Fisica e astrofisica dei neutrini

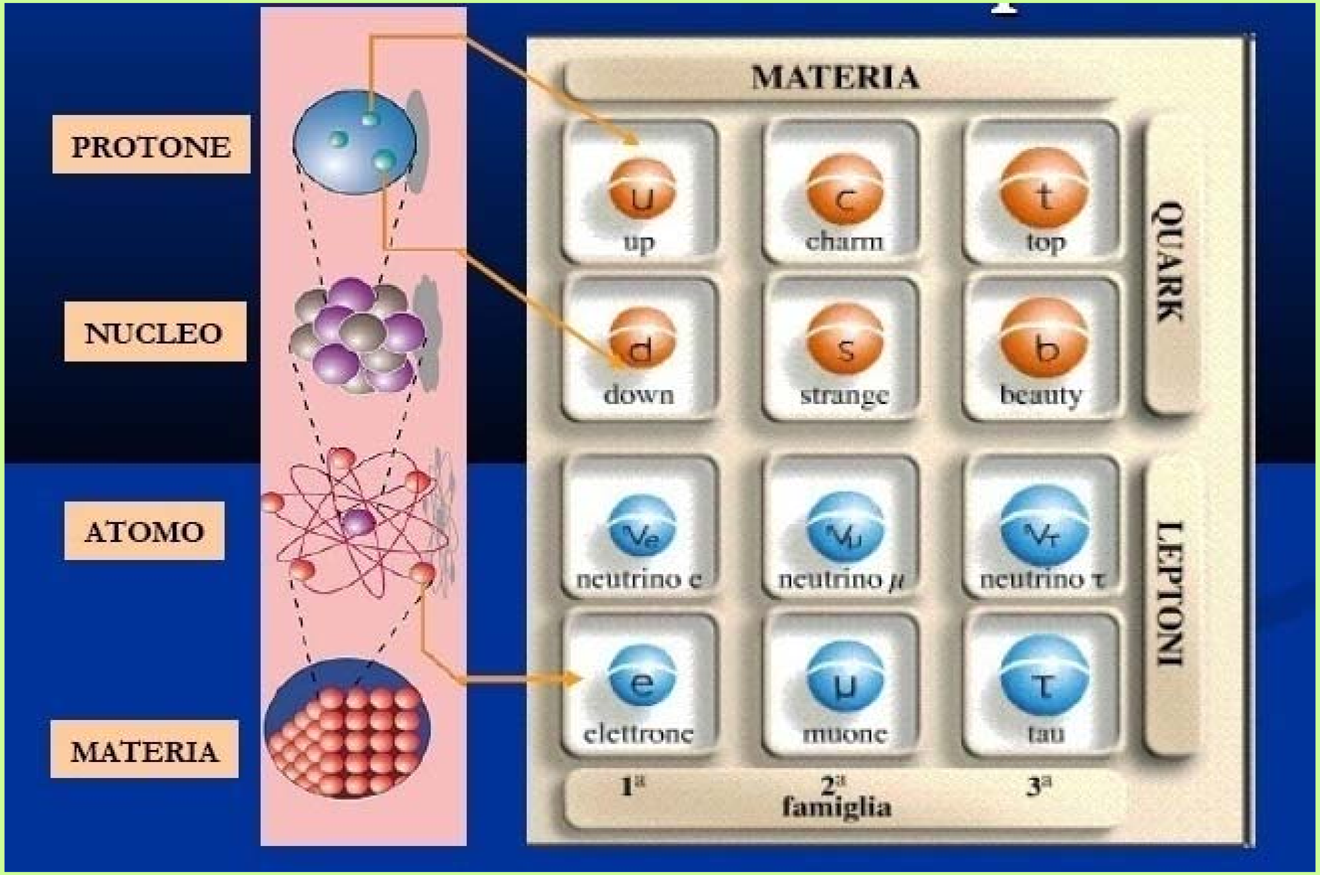
Biblioteca Civica Multimediale Archimede
Settimo Torinese, 18 febbraio 2014

Alessandro Bottino

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

interazione forte →

interazione elettro-magnetica →


PROTONE
NUCLEO
ATOMO
MATERIA
MATERIA
u
up
c
charm
t
top
d
down
s
strange
b
beauty
QUARK
νe
neutrino e
νμ
neutrino μ
ντ
neutrino τ
e
elettrone
μ
muone
τ
tau
LEPTONI
1ª
2ª
famiglia
3ª

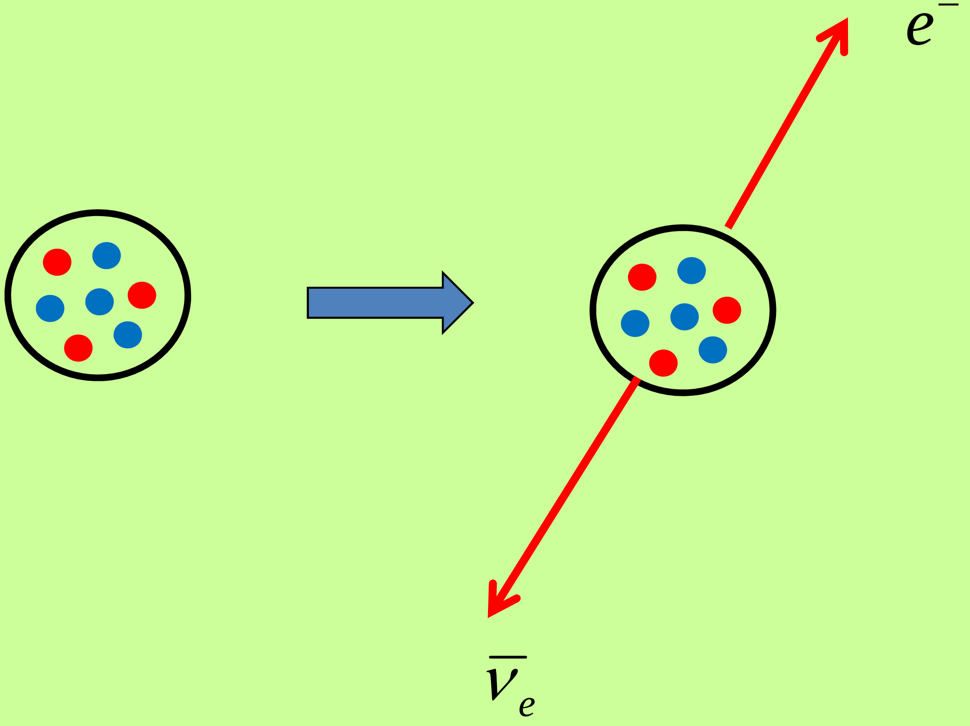
e ai corrispondenti anti-quarks e anti-leptoni:

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

Neutrini ed interazione debole

decadimento beta di un nucleo

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



decadimento beta del neutrone

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

Molti nuclei atomici instabili acquisiscono stabilita' emettendo radiazione beta:

$$\mathrm{N(Z,N)} \rightarrow \mathrm{N(Z+1,N-1)} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}_e$$

beta -

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

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

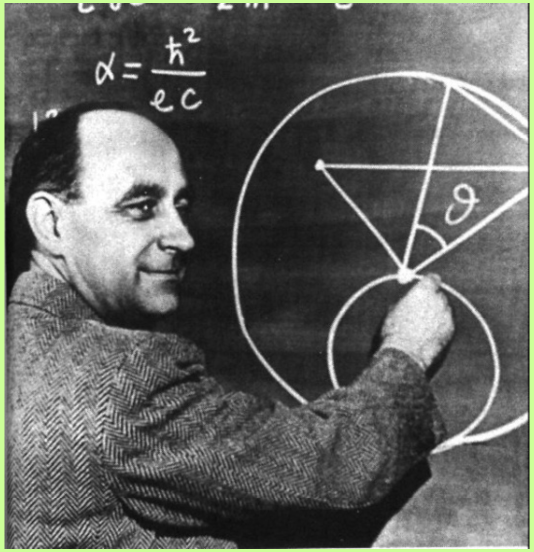
$$\mathrm{N(Z,N)} \rightarrow \mathrm{N(Z-1,N+1)} + \mathrm{e}^+ + \nu_e$$

beta +

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

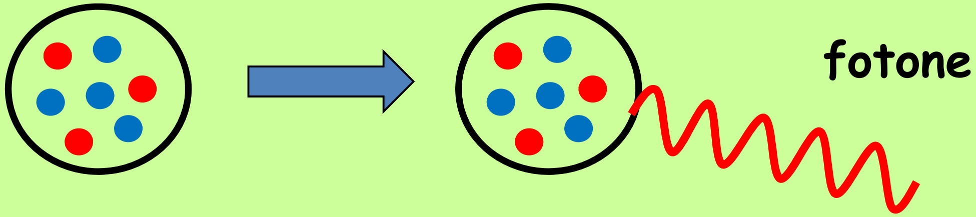
Questi processi sono dovuti all'interazione debole

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

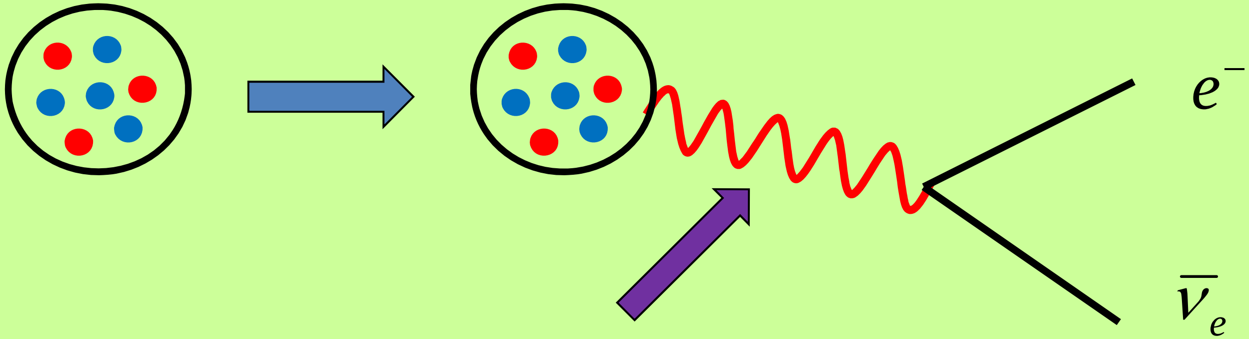

$\alpha = \frac{\hbar^2}{ec}$
ϑ

teoria dell'interazione debole (1933)

diseccitazione di un nucleo



decadimento beta di un nucleo



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

Numeri leptonici

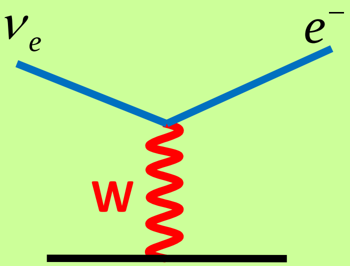
leptoni

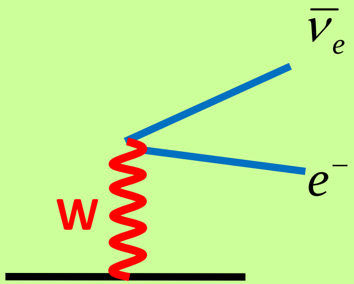
	ν_e e^-	ν_μ μ^-	ν_τ τ^-
L_e	+1	0	0
L_μ	0	+1	0
L_τ	0	0	+1

