

Emissione beta nucleare:

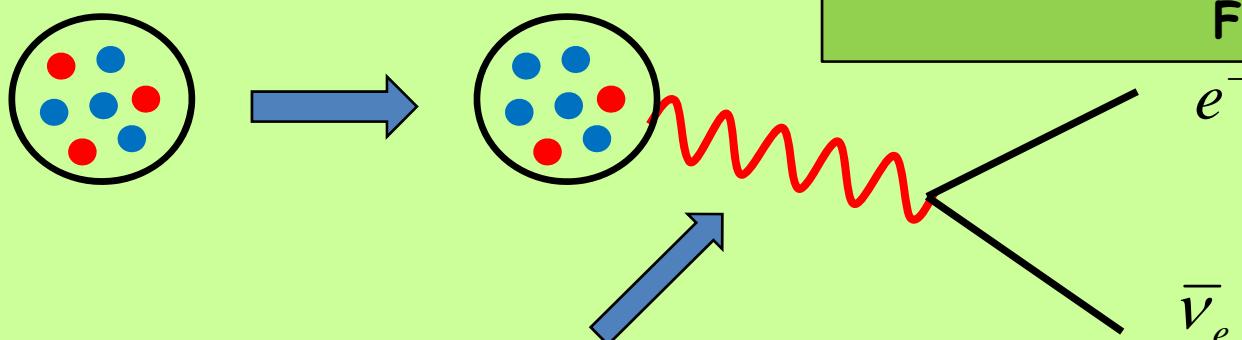


viene anche emesso un neutrino: particella di carica nulla e massa piccola rispetto a quella dell'elettrone (ipotesi di PAULI)

diseccitazione di un nucleo

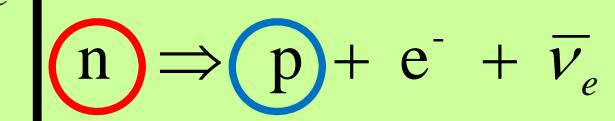


decadimento beta di un nucleo



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

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



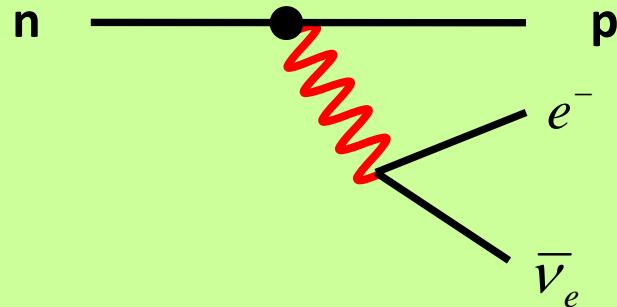
Fermi pubblica nel 1933 sulla "Rivista Scientifica" un articolo dal titolo: "Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi Beta"

- 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)

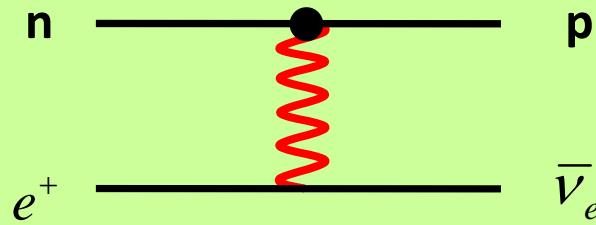


Steve Weinberg (Premio Nobel) in un suo lavoro fondamentale sul Modello Standard (1967):
"La storia dei tentativi di unificazione di interazione elettromagnetica ed interazione debole e' molto lunga. **Probabilmente il primo lavoro in questo senso e' E. Fermi, Zeitschrift fur Physik**".

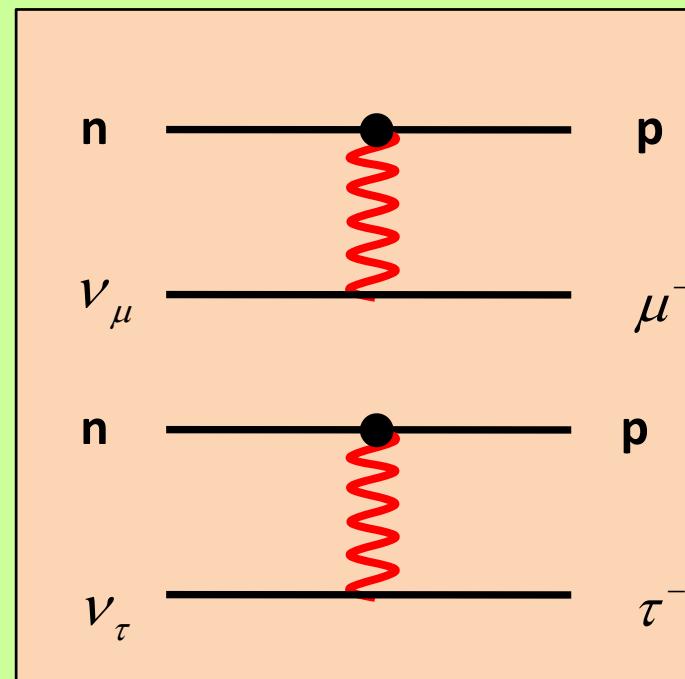
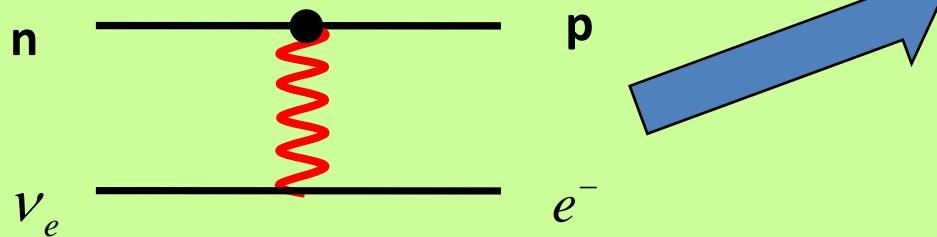
rappresentiamo il decadimento del neutrone con il diagramma



