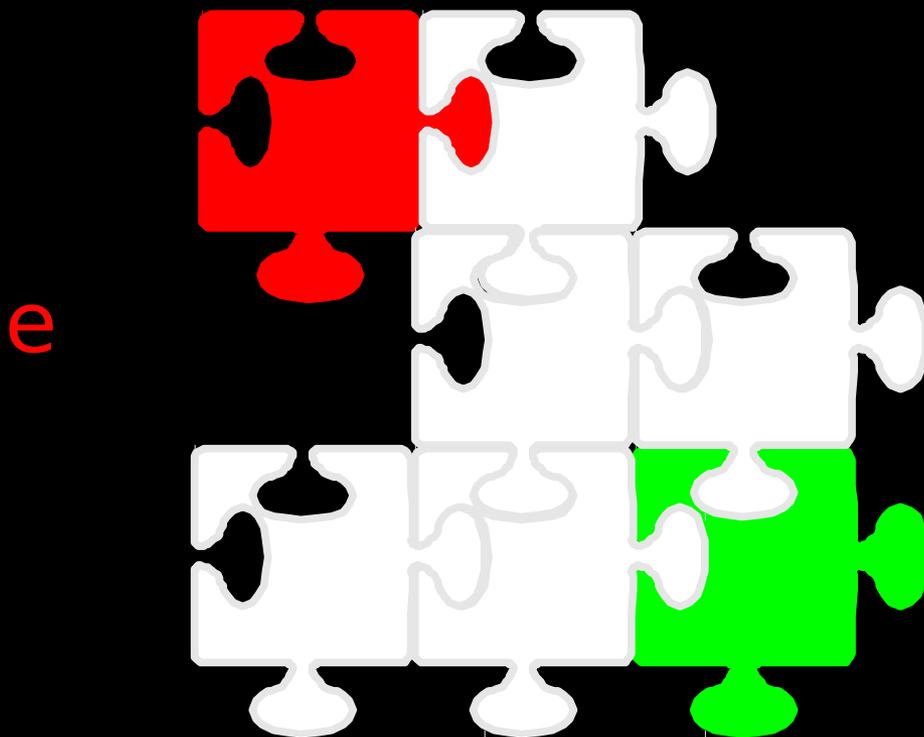
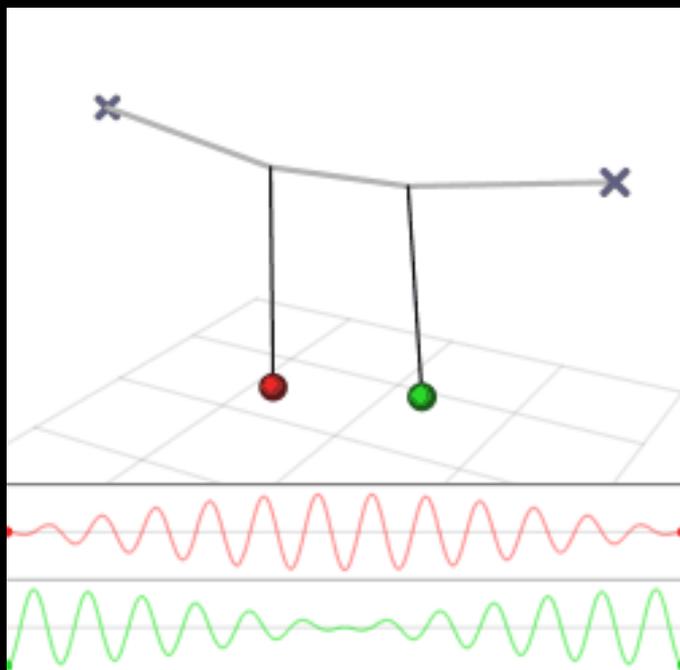


Pendoli accoppiati



Oscillazioni di neutrini

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 già nel 400 a.C.

I costituenti della materia

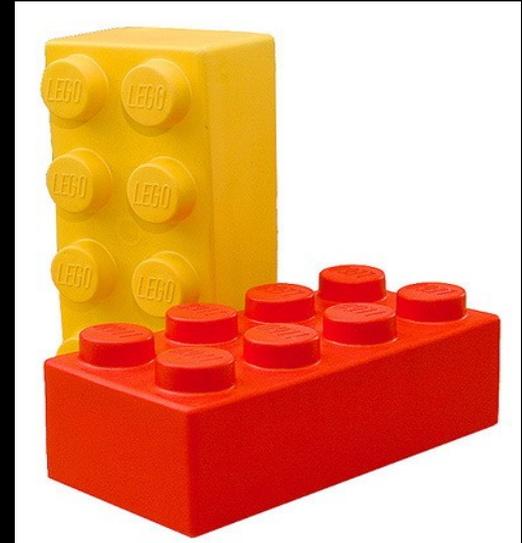
Democrito :

“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 della materia



I costituenti della materia



Gli atomi

Gli elementi nella tavola periodica formano tutte le sostanze conosciute.

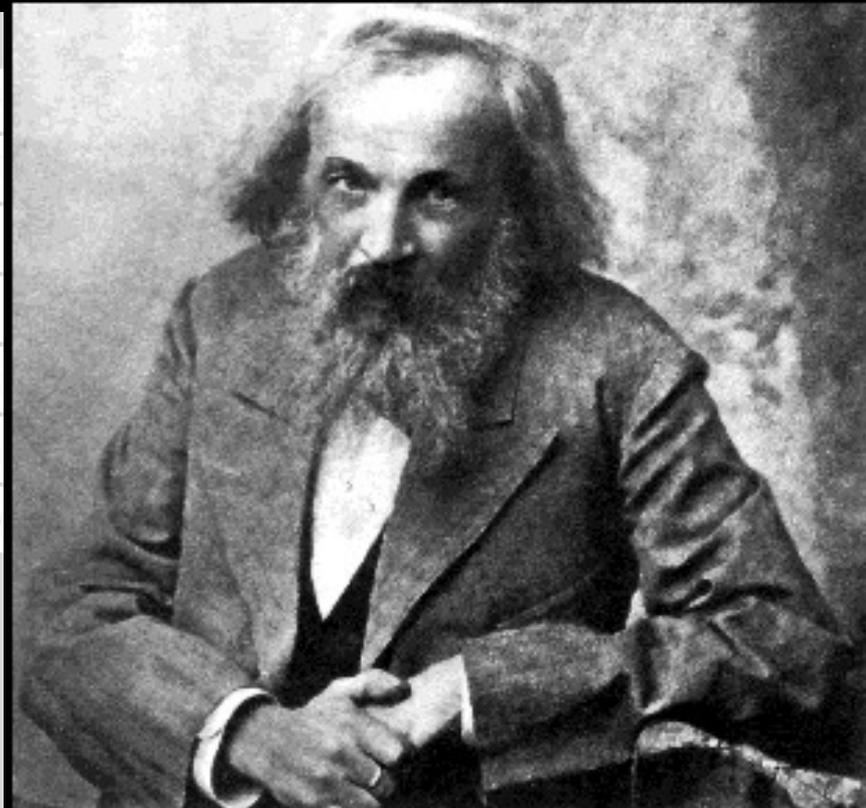
Le trasformazioni chimiche ordinarie non riescono a scomporli in sostanze più semplici.