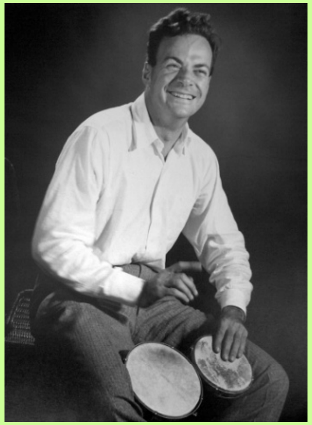
antileptoni

	$\overline{\nu}_e$ e^+	$\overline{\nu}_\mu$ μ^+	$\overline{\nu}_\tau$ τ^+
L_e	-1	0	0
L_μ	0	-1	0
L_τ	0	0	-1

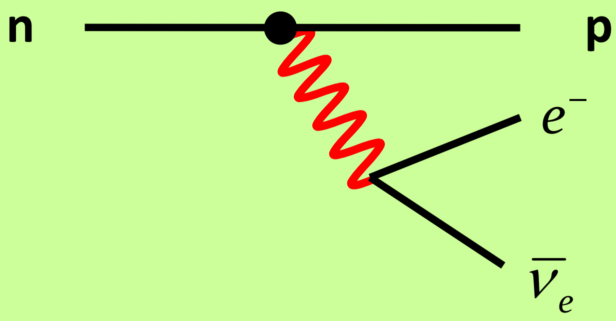
Conservazione dei numeri leptonici
(diagrammi di Feynman)



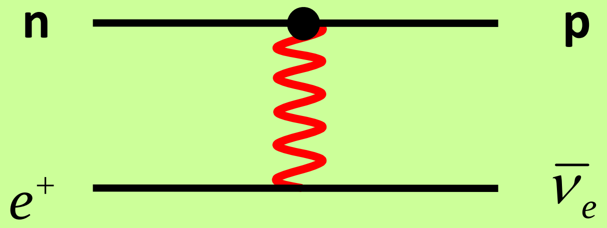




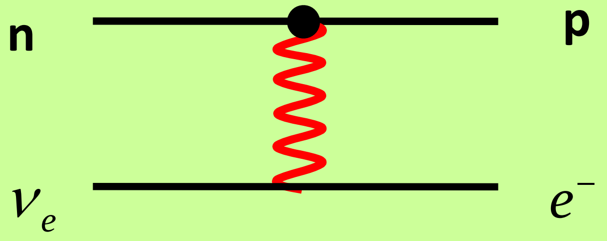
rappresentiamo il decadimento del neutrone con il diagramma

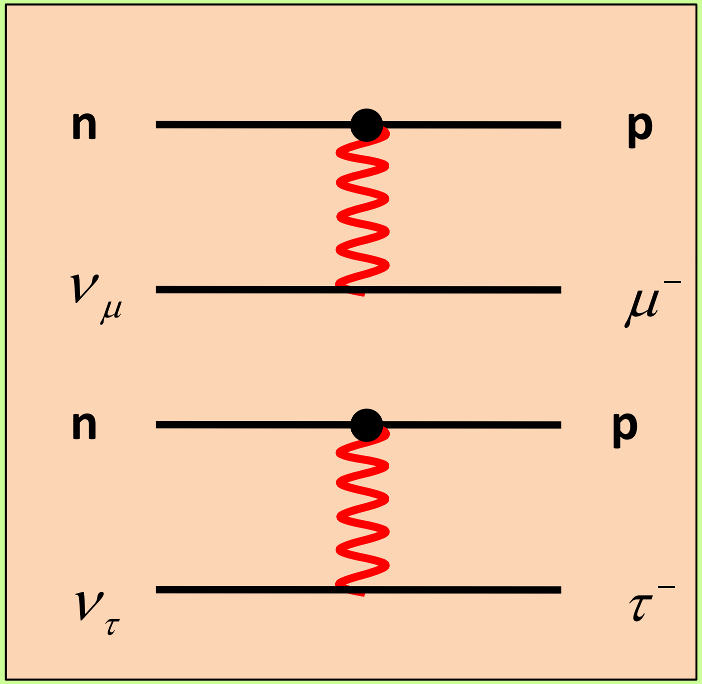

n
p
e^-
$\overline{\nu}_e$

schema analogo per urto di positrone su neutrone


n
p
e^+
$\overline{\nu}_e$

oppure urto neutrino-neutrone

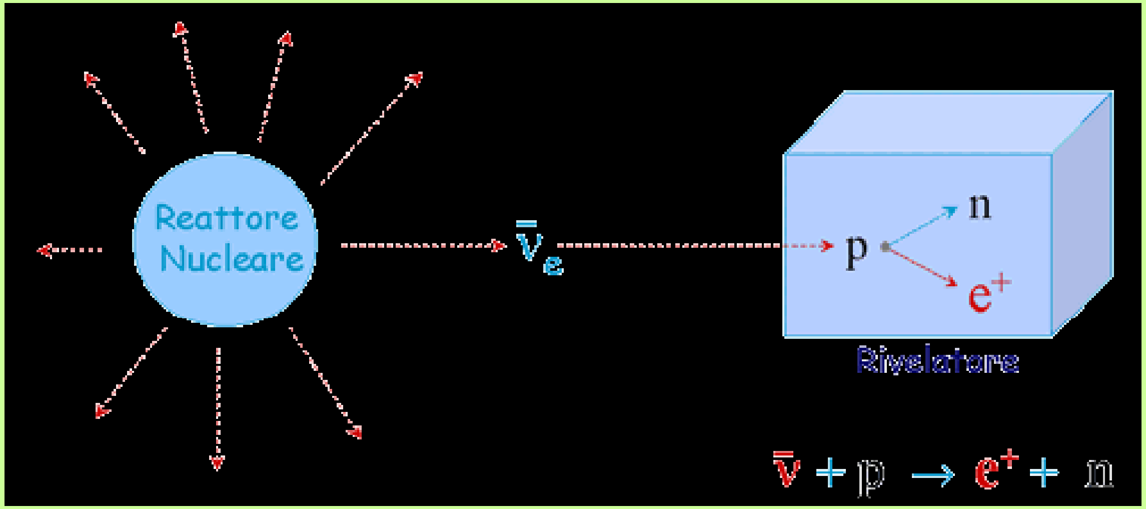


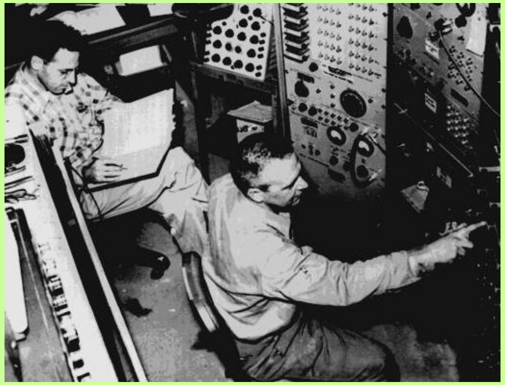

n
p
ν_μ
μ^-
n
p
ν_τ
τ^-

esistono 3 tipi di neutrini di diverso “sapore”

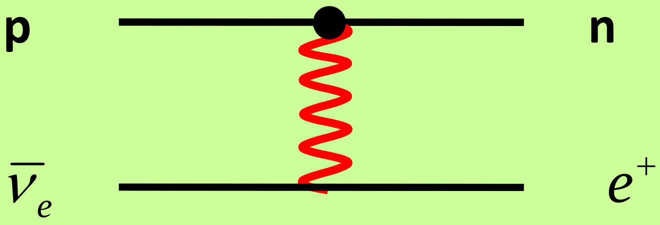
Prima rivelazione di neutrino (Fred Reines e Clyde Cowan, 1957)

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


Reattore
Nucleare
$\bar{\nu}_e$
p
n
e^+
Rivelatore
$\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$



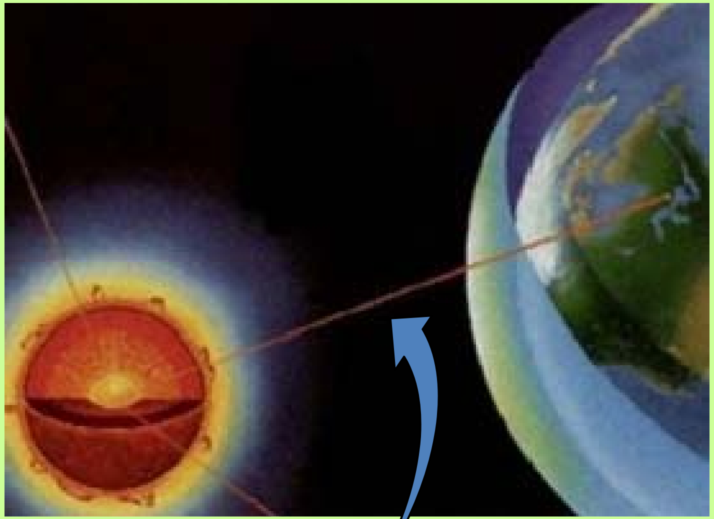
e rivelato mediante il processo


p
n
$\overline{\nu}_e$
e^+

Neutrini solari

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

$$p + p \Rightarrow p + n + e^+ + \nu_e$$



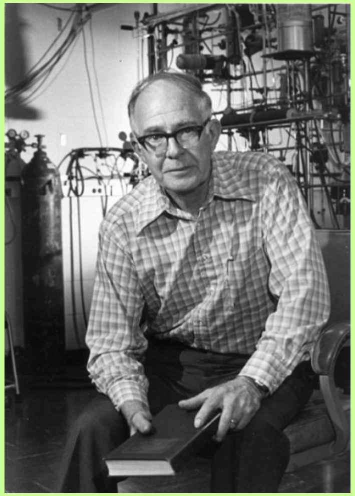
con risultato netto finale

$$4\,p \Rightarrow {}^4\mathrm{He} + 2\,e^+ + 2\,\nu_e + \gamma$$

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

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

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

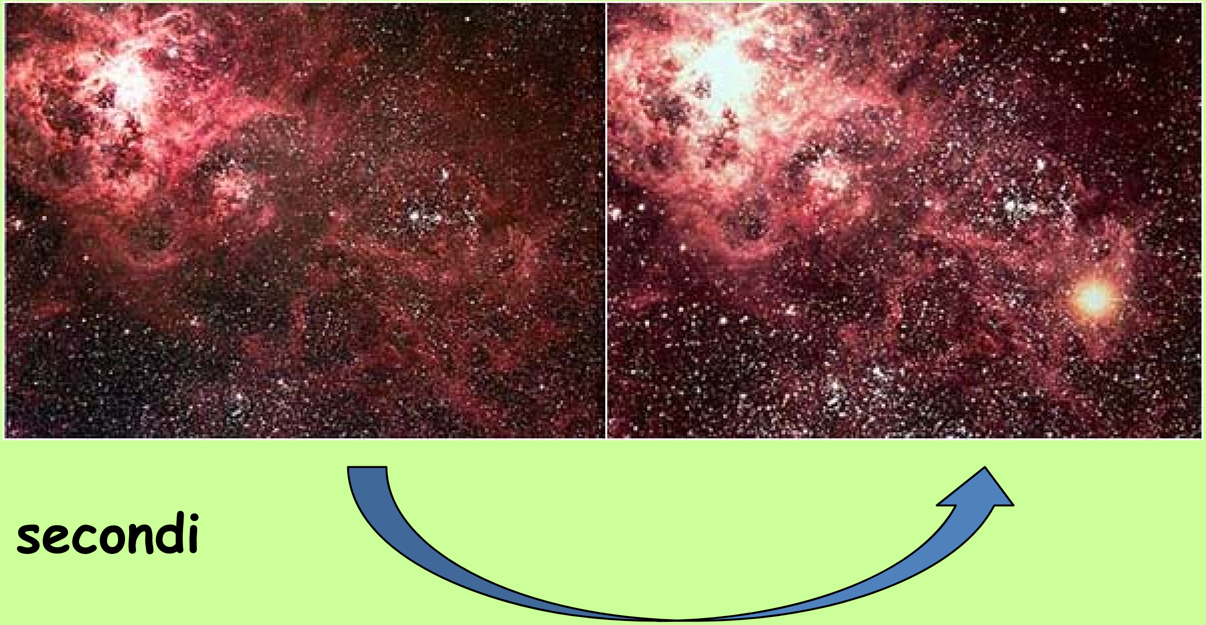


Raymond Davis Jr
(Nobel 2002)