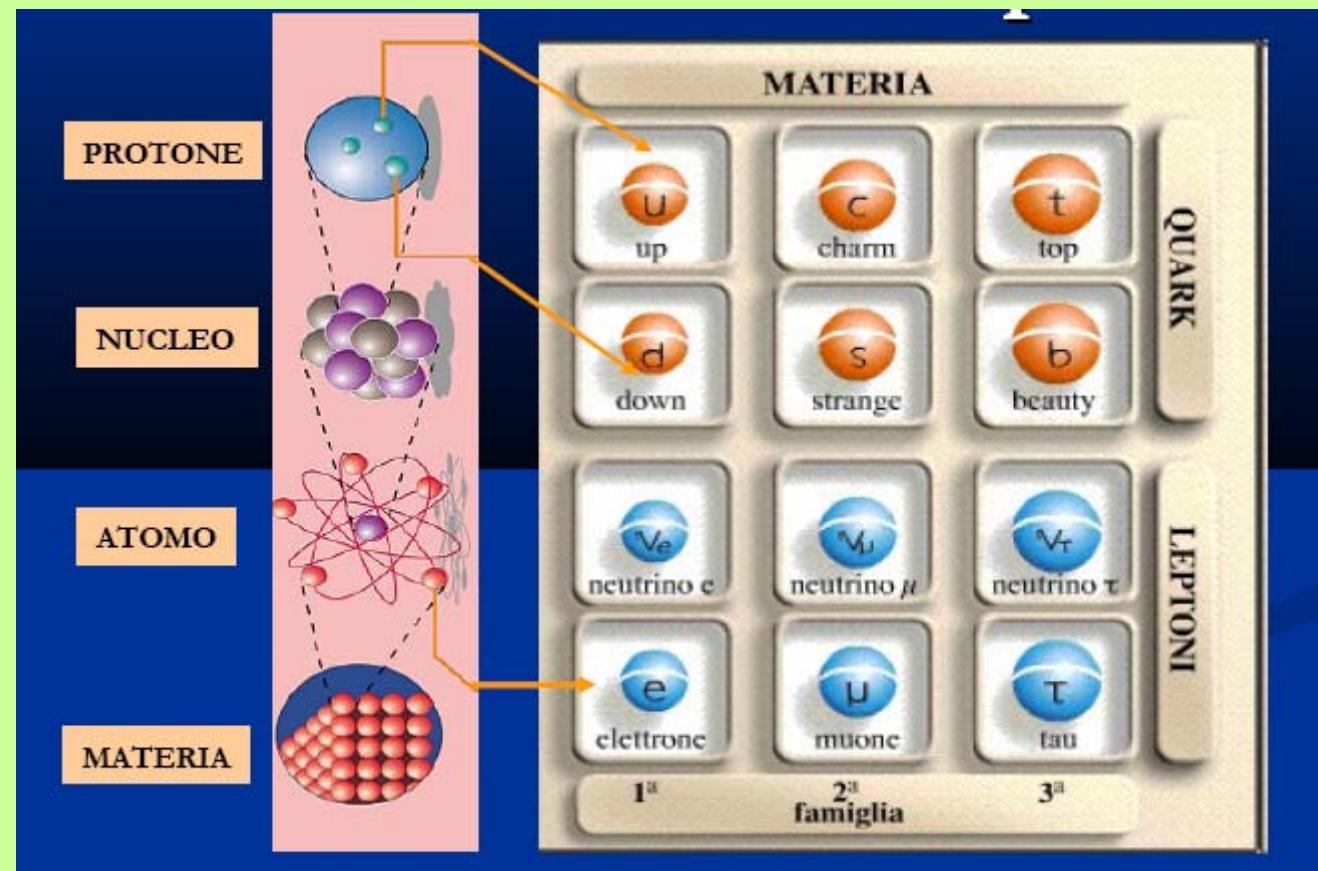
schema analogo per urto di positrone su neutrone



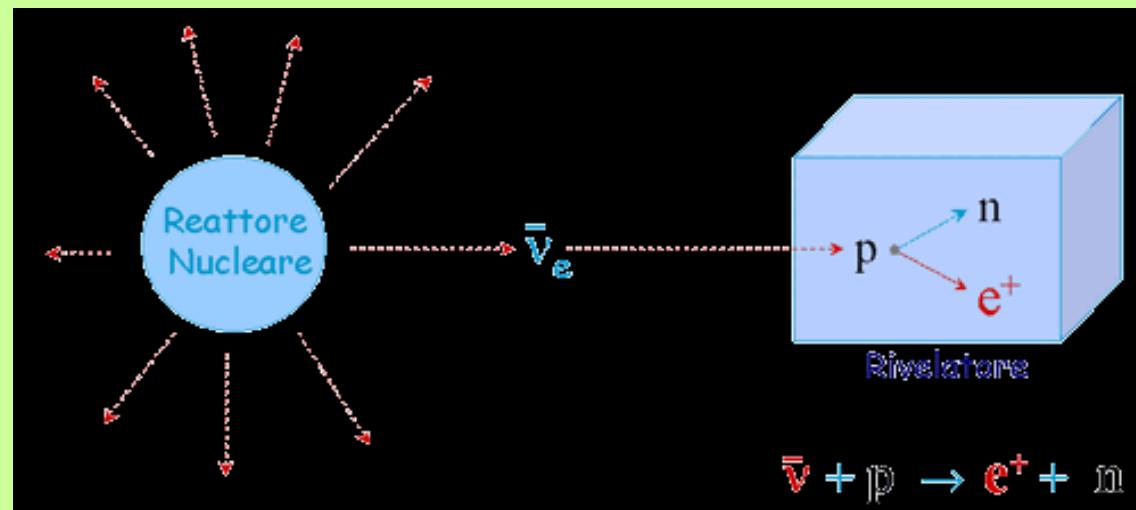
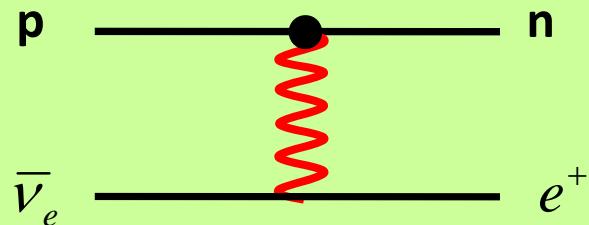
oppure urto neutrino-neutrone



esistono 3 tipi di neutrini di diverso "sapore"