An Updated Traditional Flat Periodic Table

1 H 1.01																	2 He 4.00																												
3 Li 6.94	4 Be 9.01											5 B 10.8	6 C 12.0	7 N 14.0	8 O 16.0	9 F 19.0	10 Ne 20.2																												
11 Na 23.0	12 Mg 24.3											13 Al 27.0	14 Si 28.1	15 P 31.0	16 S 32.1	17 Cl 35.5	18 Ar 40.0																												
19 K 39.1	20 Ca 40.1	21 Sc 45.0	22 Ti 47.9	23 V 50.9	24 Cr 52.0	25 Mn 54.9	26 Fe 55.8	27 Co 58.9	28 Ni 58.7	29 Cu 63.5	30 Zn 65.4	31 Ga 69.7	32 Ge 72.6	33 As 74.9	34 Se 79.0	35 Br 79.9	36 Kr 83.8																												
37 Rb 85.5	38 Sr 87.6	39 Y 88.9	40 Zr 91.2	41 Nb 92.9	42 Mo 95.9	43 Tc 98	44 Ru 101	45 Rh 103	46 Pd 106	47 Ag 108	48 Cd 112	49 In 115	50 Sn 119	51 Sb 122	52 Te 128	53 I 127	54 Xe 131																												
55 Cs 133	56 Ba 137	57 La 139	72 Hf 178	73 Ta 181	74 W 184	75 Re 186	76 Os 190	77 Ir 192	78 Pt 195	79 Au 197	80 Hg 201	81 Tl 204	82 Pb 207	83 Bi 209	84 Po 210	85 At 210	86 Rn 222																												
87 Fr 223	88 Ra 226	89 Ac 227	104 Rf 227	105 Db 262	106 Sg 263	107 Bh 264	108 Hs 265	109 Mt 268	110 Ds 271	111 Rg 272	112 Uub 285	113 Uut 284	114 Uuq 289	115 Uup 288	116 Uuh 292	117 Uus ?	118 Uuo ?																												
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>58 Ce 140</td> <td>59 Pr 141</td> <td>60 Nd 144</td> <td>61 Pm 147</td> <td>62 Sm 150</td> <td>63 Eu 152</td> <td>64 Gd 157</td> <td>65 Tb 159</td> <td>66 Dy 163</td> <td>67 Ho 165</td> <td>68 Er 167</td> <td>69 Tm 169</td> <td>70 Yb 173</td> <td>71 Lu 175</td> </tr> <tr> <td>90 Th 232</td> <td>91 Pa 231</td> <td>92 U 238</td> <td>93 Np 237</td> <td>94 Pu 244</td> <td>95 Am 243</td> <td>96 Cm 247</td> <td>97 Bk 247</td> <td>98 Cf 251</td> <td>99 Es 254</td> <td>100 Fm 257</td> <td>101 Md 258</td> <td>102 No 255</td> <td>103 Lr 256</td> </tr> </tbody> </table>																		58 Ce 140	59 Pr 141	60 Nd 144	61 Pm 147	62 Sm 150	63 Eu 152	64 Gd 157	65 Tb 159	66 Dy 163	67 Ho 165	68 Er 167	69 Tm 169	70 Yb 173	71 Lu 175	90 Th 232	91 Pa 231	92 U 238	93 Np 237	94 Pu 244	95 Am 243	96 Cm 247	97 Bk 247	98 Cf 251	99 Es 254	100 Fm 257	101 Md 258	102 No 255	103 Lr 256
58 Ce 140	59 Pr 141	60 Nd 144	61 Pm 147	62 Sm 150	63 Eu 152	64 Gd 157	65 Tb 159	66 Dy 163	67 Ho 165	68 Er 167	69 Tm 169	70 Yb 173	71 Lu 175																																
90 Th 232	91 Pa 231	92 U 238	93 Np 237	94 Pu 244	95 Am 243	96 Cm 247	97 Bk 247	98 Cf 251	99 Es 254	100 Fm 257	101 Md 258	102 No 255	103 Lr 256																																

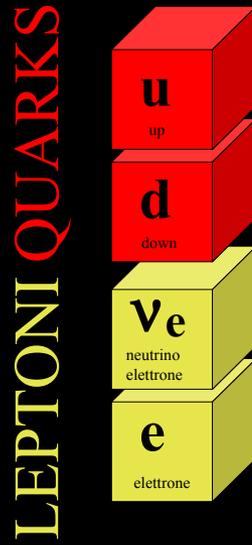
light metals - brittle metals - ductile metals - low melting metals - non-metals - noble gases - lanthanides - actinides

from AllPeriodicTables.com



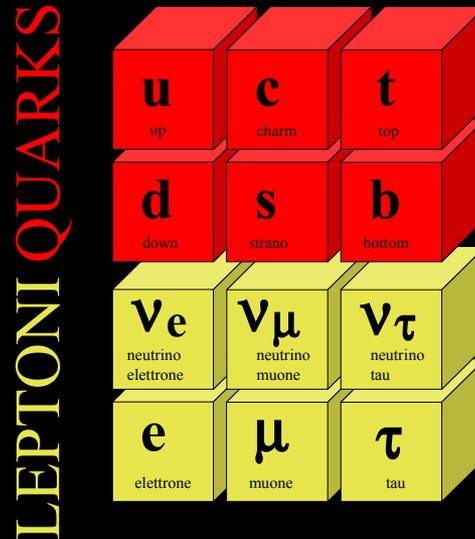
Le particelle fondamentali

Praticamente tutta la materia con cui ci troviamo a che fare nella vita di tutti i giorni, è costituita da “mattoncini” della prima famiglia di particelle fondamentali.



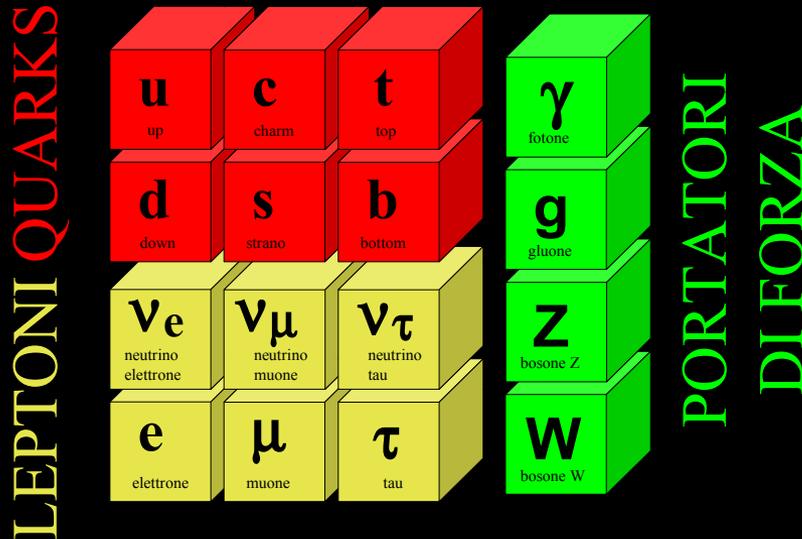
Le particelle fondamentali

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.



Le particelle fondamentali

Dopo Democrito abbiamo fatto molti passi avanti nella comprensione della realtà ma ci facciamo nuove domande per le quali non abbiamo ancora una risposta.



Perché tre famiglie ?

C'è altra materia nell'universo ?

Qual è l'origine della massa delle particelle fondamentali ?

Perché le masse delle particelle sono diverse e quelle dei neutrini molto più piccole delle altre ?

Dove è finita l'antimateria ?

