

FISICA DEL NEUTRINO

Assunta di Vacri

Laboratori Nazionali del Gran Sasso

I decadimenti radioattivi



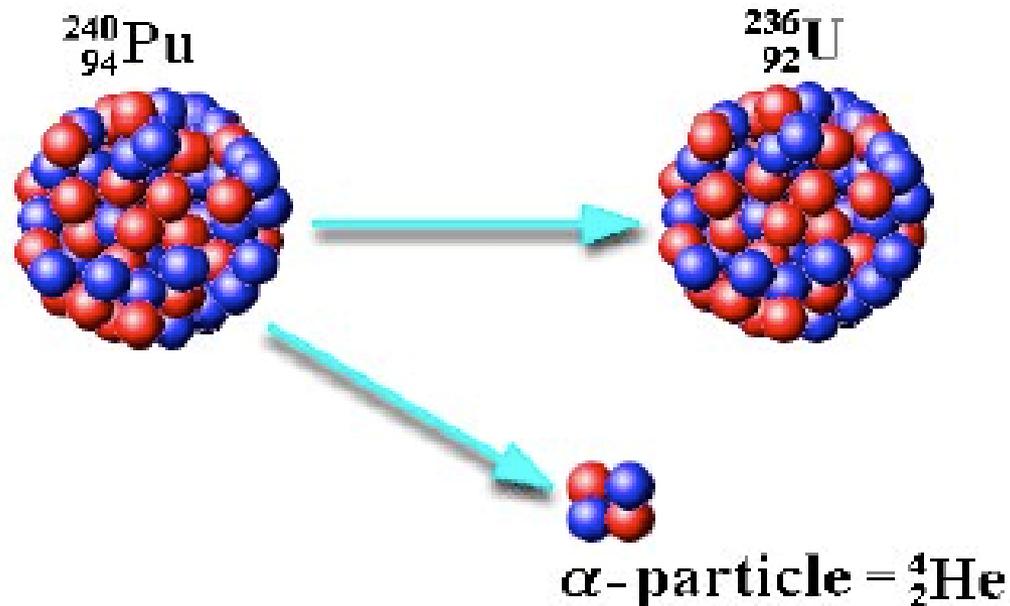
Il decadimento radioattivo è il processo con cui un nucleo instabile si trasforma spontaneamente in un altro nuclide più stabile.

Esistono **3 tipi di decadimenti radioattivi** a seconda del tipo di frammento emesso dal nucleo:

- ✓ Decadimento α ;
- ✓ Decadimento β ;
- ✓ Decadimento γ .

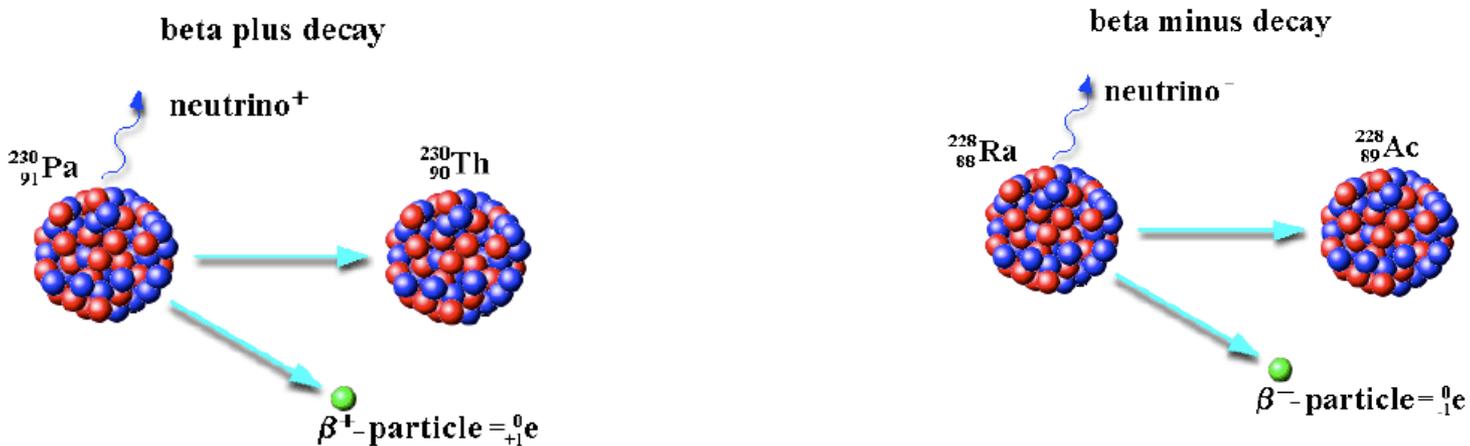
Decadimento α

- ✓ Una particella α è uguale al nucleo di un atomo di ${}^4_2\text{He}$: $2n + 2p$.
- ✓ Il nuclide che emette α diminuisce di 4 unità il numero di massa e di 2 unità il numero atomico.



Decadimento β

- ✓ Una particella β^- è uguale all'elettrone mentre una particella β^+ (positrone) è simile all'elettrone ma ha carica positiva
- ✓ Un nuclide che emette β^- trasforma un neutrone in un protone con la creazione di un e^- e di un neutrino. Mentre un nuclide che emette β^+ trasforma un protone in un neutrone.



Lo studio di questo decadimento portò all'ipotesi del neutrino!

1914-Osservazione dello spettro continuo dei decadimenti β^-

Disaccordo con la descrizione allora in voga:

Nucleo(A,Z)=sistema di A protoni+(A-Z) elettroni

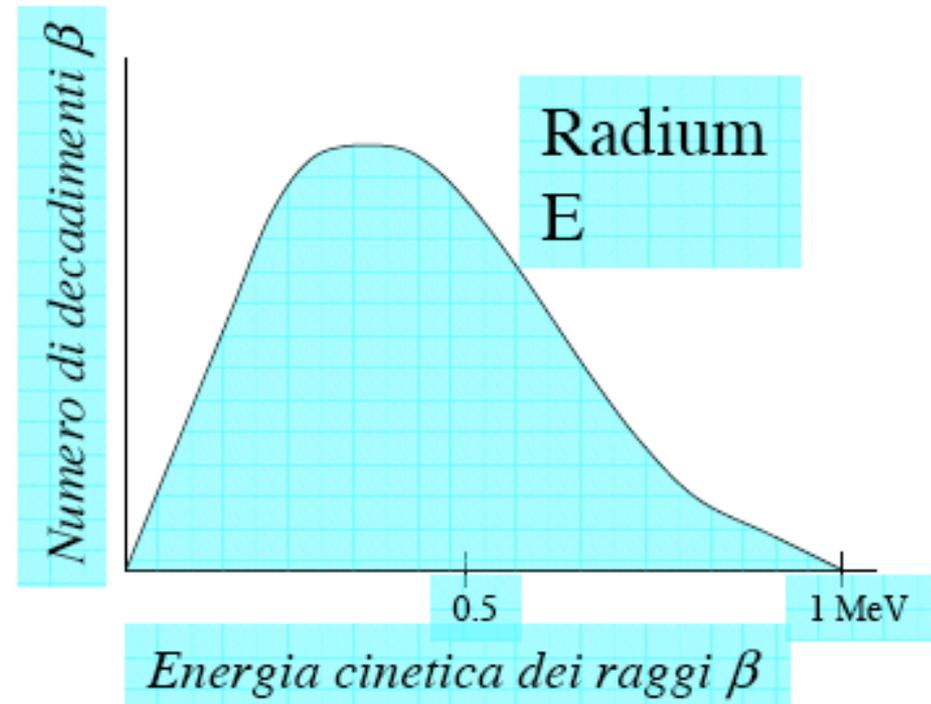
Cosa ci si attendeva per un decadimento β^-