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



Seconda tappa

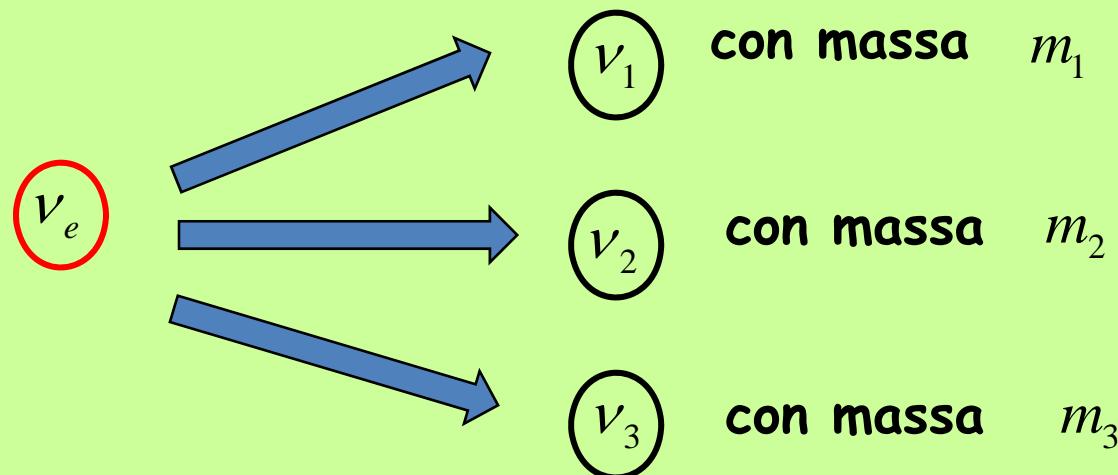
Neutrini - masse e oscillazioni

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

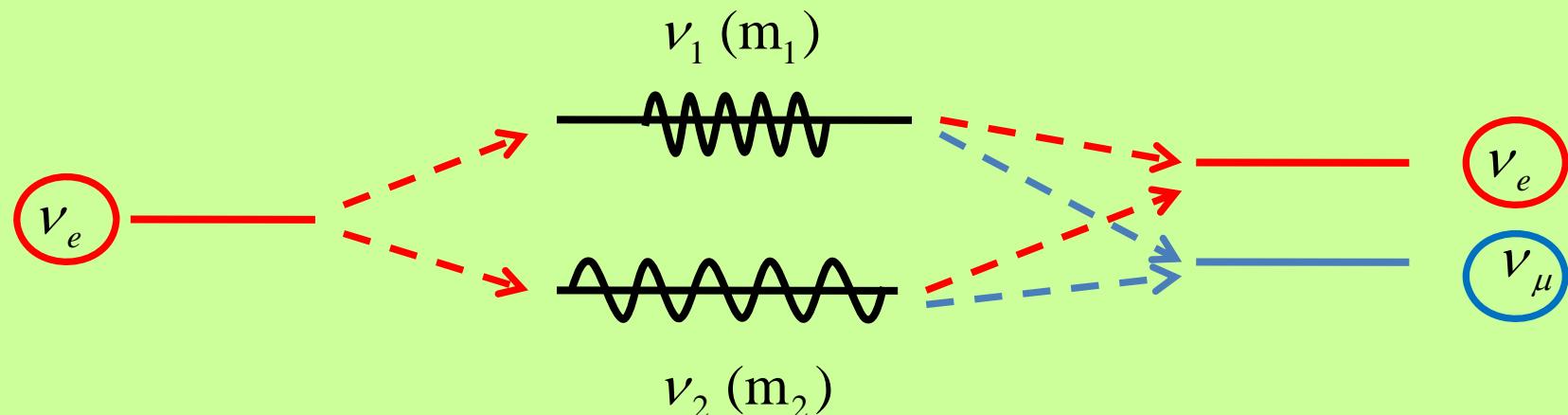
Ipotesi di Pontecorvo:

- 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 "savori"



nella sua evoluzione temporale il neutrino ν_e puo' trasformarsi in ν_μ



Probabilita' di trasformazione $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$

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

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

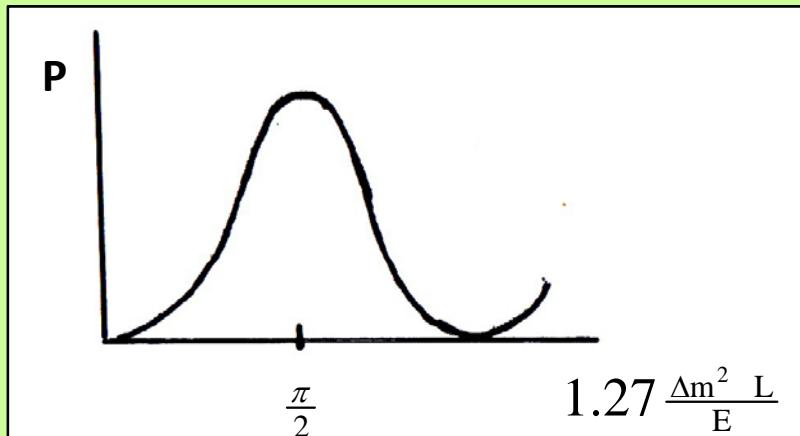
E = energia in GeV
 L = distanza in km
 masse in $eV/(c)^2$

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

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

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

neutrini atmosferici

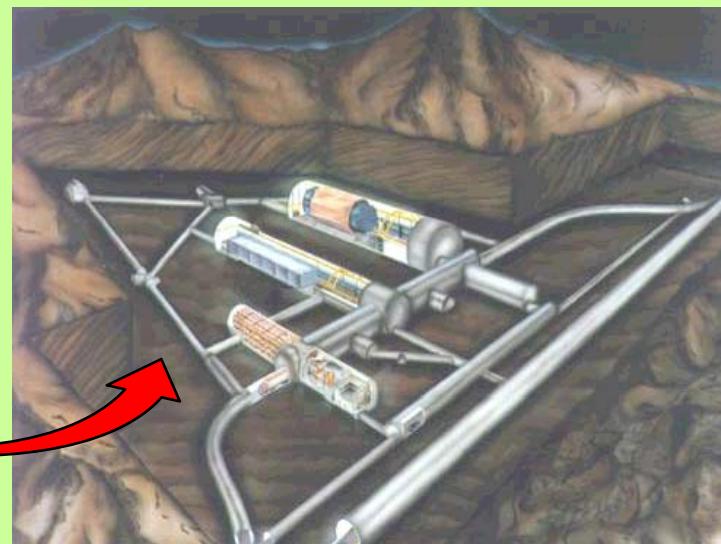
$L \approx 20 - 10^4$ km, $E = 0.1 - 100$ GeV

neutrini da reattori nucleari

$E \approx 1$ MeV, L variabile

neutrini da acceleratori nucleari E variabile, L variabile

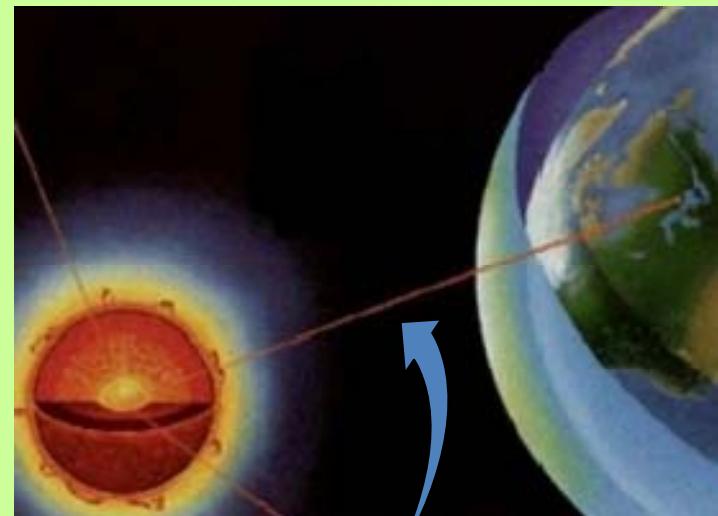
le misure di rivelazione devono essere fatte in ambienti
protetti dai raggi cosmici
(laboratori sotterranei - Laboratorio del Gran Sasso)



