

## L'incredibile NEUTRINO !

- ❑ Cos'è ? ...numeri piccoli e grandi
- ❑ La sua storia
- ❑ Fascino e misteri
- ❑ Gli esperimenti e il futuro

Antonio Ereditato

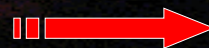
Cos'è il neutrino ?

Una particella elementare... molto particolare !

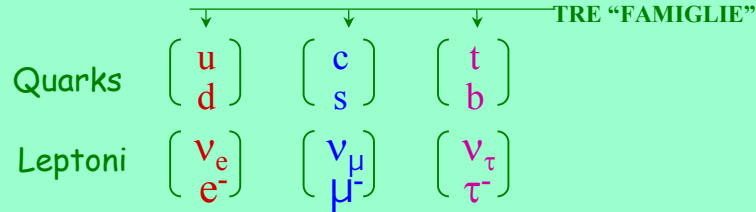
carica elettrica	0
momento angolare di spin	1 / 2
interazioni	debole
massa	?
altre proprietà	?
$\nu \neq \bar{\nu}$ (Majorana)	?

...una trottola fatta di ... niente !

Ma molto comune nel nostro Universo!



Esistono tre specie di neutrino: elettronico, muonico e tauonico, a seconda del leptone che li accompagna nei cosiddetti 'doppietti'. Attraverso l'interazione debole (la sola che i neutrini subiscono) i neutrini possono trasformarsi nel rispettivo leptone partner.



Analoghi 'doppietti' esistono per le antiparticelle

La massa dei neutrini, se diversa da zero, è comunque piccolissima. Gli esperimenti finora hanno solo permesso di porre dei limiti superiori al suo valore. Il neutrino elettronico, ad esempio, ha una massa inferiore a circa 1/500000 di quella del suo partner, l'elettrone.

$$m(\nu_e) < 2.8 \text{ eV}$$

$$m(\nu_\mu) < 17 \text{ keV}$$

$$m(\nu_\tau) < 18.2 \text{ MeV}$$

I neutrini non hanno carica elettrica e quindi non sono soggetti all'interazione elettromagnetica (a differenza degli elettroni)...



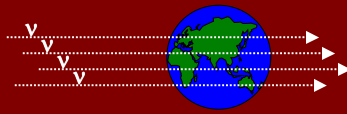
$$G_F \text{ (costante di Fermi)} \ll \alpha \text{ (costante di struttura fine)}$$

...non hanno neanche carica di 'colore', quindi non sentono l'interazione forte. L'interazione gravitazionale è comunque trascurabile. I neutrini interagiscono e vengono creati solo in virtù dell'interazione debole

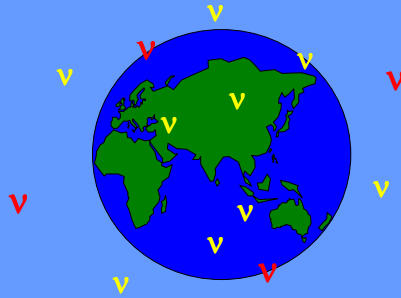


L'interazione debole è circa 10000 volte più debole di quella elettromagnetica. Ciò spiega la piccolissima probabilità di interazione del neutrino con la materia (che aumenta linearmente con l'energia): la sua sezione d'urto è di  $10^{-38} \text{ cm}^2$  a 1 GeV.

I neutrini possono attraversare la Terra, il Sole, il Sistema Solare, la nostra Galassia, senza interagire !



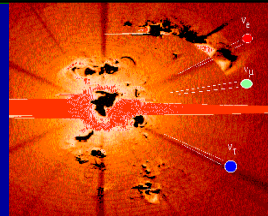
## MA DA DOVE VENGONO I NEUTRINI ?



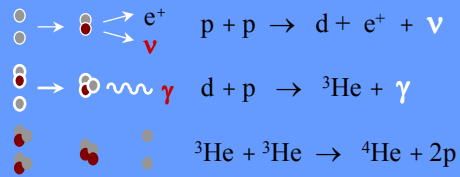
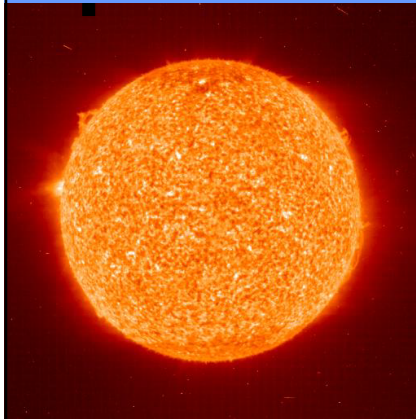
Dal Big Bang, dalle stelle (e dal nostro Sole), dai raggi cosmici, dalla nostra stessa Terra e dagli animali (uomo incluso), dalle centrali nucleari e dagli acceleratori di particelle...

Una grande quantità di neutrini fu prodotta nel Big Bang. L'Universo da allora si è espanso enormemente nel corso di 15 miliardi di anni... Di quei neutrini se ne trovano circa **330 in ogni centimetro cubo** dell'Universo attuale !

**GALASSIE, STELLE, PIANETI E LA NOSTRA TERRA  
IMMERSI IN UNA NUBE DI NEUTRINI FOSSILI**



SOLE: luce, calore e neutrini da reazioni termonucleari →

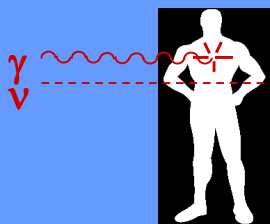


- 4 milioni di tonnellate di idrogeno del Sole vengono trasformate in energia ogni secondo ( $E=mc^2$ )
- Il Sole produce circa  $10^{38}$  neutrini al secondo
- Di essi circa 60 miliardi al secondo attraversano ogni centimetro quadrato della superficie terrestre



## I NEUTRINI E IL CORPO UMANO

La radiazione elettromagnetica interagisce con il nostro corpo e vi deposita la sua energia (calore). I neutrini hanno una bassissima probabilità di interazione e...ci trapassano senza rilasciare energia (per fortuna !)