Un decadimento a 2 corpi dovrebbe produrre elettroni monoenergetici di energia pari a

$\Delta m_{\text{nuclei}} \cdot c^2$, ma quello che si osservava era uno

spettro continuo:



Ulteriore problema con il modello nucleare

Dallo studio dello spettro Raman (Rasetti, 1929) della molecola di N risulta che $^{14}_7\text{N}$ è un bosone e dunque dovrebbe contenere un numero pari di fermioni. Anche il ^6_3Li ha momento angolare intrinseco (spin) intero. Ma il modello prevederebbe:

Li 6 protoni + 3 elettroni = 9 fermioni di spin 1/2

N 14 protoni + 7 elettroni = 21 fermioni di spin 1/2

Per risolvere questo problema bisognerà aspettare la scoperta del neutrone da parte di Chadwick!

Tentativi di spiegazione

- 1) Gli elettroni emessi subiscono interazioni secondarie nel nucleo, una parte dell'energia viene spesa per eccitare il nucleo (Lise Meitner). La successiva diseccitazione dovrebbe dare raggi γ . Ma misure calorimetriche su Radio (Ellis e Wooster, 1927) non hanno mostrato l'emissione di altra energia oltre a quella dell'elettrone.

Calore misurato/decadimento $\sim \langle E_{e^-} \rangle$

- 2) L'energia non si conserva nel decadimento β (N. Bohr)

Ci prova W. Pauli

1930

Zurigo, 4 dicembre 1930.

Care signore e signori radioattivi,

Vi prego di ascoltare con molta benevolenza il messaggero di questa lettera. Vi dirà che, come palliativo alla «cattiva» statistica dei nuclei N e Li^6 e lo spettro β continuo, io ho scoperto un rimedio insperato per salvare le leggi di conservazione dell'energia e la statistica.

Si tratta della possibilità di esistenza nei nuclei di particelle neutre di spin $1/2$ che obbediscano al principio di esclusione, ma differenti dai fotoni perché non si muovono alla velocità della luce, e che io chiamo **neutroni**. La massa dei neutroni dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza di quella degli elettroni e non deve in ogni caso superare 0.01 della massa del protone, in modo che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone sia costante.

Ammetto che il mio rimedio può sembrare inverosimile, perché si sarebbero dovuti vedere questi neutroni ben prima, se veramente esistono. Ma solo chi osa vince, e la gravità della situazione, dovuta alla natura continua dello spettro β , è chiarita da una osservazione del mio onorato predecessore Signor Debye, che mi diceva recentemente a Bruxelles: «Oh. È meglio non pensarci del tutto, come per le nuove tasse». D'ora in avanti occorre discutere seriamente tutti i lati del problema. Quindi, cara gente radioattiva, esaminate e giudicate.

Sfortunatamente non posso essere di persona a Tübingen, dato che la mia presenza è indispensabile qui per un ballo che avrà luogo nella notte dal 6 al 7 dicembre.

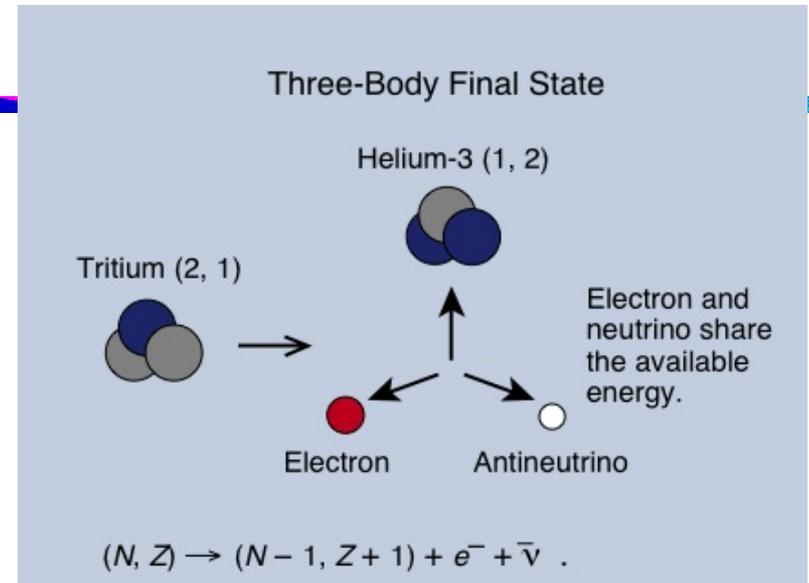
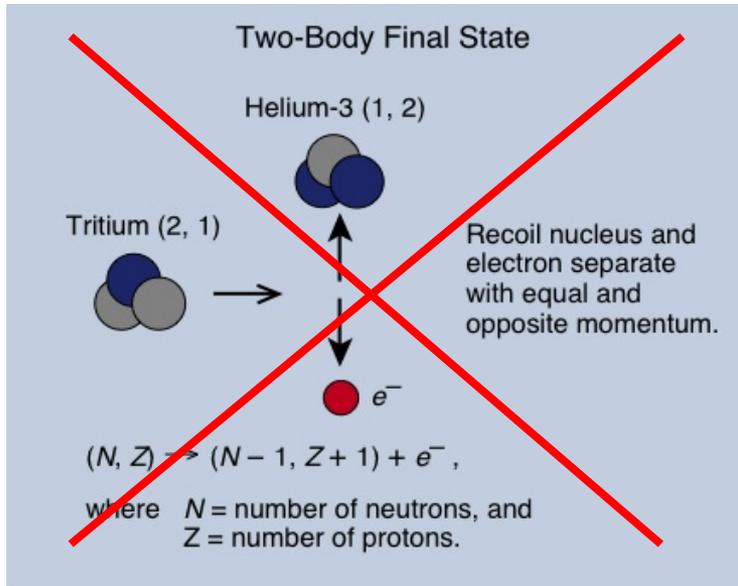
Il vostro devoto servitore

Wolfgang Pauli

Lettera aperta al gruppo dei Radioattivi in occasione della riunione della sezione di Tubinga della Società Tedesca di Fisica, traduzione dal tedesco

Si limitò solo a suggerirne l'esistenza, ma non pubblicò mai nulla perché, da buon conservatore quale era, pensava che l'esistenza di tale particella non si sarebbe mai potuta provare!