Neutrini solari

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

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

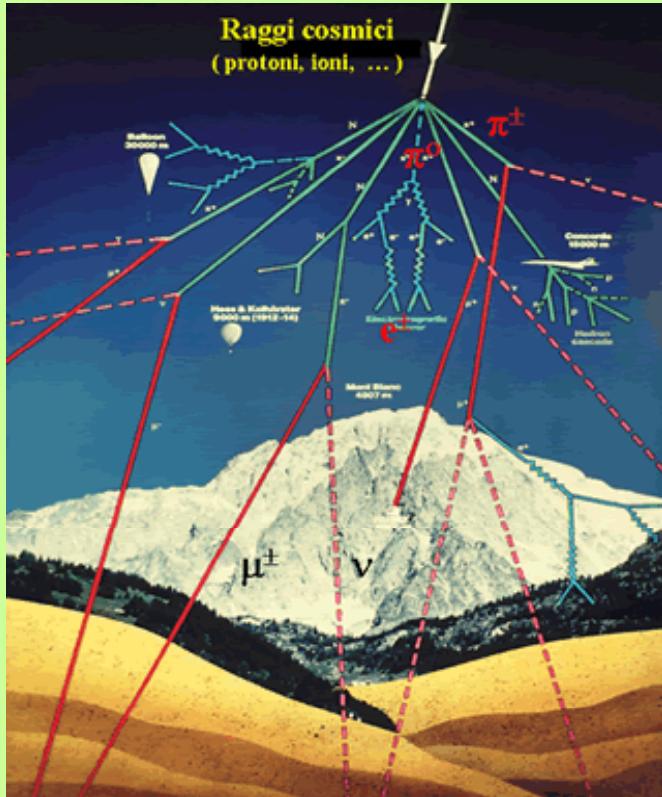


distanza Sole - Terra $\approx 10^{11} \text{ km}$

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

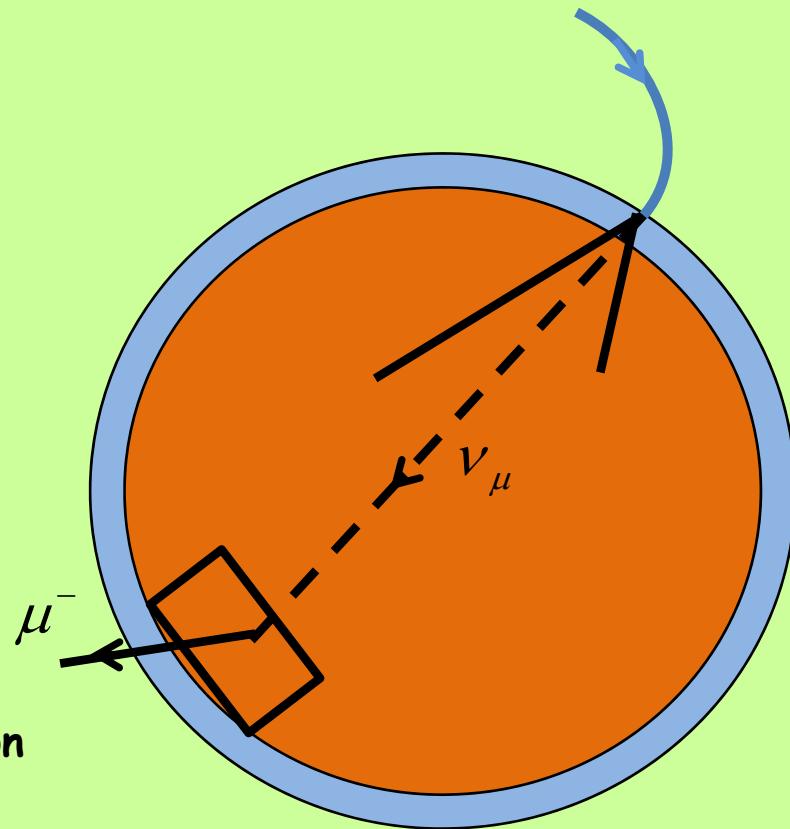
Raymond Davis Jr
(Nobel 2002)





Neutrini atmosferici

raggi cosmici



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

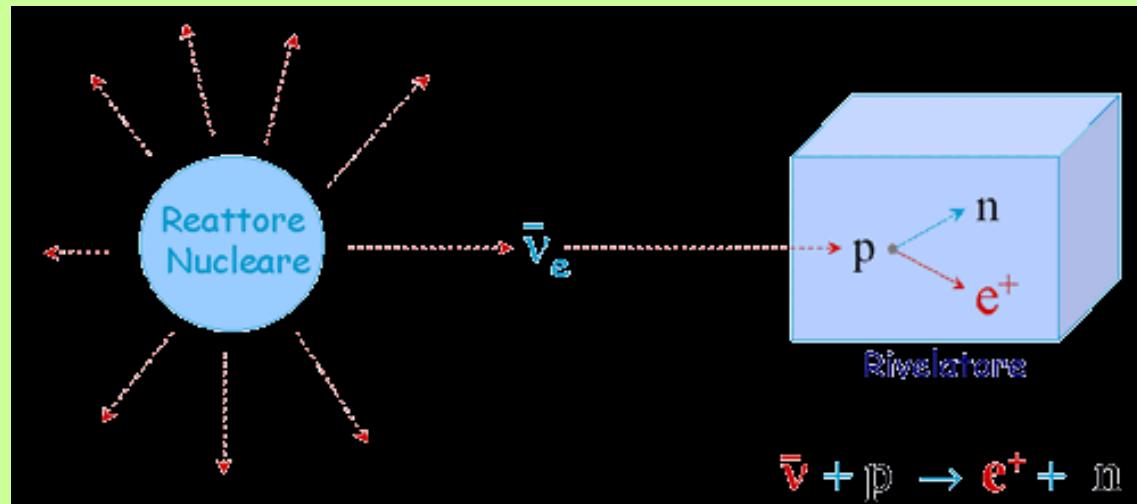


Super-Kamiokande (Giappone)
MACRO (GS)

Masatoshi Koshiba
(Nobel 2002)

atmosfera terrestre: spessore 20 km
diametro terrestre: 13.000 km

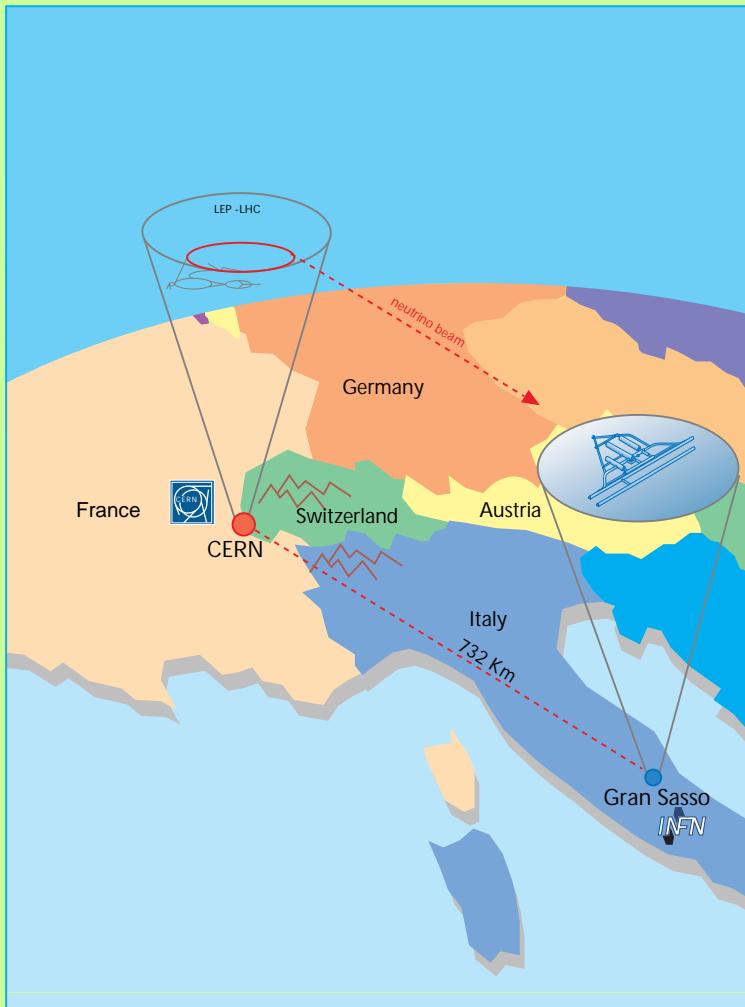
(Anti)-neutrini **da reattori nucleari** generati da
fissioni nucleari di U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{241}