Neutrini da Supernove

Esplosione di una supernova: in pochi secondi una stella esplode emettendo nello spazio una grande quantita' 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**

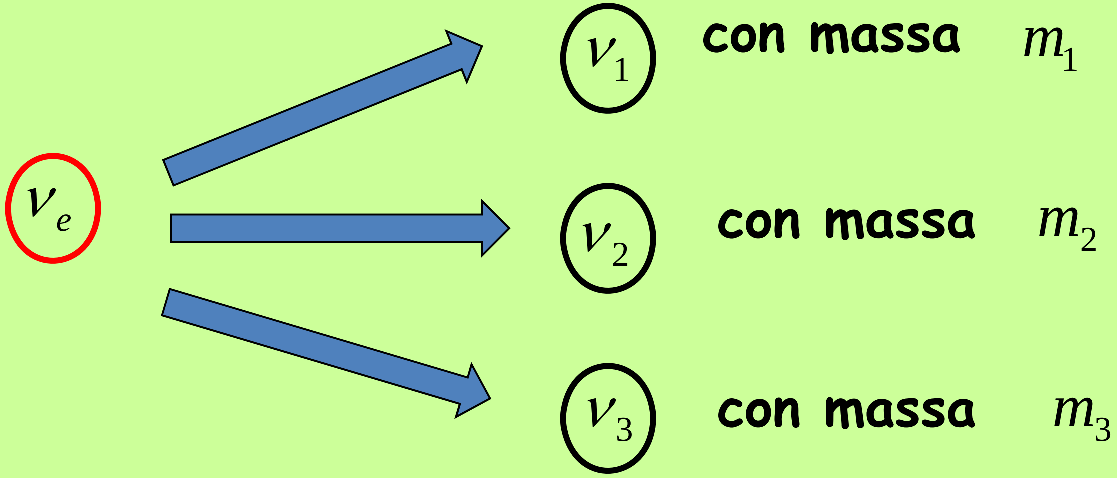
Oscillazioni del neutrino

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 di 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:



ν_e

ν_1 con massa m_1

ν_2 con massa m_2

ν_3 con massa m_3

Passaggio dagli stati con “sapore” definito agli stati con massa definita

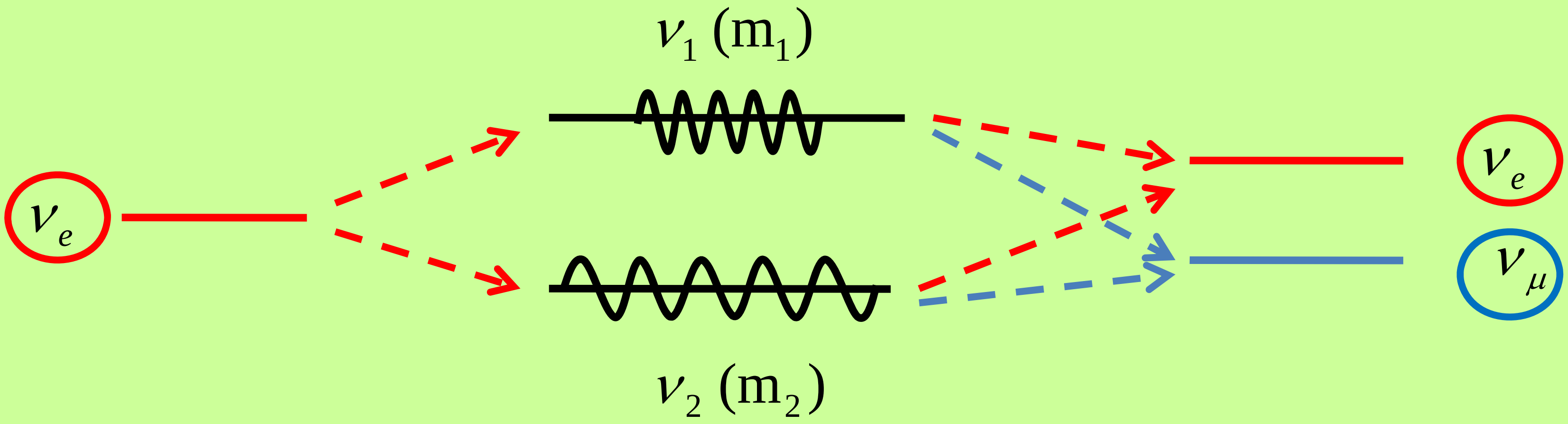
$$\boxed{|\nu_e> = a_1|\nu_1> + a_2|\nu_2> + a_3|\nu_3>}$$

$|a_i|^2$ = **probabilita’** che lo stato $|\nu_e>$ abbia massa m_i

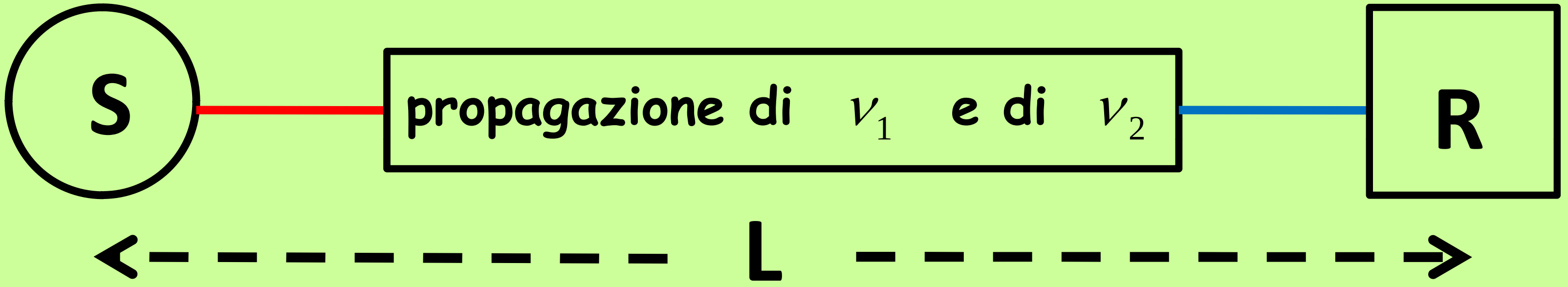
Probabilita’ totale = 1

$$|a_1|^2 + |a_2|^2 + |a_3|^2 = 1$$

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



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



S

propagazione di ν_1 e di ν_2

R

L

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

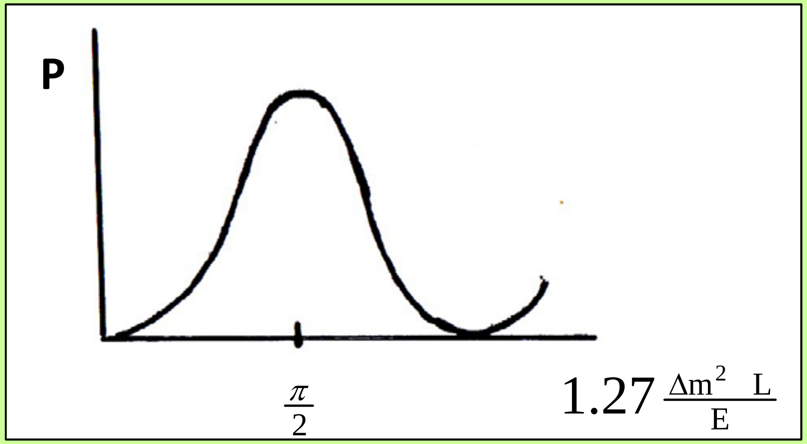
$$\boxed{P \propto \sin^2\left(1.27\frac{\Delta m^2 \ L}{E}\right)}$$

