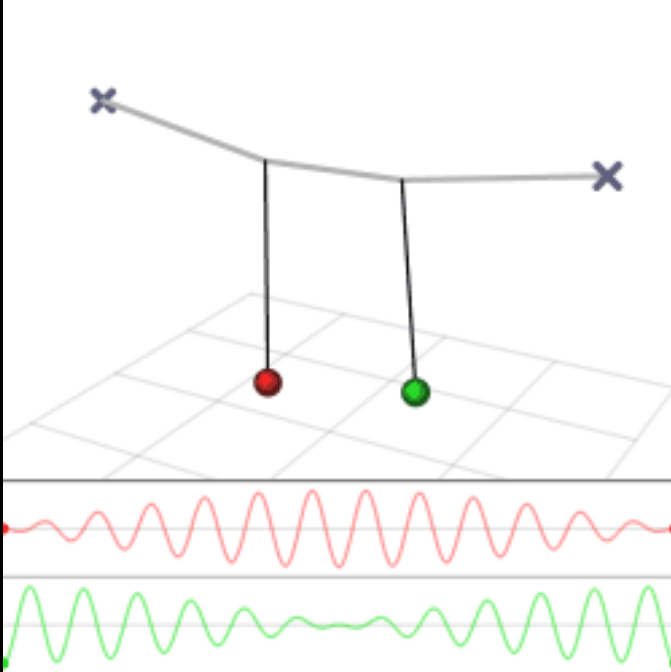


Pendoli Accoppiati



e

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Oscillazioni di Neutrini

Incontri di Orientamento PLS - Università Sapienza - 4 dicembre 2015
Lucio Ludovici/INFN

Cosa sono i neutrini ?

Particelle fondamentali costituenti la materia così come i quarks (che compongono neutroni e protoni) e gli elettroni.

Particelle fondamentali, elementari, gli “atoma” indivisibili di cui parla Democrito (400 a.C.)

I costituenti della materia

Democrito (400 a.C.)



"Opinione il dolce, opinione l'amaro, opinione il caldo, opinione il freddo, opinione il colore, in realtà soltanto gli atomi e il vuoto"

I costituenti fondamentali della materia



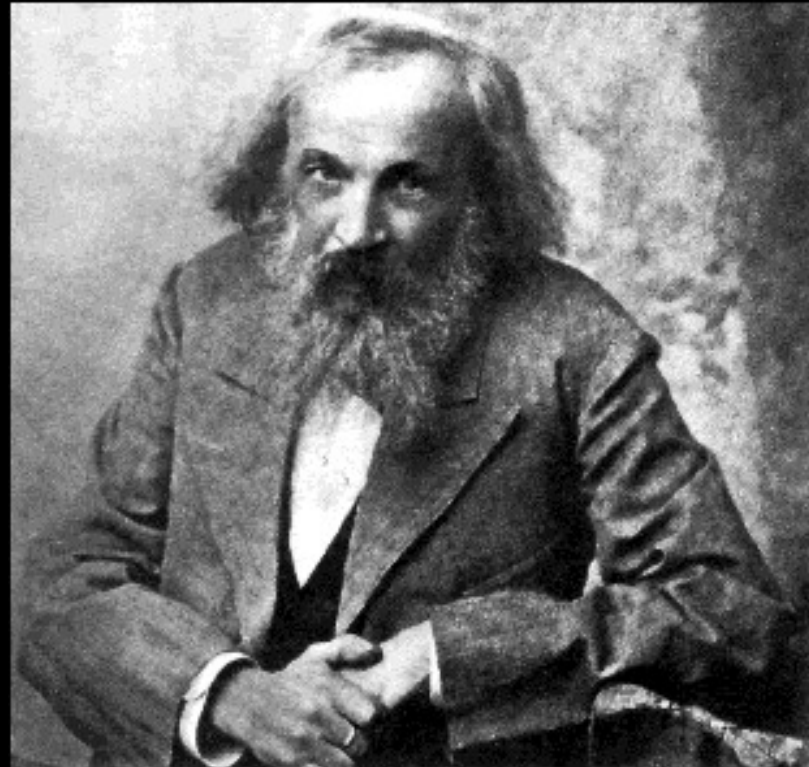
I costituenti fondamentali della materia



Modello dello Space Shuttle fatto con 65,000 pezzi di LEGO



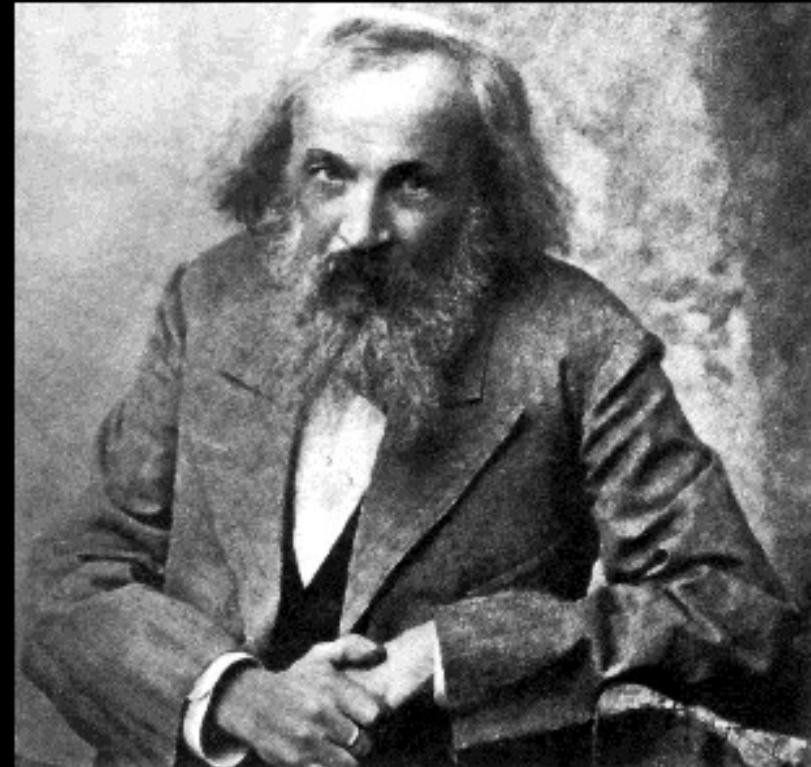
Gli atomi



Gli atomi

Tavola Periodica degli Elementi

1	Nuovo Originale																18	
1																	USA	
H	2																	He
Idrogeno 1.00794	SA																	Elio 4.002602
3	4																	Ne
Li	Be																	Neon 20.1797
Litio 6.941	Berillio 9.012182																	
11	12																	19
Na	Mg																	K
Sodio 22.989769	Magnesio 24.304																	Potassio 39.0983
21	22																	28
Sc	Ti																	Ni
Scandio 44.955912	Titanio 47.867																	Nichel 58.6934
39	40																	46
Rb	Sr																	Cd
Rubiidio 85.4678	Stronzio 87.62																	Cadmio 112.411
55	56																	82
Cs	Ba																	Pb
Cesio 132.90545196	Bario 137.327																	Piombo 207.2
87	88																	112
Fr	Ra																	Uub
Francio 223	Raffaello 226																	Ununbium 285
Le masse atomiche tra parentesi sono quelle degli isotopi più stabili o più comuni.																		
Stato Originale: 1 SA, 2 SA, 3 SA, 4 SA, 5 SA, 6 SA, 7 SA, 8 SA, 9 SA, 10 SA, 11 SA, 12 SA, 13 SA, 14 SA, 15 SA, 16 SA, 17 SA, 18 SA.																		
Legenda:																		
Metalli alcalini																		
Metalli alcalino-terrosi																		
Metalli del blocco d																		
Lantanidi																		
Atinidi																		
Metalli del blocco p																		
Nonmetalli																		
Gas nobili																		
Solidi																		
Liquidi																		
Gas																		
Artificiali																		
Nota: Nella tavola sono indicati i numeri 1-18 e lo stato solido. Nel 1984 dalla International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC) sono stati definiti i numeri 1-18 come gli equivalenti stabili di questi.																		



Gli atomi

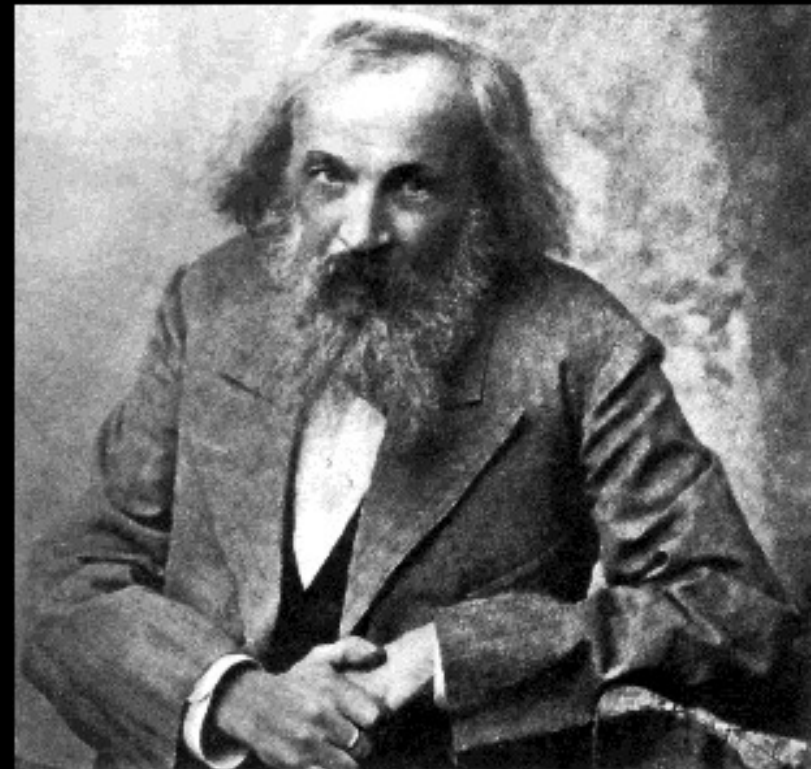
Gli elementi nella tavola periodica formano tutte le sostanze conosciute.