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



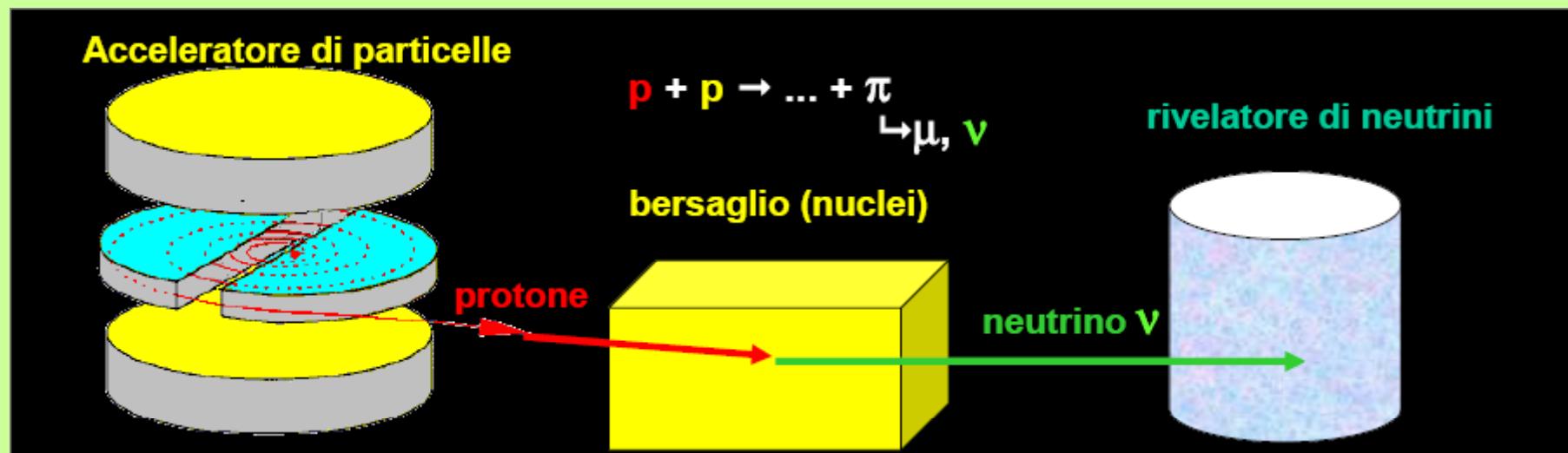
$$\nu_\mu \longrightarrow \nu_\tau$$

Fascio di ν_μ 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)

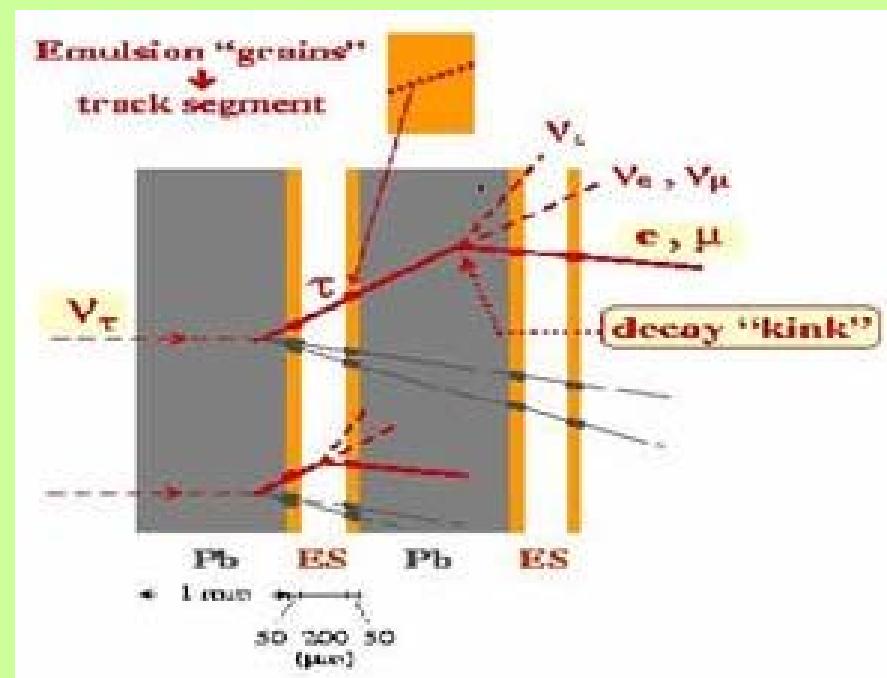
Neutrini da acceleratori



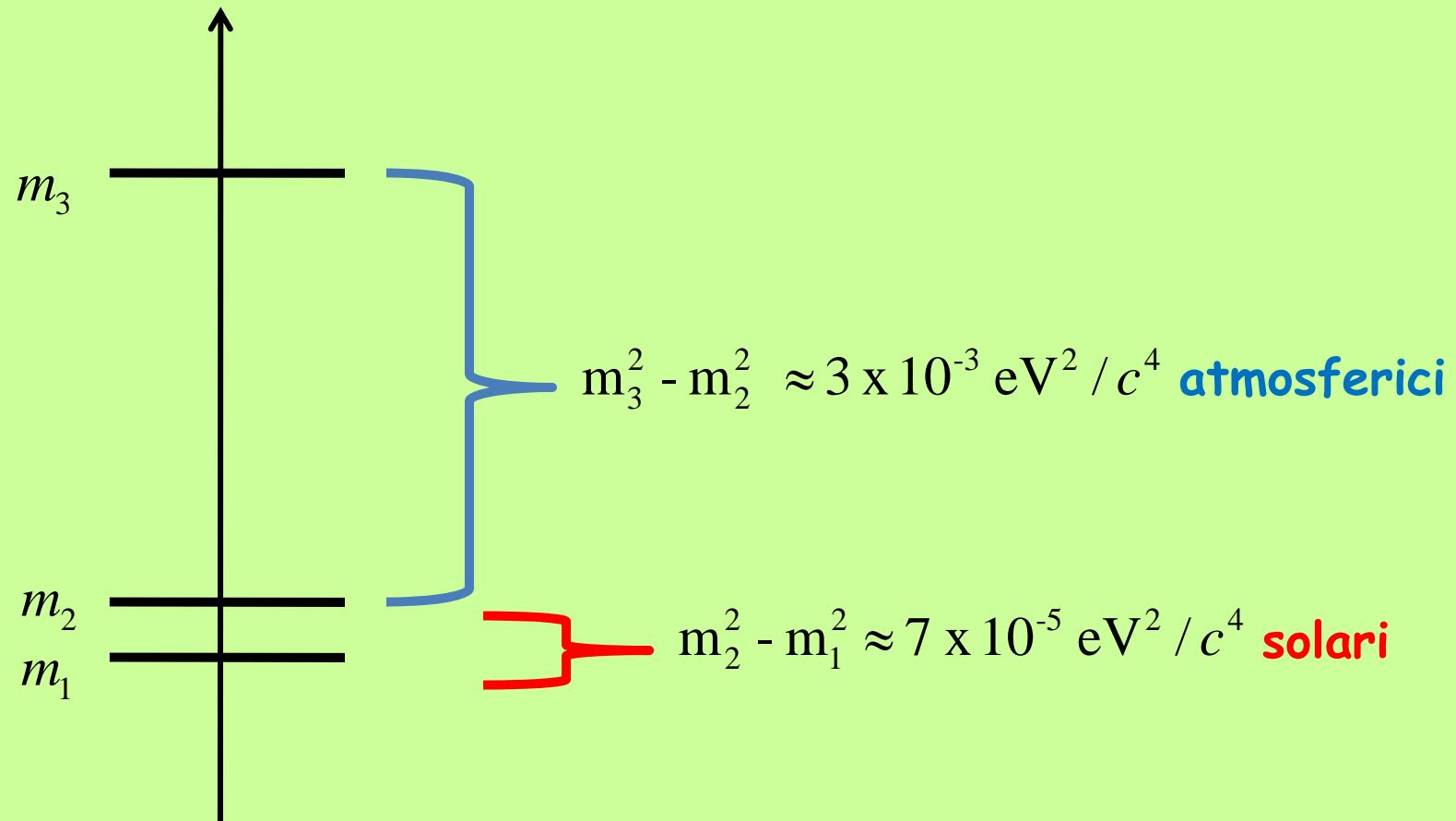
Esperimento OPERA al Gran Sasso



$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$



Riassumendo, masse di neutrini:



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

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

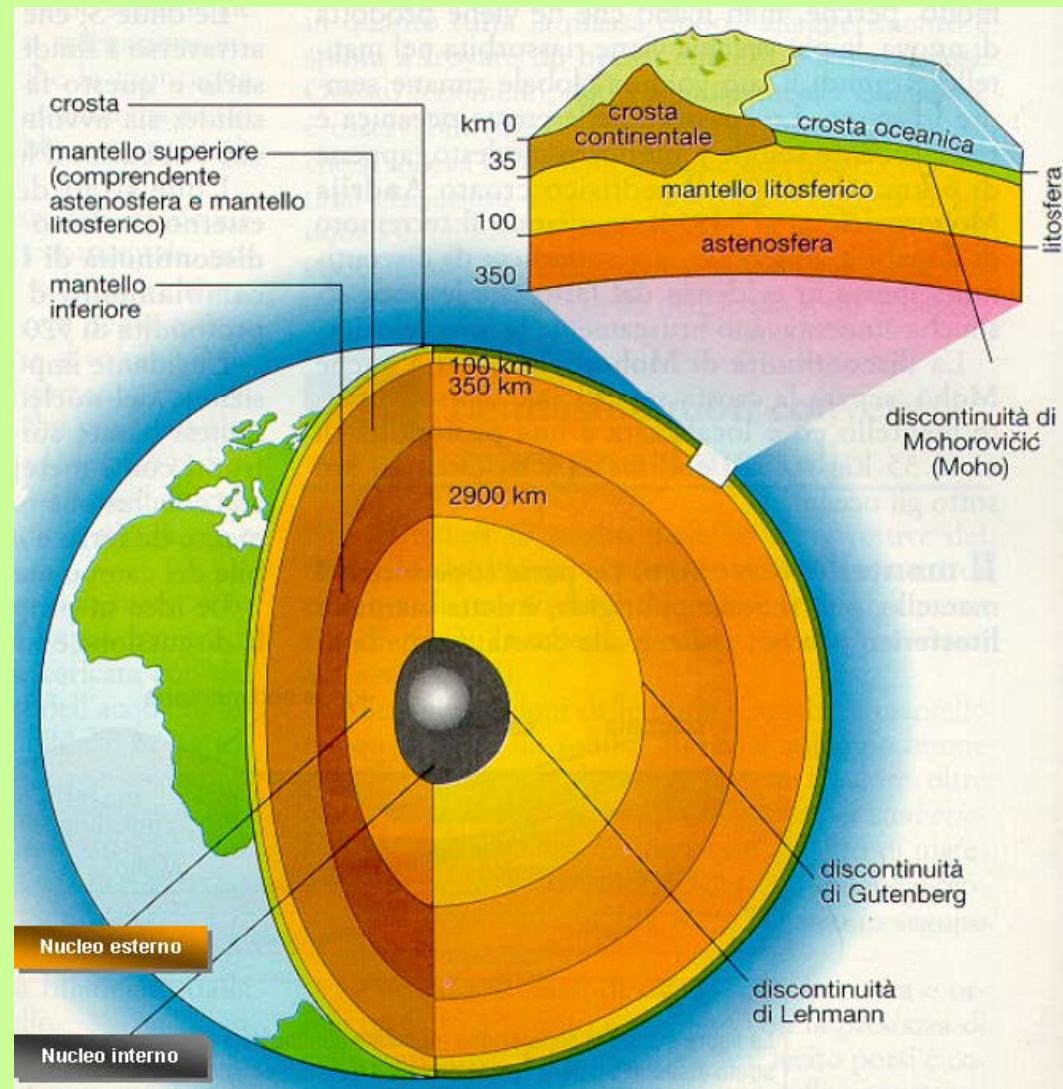
Geoneutrini

(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

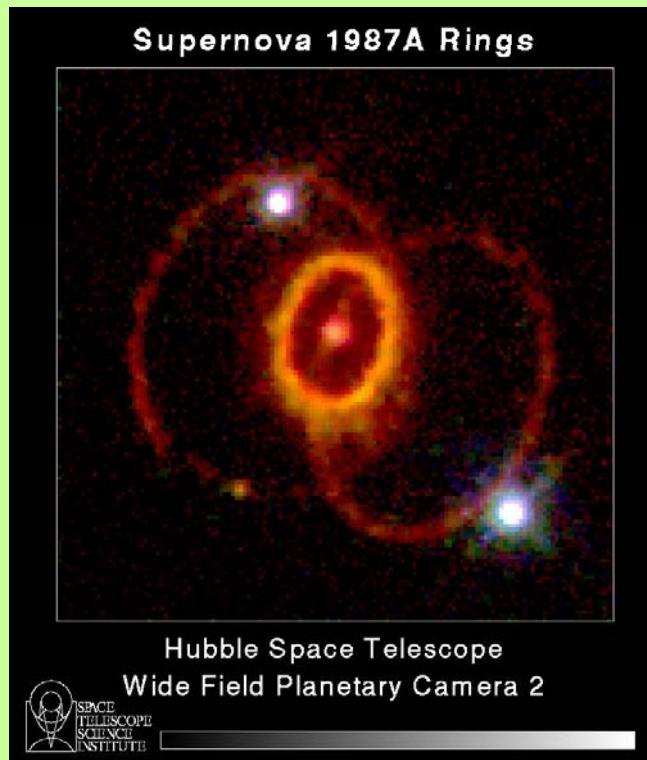
I geoneutrini sono stati
misurati in Giappone
(KamLAND) e in Italia
(Borexino, LNGS)