Qui inizia la lunga storia del neutrino, la sola particella tutta italiana!



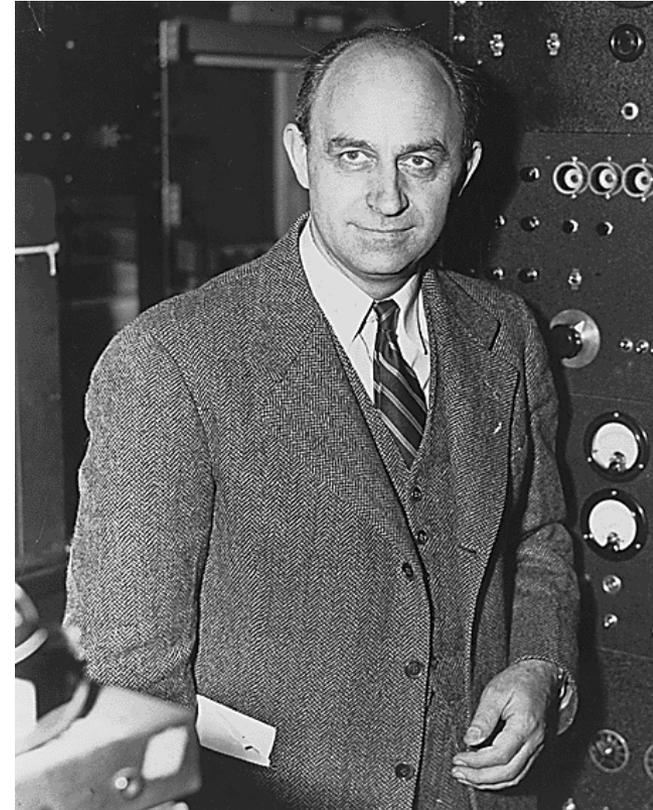
- 1) $E_e < E_{\text{disponibile}}$
 --> una nuova particella neutra (quindi invisibile), di spin 1/2 "ruba" E
- 2) $E_e \leq E_{\text{disponibile}}$ --> m molto piccola

Qui inizia la lunga storia del neutrino, la sola particella tutta italiana!

“No, il neutrone è grosso, questa particella è un piccolo neutrone, diciamo un *NEUTRINO*”

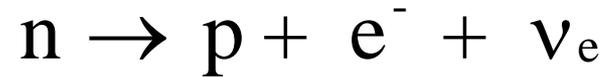
Con queste parole E. Fermi battezzava la nuova particella nata dall'idea di Pauli. Ma lui non ne è solo il “padrino”, a lui si deve il merito di aver concretizzato quell'idea incorporandola nella sua teoria che descrive l'interazione

la teoria di Fermi del decadimento β



1932-La teoria del decadimento β

Allora era chiaro che il processo che dava luogo ai neutrini era:



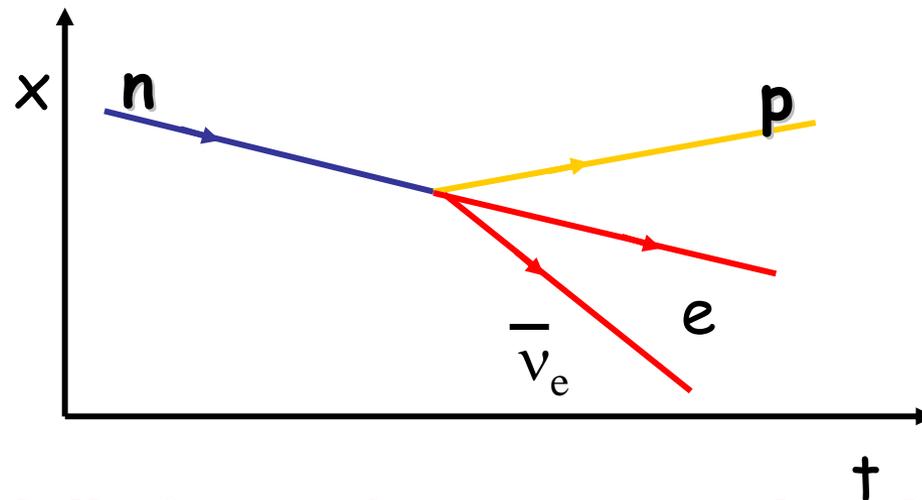
Si basa sul **parallelo con un processo di carattere elettromagnetico** in cui da un atomo eccitato

viene emessa radiazione elettromagnetica, cioè il fotone emesso nella diseccitazione.

Fermi ha l'intuizione di trasferire al nucleo atomico i concetti della fisica quantistica elaborati per spiegare le emissioni di quanti in conseguenza dei salti di e^{-} atomici tra un orbitale e l'altro. **Il p e il n sono i "due stati quantici" di una stessa particella, il nucleone.** Nel decadimento radioattivo, un nucleone si trasforma spontaneamente dallo stato di n a quello di p emettendo una coppia elettrone-neutrino.

1932-La teoria del decadimento β

Fermi costruisce una teoria semplice basata sull'esistenza di una **interazione puntiforme** tra 4 fermioni, caratterizzata da un'unica costante di accoppiamento:

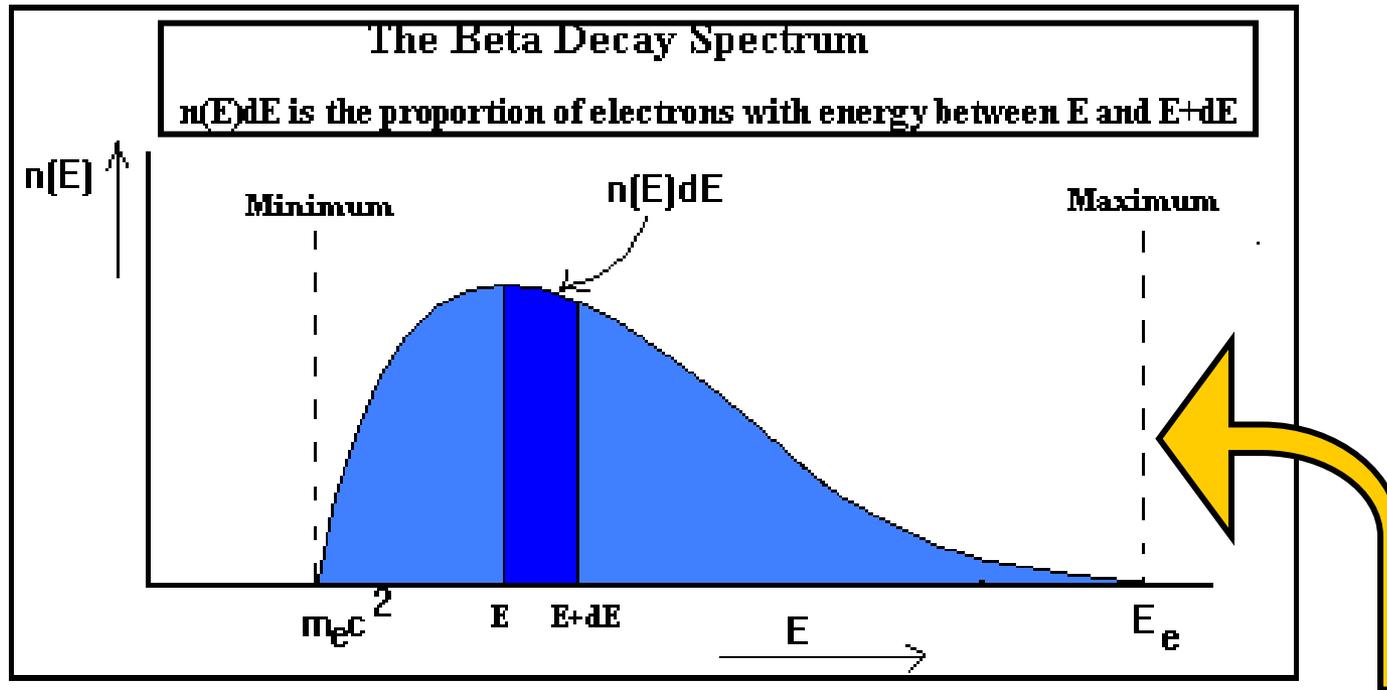


L'intensita' della forza e' proporzionale ad una quantita':

Costante di Fermi: $G_f = 1.166 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} (\text{hc})^3$

La teoria di Fermi convinse tutti i fisici dell'epoca, ma qualcuno doveva provare l'esistenza di quella particella. Per questo bisognava aspettare ancora circa 20 anni!

Tale teoria permise di calcolare la forma dello spettro dell'energia dell'elettrone emesso

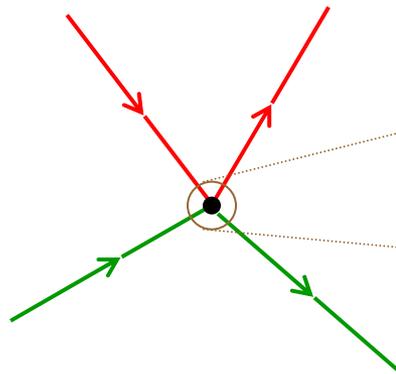


$$\frac{dN_a}{dE_a} \propto F(Z_D, E_a) E_a (E_0 - E_a)^2 \sqrt{E_a^2 - m_e^2 c^4} \left(1 - \frac{m_\nu^2 c^4}{(E_0 - E_a)^2} \right)^{1/2}$$

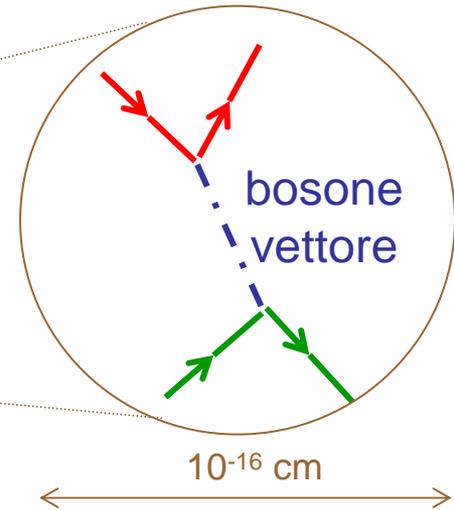
Valore dell'energia che avrebbe l'elettrone se non ci fosse il ν ...

tasso di decadimento: $\Gamma \propto G_f^2 \Delta E^5$
 $\Delta E = m_n - m_p - m_e$ (rilascio di energia)

Il decadimento β del neutrone secondo l'interazione elettro-debole come la conosciamo oggi



descrizione
moderna

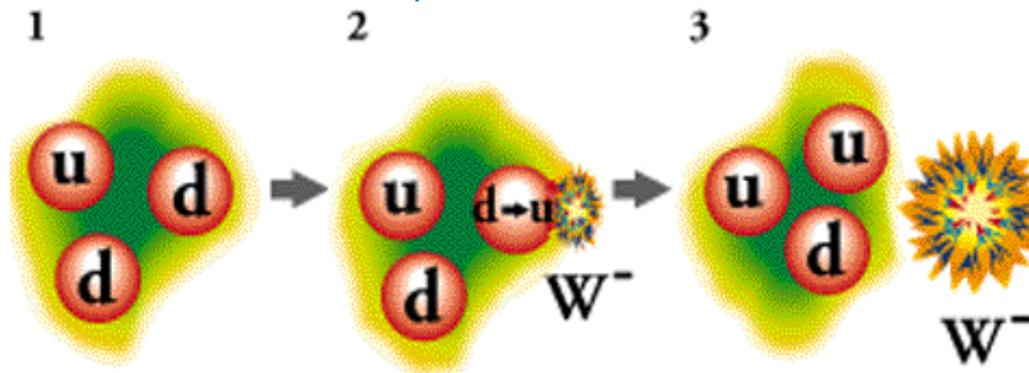


Ridefinizione della costante di Fermi

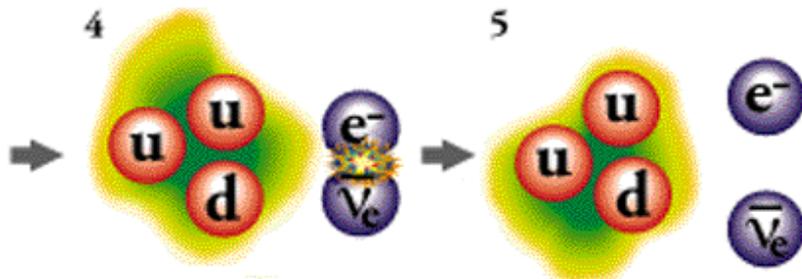
$$G_f = \sqrt{2} g^2 / (8 M_w^2)$$

in termini di una nuova costante "g"

Un neutrone (udd) decade in un protone (uud), un elettrone, e un antineutrino.



- 1) Un neutrone (carica = 0). E' fatto da un quark up, e due down.
- 2) Uno dei quark down si trasforma in un quark up. Dato che il down ha carica $-1/3$ e l'up $2/3$, per conservare la carica bisogna che il processo sia mediato da una particella W^- , che porti via una carica di -1 .
- 3) Il neutrone così è diventato un protone. La W^- emessa si allontana.



- 4) Un elettrone e un antineutrino prendono vita dal bosone virtuale W^-
- 5) Il protone, l'elettrone e l'antineutrino si allontanano l'uno dall'altro.

Una particella elusiva, un poltergeist



Pauli, 1931: "Ho fatto una cosa terribile, ho postulato l'esistenza di una particella che non può essere rivelata"

Bethe e Peierls, 1934: "Praticamente non c'è nessuna via possibile per osservare il neutrino."