Le trasformazioni chimiche ordinarie non riescono a scomporli in sostanze più semplici.

Tavola Periodica degli Elementi

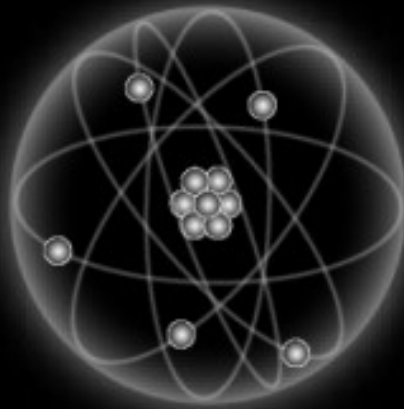
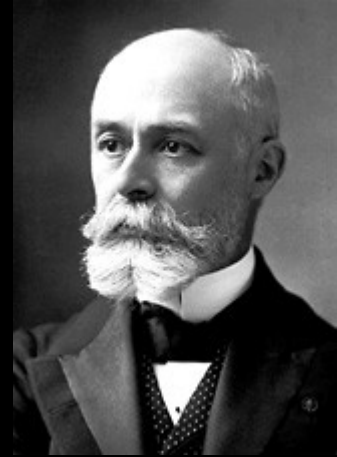
The periodic table is color-coded by groups: Alkali metals (orange), Alkaline earth metals (yellow), Transition metals (pink), Lanthanides (light orange), Actinides (light pink), Metalloids (light green), Nonmetals (green), and Noble gases (light blue). It also includes state indicators: Solids (C), Liquids (Br), Gases (H), and Artificial (Tc). The table shows elements from Hydrogen (1) to Oganesson (118), with Lanthanides and Actinides shown in separate rows at the bottom.

Le masse atomiche tra parentesi sono quelle degli isotopi più stabili o più comuni.

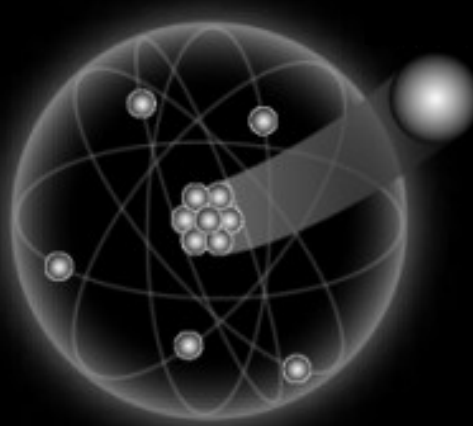
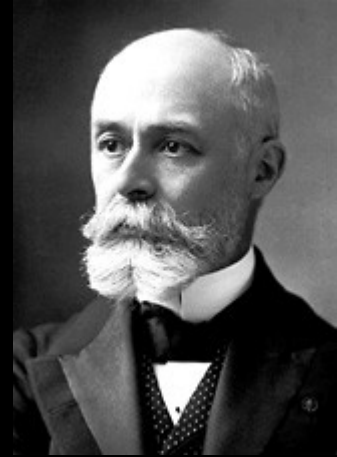


Indivisibili ?

La radioattività



La radioattività



La radioattività

$^{10}_{6}\text{C}$	Carbonio 10	19.4 secondi
$^{239}_{92}\text{U}$	Uranio 239	23.5 minuti
$^{292}_{86}\text{Rn}$	Radon 222	3.8 giorni
$^{14}_{6}\text{C}$	Carbonio 14	5730 anni
$^{40}_{19}\text{K}$	Potassio 40	1.2 miliardi di anni
$^{238}_{92}\text{U}$	Uranio 238	4.6 miliardi di anni
$^{128}_{52}\text{Te}$	Tellurio 128	$2.2 \cdot 10^{24}$ anni

La radioattività

$^{10}_{6}\text{C}$	Carbonio 10	19.4 secondi
$^{239}_{92}\text{U}$	Uranio 239	23.5 minuti
$^{292}_{86}\text{Rn}$	Radon 222	3.8 giorni
$^{14}_{6}\text{C}$	Carbonio 14	5730 anni
$^{40}_{19}\text{K}$	Potassio 40	1.2 miliardi di anni
$^{238}_{92}\text{U}$	Uranio 238	4.6 miliardi di anni
$^{128}_{52}\text{Te}$	Tellurio 128	$2.2 \cdot 10^{24}$ anni

Età della Terra: 4.5 miliardi di anni
Età dell'universo 14 miliardi di anni

Gli atomi

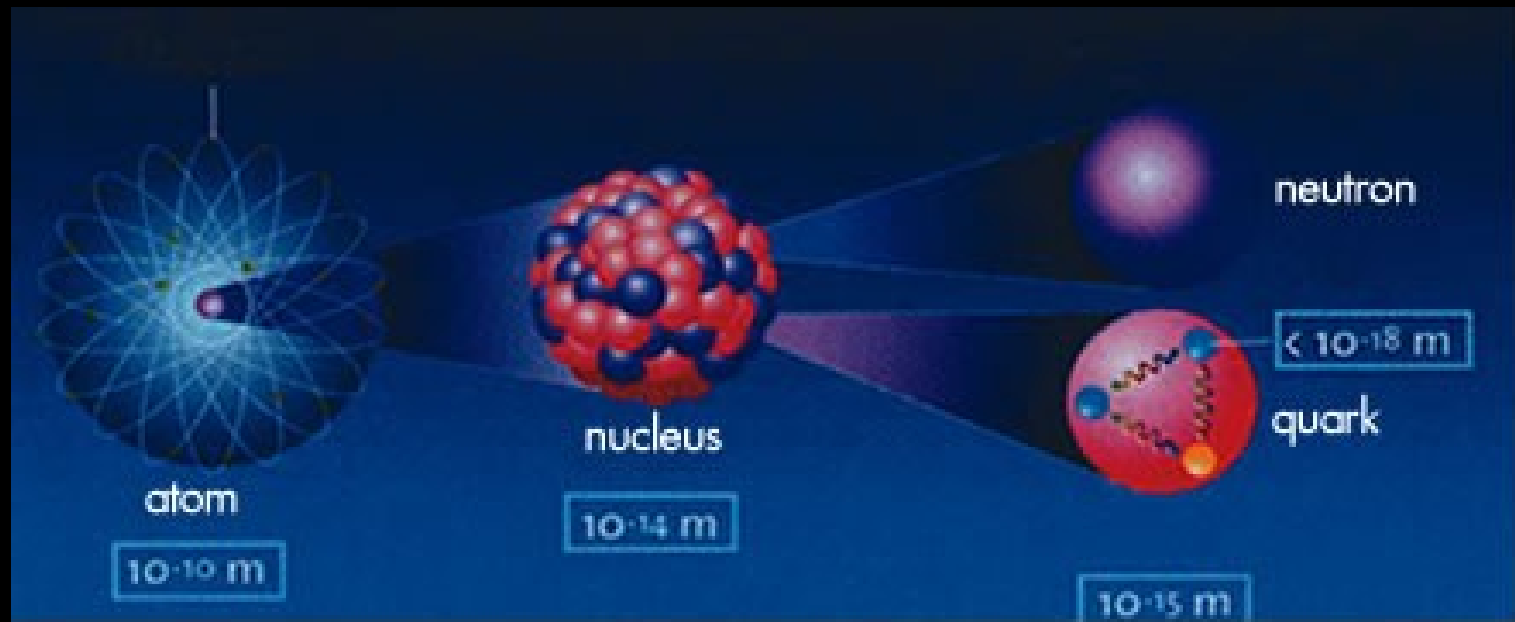
non sono "fondamentali"

ma sono costituiti

da altre particelle

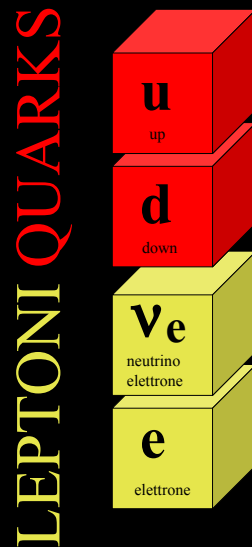
Le particelle fondamentali

Praticamente tutta la materia con cui ci troviamo a che fare nella vita di tutti i giorni, è costituita da “mattoncini lego” di una famiglia di particelle fondamentali: due quarks e l'elettrone



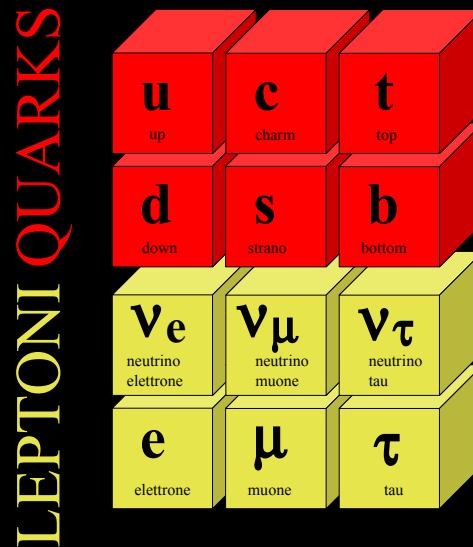
Le particelle fondamentali

Praticamente tutta la materia con cui ci troviamo a che fare nella vita di tutti i giorni, è costituita da “mattoncini lego” di una famiglia di particelle fondamentali: due quarks e l'elettrone

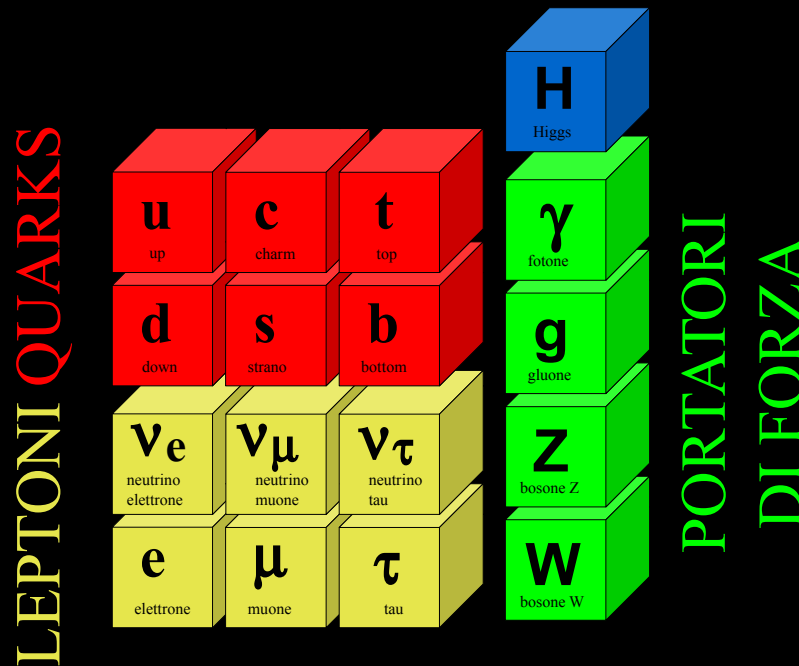


Le particelle fondamentali

Abbiamo scoperto altre due famiglie di “mattoncini” fondamentali che costituiscono particelle che decadono rapidamente, prodotte e osservate soprattutto nelle collisioni ai grandi acceleratori di particelle.