Terza tappa

I neutrini come mezzo di osservazione astronomica

NEUTRINI DA SUPERNOVE

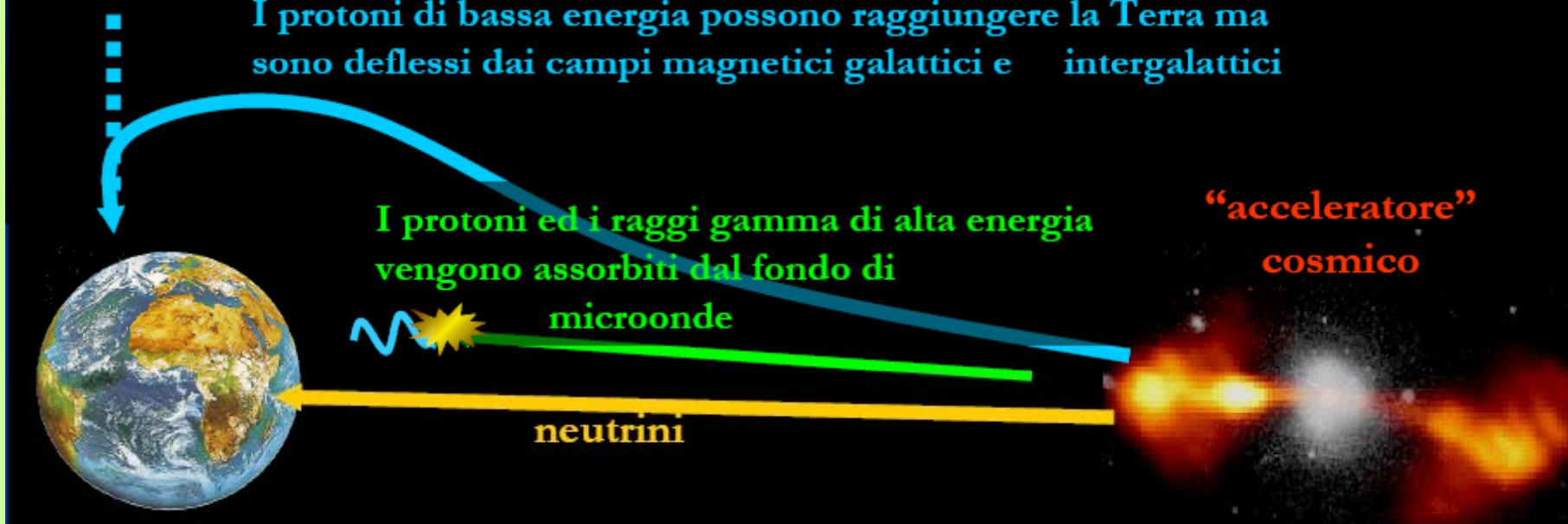


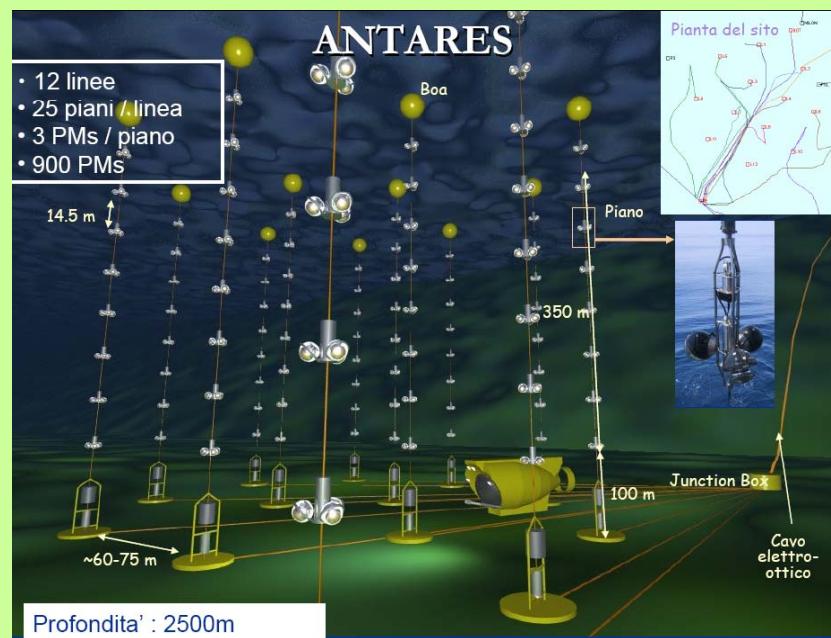
Nella fase di esplosione di una stella massiccia che porta alla formazione di una supernova vengono emessi molti neutrini -