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

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

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

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

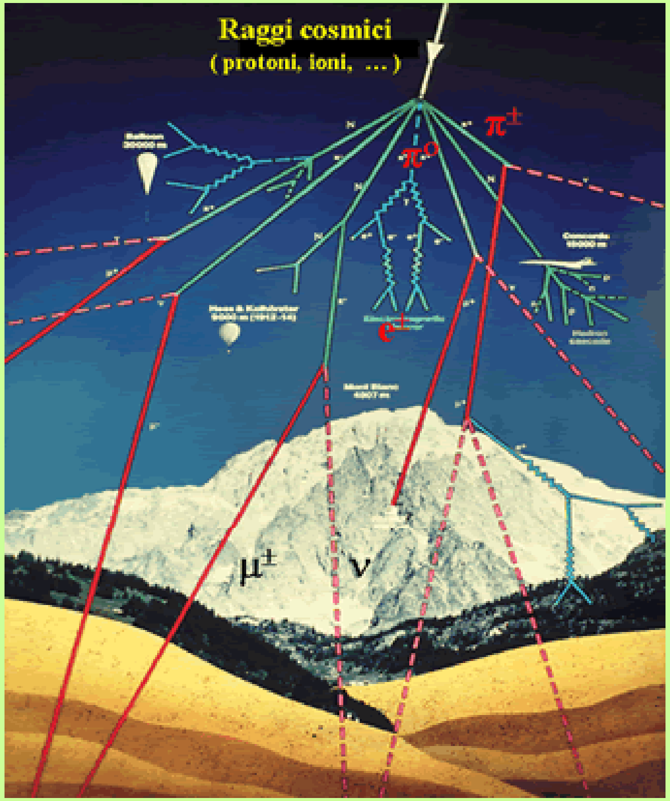


sensibilita' in $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$

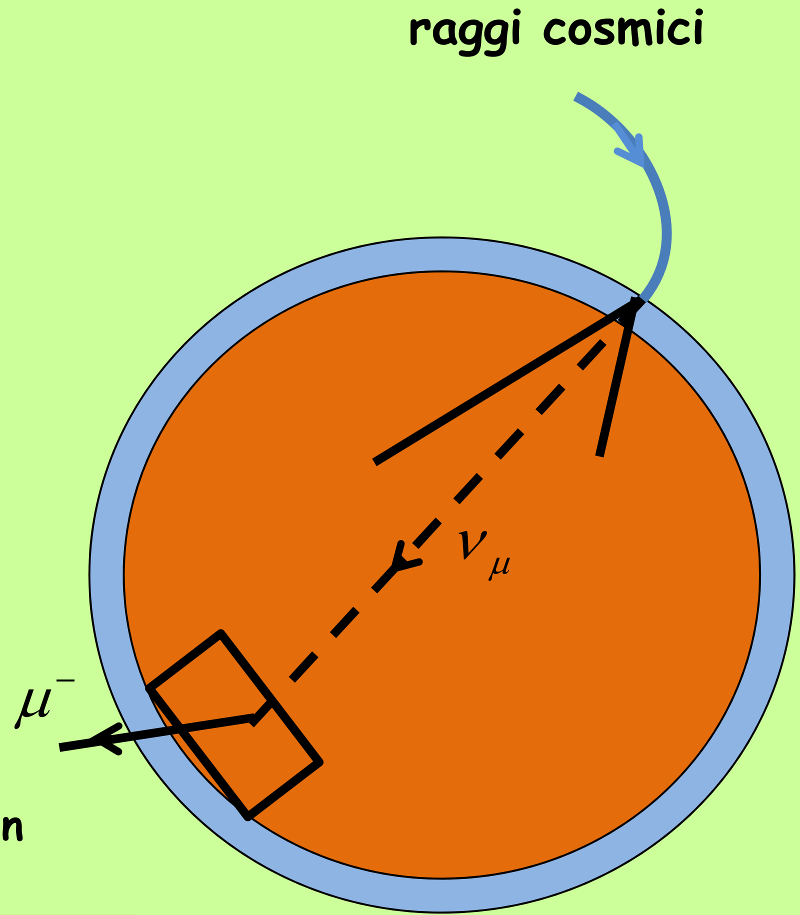
$$\Delta m^2 \approx \frac{E}{L}$$

neutrini solari $L \approx 10^8$ km, $E = 0.2 - 15$ MeV

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


Raggi cosmici
(protoni, ioni, ...)
$\pi^\pm$
π^0
$e^\pm$
$\mu^\pm$
ν

Neutrini atmosferici


raggi cosmici
ν_μ
μ^-

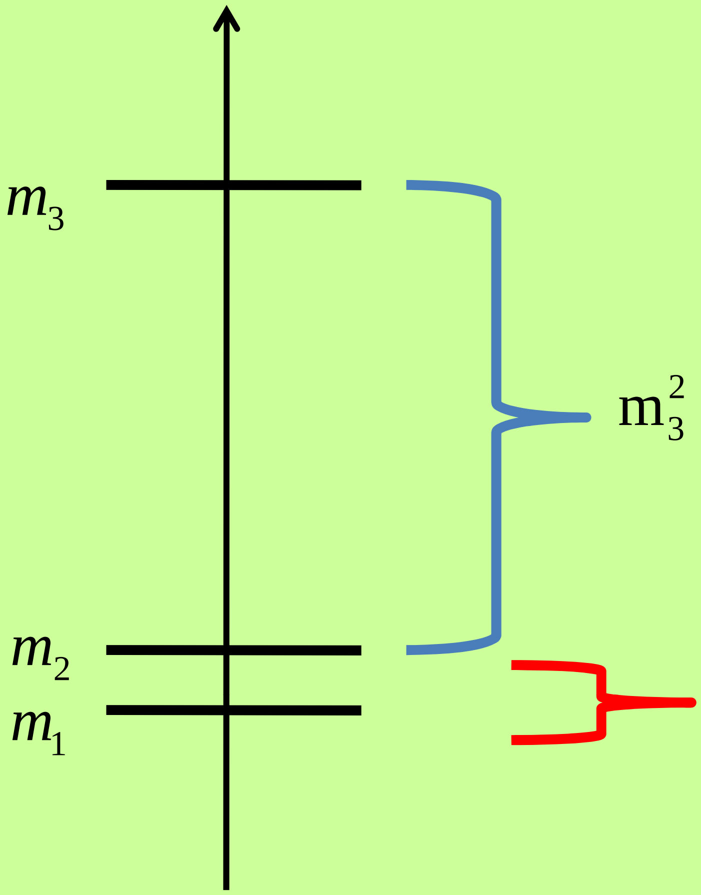
Neutrini atmosferici: generati da interazioni di raggi cosmici con i nuclei dell'atmosfera con energia di 100 MeV – 100 GeV

Super-Kamiokande (Giappone)
MACRO (GS)

atmosfera terrestre: spessore 20 km
diametro terrestre: 13.000 km

Masatoshi Koshiba
(Nobel 2002)

Riassumendo, masse di neutrini:



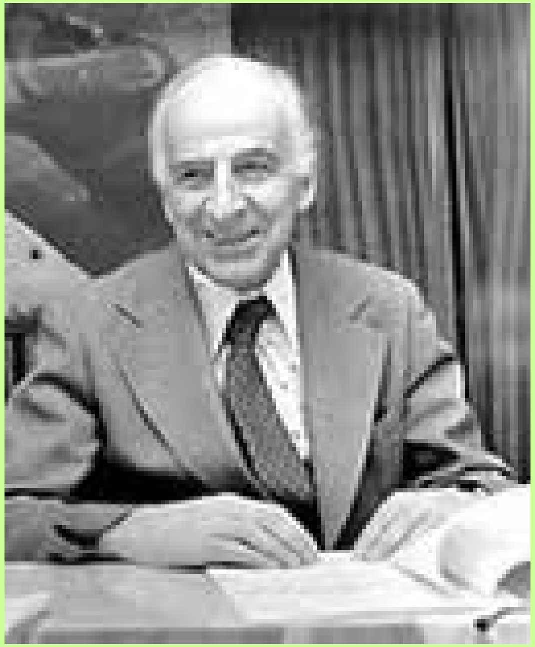
$m_3^2 - m_2^2 \approx 3 \text{ x } 10^{-3} \text{ eV}^2 / c^4$ **atmosferici**

$m_2^2 - m_1^2 \approx 7 \text{ x } 10^{-5} \text{ eV}^2 / c^4$ **solari**

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

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

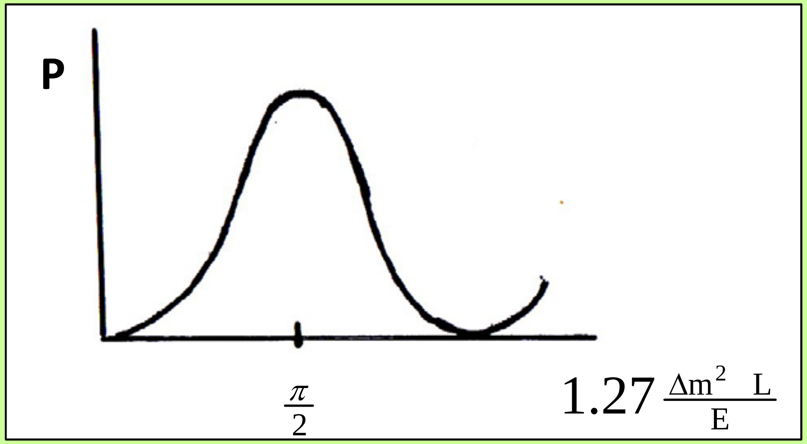
La prima comprensione intuitiva della oscillazioni del neutrino e' dovuta a Pontecorvo (1967)



Bruno Pontecorvo
(1913 – 1993)

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

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



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

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

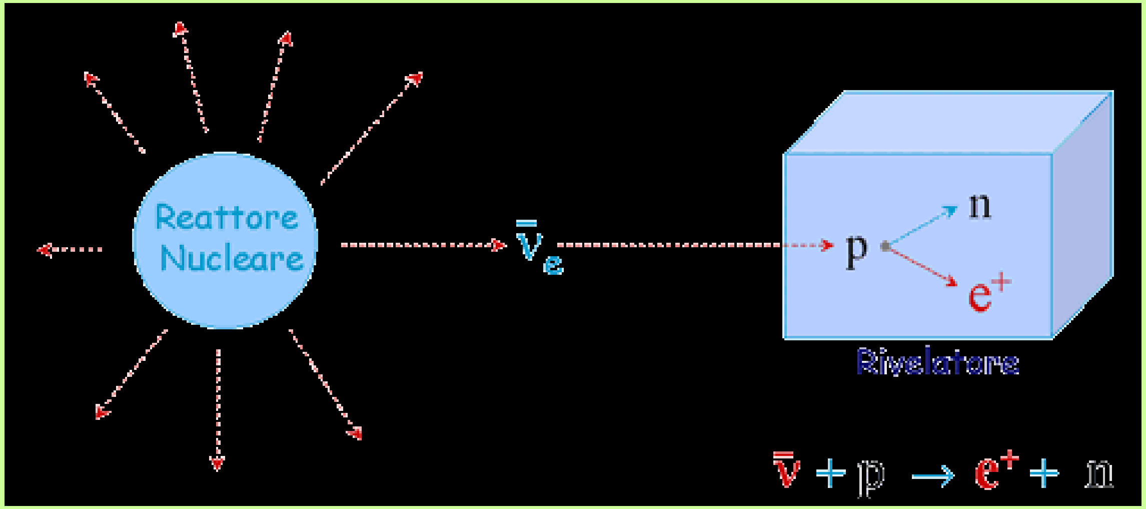
neutrini solari $L \approx 10^8$ km, $E = 0.2 - 15$ MeV

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

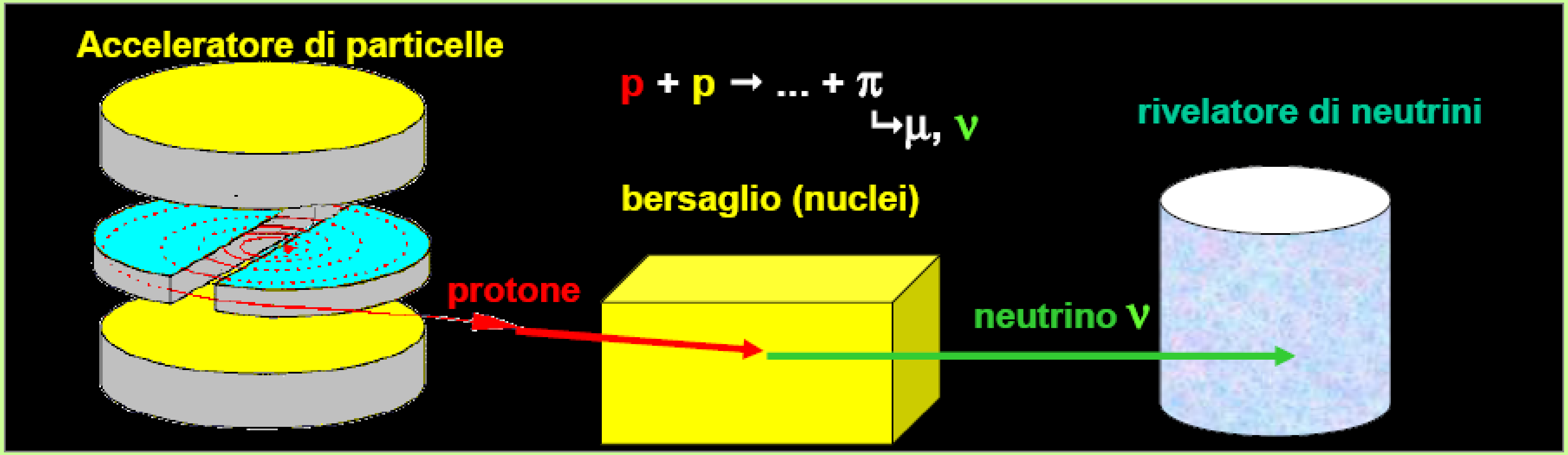
(Anti)-neutrini da reattori nucleari generati da fissioni nucleari di U^{235} , U^{238} , Pu^{239} , Pu^{241}