Ma da cosa derivano queste osservazioni?

Sezione d'urto, σ

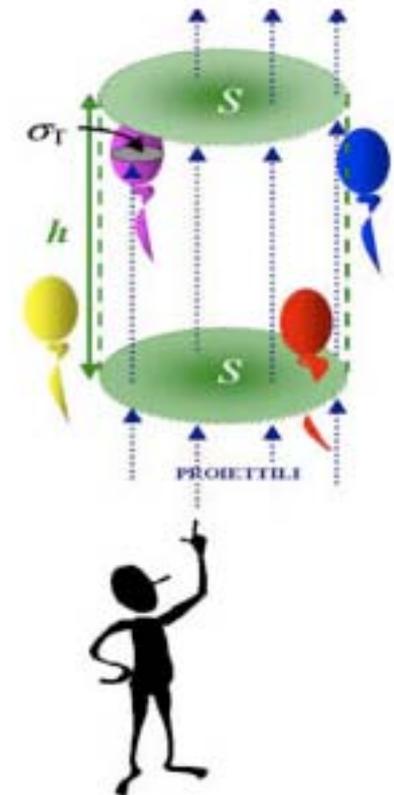
E' una grandezza che quantifica la probabilità di interazione tra due particelle. E' legata a:

- ✓ **natura delle particelle** che collidono;
- ✓ **forza** responsabile dell'interazione.

Intuitivamente ci si può rifare ad un esperimento che coinvolga dei proiettili e dei palloncini. La probabilità di colpire un palloncino dipenderà da 3 fattori:

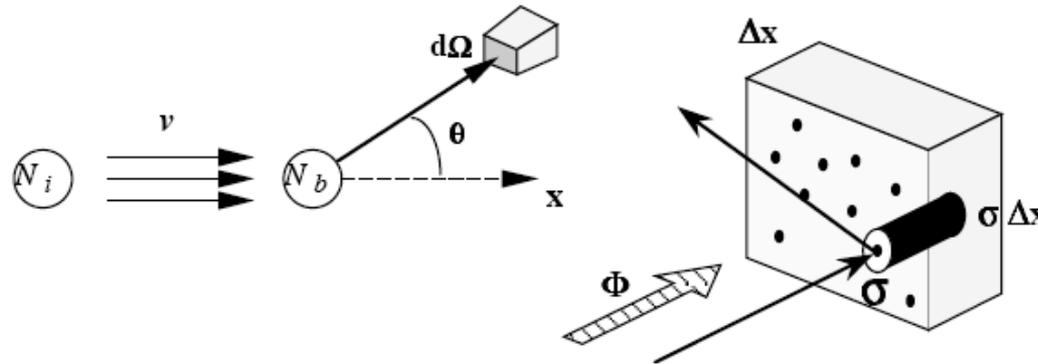
1. densità di palloncini
2. spessore dello strato di palloncini
3. sezione presentata nella direzione dei proiettili. La probabilità di colpire un palloncino sarà:

$$P = n S h \sigma_T / S = n h \sigma_T$$



Sezione d'urto (II)

Una particella urta un bersaglio a forma di parallelepipedo di spessore Δx e superficie S , costituito da tanti elementi (**CENTRI DIFFUSORI**) di sezione σ .



N^* =numero di centri diffusori visti entro una certa profondità Δx .
Nell' ipotesi $N^*\sigma \ll S$ (**spazio** entro il bersaglio sostanzialmente **vuoto**) la probabilità di un urto è:

$$N_u = (N^*\sigma/S) \cdot 1 \text{ particella.}$$

Se invece di 1 particella ne abbiamo N

$$N_u = (N^*\sigma/S) \cdot N.$$

Sezione d'urto (III)

Calcolando le derivate

$$\frac{\partial N_u}{\partial t} = \frac{N * \sigma}{S} \frac{\partial N_u}{\partial t}$$

Si definisce **sezione d'urto** quello che si ricava da questa espressione:

$$\sigma = \frac{\frac{\partial N_u}{\partial t}}{\frac{\partial N}{\partial t} \frac{N}{S}}$$

$$= \frac{\text{n urti per unità di t}}{\text{n di incidenti per unità di t} * \text{n centri diff. per unità di S}}$$

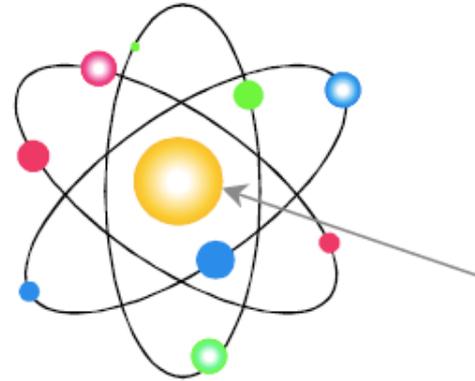
La sezione d'urto ha le dimensioni di un'area e viene normalmente espressa in barn:

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

“Interazione debole”

$$\begin{array}{c} \longrightarrow \\ \nu \\ \sigma \sim 10^{-44} \text{ cm}^2 \end{array}$$

diametro atomo $\sim 10^{-8} \text{ cm}$



diametro
nucleo
 $\sim 10^{-13} \text{ cm}$

Il Neutrino ha una probabilità piccolissima di interagire con la materia

Probabilità di interazione degli ν

Si definisce **cammino libero medio** di una particella che interagisca con **sezione d'urto totale** σ , in un materiale contenente **n particelle bersaglio per unità di volume**, la quantità

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \quad \text{dove} \quad n = \frac{N}{A} \rho$$

(con un fattore 2 nel caso dell'idrogeno e quindi dell'acqua) è il numero di protoni liberi nel mezzo, N è il numero di Avogadro ($6.02 \cdot 10^{23}$ moli⁻¹), A è la massa di una mole di materiale. Nel caso dell'acqua:

$$\lambda = \frac{A}{2 \cdot N \cdot \sigma} = \frac{18 \text{ g}}{2 \cdot 6 \cdot 10^{23} \times 10^{44}} = 1.5 \times 10^{21} \text{ cm} = 1585 \text{ anni luce}$$