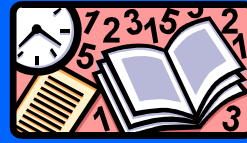
- Ogni secondo, un uomo è attraversato da:
- 400000 miliardi di neutrini provenienti dal Sole
  - 50 miliardi di neutrini dalla radioattività delle rocce terrestri
  - da 10 a 100 miliardi di neutrini provenienti da tutte le centrali nucleari mondiali

**Ma attenzione:** il corpo umano contiene circa 20 mg di Potassio 40, che è  $\beta$  radioattivo: Quindi **emettiamo** circa **340 milioni di neutrini al giorno**, che ci lasciano alla velocità della luce e si perdono nell'immensità dell'Universo !

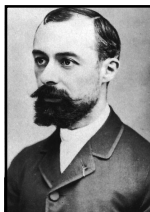


## La storia del neutrino

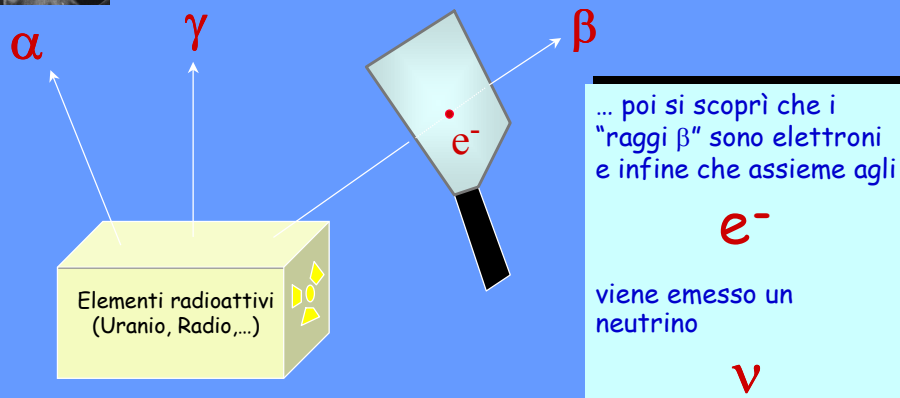
...alcune tappe salienti



- 1896   ▶ Scoperta della radioattività
- 1926   ▶ Problema del decadimento  $\beta$
- 1930   ▶ Ipotesi di Pauli: nasce il neutrino (chiamato allora neutrone)
- 1933   ▶ Fermi dà il nome al neutrino; teoria dell'interazione debole
- 1956   ▶ Scoperta sperimentale del neutrino (neutrino elettronico  $\nu_e$ )
- 1962   ▶ Scoperta di un altro tipo di neutrino (neutrino muonico  $\nu_\mu$ )
- 1962   ▶ Pontecorvo: ipotesi delle oscillazioni di neutrino
- 1973   ▶ Scoperta delle correnti neutre indotte da neutrini
- 1991   ▶ Acceleratore LEP: prova indiretta di soli 3 tipi di neutrino
- 1995-1999 ▶ Deficit dei neutrini solari e atmosferici: oscillazioni ?
- 2000   ▶ Scoperto il terzo neutrino (neutrino tauonico  $\nu_\tau$ )



**BECQUEREL 1896:**  
SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITA' NATURALE



**Decadimento  $\beta$  nucleare**

$^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}$

$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

Oggi sappiamo che (in termini di quarks)

neutrone  $(u, d, d) \xrightarrow{W^-} (u, u, d) + e^- + \bar{\nu}$

protonone  $(u, u, d)$

Se il decadimento  $\beta$  fosse a due corpi ( $^{60}\text{Ni} + e^-$ ), lo spettro dovrebbe mostrare una riga, mentre invece lo spettro è continuo!

eventi

Energia di  $e^-$

Energia disponibile =  $\Delta m_{\text{nuclei}} c^2$

$m_\nu > 0 ?$

Lo spettro continuo dell'elettrone non era compatibile col decadimento a due corpi del nucleo radioattivo. Si arrivò perfino a mettere in discussione il principio di conservazione dell'energia nei decadimenti  $\beta$ . Finché Pauli non ipotizzò l'esistenza del (da lui chiamato) **neutrone**.

Lettera inviata da Pauli il 4 Dicembre 1930 ai partecipanti ad un congresso di fisica a Tubinga

*Cari Signore e Signori Radioattivi,*

...a causa dello spettro continuo del decadimento beta, ho pensato a un possibile **disperato rimedio** per salvare le statistiche e il principio di conservazione dell'energia. Si tratta della possibilità che esista nel nucleo una particella elettricamente neutra, che chiamerò **neutrone**, con spin  $\frac{1}{2}$ , che rispetti il principio di esclusione, ma che sia diversa dai fotoni, in quanto non viaggia alla velocità della luce. La massa del neutrone dovrebbe essere simile a quella dell'elettrone e comunque non maggiore dell'1% della massa del protone. Potremmo così spiegare lo spettro continuo assumendo che **nel decadimento beta è emesso un neutrone assieme all'elettrone in maniera tale che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone sia costante**...

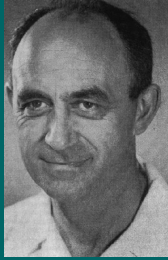
...Concordo sul fatto che **tale rimedio possa sembrare incredibile** poiché avremmo già dovuto osservare tali neutroni. Ma **solo chi osa può vincere** e la situazione difficile in cui ci troviamo è ben illustrata da una frase che il mio illustre predecessore, il Sig. Debye, mi disse recentemente a Bruxelles: "Oh, è meglio non pensarci per nulla...proprio come per nuove tasse...". D'ora in avanti ogni soluzione merita di essere considerata.

...Sfortunatamente **non potrò raccontarvi personalmente le mie idee a Tubinga in quanto dovrò restare qui a Zurigo a causa di una festa da ballo la notte tra il 6 e il 7 Dicembre**...

prima...  $N$

...dopo  $N'$

$e^-$   $\bar{\nu}$



Fermi supportò subito l'ipotesi di Pauli, inquadrandola in una teoria delle Interazioni Deboli che ancora oggi è in grado di spiegare molti dei risultati sperimentali. Fermi cambiò anche nome alla particella, battezzandola **NEUTRINO**, facendo riferimento alla piccolezza della sua massa.