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



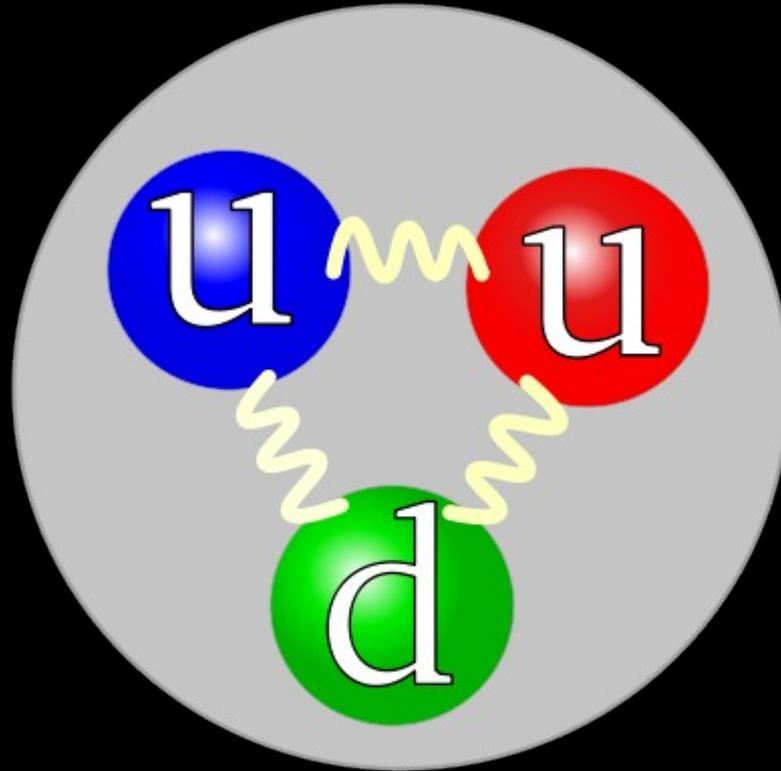
Le forze fondamentali

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).

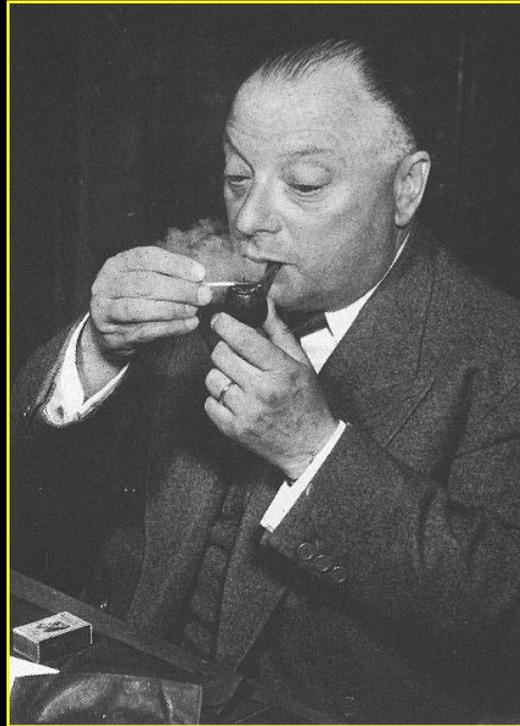
Un neutrino dell'energia tipica dei neutrini emessi nei processi di fusione e fissione dei nuclei atomici, percorre in acqua, in media, 10^{20} cm, cioè circa 100 anni luce.

La loro probabilità di interazione aumenta con l'energia.

Per poterli rivelare (cioè misurare gli effetti delle loro interazioni) servono 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

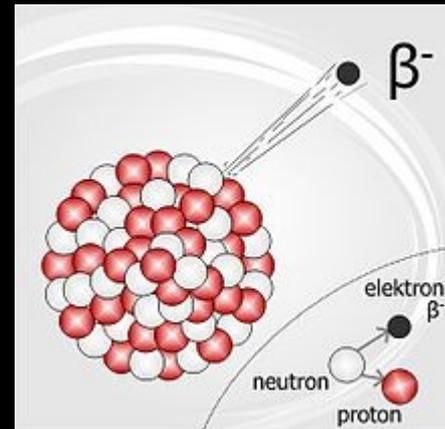


A chi sono venuti in mente ?

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 differente emettendo un elettrone :



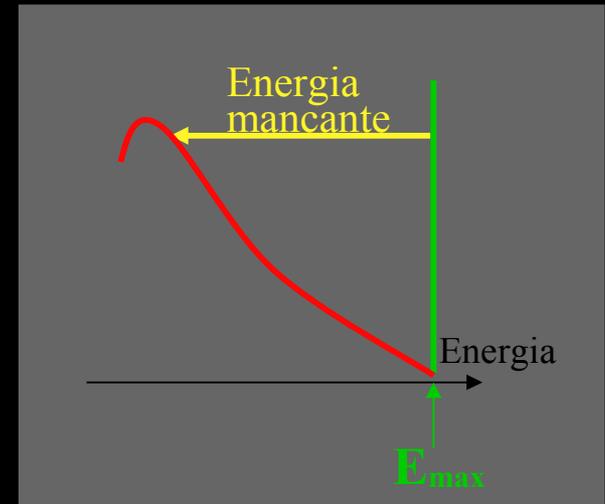
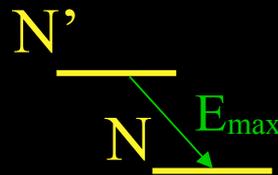
A chi sono venuti in mente ?

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 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).



Original-Photogramm of No. 0393
Abschrift/15.12.56 PM

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

Abschrift
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich kuldovollst
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelden Ausweg
verfallen um den "Wechselstz" (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
sich 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
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

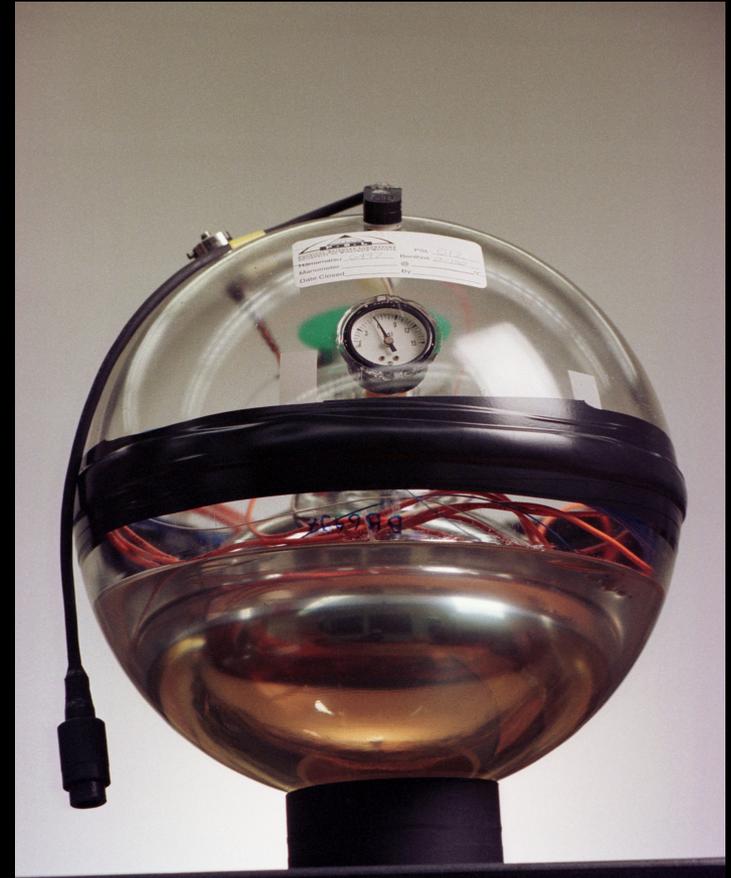
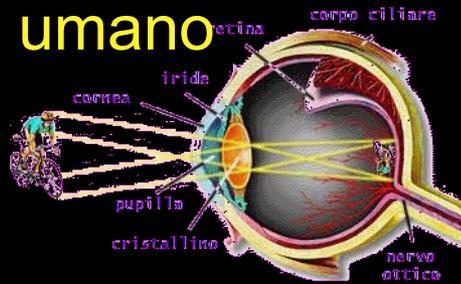
[...] La massa del neutrone dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza della massa dell'elettrone e in ogni caso non più grande di 0.01 volte la massa del protone. [...] Sfortunatamente non posso apparire a Tubinga personalmente perchè sono indispensabile qui a Zurigo a causa di un ballo nella notte del 6/7 dicembre. [...] Lettera di W.Pauli "Liebe Radioaktive Damen und Herren"