Reattore Nucleare
$\bar{\nu}_e$
p
n
e^+
Rivelatore
$\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$

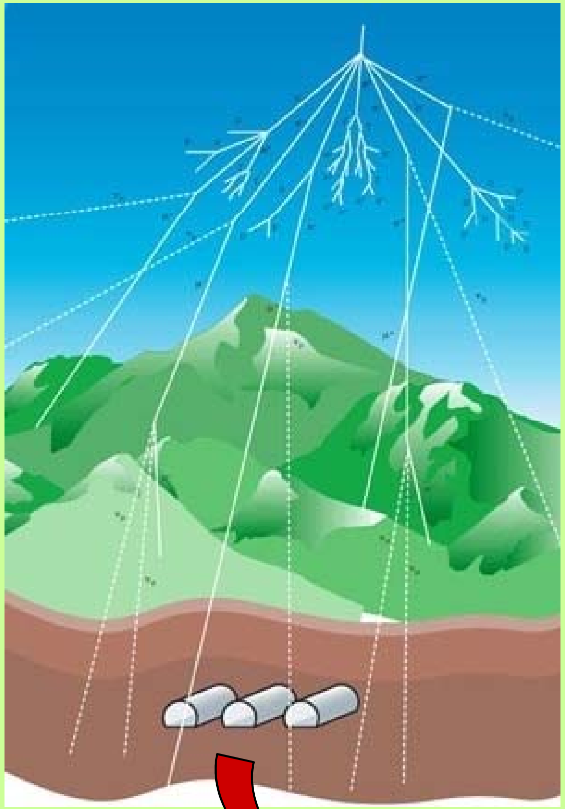
Energia degli antineutrini circa 1 MeV

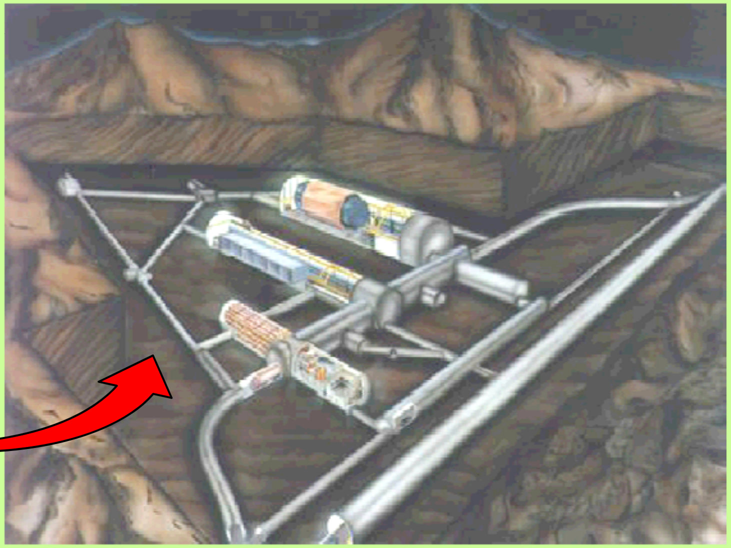
distanze variabili - negli esperimenti eseguiti o in corso L = 10 m, 1 km, 100 km

Neutrini da acceleratori

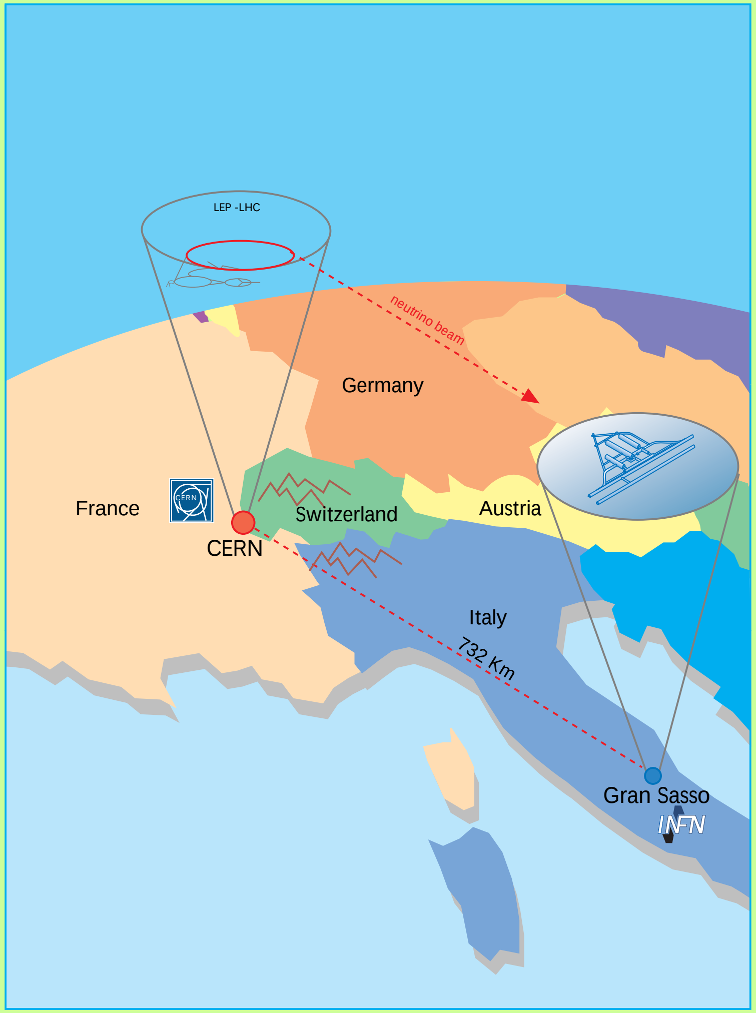

Acceleratore di particelle
$p + p \rightarrow \ldots + \pi$
$\hookrightarrow \mu, \nu$
rivelatore di neutrini
bersaglio (nuclei)
protone
neutrino ν

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



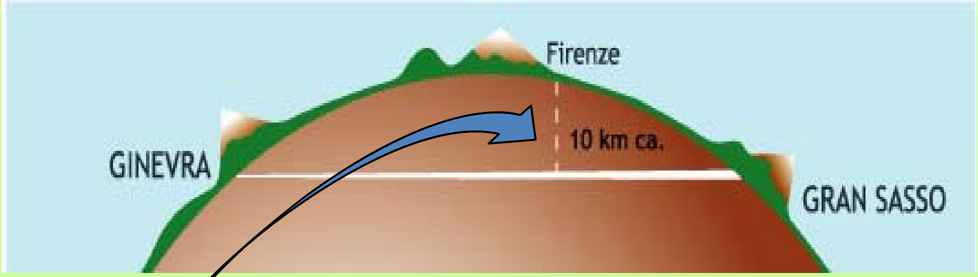


CNGS CERN to Gran Sasso Neutrino Project


LEP -LHC
neutrino beam
Germany
France
Switzerland
Austria
CERN
Italy
732 Km
Gran Sasso
INFN

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

Fascio di ν_μ prodotto al CERN e rivelato al LNGS dopo un viaggio di 731 km - tempo di percorrenza circa 2.4 millisecondi


Firenze
10 km ca.
GINEVRA
GRAN SASSO

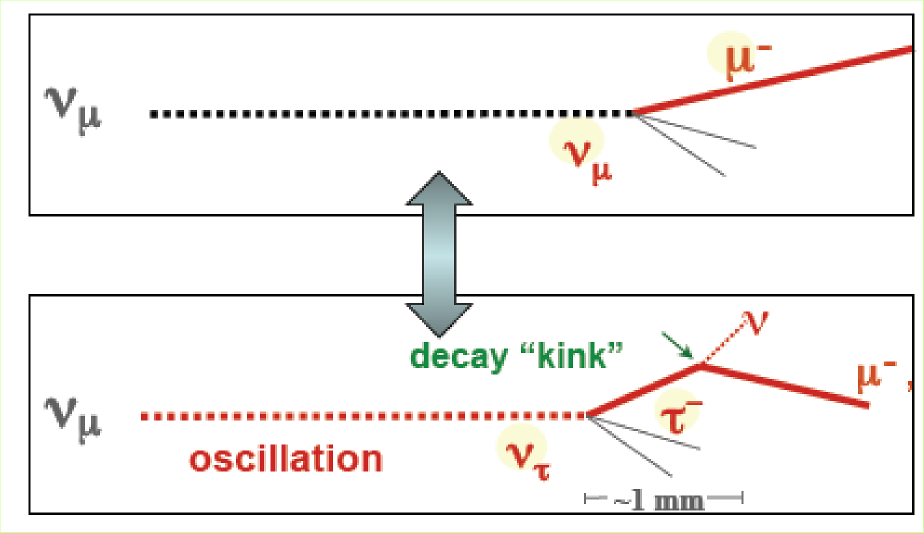
massima profondita' circa 10 km (raggio della terra circa 6400 km)