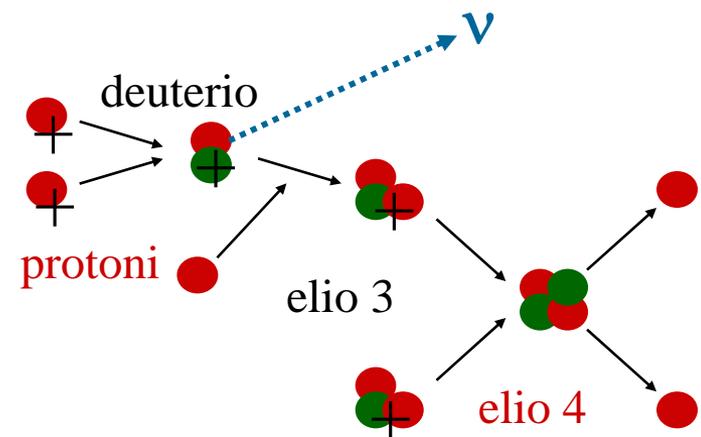
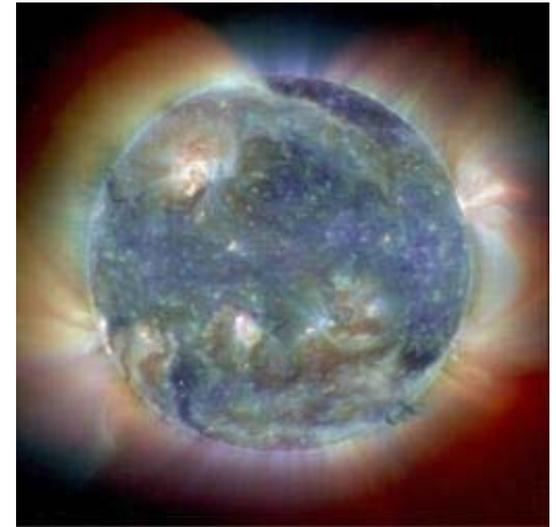
La **probabilità di interazione** di un neutrino in uno spessore di **$L=1$ m di acqua** sarà:

$$P(L) = 1 - \exp(-L/\lambda) \sim L/\lambda \sim 6.7 \cdot 10^{-20}$$

I neutrini dal sole: il ciclo pp

Bethe (1938) propone uno schema di reazioni nucleari per il Sole

- Il **ciclo fondamentale è quello pp**
- Il ciclo CNO contribuisce solo per qualche %
- Durante il ciclo pp, **4 protoni si trasformano in ^4He** con una catena di trasformazioni mediate dalla forza debole e che quindi comportano **l'emissione di neutrini**
- Ogni ciclo produce energia pari alla differenza fra la massa di un nucleo di ^4He e quella di 4 protoni
✓ $E = 4M_p - M(^4\text{He}) = 26 \text{ MeV} = 4.2 \cdot 10^{-12} \text{ J}$



Come sappiamo che il Sole emette neutrini

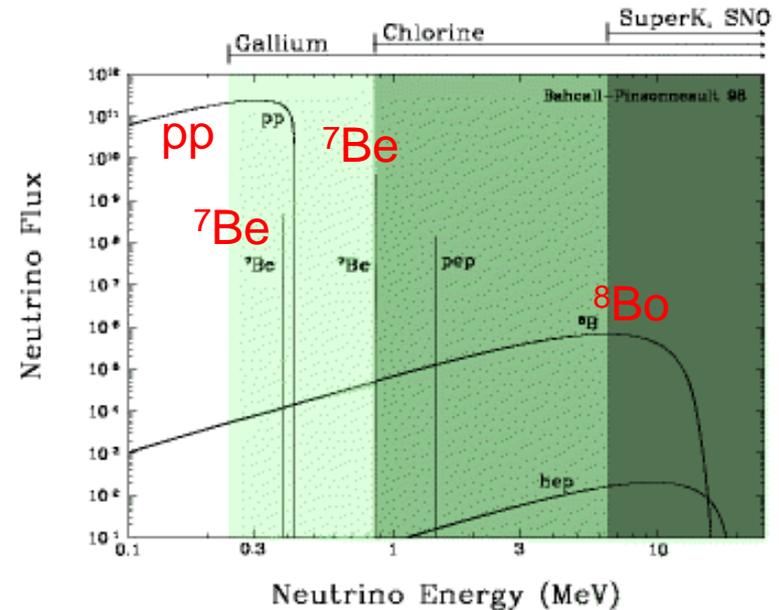
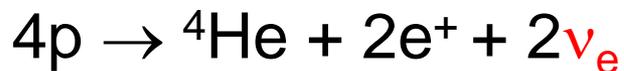
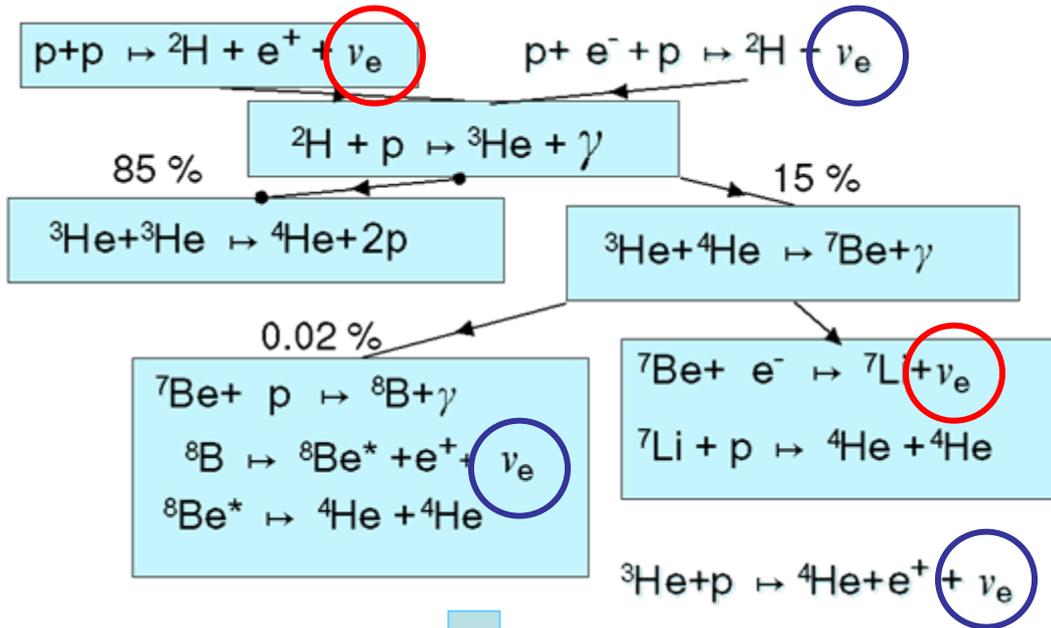
- Il Sole emette enormi quantità di neutrini
 - Circa $6 \times 10^{10} = 6 \times 100000000000$ neutrini/s per cm^2
 - Il flusso dei neutrini solari è stato misurato con precisione a diverse energie
 - Le misure hanno confermato il flusso di neutrini, anche se per molto tempo c'è stata una discrepanza di circa un fattore 2
 - Oggi sappiamo che la discrepanza NON è legata alla fisica del Sole ma a una nuova proprietà dei neutrini che è stata scoperta proprio studiando il flusso di neutrini solari: le oscillazioni dei neutrini
- ✓ Una misura astronomica ci ha insegnato qualcosa sulla materia
- ✓ Non sarebbe stato possibile capire il Sole senza la fisica nucleare