**"Tentativo Di Una Teoria Dei Raggi  $\beta$ "**  
*Enrico Fermi (1934)*

Sunto - Si propone una teoria quantitativa dell'emissione dei raggi  $\beta$  in cui **si ammette l'esistenza del <neutrino>** e si tratta l'emissione degli elettroni e dei neutrini da un nucleo all'atto della disintegrazione  $\beta$  con un procedimento simile a quello seguito nella teoria dell'irradiazione per descrivere l'emissione di un quanto di luce da un atomo eccitato. Vengono dedotte delle formule per la vita media e per la forma dello spettro continuo dei raggi  $\beta$ , e le si confrontano con i dati sperimentali.

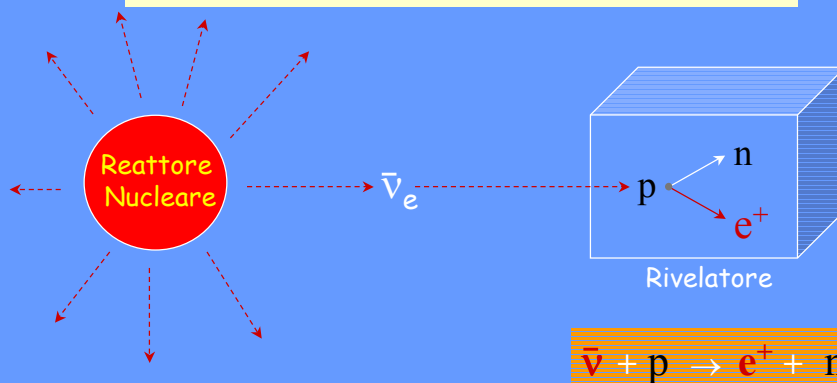
**Ipotesi Fondamentale della teoria**

§1 Nel tentativo di costruire una teoria degli elettroni nucleari e dell'emissione dei raggi  $\beta$ , si incontrano, come è noto, due difficoltà principali. La prima dipende dal fatto che i raggi  $\beta$  primari vengono emessi dai nuclei con una distribuzione continua di velocità. Se non si vuole abbandonare il principio della conservazione dell'energia, si deve ammettere perciò che una frazione dell'energia che si libera nel processo di disintegrazione  $\beta$  sfugga alle nostre attuali possibilità di osservazione. Secondo la proposta di Pauli si può, ad esempio, ammettere l'esistenza di una nuova particella, **il così detto <neutrino>** avente carica elettrica nulla e massa dell'ordine di grandezza di quella dell'elettrone o minore. Si ammette poi che in ogni processo  $\beta$  vengano emessi simultaneamente un elettrone, che si osserva come raggio  $\beta$ , e un neutrino che sfugge all'osservazione portando seco una parte dell'energia. Nella presente teoria ci baseremo sopra l'ipotesi del neutrino.

Una seconda difficoltà per la teoria degli elettroni nucleari, dipende dal fatto che le attuali teorie relativistiche delle particelle leggere (elettroni o neutrini) non danno una soddisfacente spiegazione della possibilità che tali particelle vengano legate in orbite di dimensioni nucleari.


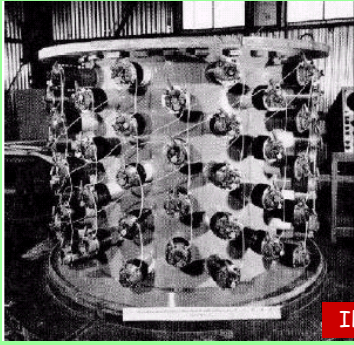


La scoperta del neutrino avvenne più di 20 anni dopo la sua nascita 'teorica' (Reines e Cowan 1956)

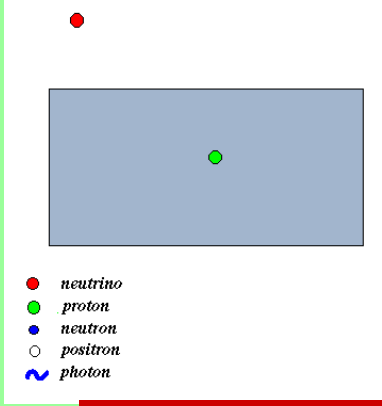


Un reattore nucleare è un notevole produttore di (anti)neutrini: circa  $5 \times 10^{20}$  per secondo! Un rivelatore posto nei pressi del reattore permette di osservare i frutti dell'interazione dei  $\bar{\nu}$  con la materia stessa del rivelatore. In particolare, i neutrini si identificano attraverso la rivelazione 'in coincidenza' di un positrone e di un neutrone: la reazione inversa del decadimento beta:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

Reines e Cowan nella sala controllo dell'esperimento


Il rivelatore di neutrini



Principio di rivelazione

- neutrino
- proton
- neutron
- positron
- ~ photon

### La scoperta del $\nu_\mu$



Shwartz  
Lederman  
Steinberger

Oggi sappiamo che un neutrino di tipo elettronico  $\nu_e$  interagendo con la materia produce un elettrone (correnti cariche):

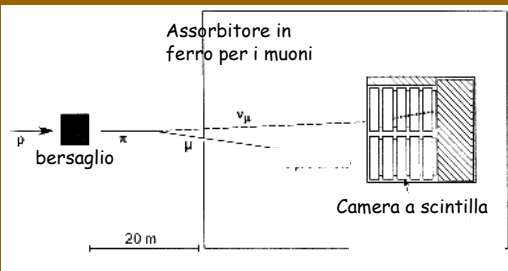
$$\nu_e + X \rightarrow e + X'$$

... e che un neutrino di tipo muonico  $\nu_\mu$  produce un muone e mai un elettrone:

$$\nu_\mu + X \rightarrow \mu + X'$$

**Schwartz, Lederman e Steinberger** ottennero il premio Nobel per il loro esperimento del 1962 all'acceleratore di Brookhaven che mostrò appunto che da un fascio di  $\nu_\mu$  vengono prodotti muoni e mai elettroni. Questa fu la prova che il neutrino elettronico è una particella diversa dal neutrino muonico.