Esperimento OPERA al Gran Sasso

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

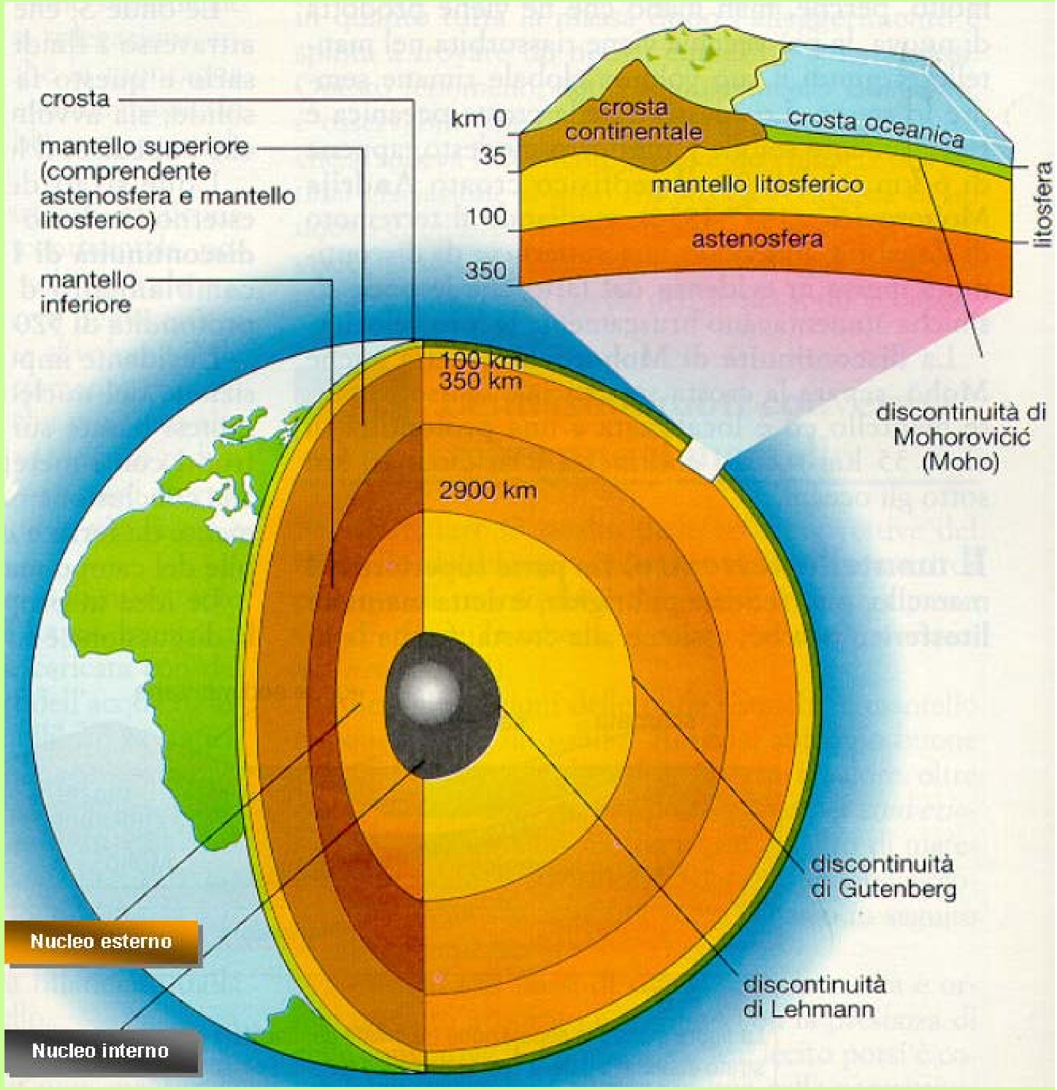
se avviene l'oscillazione:

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


ν_μ
μ^-
ν_μ
decay "kink"
ν
ν_μ
μ^-
τ^-
oscillation
ν_τ
~1 mm

Geoneutrini

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


crosta
mantello superiore (comprendente astenosfera e mantello litosferico)
mantello inferiore
km 0
35
100
350
crosta continentale
crosta oceanica
mantello litosferico
astenosfera
litosfera
100 km
350 km
2900 km
discontinuità di Mohorovičić (Moho)
discontinuità di Gutenberg
discontinuità di Lehmann
Nucleo esterno
Nucleo interno

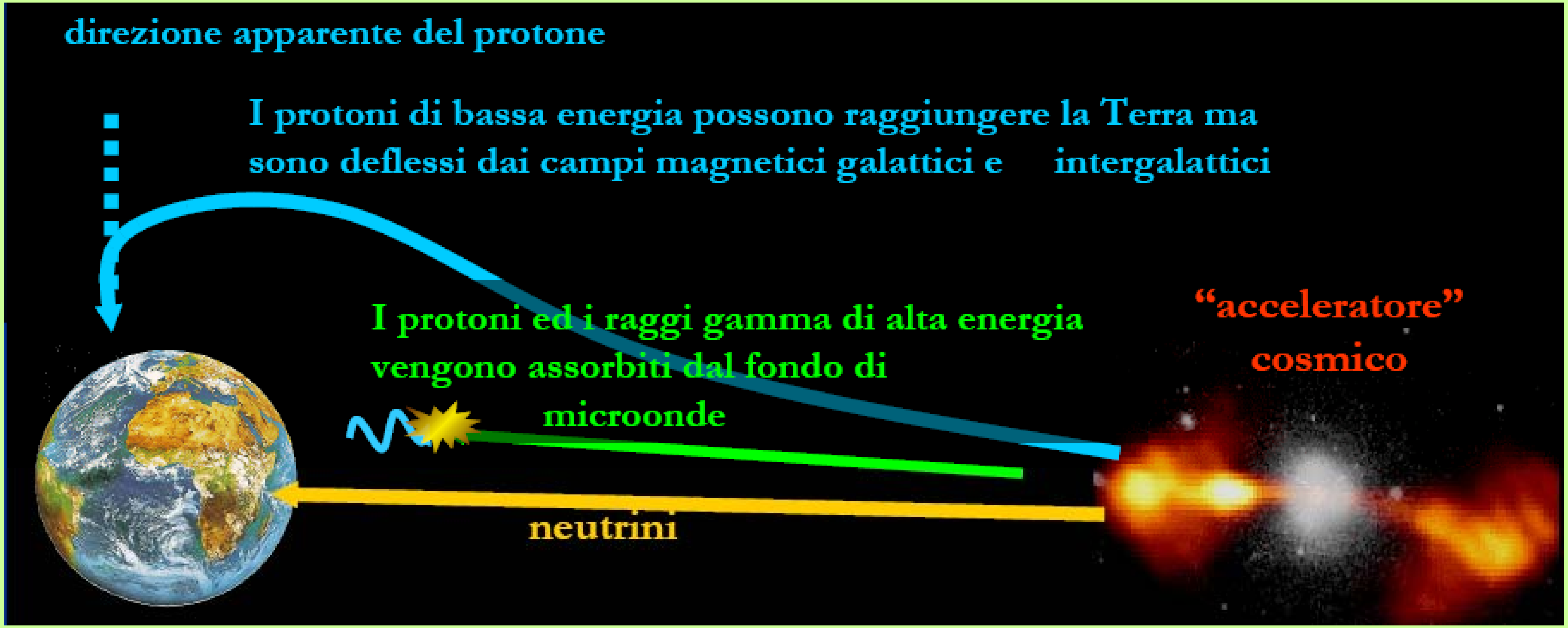
Questi decadimenti sono una delle maggiori fonti di calore generato dalla Terra

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



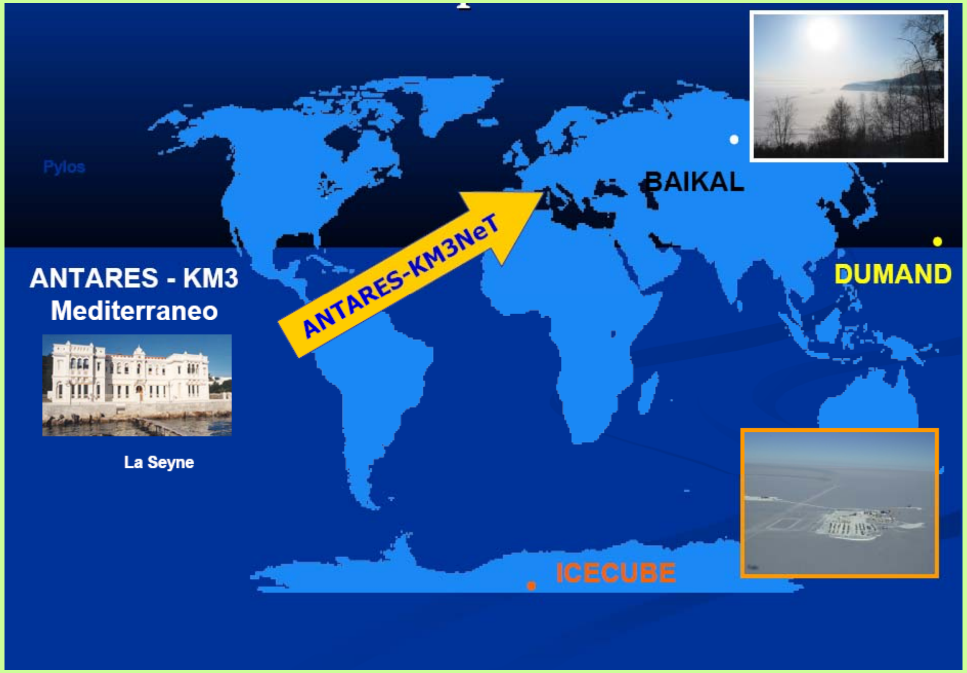
direzione apparente del protone

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

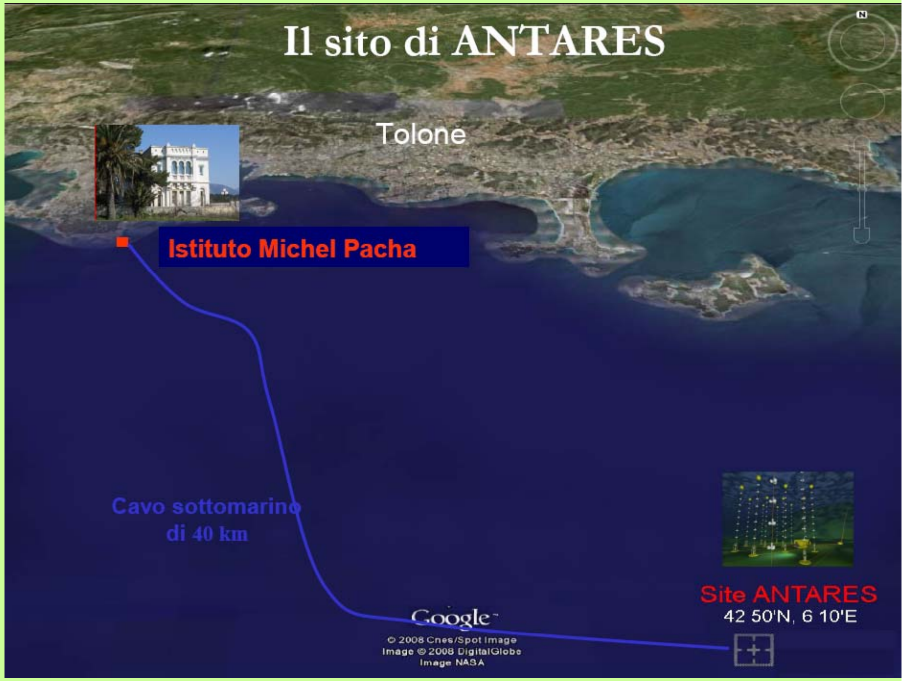
“acceleratore” cosmico

neutrini


Pylos
BAIKAL
ANTARES-KM3NeT
DUMAND
ICECUBE

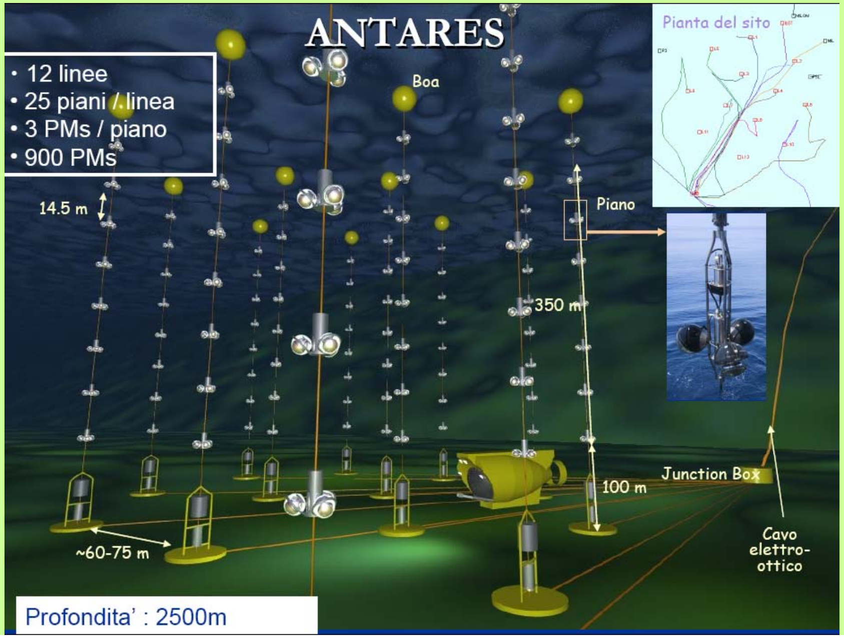
ANTARES - KM3
Mediterraneo

La Seyne



Il sito di ANTARES

Tolone
Istituto Michel Pacha
Cavo sottomarino
di 40 km
Google
© 2008 Cnes/Spot Image
Image © 2008 DigitalGlobe
Image NASA
Site ANTARES
42 50'N, 6 10'E