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

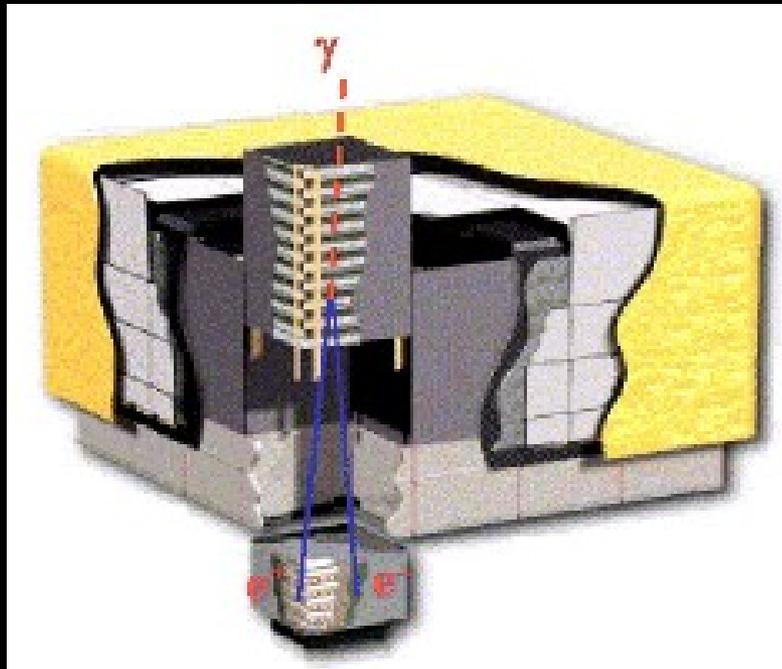


“Osservare” le particelle

Occhio umano



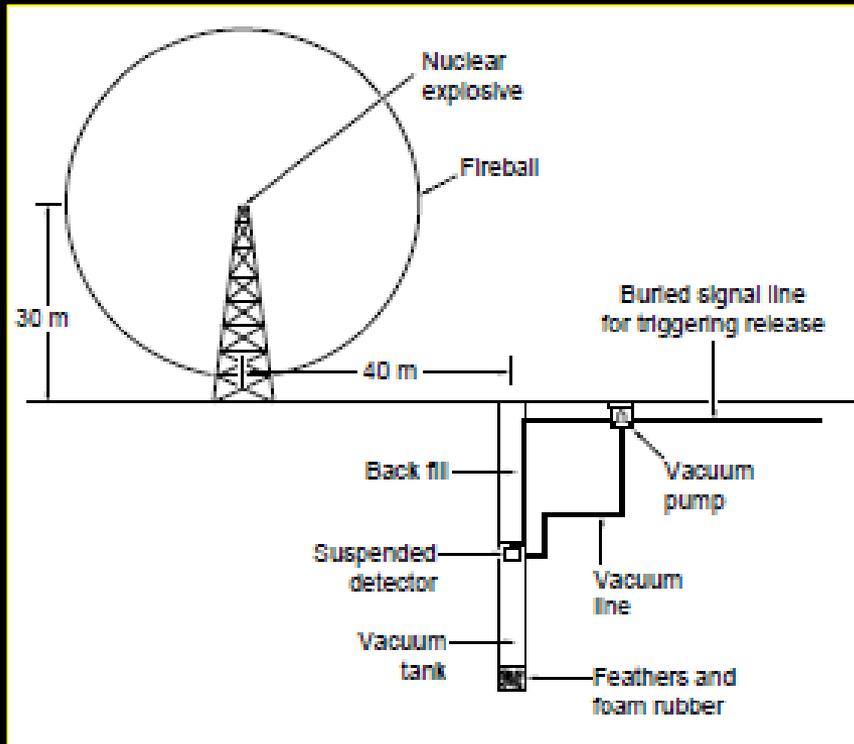
Fotomoltiplicatore
Amanda



Osservatorio Fermi

Si vedono !

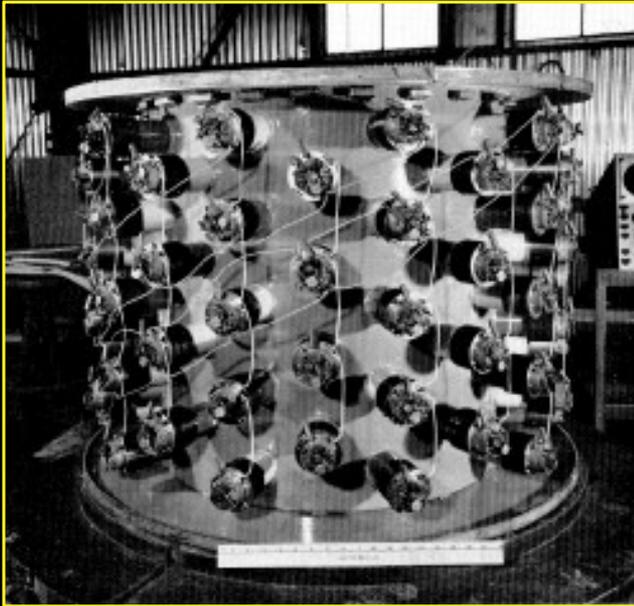
Nel 1953-56 Reines e Cowan osservano il neutrino elettrone.



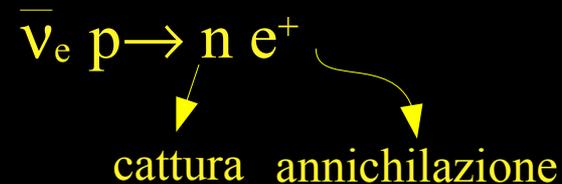
Si metta una bomba atomica sopra una torre, si scavi un pozzo ... **la prima idea non realizzata**

Si vedono !