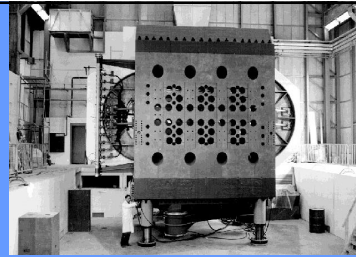
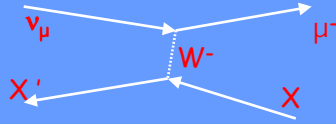
I neutrini  $\nu_\mu$  vennero ingegnosamente prodotti facendo decadere i pioni a loro volta generati nell'interazione di protoni con un bersaglio. Il rivelatore era una grande camera a scintilla, in grado di evidenziare la lunga traccia penetrante del muone prodotto dal  $\nu_\mu$ .





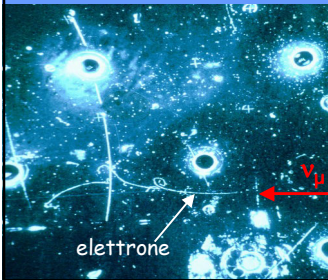
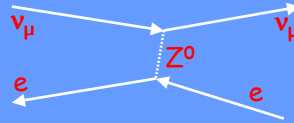
## La scoperta delle correnti neutre

L'interazione dei neutrini con la materia determina la creazione del leptone carico partner del neutrino ( $\nu_e \rightarrow e, \nu_\mu \rightarrow \mu$ ). Si parla in questo caso di **correnti cariche**, che avvengono attraverso lo scambio di una particella mediatrice: il **bosone  $W^+$  o  $W^-$** :



Gargamelle

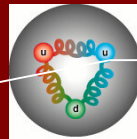
Tuttavia, la teoria di unificazione tra le interazioni elettromagnetiche e deboli sviluppata da Weinberg, Glashow e Salam prevedeva l'esistenza delle cosiddette **correnti neutre**, nelle quali il neutrino rimane tale e il mediatore è un bosone carico (la particella  $Z_0$ ):



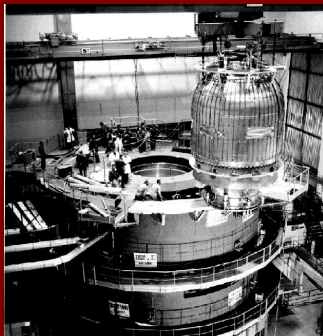
Le correnti neutre furono scoperte nel 1973 al CERN usando un fascio di neutrini muonici, prodotti facendo decadere mesoni carichi, e come rivelatore la camera a bolle Gargamelle. Una camera a bolle evidenzia le tracce delle particelle mediante una serie di piccole bollicine in un particolare gas liquefatto. A sinistra è mostrato uno degli eventi di corrente neutra: il  $\nu_\mu$  interagisce con un elettrone che viene diffuso e il neutrino non si trasforma in muone, restando invisibile.

## Esperimenti con fasci di neutrini da acceleratori di particelle

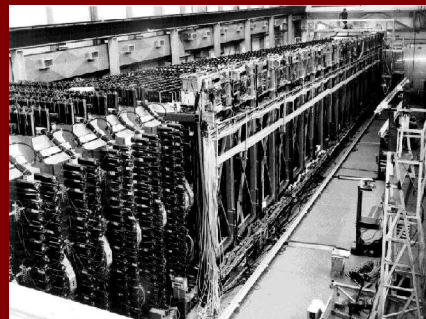
Tra gli anni '70 e '90 si consolidò la conoscenza della fisica del neutrino e delle sue proprietà attraverso una serie di complessi esperimenti realizzati utilizzando fasci di neutrini di alta energia prodotti da acceleratori di particelle. Esperimenti sono stati condotti al CERN, al Fermilab, a Brookhaven e in altri laboratori europei e americani. Usando i neutrini come proiettili, si è potuto anche studiare la struttura interna degli adroni (protoni, neutroni,...) confermando le predizioni del modello a quark.



$\nu_\mu$



La grande camera a bolle BEBC del CERN in fase di montaggio (anni '70)



Il rivelatore CHARM II del CERN ('85-'90) che ha permesso lo studio della teoria di unificazione elettrodebole mediante l'interazione neutrino-elettrone. Il rivelatore era costituito da 700 tonnellate di vetro (bersaglio per i neutrini) e da centinaia di piani di rivelatori a fili per la misura delle tracce delle particelle.

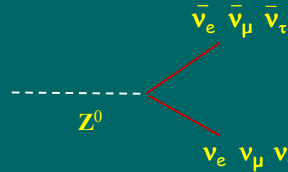
## Devono esistere solo 3 specie di neutrini !



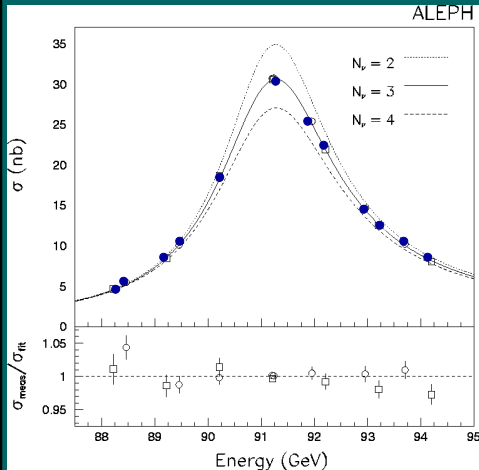
La larghezza in energia ( $\Delta E$ ) di una risonanza (particella), ad esempio quella del mediatore delle correnti neutre  $Z_0$ , è tanto maggiore quanto più numerosi sono i possibili canali di decadimento. Ciò è legato al Principio di Indeterminazione

$$\Delta E \times \Delta t = \text{costante}$$

Se aumentano le possibilità di decadimento, la vita media  $\Delta t$  diminuisce e  $\Delta E$  aumenta. Nell'ipotesi di tre soli neutrini, sono possibili, tra gli altri, i seguenti decadimenti in coppie neutrino-antineutrino:

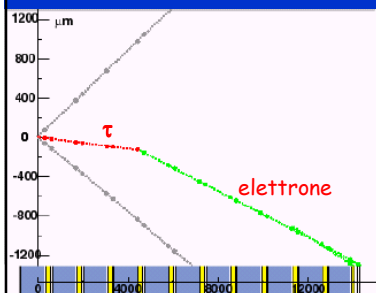
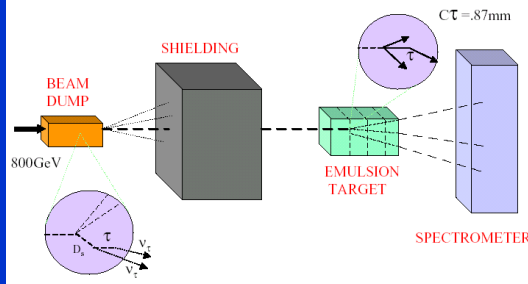


La misura effettuata al LEP del CERN ha mostrato che i punti sperimentali relativi alla misura della larghezza della  $Z_0$  sono interpolati dalla curva corrispondente a tre soli neutrini.

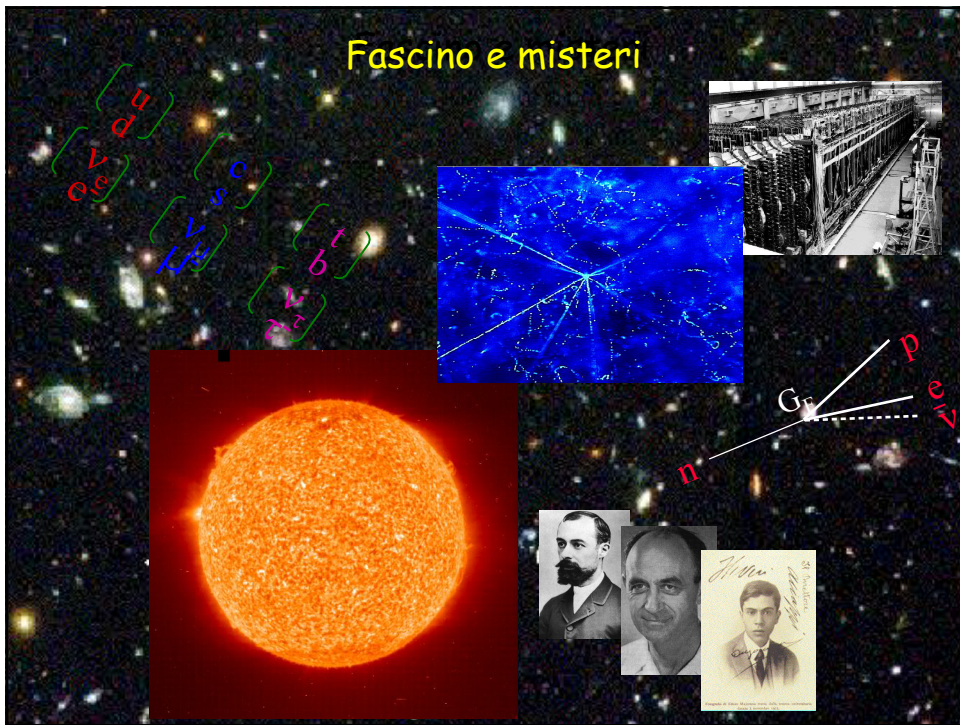


## Scoperta del $\nu_\tau$

L'esperimento DONUT si è recentemente concluso al FERMILAB. Suo scopo, la rivelazione diretta del neutrino del tau, identificando i prodotti della sua interazione (leptone  $\tau$ ) con un bersaglio attivo. La reazione cercata è la seguente:



L'identificazione del  $\tau$  è complicata dalla sua breve vita media ( $<$  qualche mm). In DONUT si sono usate perciò emulsioni nucleari, rivelatori ad altissima risoluzione spaziale (1 micron). A sinistra è mostrato uno degli eventi di segnale. Il  $\tau$  decade in elettrone dopo circa 4 mm.



La questione della massa del neutrino ha importanti implicazioni:

$m_\nu$

FISICA

ASTROFISICA

COSMOLOGIA

Ad esempio...

**Fisica**

L'esistenza di una massa non nulla per il neutrino aprirebbe un nuovo mondo per la fisica delle Particelle Elementari: renderebbe plausibile una teoria di **Unificazione di tutte le interazioni fondamentali** (elettrodebole, forte, gravitazionale) in una unica **Super Forza**, che sarebbe stata attiva nei primissimi istanti di vita dell'Universo. Ma ci sarebbero altre eccezionali implicazioni: la materia ordinaria potrebbe non essere stabile come oggi sembra. Sarebbe possibile il decadimento del protone e la conversione tra leptoni (come l'elettrone) in barioni (protone, neutrone,...). Si darebbe ulteriore supporto alle cosiddette teorie **Supersimmetriche** che predicono l'esistenza di tutta una serie di particelle ancora sconosciute, ma che soprattutto prevedono l'esistenza di una completa simmetria tra particelle (elettroni, quark,...) e mediatori (fotoni, gluoni, W, Z...).

**Astrofisica e Cosmologia**

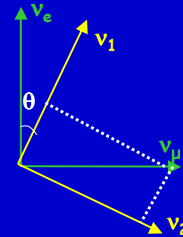
Dall'osservazione del moto delle galassie è stato possibile determinare che **solo il 10%** della massa dell'Universo è visibile o comunque costituito dalla materia ordinaria composta da atomi. Il rimanente **90% è chiamato Materia Oscura** perché invisibile.

Vi sono varie ipotesi, alcune molto fantasiose e affascinanti, per spiegare la natura della Materia Oscura: **buchi neri, particelle ancora sconosciute, o ancora... i nostri neutrini**. Dato il loro grande numero nell'Universo, infatti, se la massa di una data specie di neutrino fosse almeno 1/30000 di quella dell'elettrone, parte della Materia Oscura potrebbe essere costituita da neutrini e determinare **l'evoluzione futura dell'Universo**. Si capisce quindi l'importanza cosmologica della massa del neutrino.