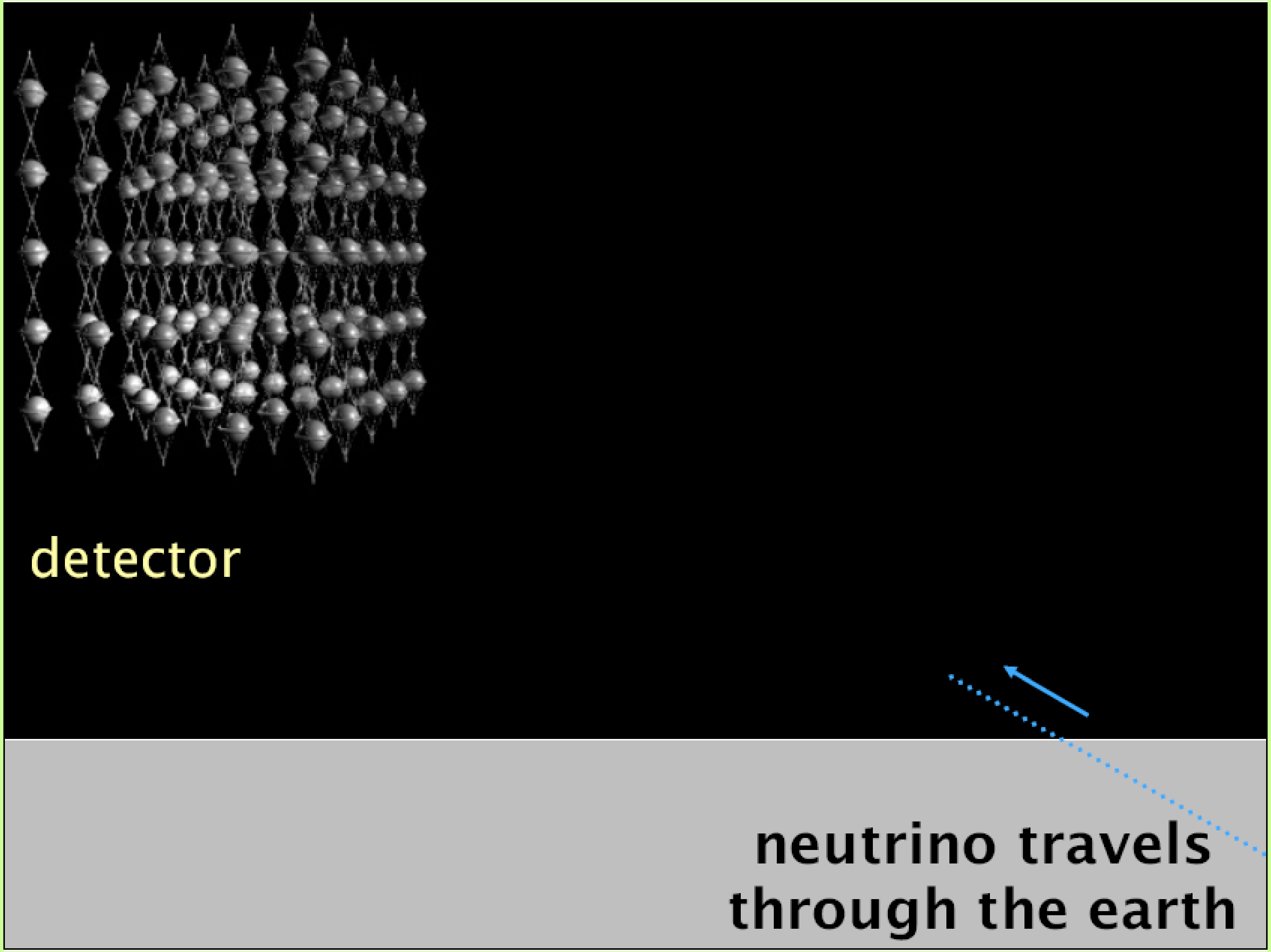


ANTARES

- 12 linee
- 25 piani / linea
- 3 PMs / piano
- 900 PMs

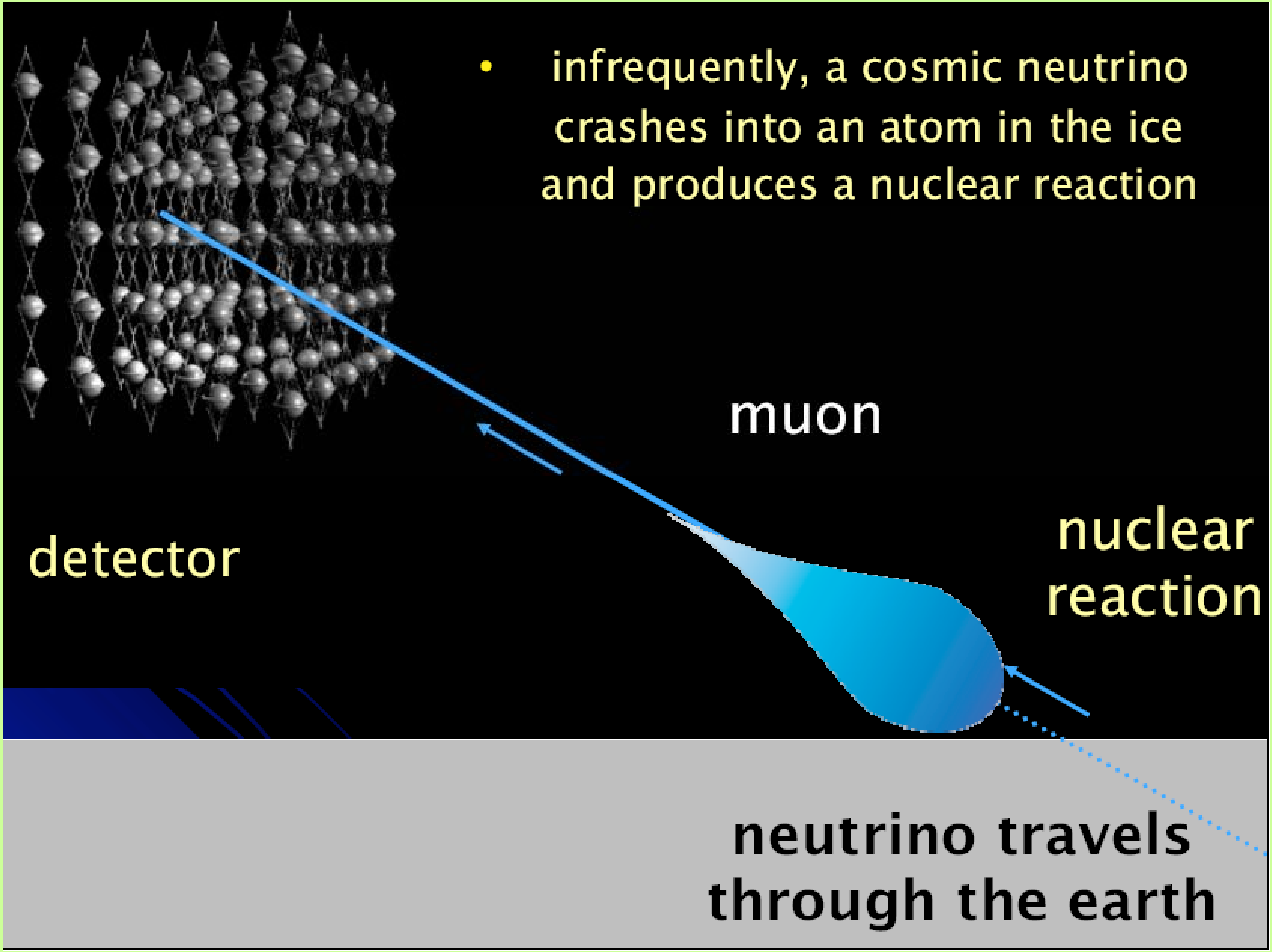
Boa
Pianta del sito
14.5 m
Piano
350 m
100 m
Junction Box
~60-75 m
Cavo
elettro-
ottico