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



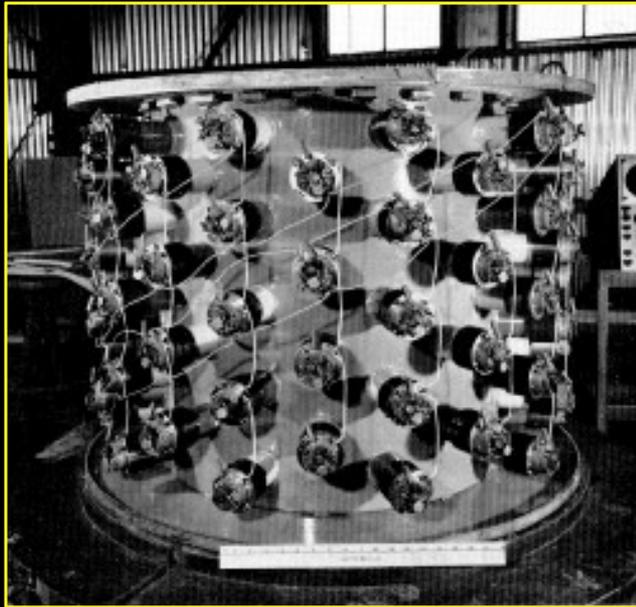
Rivelatore di 400 Kg a dieci metri dal nocciolo di un reattore nucleare che rivela le coincidenze tra il segnale prodotto dal neutrone e quello prodotto dall'elettrone nella reazione:



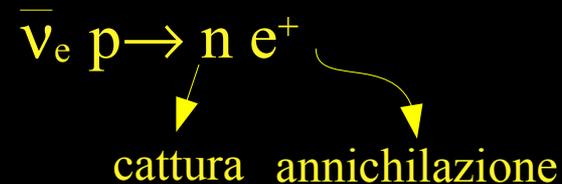
Ogni ora ci si aspettano circa 3 eventi di segnale (veri neutrini prodotti dal reattore) e 1 evento di fondo (coincidenze accidentali)

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: alcuni decadono in neutrini.

Reazioni cosmiche negli strati alti dell'atmosfera.

La creazione di un neutrino avviene in una interazione nucleare debole che definisce il "sapore" del neutrino prodotto. 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 emette 340 milioni di neutrini al giorno).

Il neutrino viene sempre creato e rivelato in un sapore definito:

neutrino elettrone

neutrino muone

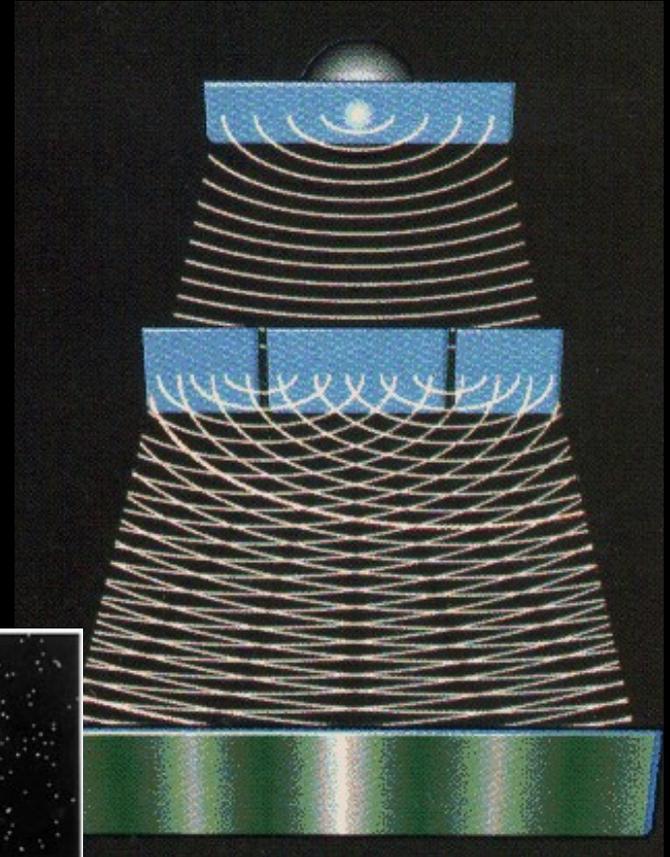
neutrino tau

Particelle: Onde o Corpuscoli ?

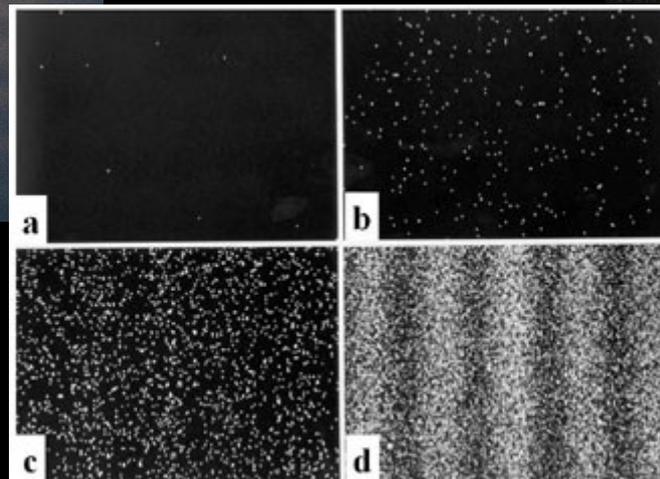
Le onde



La luce



Gli elettroni

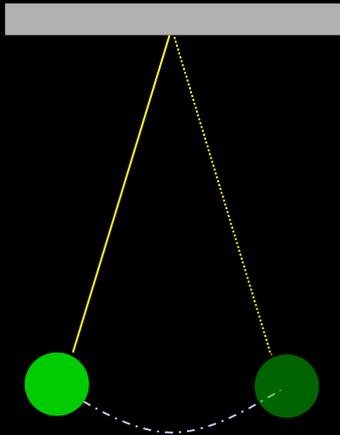


Le particelle costituenti la materia
si comportano in modo bizzarro

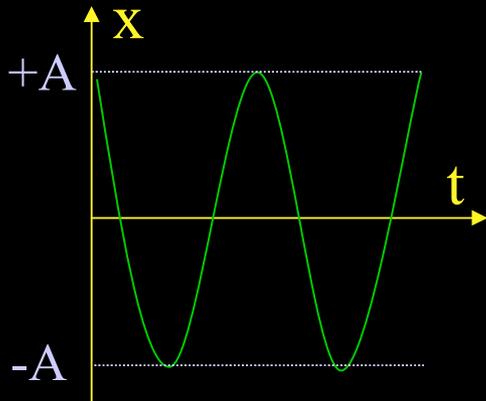
... un po' corpuscoli e un po' onde

... né corpuscoli né onde

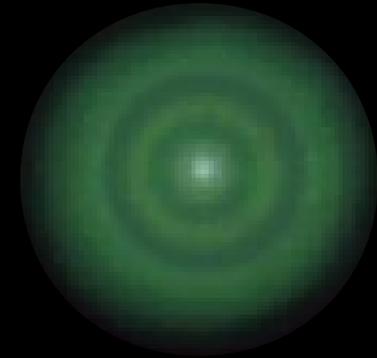
Pendoli e Particelle/Onde



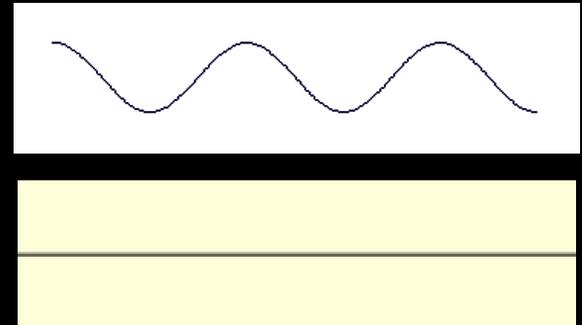
$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi)$$