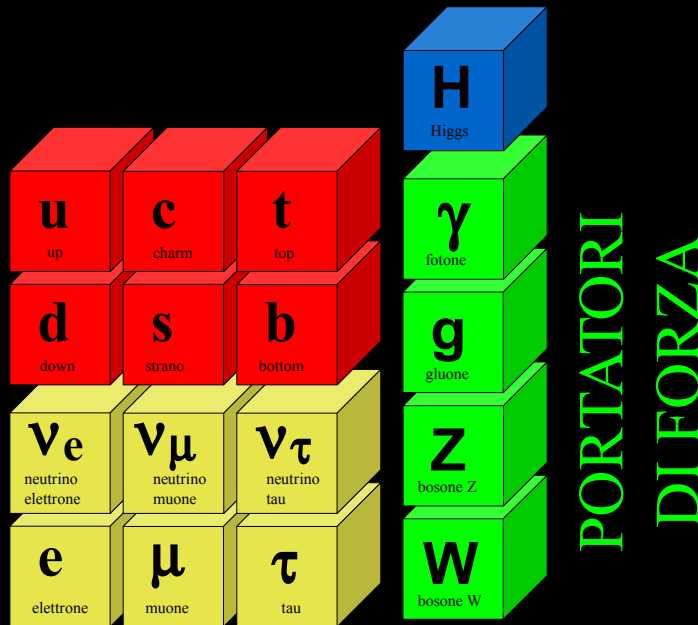


I mattoncini LEGO per costruire tutto l'universo conosciuto



Domande alle quali non sappiamo ancora rispondere

LEPTONI QUARKS



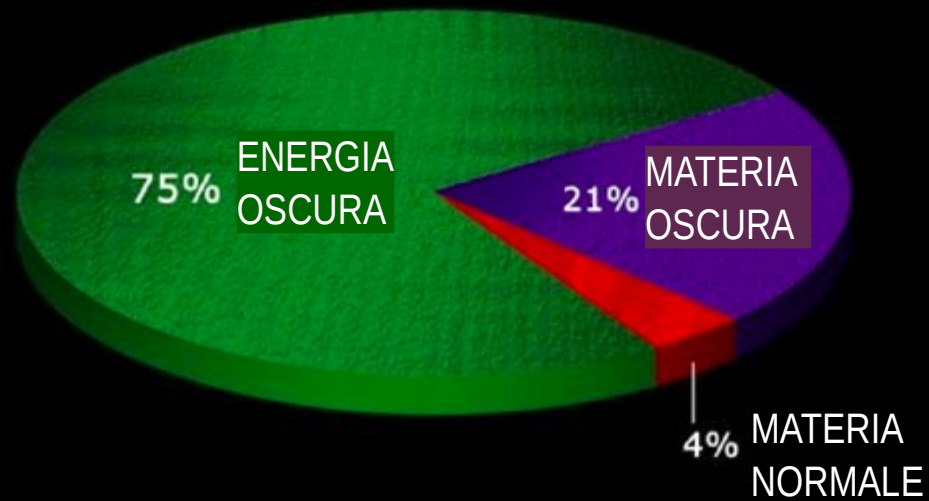
Perché tre famiglie ?

Perché le masse delle particelle fondamentali sono proprio quelle?

Dove è finita l'antimateria ?

C'è altra materia nell'universo ?

Molto rimane da capire



Mattoncini che
interagiscono tra di loro
scambiandosi
altri mattoncini



Le forze fondamentali

L'interazione elettromagnetica

L'interazione forte

L'interazione debole

L'interazione gravitazionale

Le forze fondamentali

L'interazione elettromagnetica

L'interazione forte

L'interazione debole

L'interazione gravitazionale



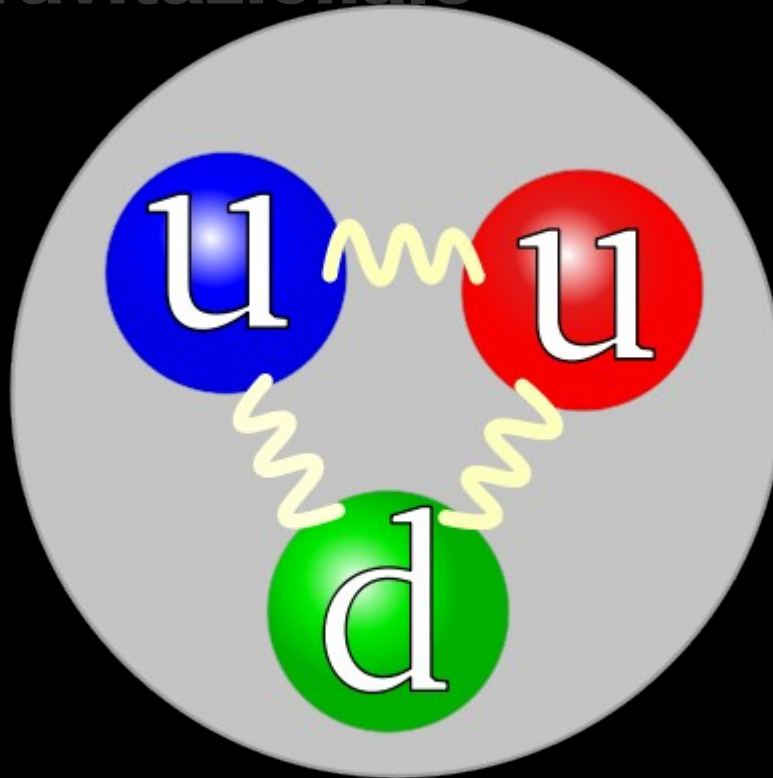
Le forze fondamentali

L'interazione elettromagnetica

L'interazione forte

L'interazione debole

L'interazione gravitazionale



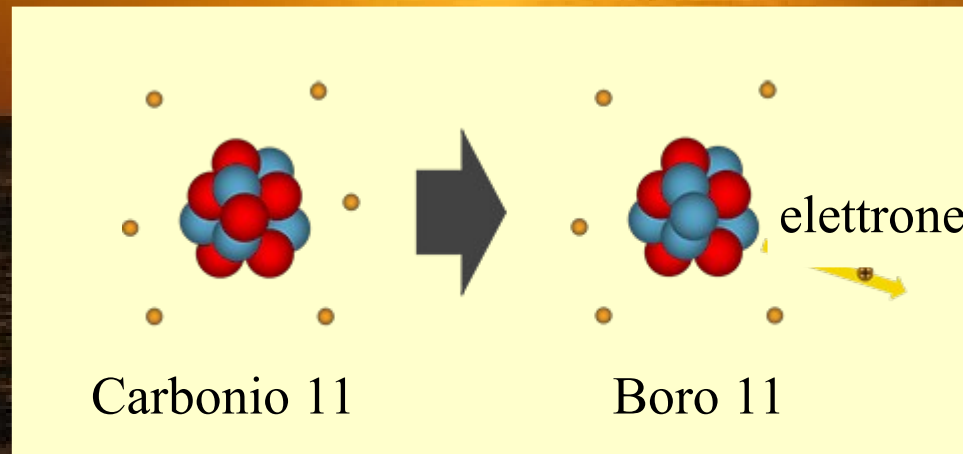
Le forze fondamentali

L'interazione elettromagnetica

L'interazione forte

L'interazione debole

L'interazione gravitazionale



Le forze fondamentali

L'interazione elettromagnetica

L'interazione forte

L'interazione debole

L'interazione gravitazionale

Quando guardiamo l'universo la gravità appare come la forza più importante ma solo perché su grande scala la materia è organizzata in modo da essere elettricamente neutra e le forze nucleari forte e debole hanno un raggio d'azione molto corto.

In realtà la gravità è la forza di gran lunga più debole. La repulsione elettrica tra due protoni è 10^{36} volte più grande della loro attrazione gravitazionale.

Cosa distingue i neutrini dalle altre particelle ?

Hanno carica elettrica nulla.

Hanno una massa molto piccola ma non nulla, come hanno mostrato gli esperimenti condotti negli ultimi anni.

Sono sensibili solo alla forza debole, contrariamente agli elettroni (sensibili alle forze debole ed elettromagnetica) e ai quarks (sensibili alle forze debole, elettromagnetica e forte).

Non costituiscono gli atomi come gli elettroni e i quarks ma intervengono ogni volta che un nucleo atomico si trasforma nei processi di decadimento, di fissione e di fusione.

Forza Debole ?

Il neutrino e la forza debole

I neutrini sentono solo la forza debole (oltre alla gravità)

Un neutrino dell'energia tipica dei neutrini emessi nei processi di fusione e fissione dei nuclei atomici, percorre in acqua, in media, 10^{20} cm

$$10^{20} \text{ cm}$$

circa 100 anni luce !