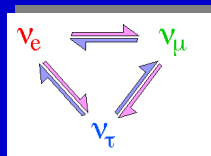


**Un modo astuto per provare che il neutrino ha una massa:  
verificare se esistono le OSCILLAZIONI DI NEUTRINO**

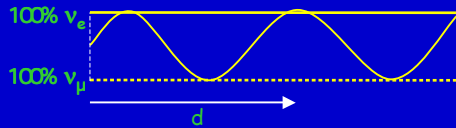
Nel 1962 Pontecorvo ipotizzò che i neutrini, se dotati di una pur piccola massa, possono essere soggetti alle cosiddette **oscillazioni di neutrino**. Si tratta di un fenomeno quantistico. Per spiegarlo, assumiamo per semplicità che si conoscano (come ai tempi di Pontecorvo) solo due tipi di neutrino (**autostati di sapore**), prodotti nei processi di interazioni deboli:  $\nu_e$  e  $\nu_\mu$ . Esisteranno allora anche due **autostati di massa**  $\nu_1$  e  $\nu_2$ . Ciascun autostato di sapore può essere espresso come combinazione lineare degli autostati di massa e viceversa. In maniera grafica abbiamo:



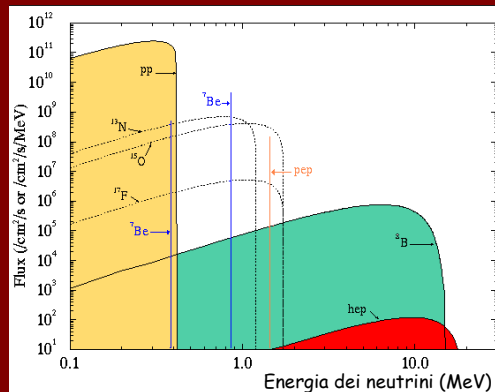
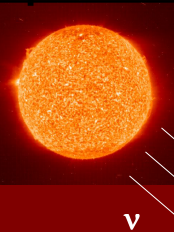
Se un dato autostato di sapore (diciamo un  $\nu_\mu$ ) viaggia nello spazio, i due autostati di massa che lo compongono si propagano come onde con frequenze diverse i cui valori dipendono dalle masse 1 e 2. Si crea quindi un fenomeno di interferenza per il quale periodicamente si passa dall'originario  $\nu_\mu$  combinazione di due autostati di massa, a un ben definito autostato di sapore, combinazione di due autostati di sapore  $\nu_\mu$  e  $\nu_e$ . Un rivelatore opportunamente posto potrebbe allora rivelare un  $\nu_e$  e non più un  $\nu_\mu$ .



La probabilità di questa transizione tra  $\nu_\mu$  e  $\nu_e$  ha carattere oscillatorio e dipende dall'angolo di mescolamento  $\theta$ , dalla distanza percorsa  $d$ , dall'energia del neutrino e dalla differenza (quadratica) delle masse 1 e 2.



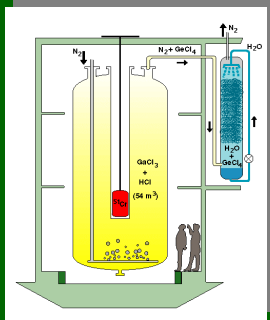
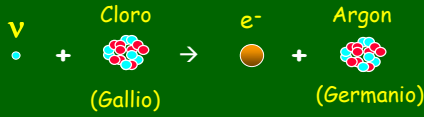
**Il mistero dei neutrini solari**



Abbiamo visto che il Sole e le altre stelle producono una gran quantità di neutrini (elettronici) nelle reazioni termonucleari che avvengono al loro interno. La distribuzione in energia di tali neutrini dipende da queste ben note reazioni e può essere calcolata, come mostrato nella figura. Si vede che gran parte (circa l'85%) del flusso di neutrini (giallo) è dovuto alla reazione di fusione protone-protone, che produce neutrini di energia minore di 0.5 MeV. Circa un 14% viene dalle 'righe' del Berillio (blu) e appena lo 0.02% dalle reazioni in cui si produce Boro (verde) a partire da Berillio, con energie relativamente alte (fino a 10 MeV).

**Ma gli esperimenti indicano che solo circa la metà dei  $\nu_e$  solari sono rivelati sulla Terra !**

### Come si rivelano i neutrini solari ?



Esperimento GALLEX al Lab. del Gran Sasso che per primo ha rivelato i neutrini provenienti dal Sole dalla reazione p-p

Ad esempio con esperimenti radio chimici: il neutrino interagisce con un elemento (es. Cloro o Gallio) e produce alcuni (pochi!) atomi di un altro elemento (Argon o Germanio), che essendo radioattivo può essere rivelato con opportuna estrazione. Tali esperimenti sono stati condotti a partire dagli anni '70 e, benché siano sensibili a neutrini di energia diversa, mostrano un chiaro deficit di neutrini rivelati.

Un altro esperimento, Super Kamiokande in Giappone, ha misurato il flusso di neutrini solari di alta energia, rivelando la luce prodotta dagli elettroni diffusi elasticamente dai neutrini:



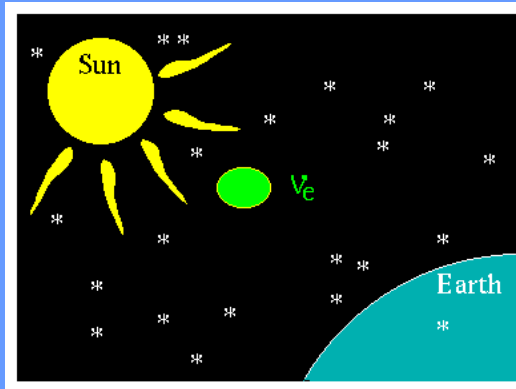
Gli elettroni sono quelli dell'acqua contenuta in una grande 'piscina' sotterranea profonda 50 m, le cui pareti sono ricoperte da rivelatori di luce (fotomoltiplicatori). La luce è prodotta dagli elettroni o da altre particelle che viaggiano ad alta velocità nell'acqua, a seguito della diffusione da parte del neutrino.