I neutrini solari: lo spettro

ciclo protone-protone



spettro e soglie
degli esperimenti principali

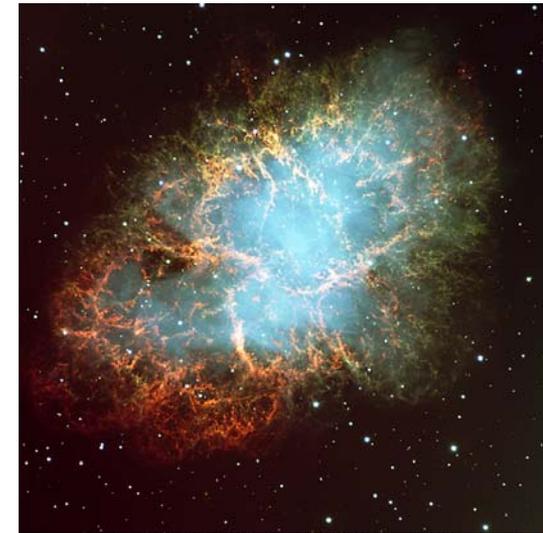


predizione del
Modello Solare Standard (SSM)
(J. Bahcall)

Come sappiamo che le stelle emettono neutrini

I neutrini della supernova 1987 A

- Una supernova è un fenomeno esplosivo con cui le stelle pesanti concludono la loro vita
- Nel 1987 una supernova esplose nella Piccola Nube di Magellano, una piccola galassia satellite della nostra
 - ✓ Dista circa 100.000 anni luce, $9.46 \cdot 10^{17}$ Km
- In quel momento, tre rivelatori di neutrini solari stavano prendendo dati
 - ✓ 2 di essi, IMB e Kamiokande, distanti fra loro più di 10000 Km, rilevano un equivocabile segnale di neutrini
 - ✓ 11 neutrini rivelati in circa 10 s
 - ✓ E' un successo clamoroso: il modello teorico delle supernove, elaborato solo sulla base di considerazioni teoriche e sulle conoscenze di fisica nucleare sviluppate nei laboratori terrestri, è pienamente confermato.



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORSZ)

ISO PR Photo 40599 (17 November 1999)

© European Southern Observatory



Neutrini dal centro della Terra (I)



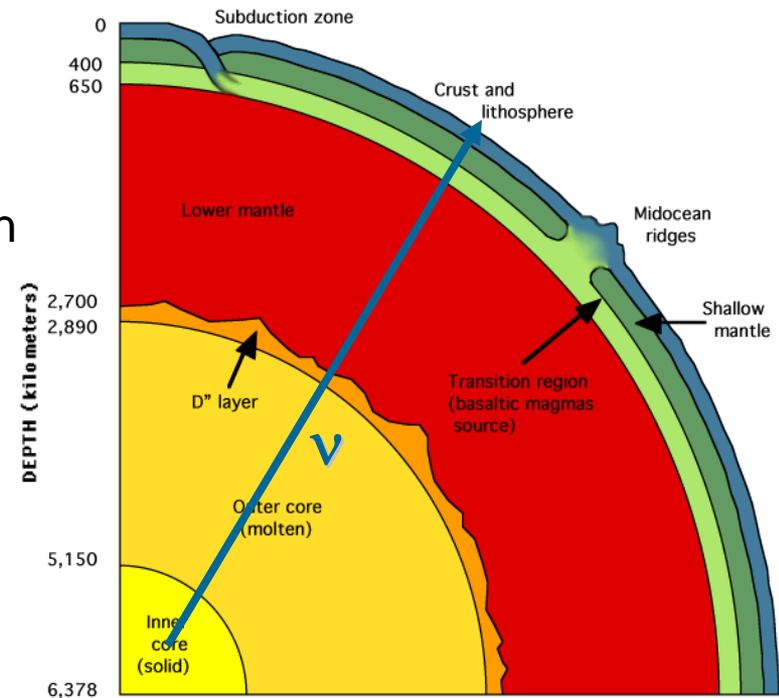
- Il pianeta Terra ha un nucleo ferroso interno caldo
 - Vulcani, fenomeni geotermici
 - La temperatura delle caverne sale rapidamente scendendo di quota
- Da dove viene questo calore ?
 - Nell'800 William Thomson (Lord Kelvin) calcolò l'età della Terra per dimostrare che la teoria Darwiniana dell'evoluzione era falsa
 - ✓ Assunse che la Terra all'origine del sistema solare fosse una palla di roccia fusa e che il calore fosse il residuo di questo stato iniziale
 - ✓ Trovò che la Terra dovesse avere un'età non superiore a 100.000.000 di anni, troppo poco per dare alla vita il tempo di svilupparsi secondo la teoria di Darwin
 - ✓ Thomson calcolò anche la vita del Sole, assumendo che l'energia solare fosse dovuta all'energia gravitazionale, e anche qui trovò un numero consistente.
 - **Entrambi i calcoli erano sbagliati.**

Neutrini dal centro della Terra (II)

- Lord Kelvin non poteva sapere che sia nel Sole sia all'interno del nostro pianeta la maggiore fonte di energia è di origine nucleare
 - Abbiamo visto che il Sole sta acceso per il ciclo di fusione nucleare pp
 - La Terra è rimasta calda per 5 miliardi di anni perchè al suo interno avvengono continue reazioni di decadimento radioattivo di vari nuclei, principalmente Uranio e Torio
 - ✓ Ogni decadimento radioattivo produce un pò di energia che si dissipa in calore
 - ✓ Anche se poca, questa energia si accumula all'interno e si sposta verso l'esterno solo attraverso il lento processo della conduzione del calore per cui il centro della Terra è caldo (parecchie migliaia di gradi)
 - Possiamo verificare questa teoria senza fare un viaggio al centro della Terra ?
 - ✓ Forse sì, ancora grazie ai neutrini....

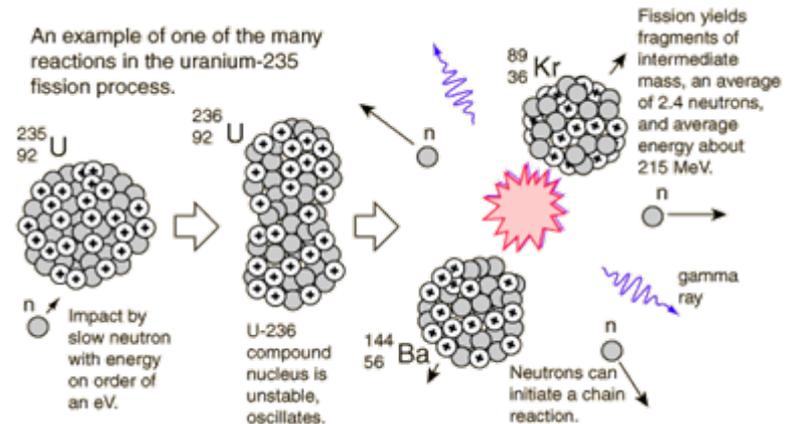
Neutrini dal centro della Terra (III)