Il neutrino e la forza debole

I neutrini sentono solo la forza debole (oltre alla gravità)

Un neutrino dell'energia tipica dei neutrini emessi nei processi di fusione e fissione dei nuclei atomici, percorre in acqua, in media, 10^{20} cm

La loro probabilità di interazione aumenta con l'energia

Per poterli rivelare (cioè misurare gli effetti delle loro interazioni) servono quindi flussi di neutrini intensi e rivelatori di grandi dimensioni

A chi sono venuti in mente ?

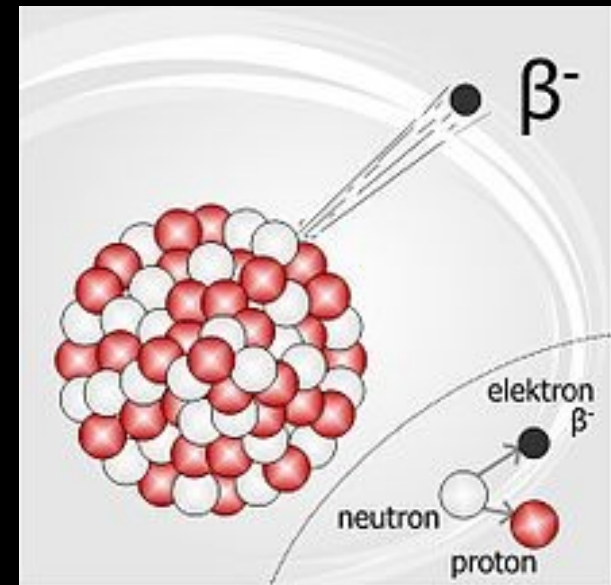
Nel 1930 **Wolfgang Pauli** ipotizzò l'esistenza di una particella neutra, di massa molto piccola o nulla



A chi sono venuti in mente ?

Nel 1930 **Wolfgang Pauli** ipotizzò l'esistenza di una particella neutra, di massa molto piccola o nulla, emessa insieme ad un elettrone in alcuni decadimenti nucleari (i decadimenti beta).

Il nucleo di un atomo si trasforma spontaneamente in un nucleo diverso emettendo un elettrone (chiamati un tempo raggi beta):



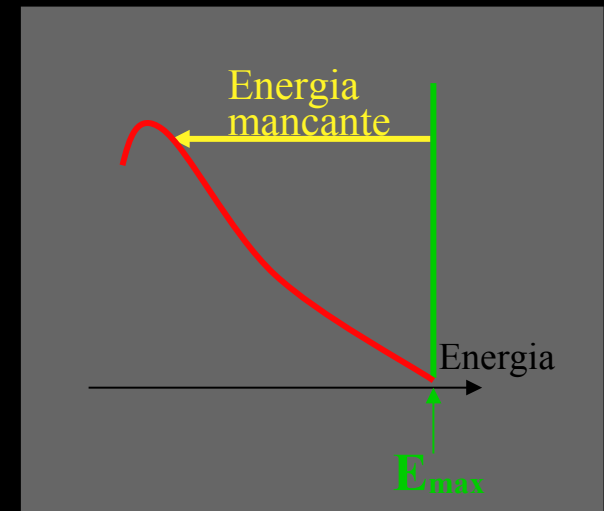
A chi sono venuti in mente ?

Nel 1930 **Wolfgang Pauli** ipotizzò l'esistenza di una particella neutra, di massa molto piccola o nulla, emessa insieme ad un elettrone in alcuni decadimenti nucleari (i decadimenti beta).



L'elettrone prodotto dovrebbe avere in ogni decadimento la stessa energia.

Ma non è così.



A chi sono venuti in mente ?

Nel 1930 **Wolfgang Pauli** ipotizzò l'esistenza di una particella neutra, di massa molto piccola o nulla, emessa insieme ad un elettrone in alcuni decadimenti nucleari (i decadimenti beta).

... La massa del neutrone dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza della massa dell'elettrone e in ogni caso non più grande di 0.01 volte la massa del protone. ...

Sfortunatamente non posso apparire a Tubinga personalmente perchè sono indispensabile qui a Zurigo a causa di un ballo nella notte del 6/7 dicembre. ...

Original. Photocopy of Pauli's letter
Abschrift/15.12.56 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gesellschafts-Tagung zu Tübingen.

Abschrift
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich kuldvollst
anzuhören bitte, Ihnen das Nähere auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der α - und β -Kerne, sowie
des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg
verfallen: um den "Wechselstich" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche
 β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
 β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Lettera di W. Pauli "Liebe Radioaktive Damen und Herren"
4 dicembre 1930

Ho fatto qualcosa di terribile.
Ho predetto una particella inosservabile
(W.Pauli)