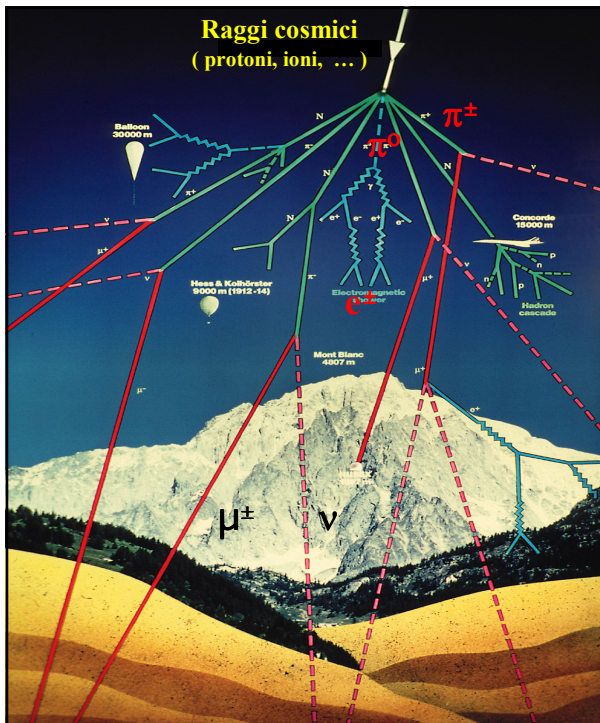


Interno del rivelatore Super Kamiokande

### L'oscillazione dei $\nu_e$ solari in un'altra specie ( $\nu_\mu$ ?) spiega il deficit dei neutrini solari

I rivelatori di neutrini solari sono sensibili ai neutrini elettronici (quelli che vengono dal Sole, appunto). Se tali neutrini *oscillassero* durante il loro viaggio dal Sole alla Terra, potrebbero, per valori opportuni dei parametri di oscillazione, arrivare come neutrini di **un tipo diverso** sulla Terra ( $\nu_\mu$  o  $\nu_\tau$ ) e non essere quindi rivelati. Ciò può produrre l'osservata mancanza di  $\nu_e$  rispetto alle predizioni della teoria. I risultati sperimentali ottenuti combinando le misure dei vari esperimenti **supportano fortemente** questa ipotesi.





Particelle elementari di altissima energia sono generate in lontane galassie. Esse raggiungono la Terra e interagiscono con l'atmosfera producendo tra l'altro neutrini

$$\nu_\mu \quad \nu_e$$

Il numero di neutrini muonici attesi è circa il doppio di quelli elettronici. Ma gli esperimenti hanno osservato un notevole deficit di  $\nu_\mu$  funzione dell'energia del neutrino e della distanza percorsa dal punto di produzione al rivelatore...

Cosa accade ai  $\nu_\mu$  ?

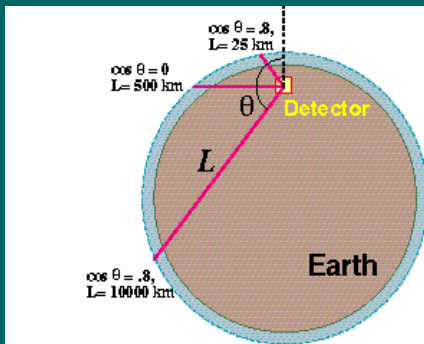
Con opportuni rivelatori (camere a scintilla) è possibile 'vedere' le tracce delle particelle 'cosmiche' che li attraversano. Al livello del mare, tali particelle sono essenzialmente muoni e neutrini che (essendo elettricamente neutri) non lasciano alcun segnale in tali rivelatori.

L'energia delle particelle primarie che producono sciami di raggi cosmici sulla Terra varia da circa un GeV fino all'incredibile energia di oltre  $10^{12}$  GeV. Tale valore equivale a 10 Joule, l'energia di una palla da tennis concentrata in una particella infinitesima! Uno dei misteri della fisica cosmica è quale può mai essere il metodo di accelerazione usato in una qualche profondità dell'Universo per fornire a una particella energie simili

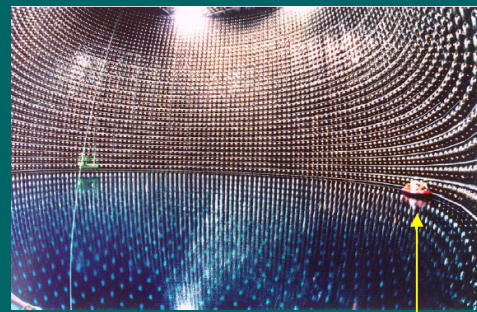
Ancora una volta, è possibile che queste particelle primarie di altissima energia siano neutrini.

## L'oscillazione dei neutrini atmosferici

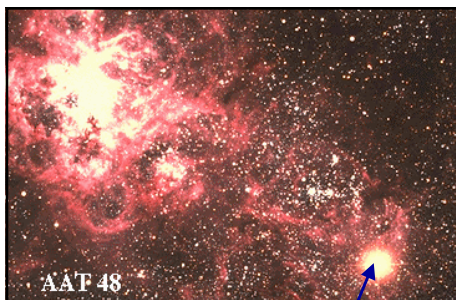
Come accade per i neutrini solari, anche il flusso dei neutrini prodotti nell'atmosfera terrestre mostra un deficit rispetto alle attese. In questo caso, l'ipotesi delle oscillazioni è ancora più plausibile. Il deficit riguarda infatti solo i neutrini muonici ( $\nu_\mu$ ) che verosimilmente oscillano in  $\nu_\tau$ , ai quali non sono sensibili i rivelatori terrestri. A supporto dell'ipotesi anche il fatto che la riduzione del flusso di  $\nu_\mu$  è funzione della distanza percorsa dal neutrino e dalla sua energia (come predetto dalla teoria delle oscillazioni). Neutrini che vengono dallo zenit percorrono una distanza pari circa allo spessore dell'atmosfera (20 km). Quelli provenienti dal basso (nadir) hanno percorso i 20 km di atmosfera agli antipodi più il diametro terrestre di circa 13000 km.



La misura più convincente dell'anomalia dei neutrini atmosferici è stata condotta dall'esperimento Super Kamiokande. Nella figura la grande piscina del rivelatore durante il suo riempimento con l'acqua.