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

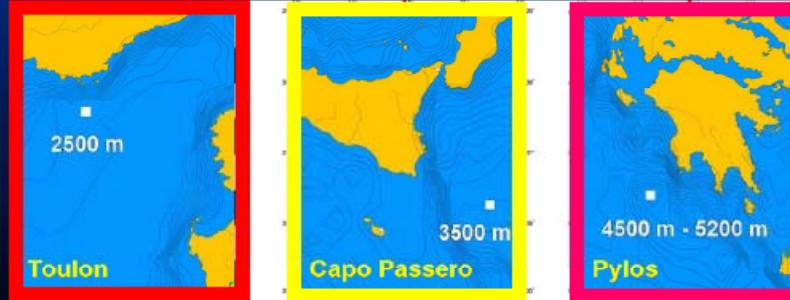
direzione apparente del protone

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





Siti possibili





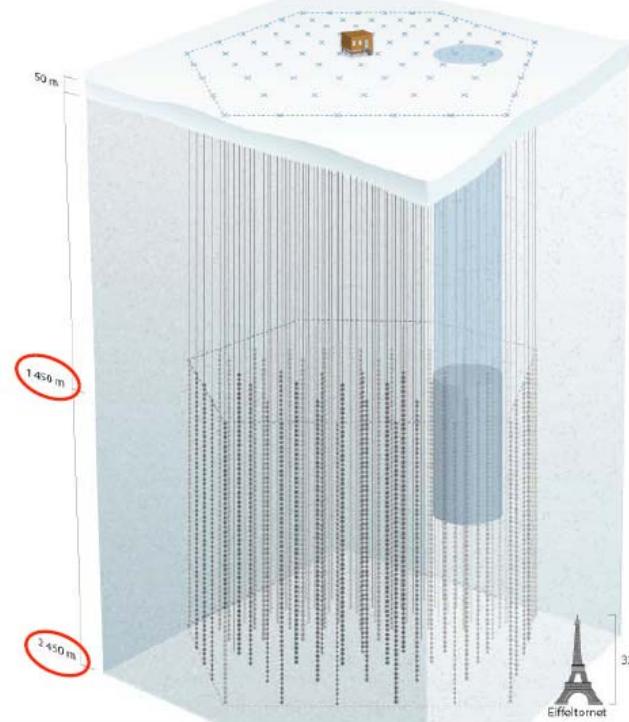
IceCube Neutrino Observatory

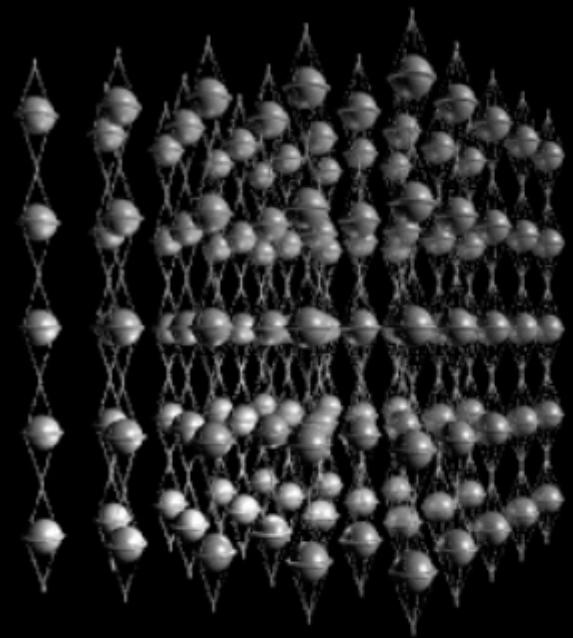
IceCube

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

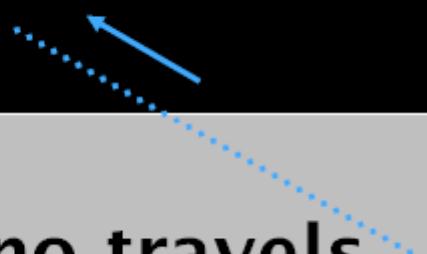
Air shower array

80 Pairs of Ice Cherenkov Tanks

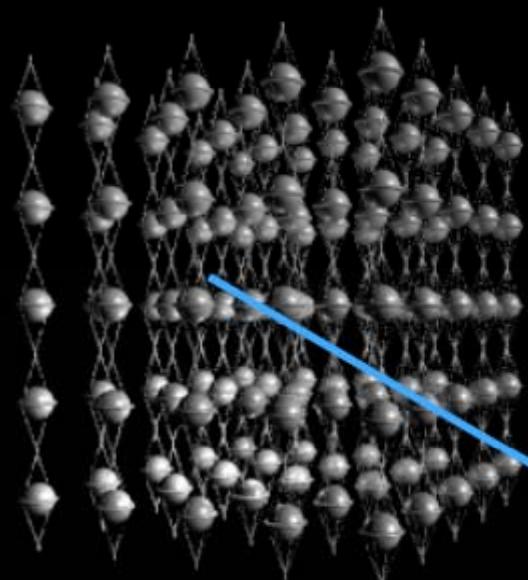




detector



**neutrino travels
through the earth**



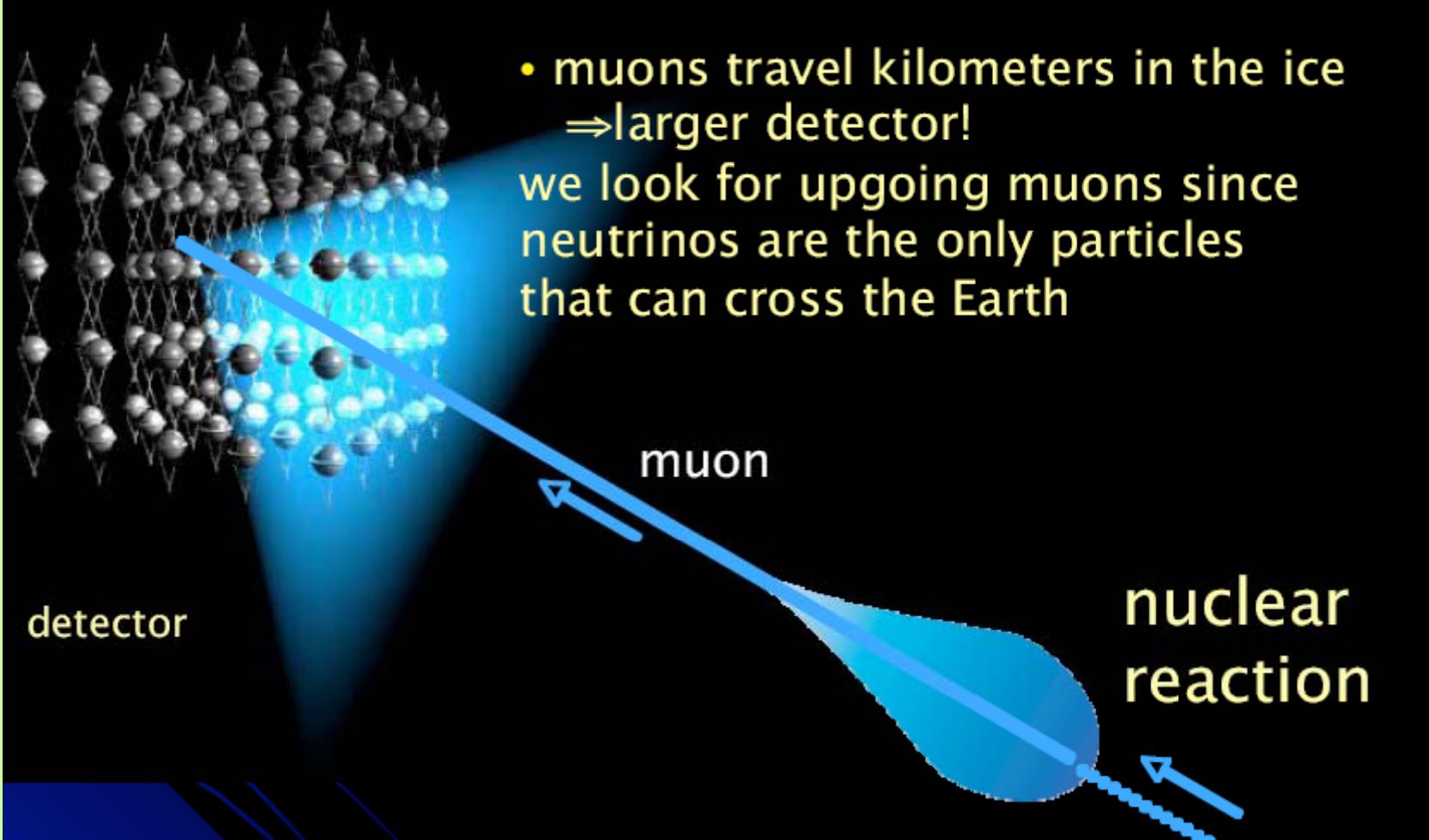
detector

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

muon

nuclear
reaction

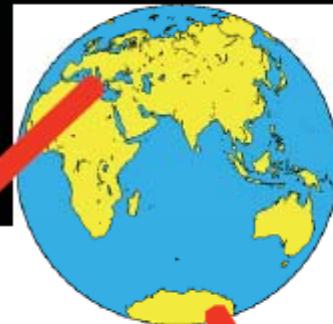
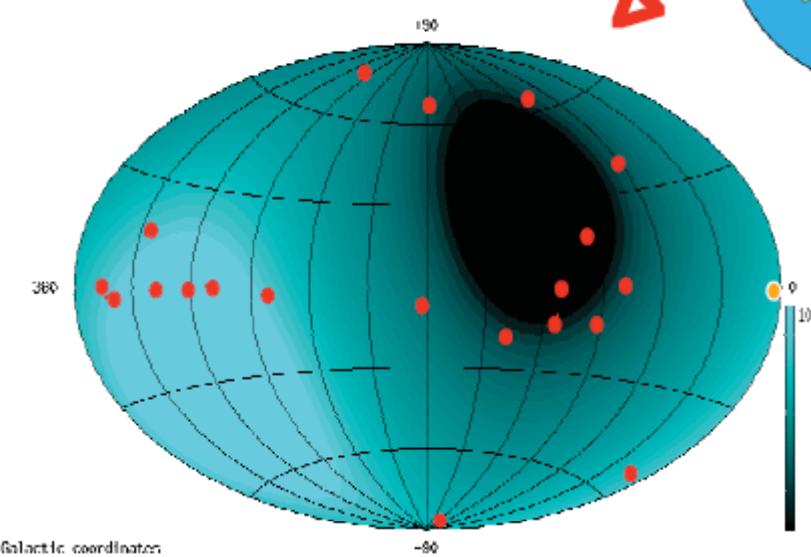
neutrino travels
through the earth



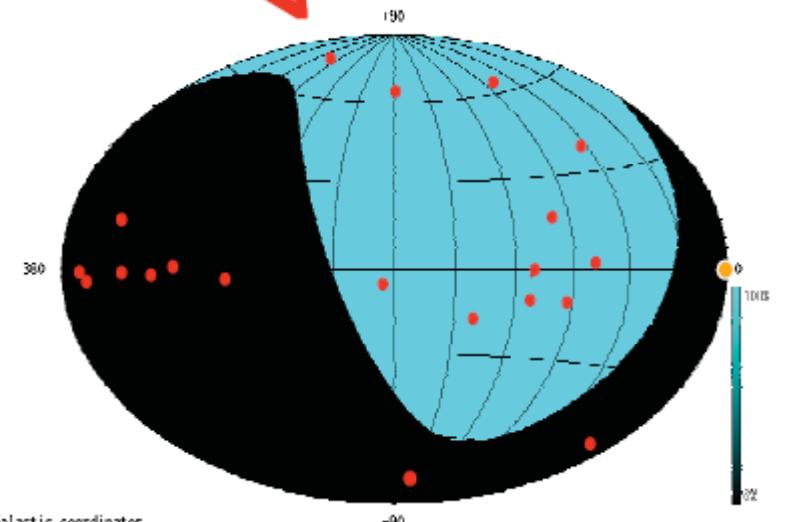
- blue light produced in nuclear reaction
- optical sensors capture (and map) the light

Why 2 large detectors in 2

hemispheres?



AMANDA, IceCube
South Pole



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

TeV γ sources

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