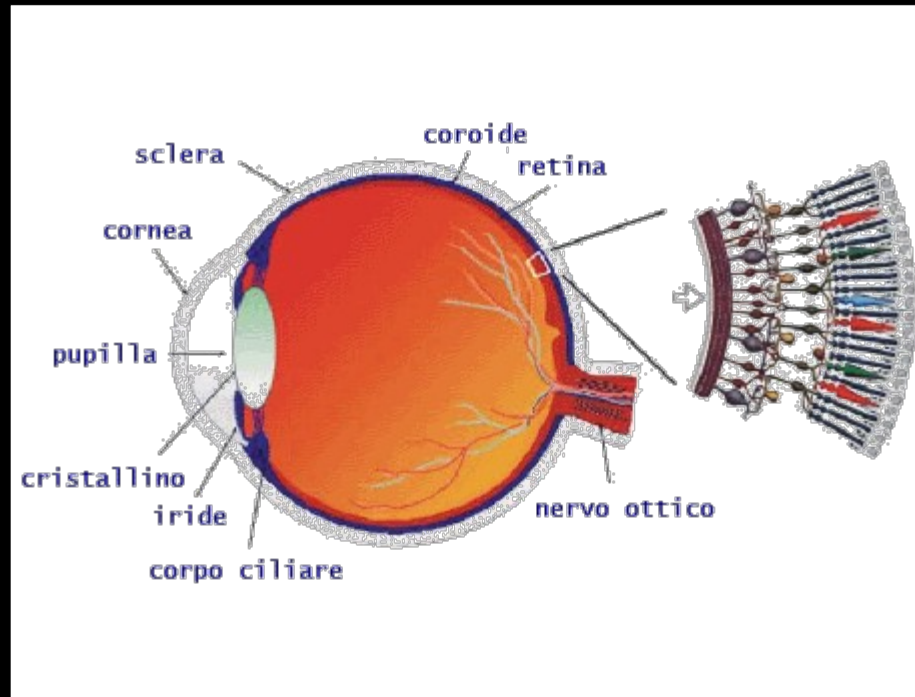


“Osservare” le particelle



Occhio umano

“Osservare” le particelle



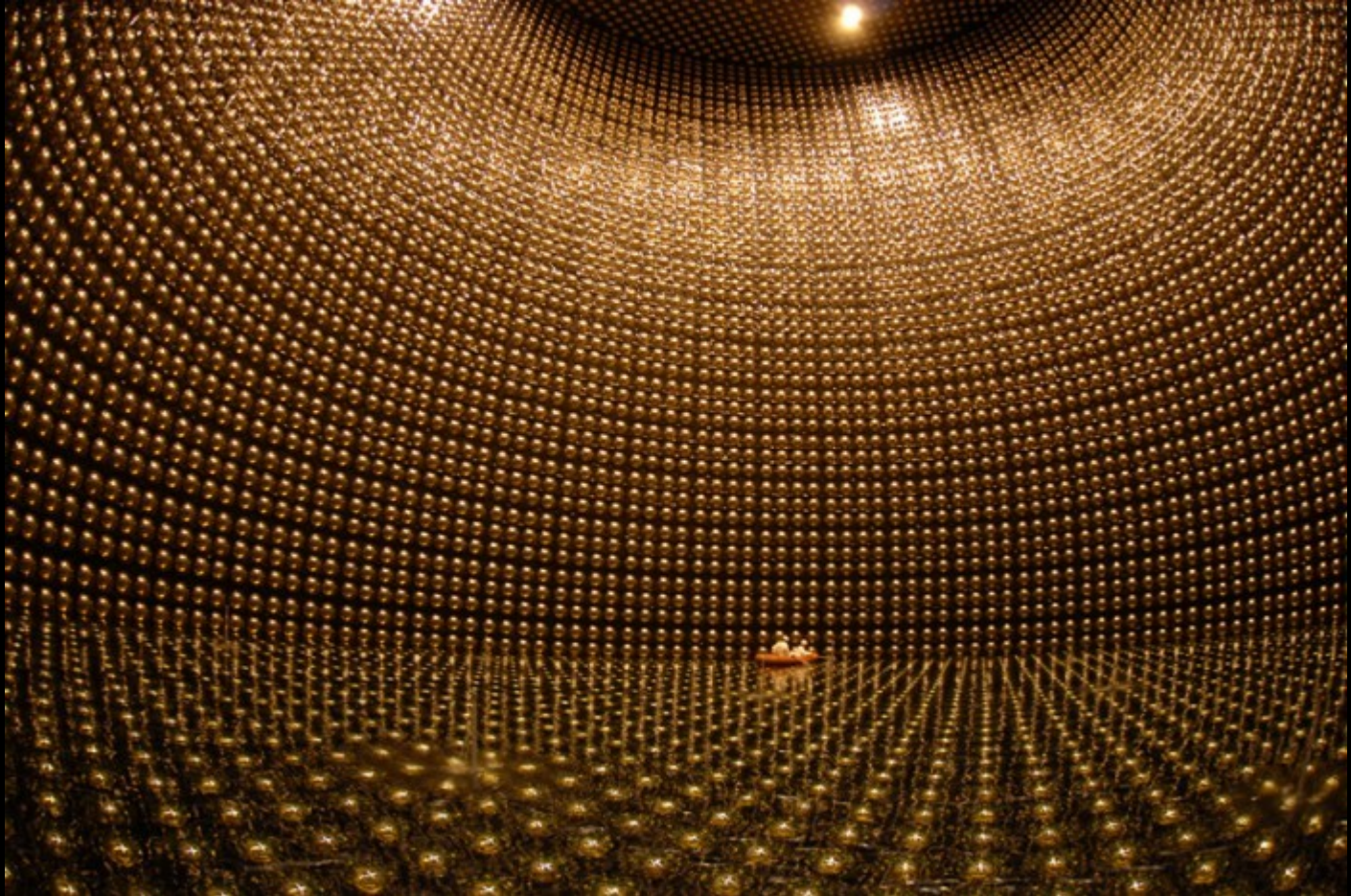
Occhio umano

“Osservare” le particelle



Fotomoltiplicatore

“Osservare” le particelle



Esperimento Super-Kamiokande

“Osservare” le particelle



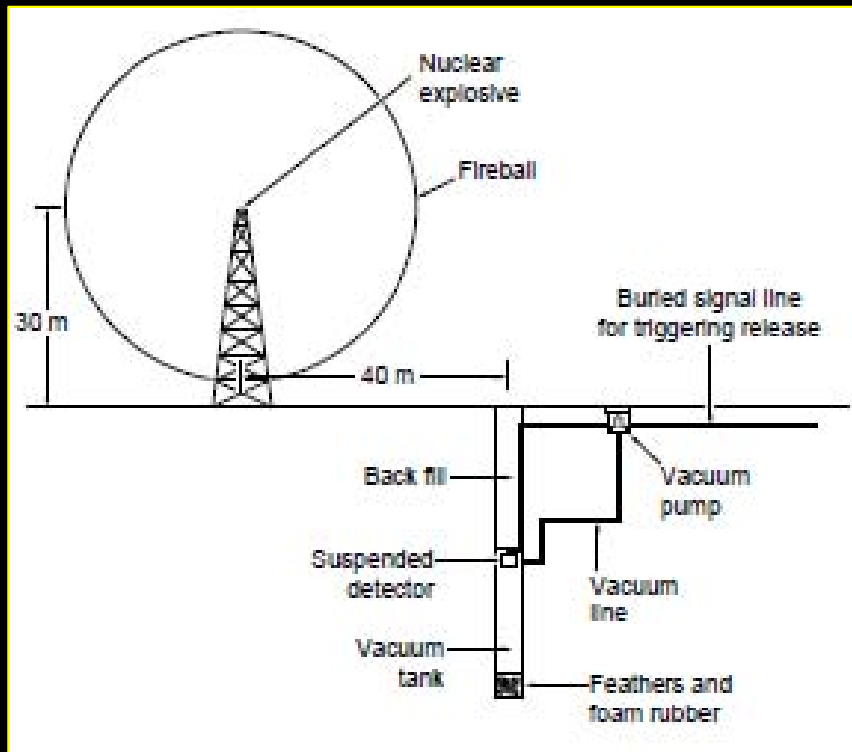
Satellite FERMI

Ci vollero più di trent'anni perché
il neutrino fosse sperimentalmente
osservato



Come vedere i neutrini ?

Negli anni '50, Reines e Cowan cominciano a pensare a un esperimento per osservare il neutrino elettrone.



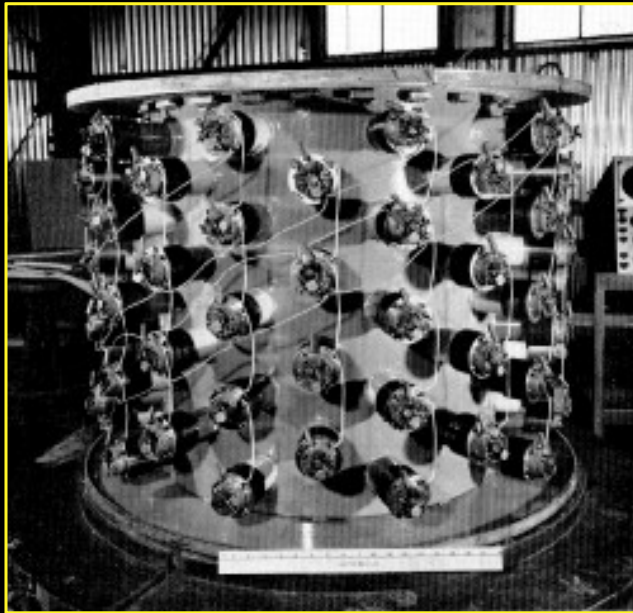
La prima idea:

Si faccia una torre, ci si metta in cima una bomba atomica, si scavi un pozzo ...

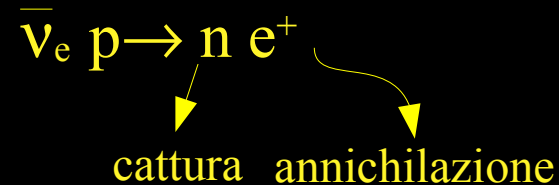
... non realizzata.

Si vedono !

Nel 1953-56 Reines e Cowan osservano il neutrino elettrone.



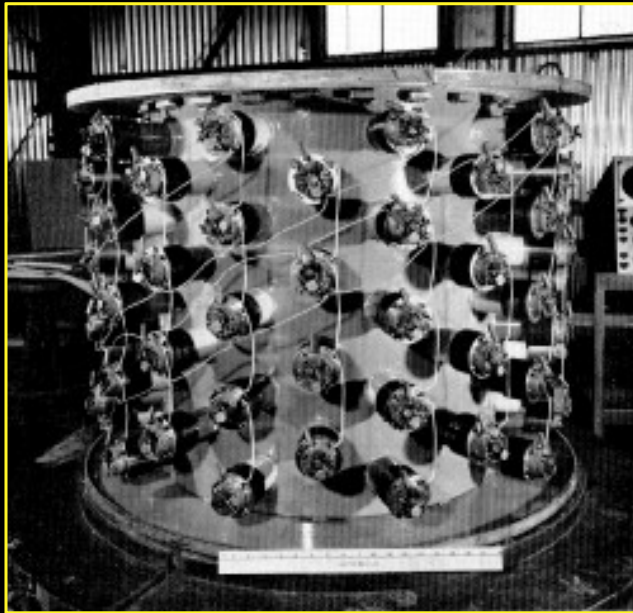
Rivelatore di 400 Kg a dieci metri dal nocciolo di un reattore nucleare che rivela le **coincidenze** tra il segnale prodotto dal neutrone e quello prodotto dall'elettrone nella reazione:



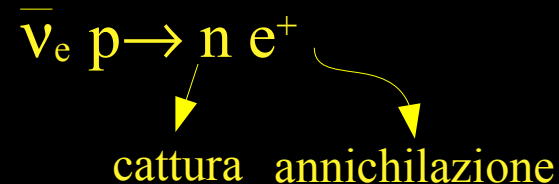
Ogni ora ci si aspettano circa **3 eventi di segnale** (cioè dovuti a veri neutrini prodotti dal reattore) e **1 evento di fondo** (coincidenze accidentali, dovute a fenomeni diversi da quello cercato)

Si vedono !

Nel 1953-56 Reines e Cowan osservano il neutrino elettrone.



Rivelatore di 400 Kg a dieci metri dal nocciolo di un reattore nucleare che rivela le coincidenze tra il segnale prodotto dal neutrone e quello prodotto dall'elettrone nella reazione:



Altri esperimenti negli anni successivi hanno mostrato che anche gli altri due sapori di neutrino esistono e sono distinti tra loro.

Il neutrino è sempre rivelato
in uno stato di sapore definito:

neutrino elettrone

neutrino muone

neutrino tau

Da dove vengono i neutrini ?

Decadimenti nucleari (reazioni di fissione). Radioattività naturale terrestre: 20,000 GW, 6 milioni di neutrini/cm²/s. Un tipico reattore nucleare da 1GW produce $5 \cdot 10^{20}$ neutrini/s.

Fusione termonucleare: dal sole ci arrivano $4 \cdot 10^{10}$ neutrini/cm²/s

Supernovae: osservati nel 1987 per la prima volta.

Acceleratori di particelle: alcune particelle cariche sono instabili e decadono in neutrini.

Reazioni prodotte dai raggi cosmici negli strati alti dell'atmosfera.

Neutrini “fossili”: l'universo attuale è permeato da circa 300 neutrini per cm³ prodotti nel Big-Bang.

(Il nostro corpo contiene circa 20 mg di Potassio 40, un elemento radioattivo, che emettono 340 milioni di neutrini al giorno).

Il neutrino è sempre creato
in uno stato di sapore definito:

neutrino elettrone

neutrino muone

neutrino tau

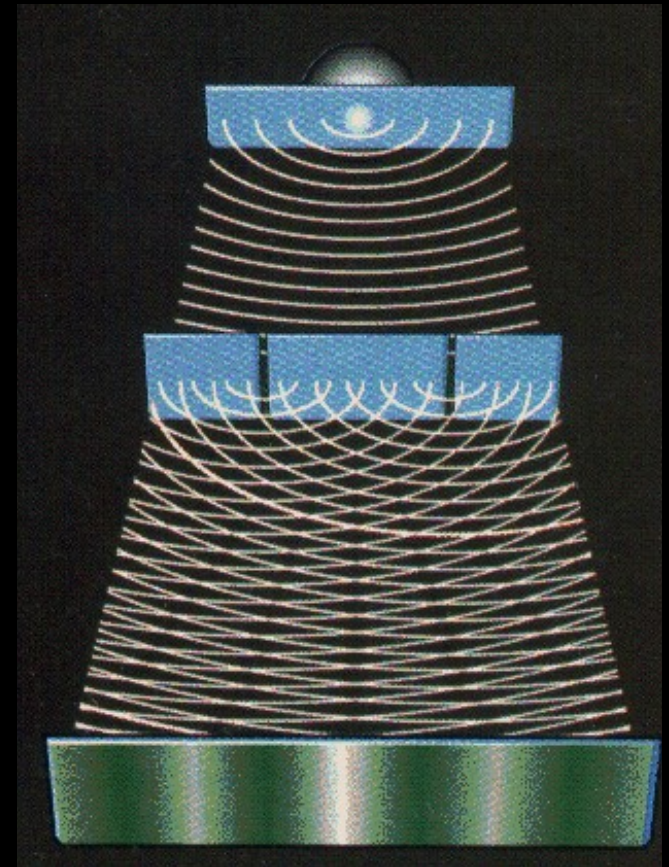
Il neutrino può essere creato
e rivelato solo in uno stato di
sapore definito

Particelle: Onde o Corpuscoli ?