Gommone galleggiante usato per la manutenzione dei fotomoltiplicatori durante il riempimento della piscina



Nebulosa Tarantula e Supernova 1987A nella Grande Nube di Magellano

Un'esplosione "vicina" (una ogni ~ 300 anni) che ha inondato la terra di neutrini

## Neutrini da Supernovae

~ 170000 anni luce

Luce e neutrini →



Nel 1987, in laboratori sotterranei:

- si sono osservati neutrini emessi nell'esplosione della Supernova 1987A
- dalla misura dei tempi di arrivo si è cercato di misurare la loro velocità e quindi la loro massa



## Presente e futuro della fisica del neutrino



L'attuale scenario della fisica del neutrino evidenzia il grande progresso ottenuto in 70 anni di ricerche dal momento della sua nascita ad oggi. Tuttavia, molti sono ancora i misteri e gli affascinanti interrogativi legati a questa elusiva particella:

- Si riuscirà ad evidenziare una massa per il neutrino mediante misure cinematiche dirette ?
- Sono le oscillazioni di neutrino la causa del deficit dei neutrini solari e atmosferici ?
- Contribuiscono i neutrini al puzzle della Materia Oscura dell'Universo ?
- Esistono sorgenti cosmiche di neutrini di altissima energia, si realizzerà il sogno dell'astronomia con neutrini ?
- Riuscirà infine il neutrino a svelare tutti i suoi misteri e ad aiutarci a rispondere alle eterne domande sull'origine dell'Universo e sulla sua evoluzione ?

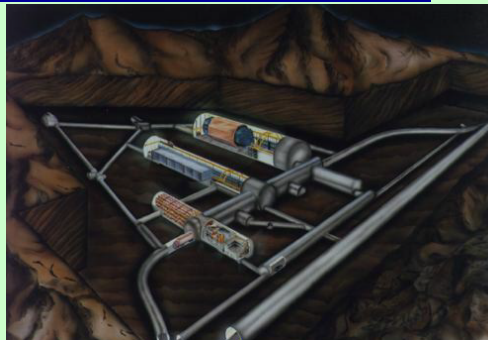
Questi formidabili interrogativi saranno affrontati nei prossimi anni con ambiziosi progetti di ricerca teorica e sperimentale da parte di gruppi di ricercatori in Italia e in tutto il mondo...

(seguono alcuni esempi, certamente non esaustivi!)

### Come provare che i neutrini solari oscillano ?

I risultati sul deficit dei neutrini solari sono molto interessanti: recentemente l'esperimento SNO in Canada sembra indicare che il modello teorico del Sole sia corretto e che effettivamente i neutrini elettronici 'si trasformano' in un altro tipo di neutrino. **Ma si tratta di oscillazioni ?**

Per rispondere a questa domanda, degli esperimenti in laboratori sotterranei cercheranno di evidenziare che la scomparsa dei neutrini solari elettronici è compatibile con le predizioni del processo di oscillazione. L'esperimento **KAMLAND** è in corso in Giappone, utilizzando i neutrini provenienti da reattori nucleari che dovrebbero simulare i neutrini solari. Al Laboratorio del Gran Sasso, invece, l'esperimento **BOREXINO** cercherà di rispondere alla domanda mediante una misura di precisione del flusso di neutrini solari. Questi sono solo alcuni degli esperimenti in programma o proposti per il futuro su questo argomento !



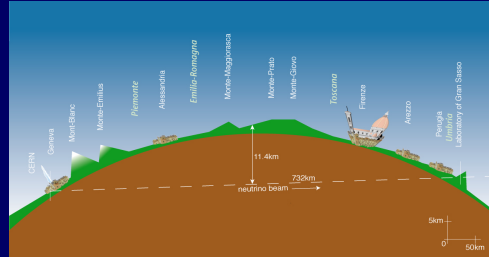
Il Laboratorio del Gran Sasso, costruito lungo un tunnel autostradale tra L'Aquila e Teramo, è costituito da tre grandi sale sperimentali sotterranee che ospitano (e ospiteranno) una serie di apparati per esperimenti di fisica, astrofisica e cosmologia. Il bassissimo 'rumore' indotto da raggi cosmici, schermati dalla roccia sovrastante, rende il laboratorio ideale per esperimenti con neutrini.

Parte dell'esperimento BOREXINO, che rivela l'interazione dei neutrini solari utilizzando un grande volume riempito di scintillatore liquido. Si tratta di una sostanza che al passaggio di particelle cariche produce luce che può essere rivelata.



## Fasci di neutrini su lunga banda: ovvero da Ginevra al Gran Sasso in 3 millisecondi !

I risultati sperimentali sul deficit di neutrini muonici atmosferici può essere interpretato in termini di oscillazioni di neutrino  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ . Per verificare questa possibilità si è pensato di realizzare dei fasci artificiali di neutrini (da acceleratori di particelle) in grado di ricostruire le stesse condizioni dei neutrini atmosferici con esperimenti di laboratorio (controllati). Abbiamo visto, infatti, che le oscillazioni sono funzione dalla distanza percorsa dal neutrino  $L$  e dalla sua energia  $E$ . Più precisamente la probabilità di oscillazione dipende dal rapporto  $E/L$ . Nel prossimo futuro, tre progetti in Giappone, in USA e in Europa dovrebbero dare una risposta a questo importante quesito.



Il progetto Europeo (CNGS) prevede l'invio di un fascio di  $\nu_\mu$  dal CERN di Ginevra al Laboratorio del Gran Sasso, distante 730 km. Nelle sale sperimentali sotterranee gli esperimenti OPERA e ICARUS cercheranno di evidenziare il debole segnale della comparsa di  $\nu_\tau$  provenienti dal processo di oscillazione.

Interno del rivelatore ICARUS. E' costituito da un grande volume di Argon liquefatto nel quale i neutrini interagiscono e le particelle prodotte creano ionizzazioni, producendo elettroni e ioni. I primi sono raccolti da camere a fili poste all'interno del volume producendo segnali elettrici che permettono la ricostruzione delle tracce delle particelle.