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



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



$|\Psi|^2 \rightarrow$ probabilità

$$\omega = E/\hbar$$

$$\hbar = 1.056 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

Oscillazione dei neutrini

sapore
definito



creazione

Oscillazione dei neutrini

sapore
definito

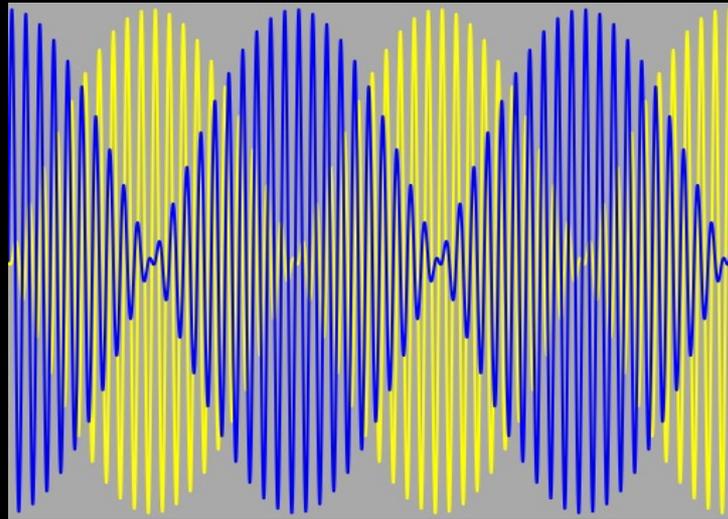


sapore ??



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



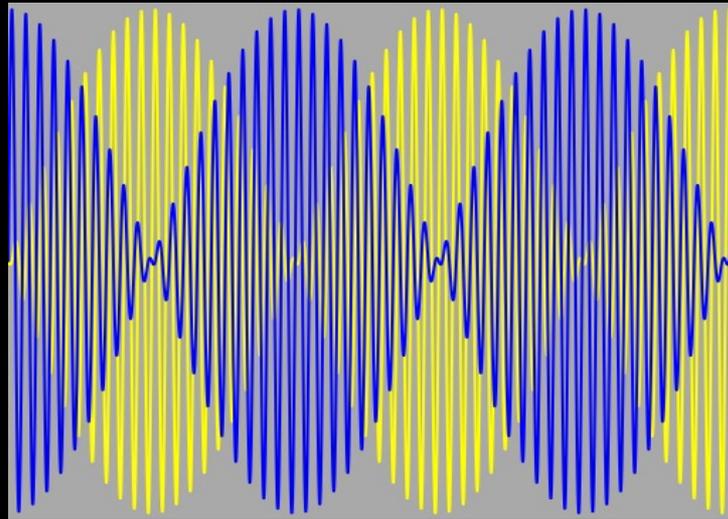
sapore ??

sapore
definito



trasporto: tempo/distanza

creazione

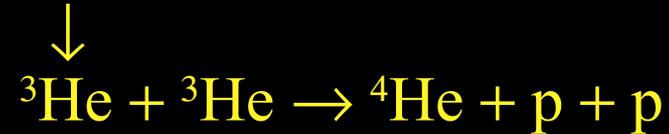
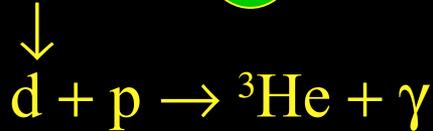
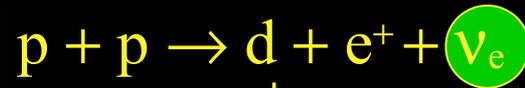
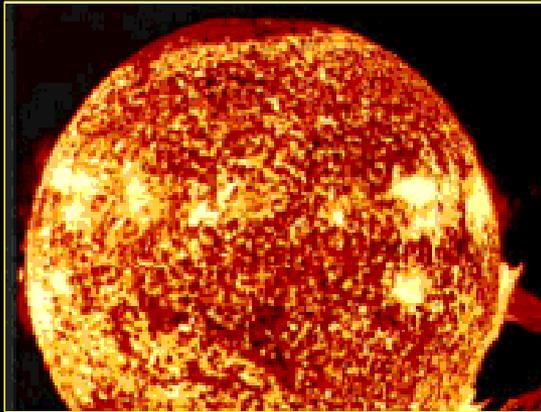


rivelazione

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.

Oscillazione dei neutrini solari

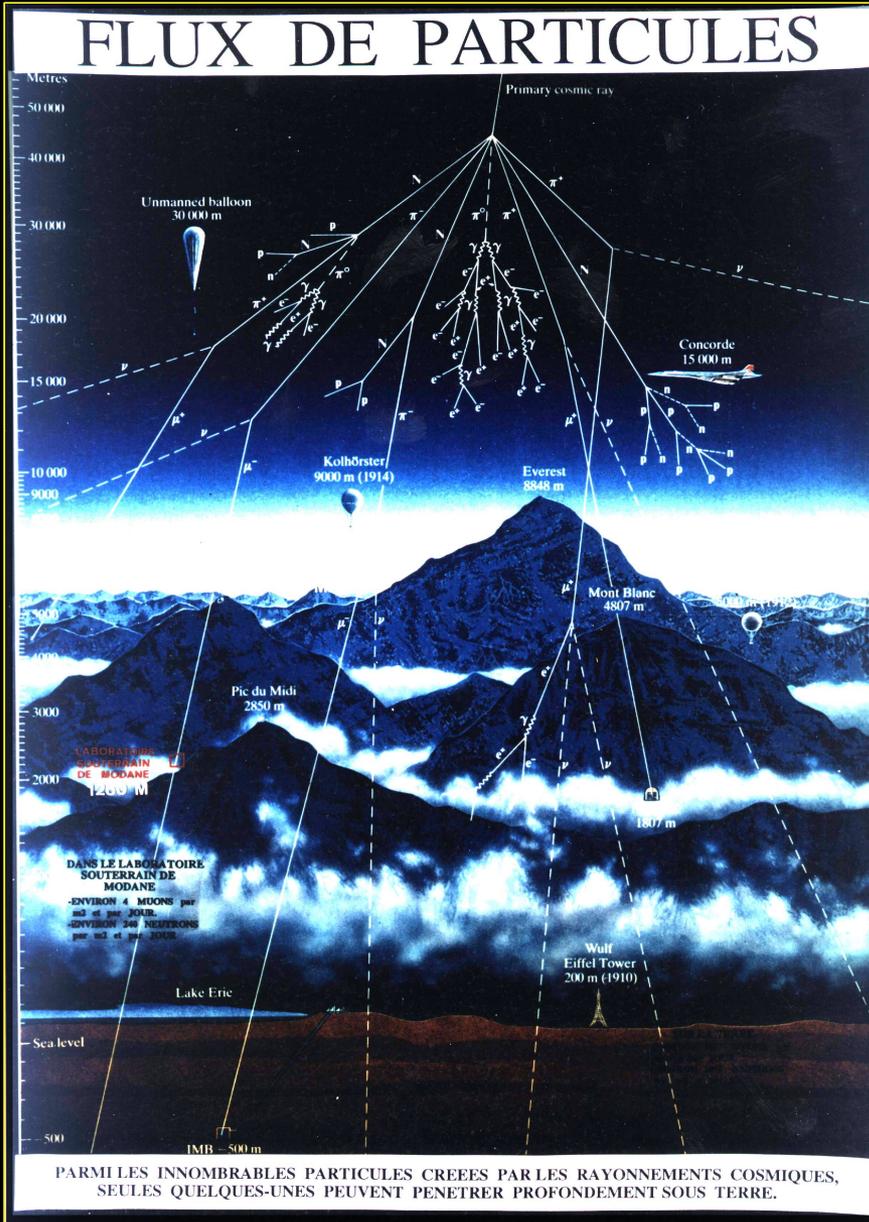


I neutrini elettrone che ci arrivano dal sole sono solo un terzo di quelli aspettati (Davis et al. 1968). Questo deficit è stato successivamente confermato da esperimenti negli USA, in Giappone e in Italia, che nei decenni successivi hanno misurato il flusso di neutrini elettrone dal sole.