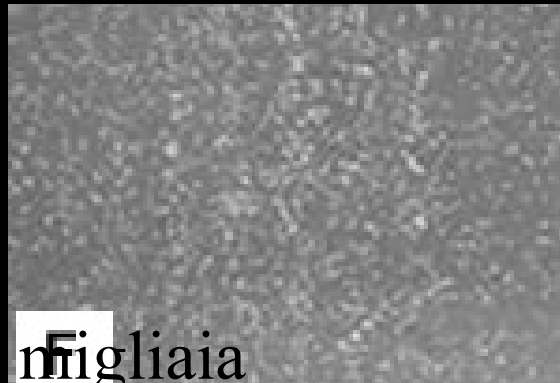
Le onde



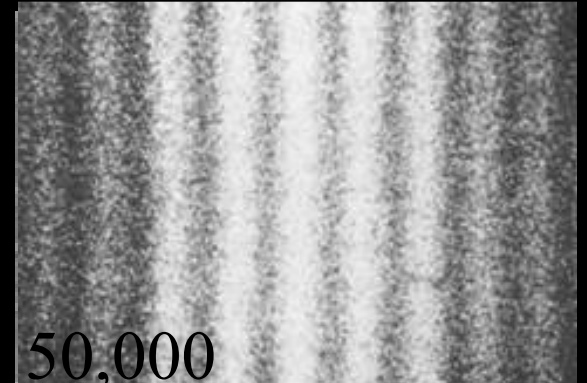
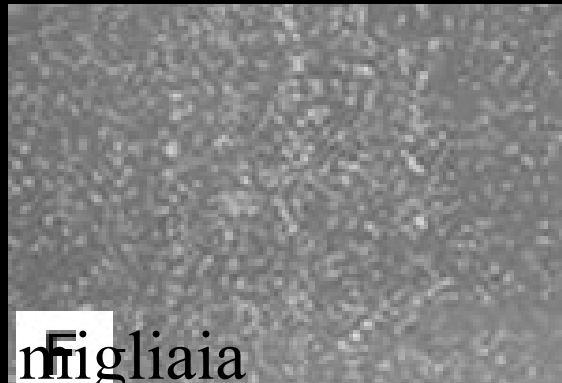
La luce



Particelle: Onde o Corpuscoli ?



Particelle: Onde o Corpuscoli ?

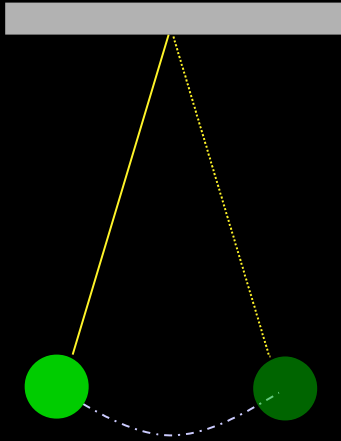


Le particelle costituenti la materia
si comportano in modo bizzarro

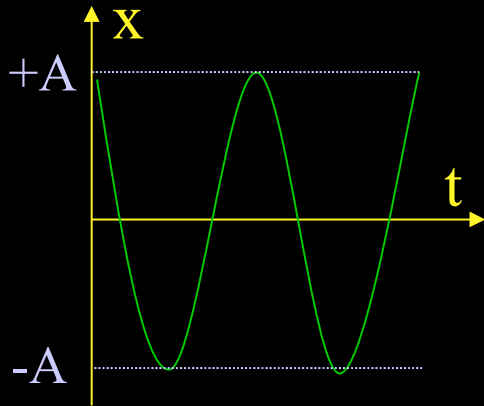
... un po' corpuscoli e un po' onde

... nè corpuscoli nè onde

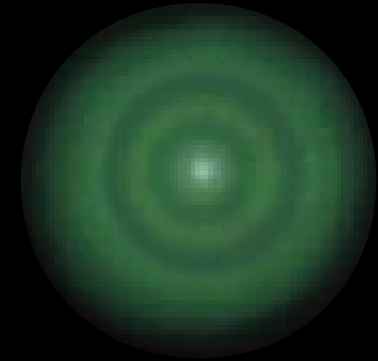
Pendoli e Particelle/Onde



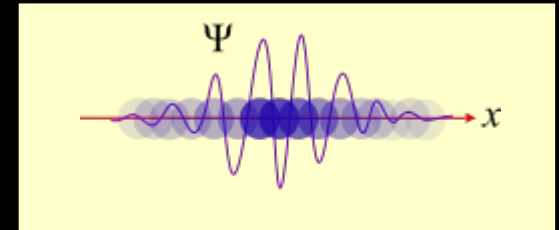
$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi)$$



$$\omega = 2\pi/T = \sqrt{g/l}$$



$$\Psi(x,y,z,t)$$



$$|\Psi|^2 \rightarrow \text{probabilità}$$

$$\omega = 2\pi E/h$$

$$h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

Oscillazione dei neutrini

sapore
definito



creazione

Oscillazione dei neutrini

sapore
definito

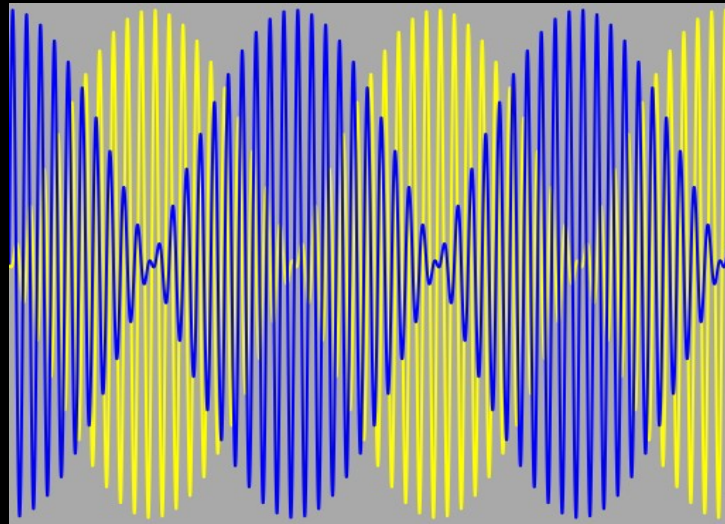


sapore ??



creazione

trasporto: tempo/distanza



Il sapore di un neutrino prodotto, come l'oscillazione del singolo pendolo rosso o blu, non è uno dei modi normali.

Oscillazione dei neutrini

sapore
definito



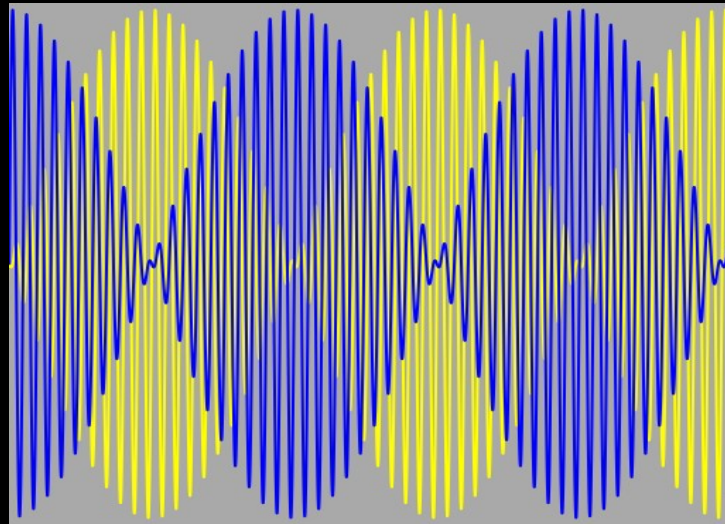
sapore ??

sapore
definito



trasporto: tempo/distanza

creazione



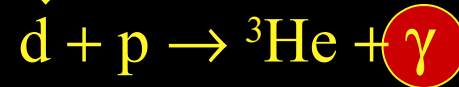
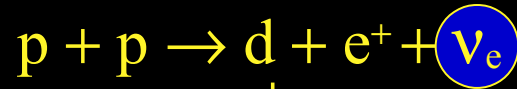
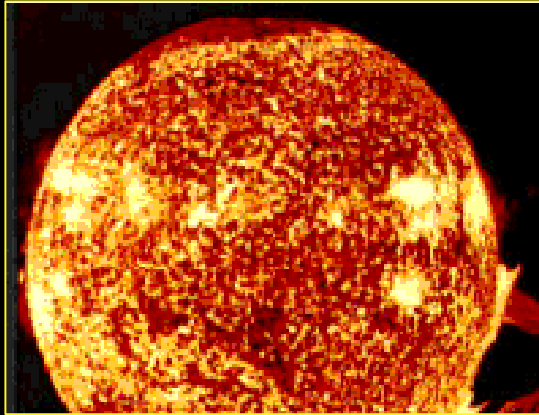
rivelazione

Il sapore di un neutrino prodotto, come l'oscillazione del singolo pendolo rosso o blu, non è uno dei modi normali.

Alla rivelazione dello stesso neutrino il suo sapore sarà in generale differente da quello creato.