Profondita' : 2500m



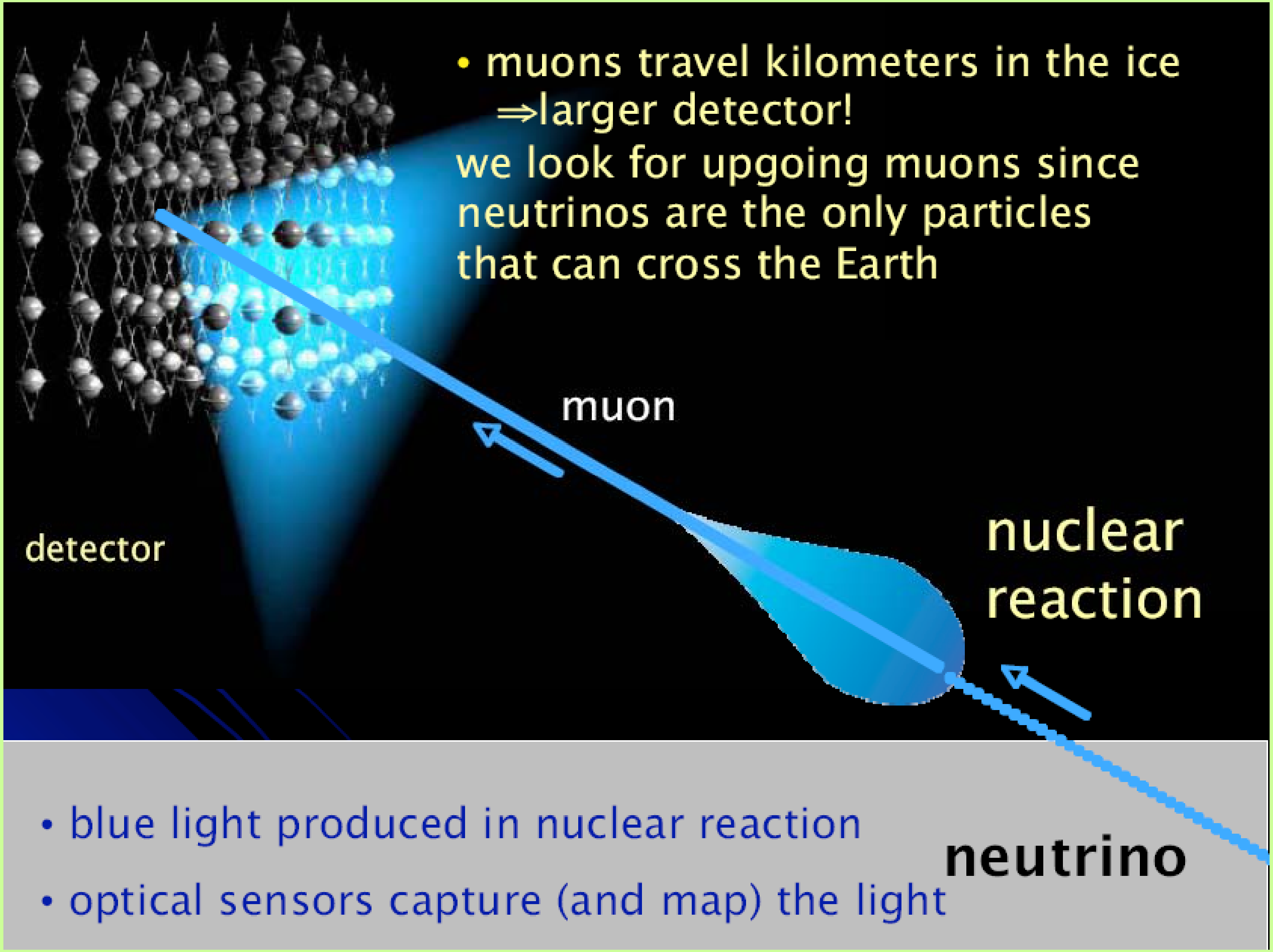
detector

neutrino travels
through the earth



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

muon
detector
nuclear reaction
neutrino travels through the earth



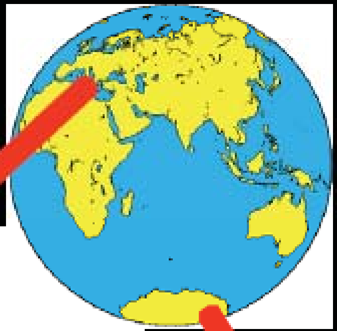
- muons travel kilometers in the ice ⇒larger detector!

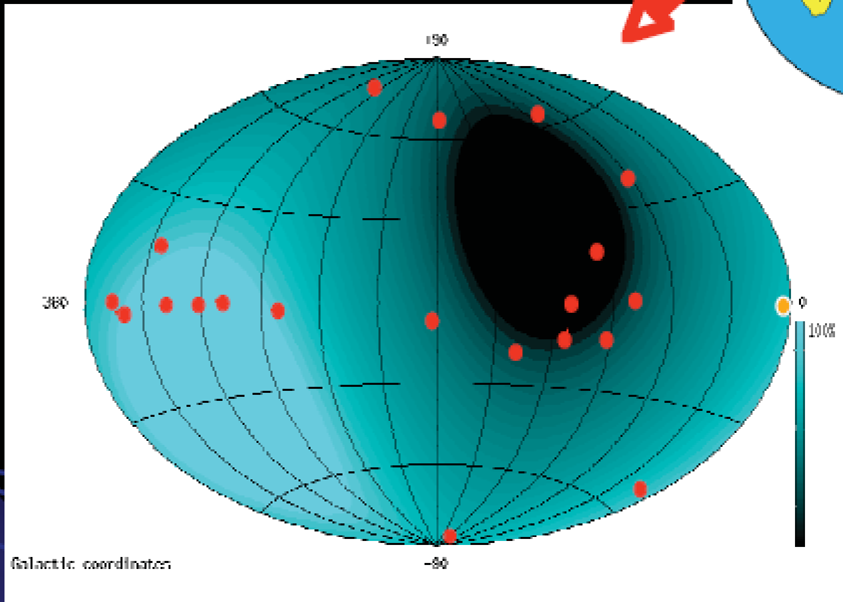
we look for upgoing muons since neutrinos are the only particles that can cross the Earth

muon
detector
nuclear reaction
neutrino

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

Why 2 large detectors in 2 hemispheres?




+90
360
0
100%
Galactic coordinates
-90

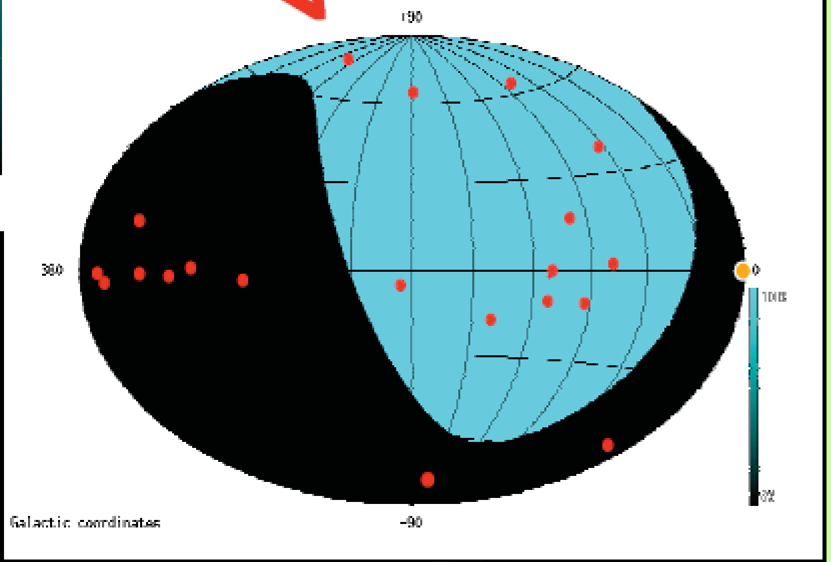
Mediterranean

France 43° North

2/3 of time: Galactic Centre

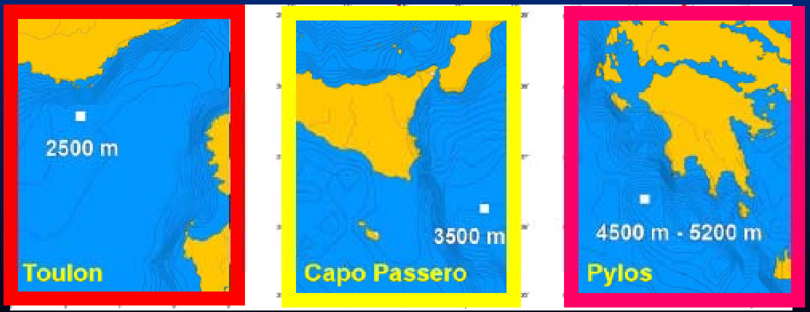
AMANDA, IceCube

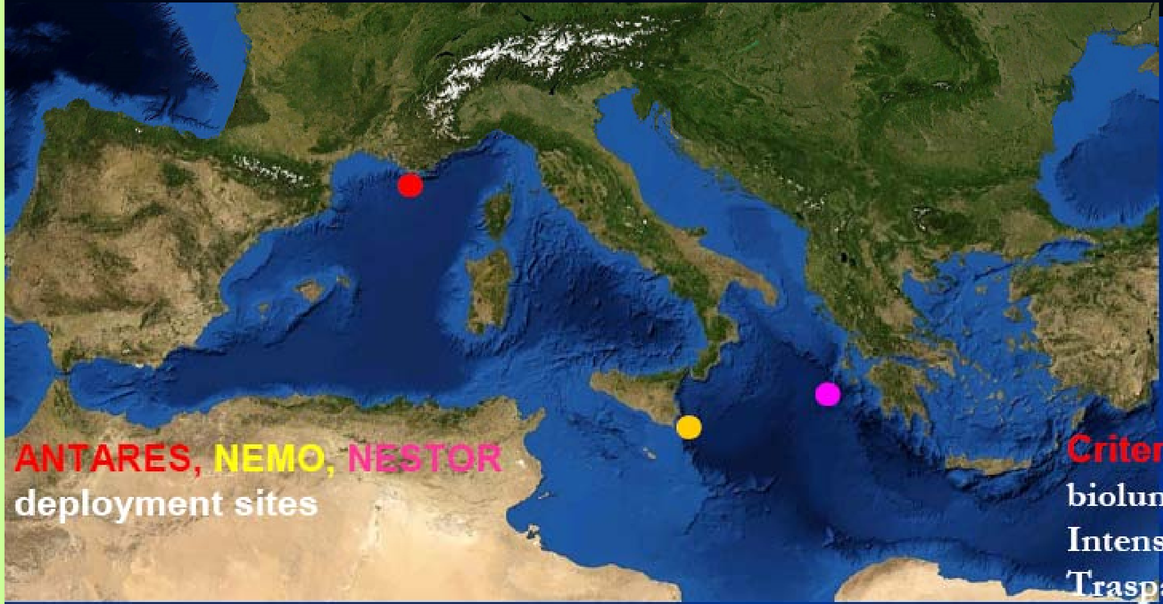
South Pole


+90
360
0
100%
0%
Galactic coordinates
-90

TeV γ sources

Siti possibili


2500 m
Toulon
3500 m
Capo Passero
4500 m - 5200 m
Pylos



ANTARES, NEMO, NESTOR
deployment sites

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

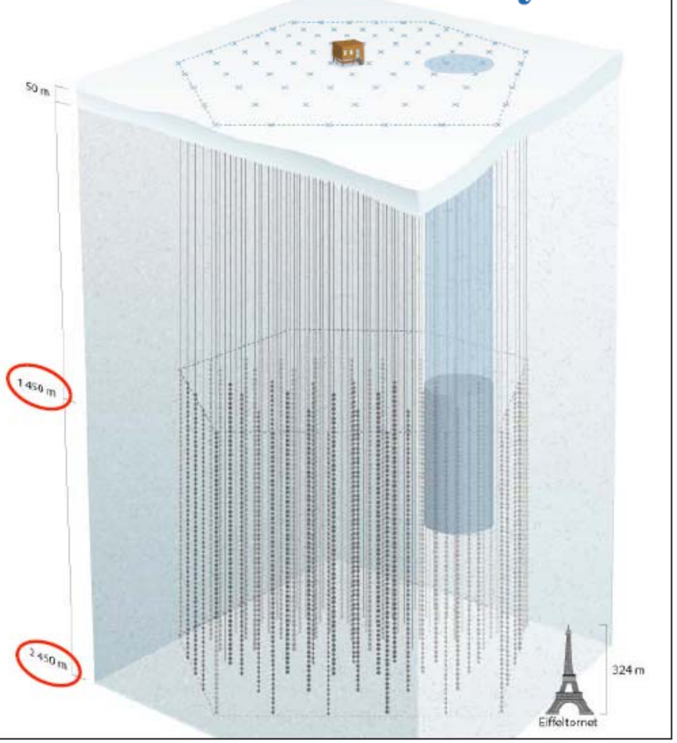
e Neutrino Observatory

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


50 m
1 450 m
2 450 m
324 m
Eiffeltornet

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 !