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

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

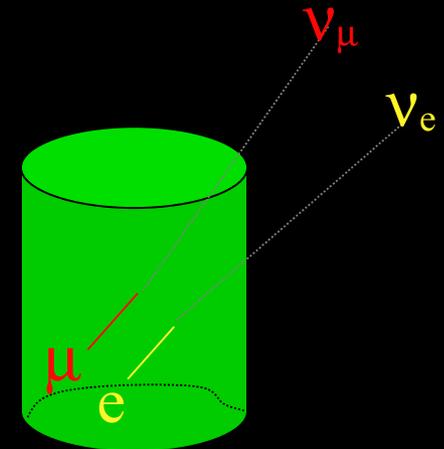


A livello del mare: 180 muoni/m²/s

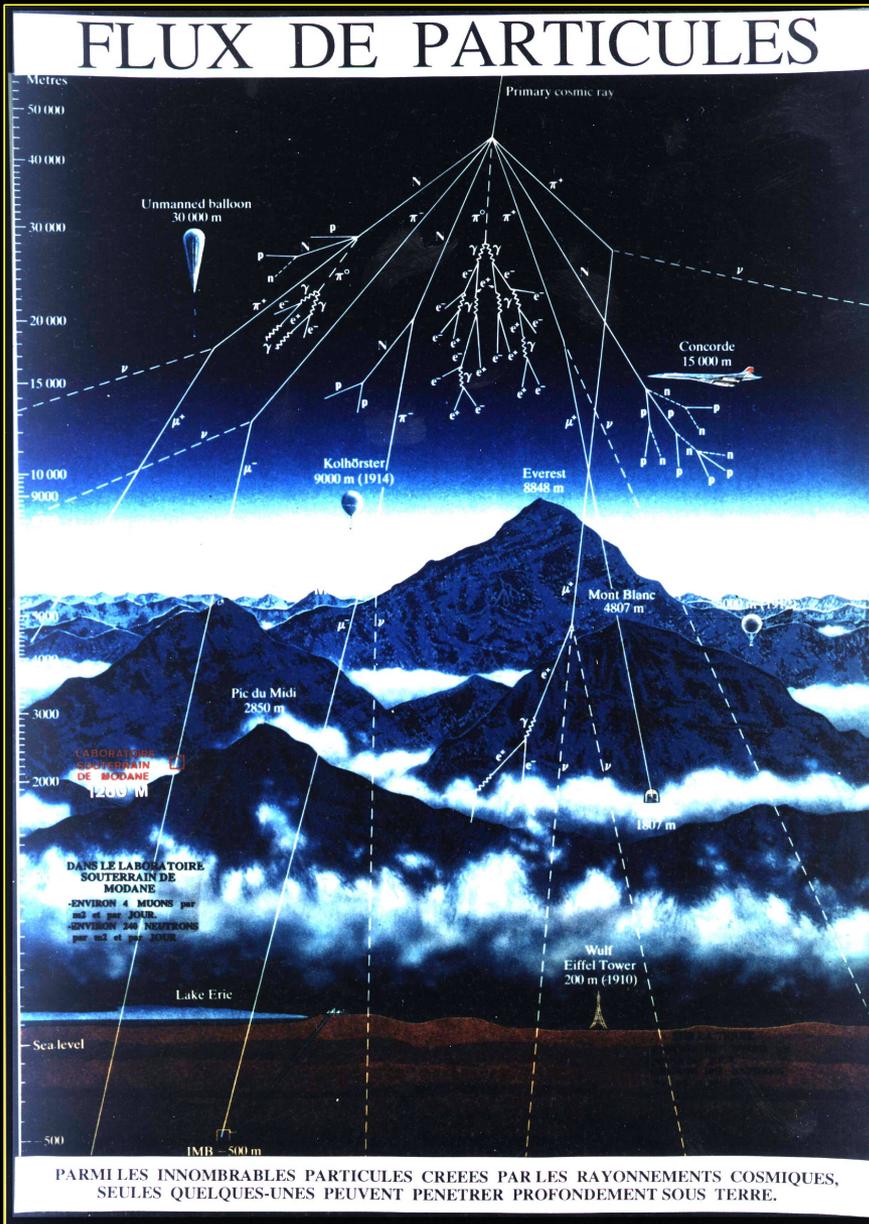
Muoni di qualche GeV sono fermati da qualche metro di materiale.

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

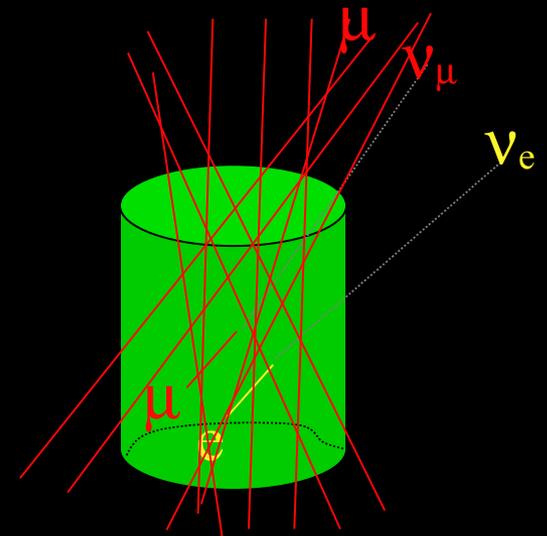


A livello del mare: 180 muoni/m²/s

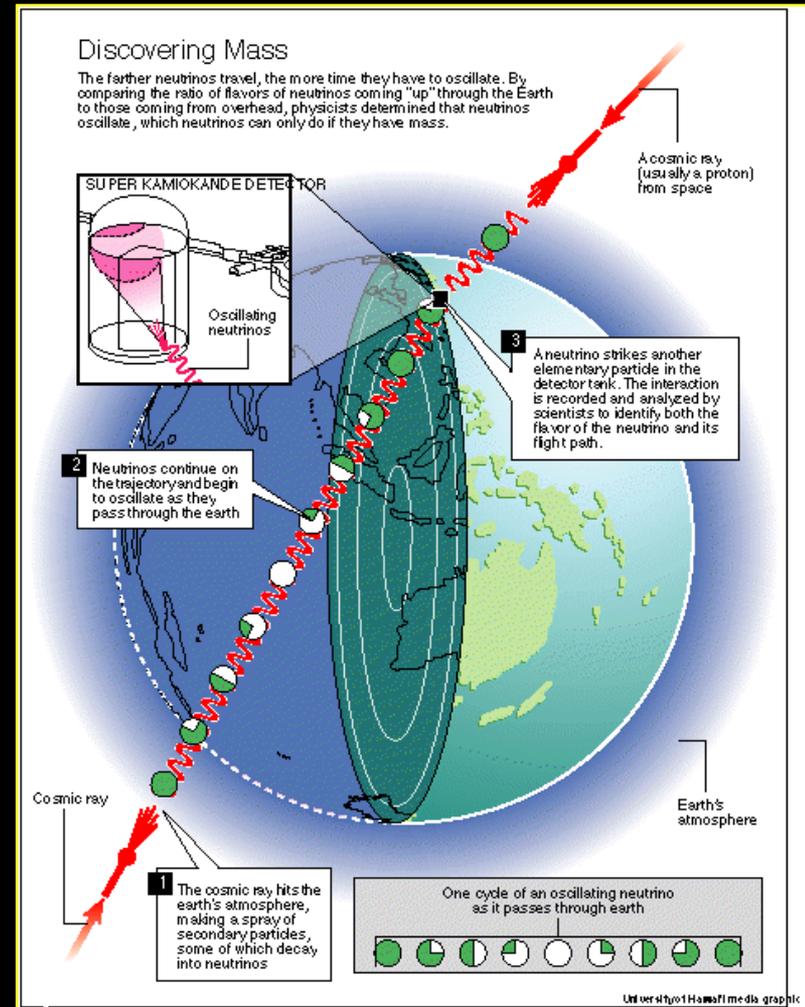
Muoni di qualche GeV sono fermati da qualche metro di materiale.