I “modi normali” in cui i neutrini si propagano sono quelli di massa definita e non coincidono con il sapore (elettrone, muone e tau) in cui sono prodotti e rivelati

I neutrini solari



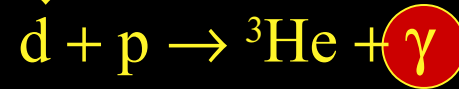
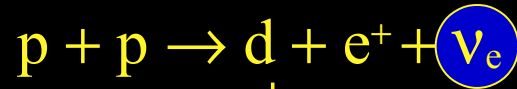
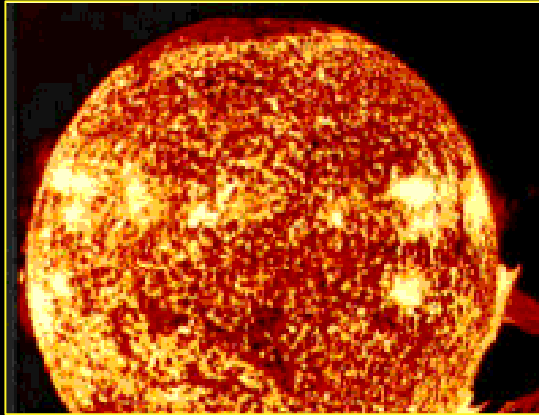
I processi di fusione nucleare nel sole producono:

fotoni (la radiazione elettromagnetica che ci scalda)

+

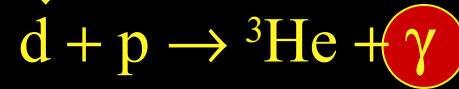
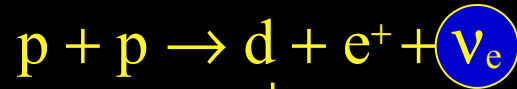
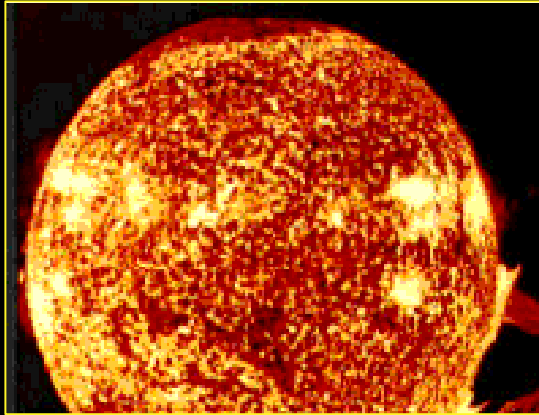
neutrini di tipo elettrone

Oscillazione dei neutrini solari



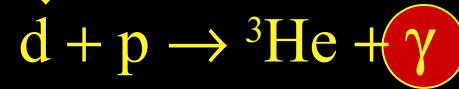
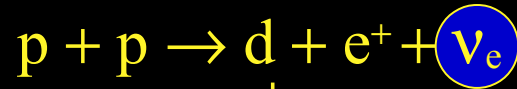
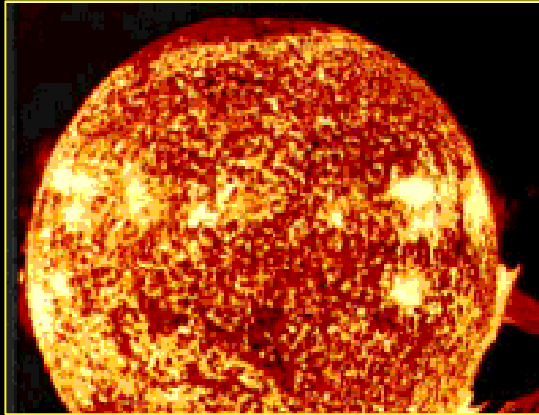
I neutrini elettronici che ci arrivano dal sole sono solo un terzo di quelli aspettati (Davis et al. 1968). Questo deficit è stato successivamente confermato da esperimenti negli USA, in Giappone e in Italia, che nei decenni successivi hanno misurato il flusso di neutrini elettronici dal sole.

Oscillazione dei neutrini solari



Nel 2002 un esperimento in Canada (SNO) ha mostrato che i neutrini elettrone mancanti arrivano sulla terra in forma di neutrini mu e tau.

Oscillazione dei neutrini solari



Tra gli esperimenti in corso più avanzati per la misura dei neutrini emessi dal sole c'è Borexino ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

Neutrini dall'atmosfera

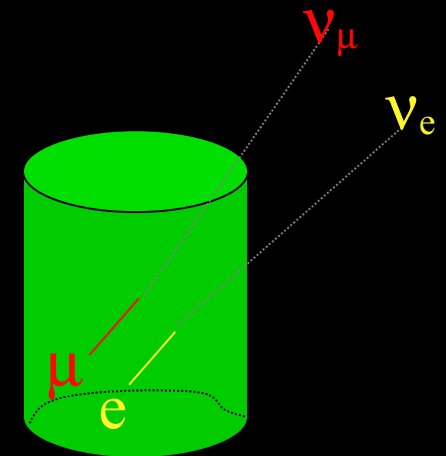


A livello del mare: 180 muoni/m²/s

Muoni di qualche GeV sono fermati da qualche metro di materiale.

Nei laboratori sotterranei più profondi il flusso di muoni si riduce di 10⁶-10⁷.

$$\mu + \nu_{\mu} \rightarrow e + \nu_{\mu} + \nu_e$$



Neutrini dall'atmosfera

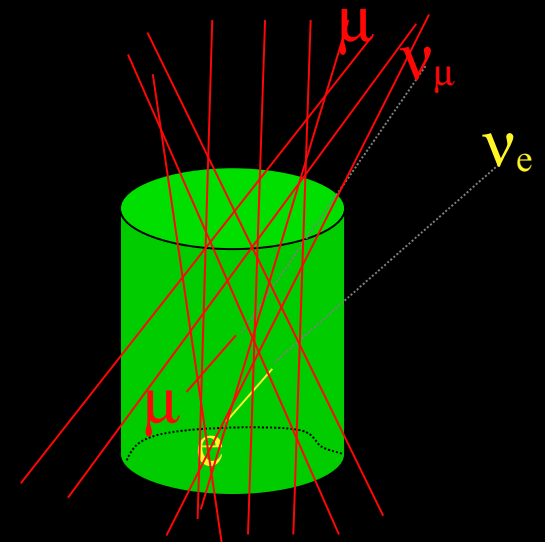


A livello del mare: 180 muoni/m²/s

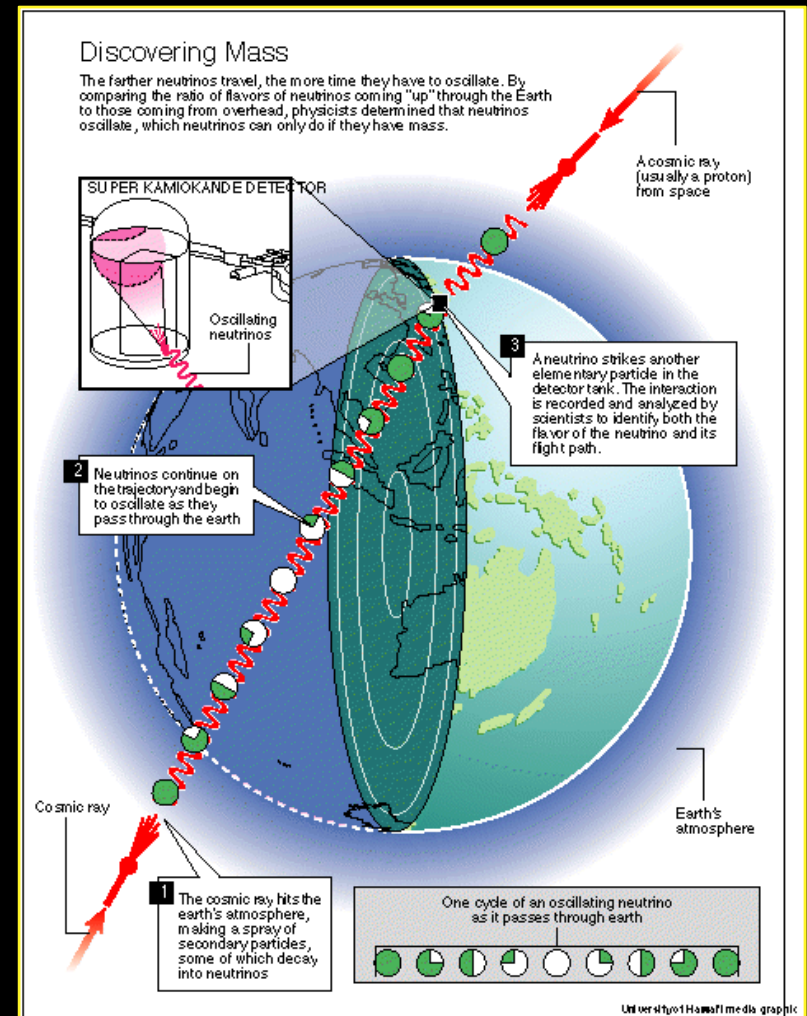
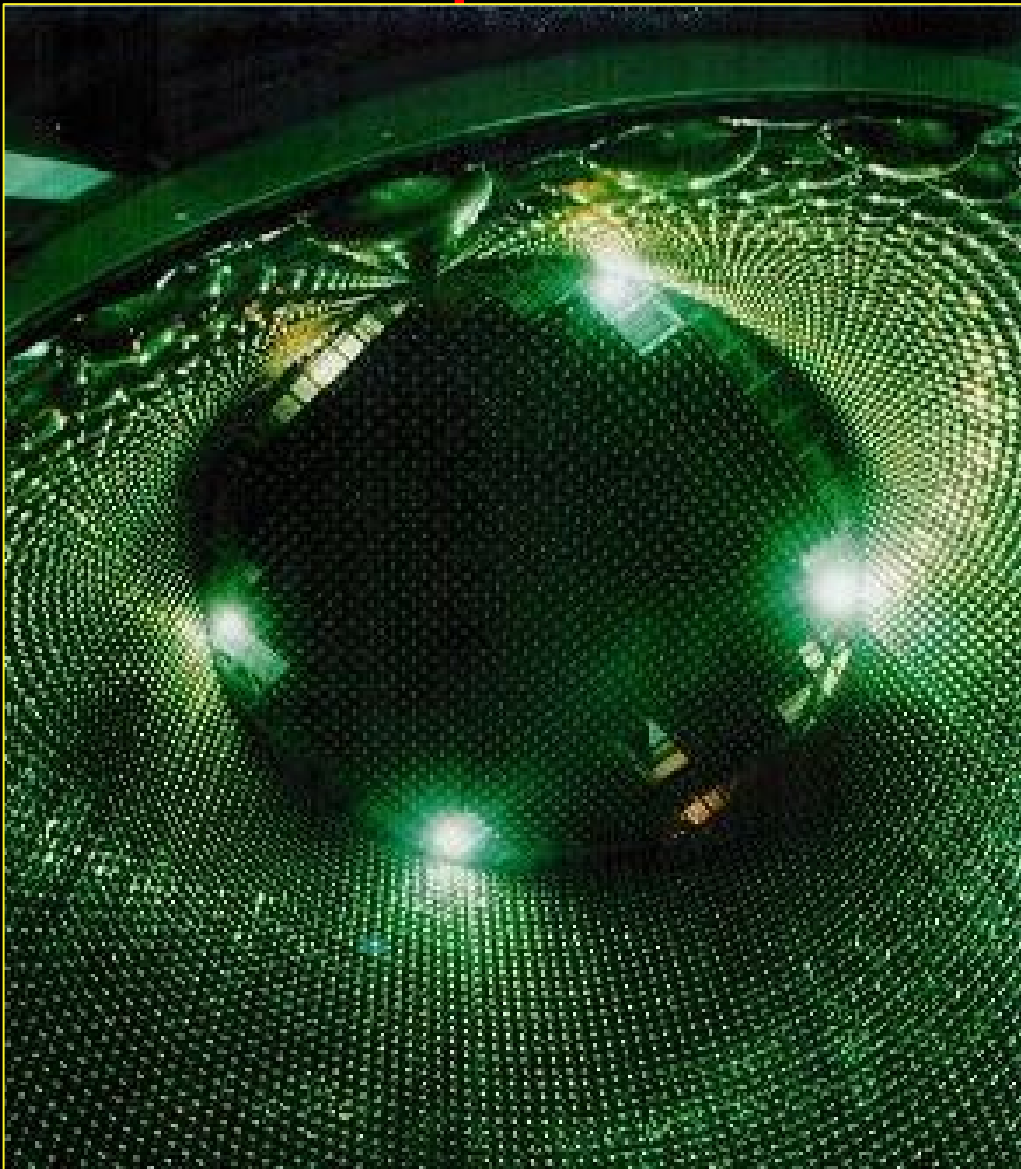
Muoni di qualche GeV sono fermati da qualche metro di materiale.

Nei laboratori sotterranei più profondi il flusso di muoni si riduce di 10⁶-10⁷.

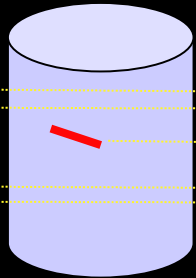
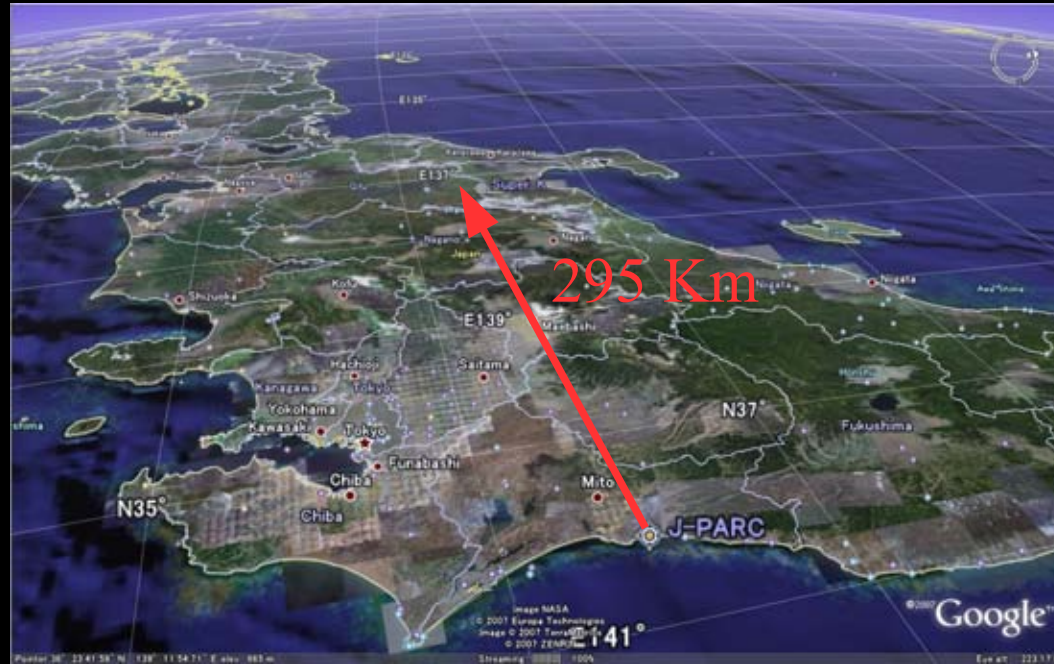
$$\mu + \nu_{\mu} \rightarrow e + \nu_{\mu} + \nu_e$$



Super-Kamiokande (1998)



ν_μ che si trasformano in ν_e



Super-Kamiokande

neutrini mu



Rivelatore vicino

pioni

protoni

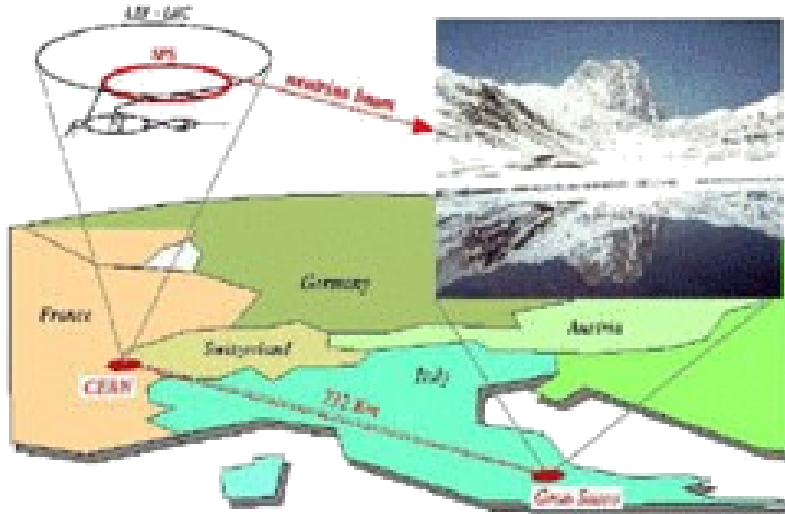
bersaglio

28 neutrini elettrone osservati

$(4.9 \pm 0.6$ eventi di fondo attesi)

ν_μ che si trasformano in ν_τ

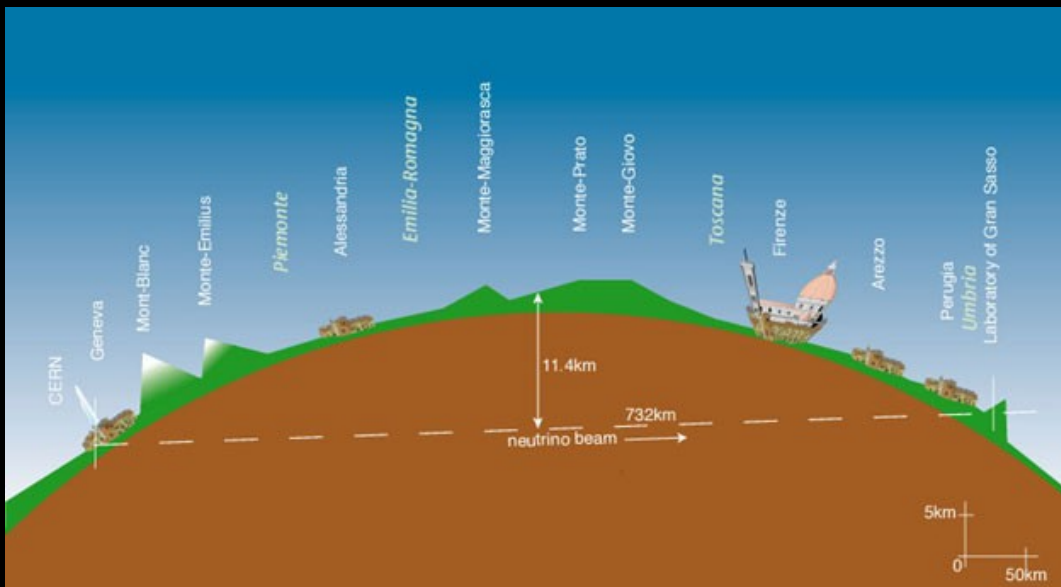
CERN to Gran Sasso Neutrino Beam



Neutrini ν_μ prodotti dagli acceleratori di particelle del CERN di Ginevra

Il “fascio” di ν_μ contiene pochi neutrini elettrone e nessun neutrino tau

Il “fascio” di ν_μ ha percorso 730 Km, sottoterra, per raggiungere i laboratori del Gran Sasso



Un grande rivelatore, Opera, ha osservato in cinque anni di presa dati le tracce dell'interazione di cinque neutrini di tipo tau

Per saperne di più

La fisica delle particelle elementari

<http://www.particleadventure.org>

La meccanica quantistica

“Il bizzarro mondo dei quanti”, S.C.Arroyo, Ed. Springer, 2008

I neutrini

<http://t2k-experiment.org/neutrinos/faq/>

I neutrini, il sole, le supernovae

http://www.windows.ucar.edu/tour/link=/sun/Solar_interior/Sun_layers/Core/core.html

lucio.ludovici@roma1.infn.it