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

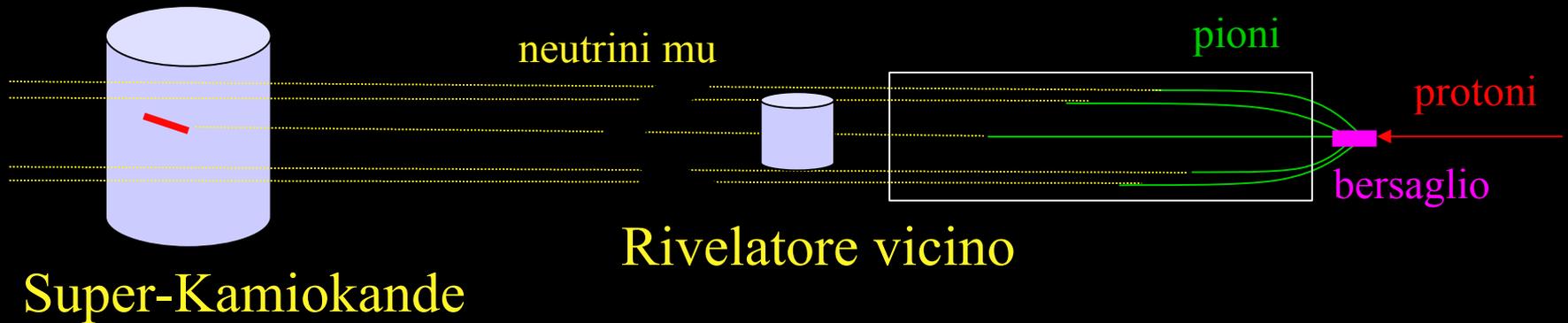
$$\mu + \nu_{\mu} \rightarrow e + \nu_{\mu} + \nu_e$$



Super-Kamiokande (1998)



K2K: Sparizione dei ν_μ (2006)



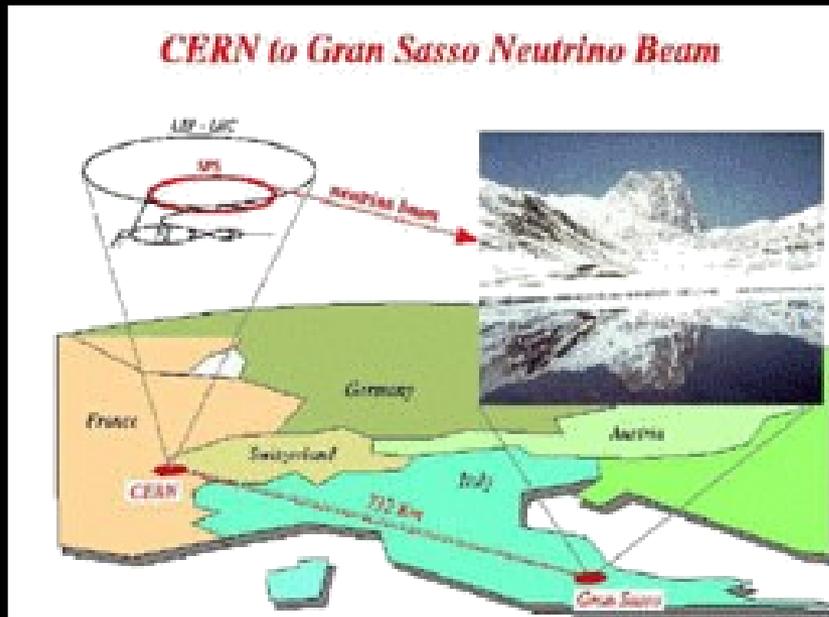
Oscillazioni !

158.1 $+9.2$
 -8.6

neutrini muonici attesi

112 neutrini muonici osservati in SuperKamiokande

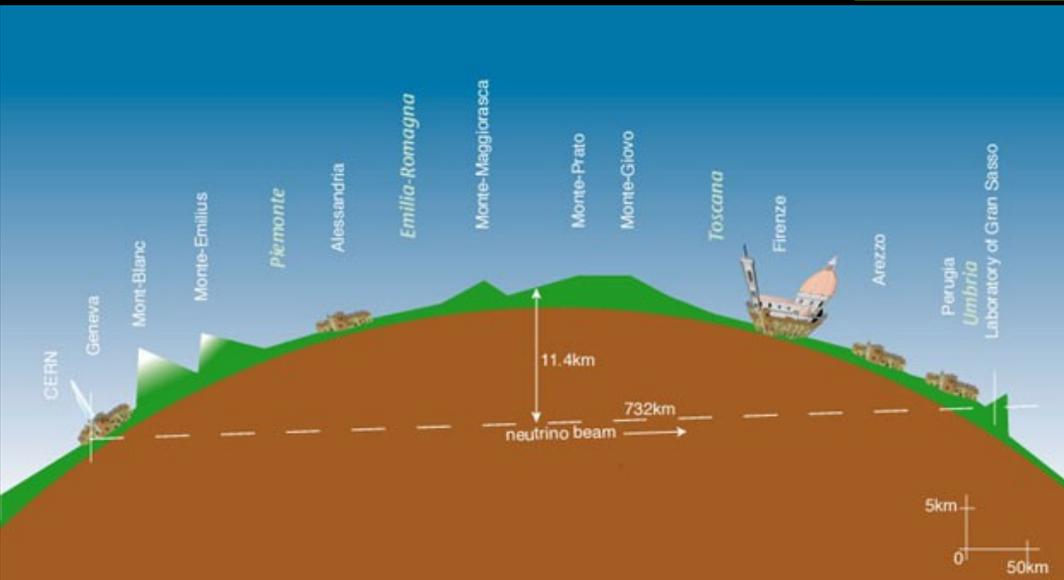
Laboratori del Gran Sasso



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 percorre 730 Km, sottoterra, e raggiunge i laboratori del Gran Sasso.



Un grande rivelatore, Opera, ha osservato le tracce dell'interazione di due neutrini di tipo tau, assente “alla produzione”

Per saperne di più

La fisica delle particelle elementari (alte energie):
<http://www.particleadventure.org>

La meccanica quantistica:

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

Storia del neutrino:

<http://www.lapp.in2p3.fr/neutrinos/aneut.html>

<http://www.ps.uci.edu/~superk/neutrino.html>

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