- L'ipotesi che l'energia termica prodotta all'interno del nostro pianeta sia di origine nucleare può essere verificata sperimentalmente osservando i neutrini che in tal caso DEVONO essere prodotti
 - La radioattività β emette neutrini
 - I decadimenti dell'U e del Th sono anche di tipo β
 - ✓ La Terra è una debole sorgente di neutrini
 - ✓ Due rivelatori attualmente in costruzione, uno in Giappone, un secondo in Italia, possono misurare questo flusso e confermare o smentire il modello geofisico



I reattori nucleari come sorgenti di $\bar{\nu}$

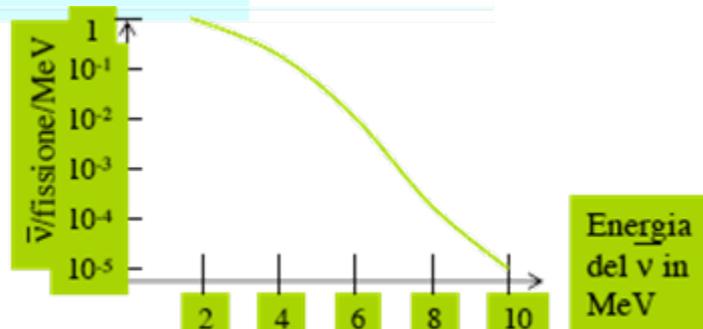
Una tipica reazione di fissione produce 2 nuclei arricchiti in neutroni, dei neutroni liberi, e circa 200 MeV.



I due nuclei figli hanno troppi neutroni per essere stabili e si trasformano in nuclei “stabili” attraverso una cascata di decadimenti β producendo mediamente 6 $\bar{\nu}$ per reazione di fissione al secondo:

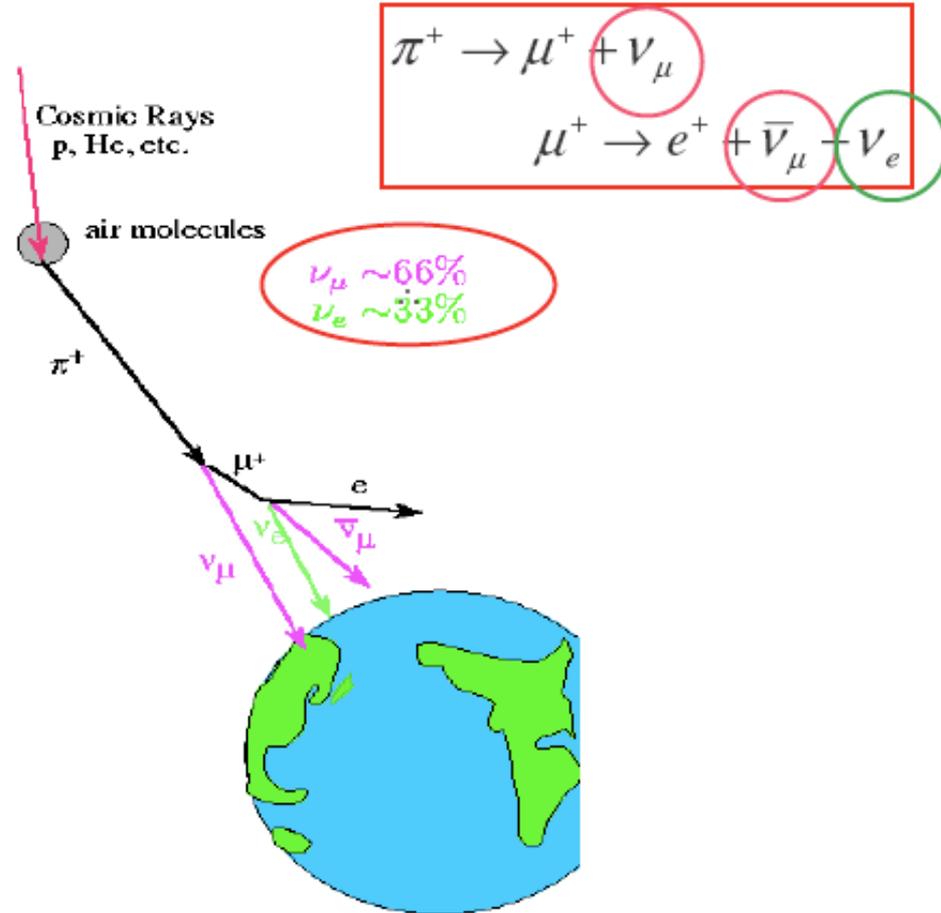
$$N_{\bar{\nu}}(s^{-1}) = 6N_{Fiss}(s^{-1}) = 6 \frac{P(W)}{1.6 \times 10^{-13} (J / MeV) \times 200 MeV} \approx 2 \times 10^{11} P(s^{-1})$$

Per $P = 3 \text{ GW}$ si hanno circa $6 \times 10^{20} \bar{\nu}$ al secondo emessi su tutto l'angolo solido



I ν atmosferici

La Terra è costantemente bombardata dai **raggi cosmici**: nuclei di H, He o più pesanti che colpiscono l'atmosfera causando una **pioggia di particelle secondarie**, circa **100 particelle cariche per metro quadro al secondo!** Nell'interazione dei raggi cosmici con la nostra atmosfera vengono prodotti dei neutrini, sia di tipo elettronico che di tipo muonico di energie anche molto elevate, fino a 10^{20} eV.



I tre sapori

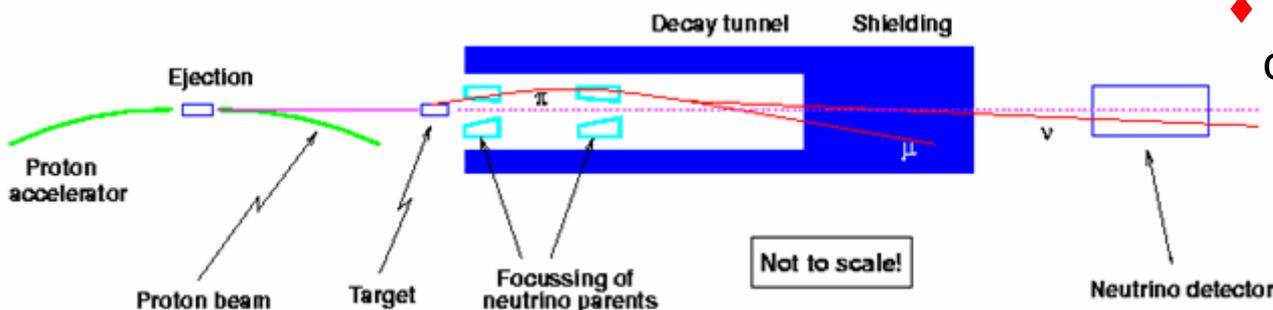
A ciascun leptone carico corrisponde un diverso tipo di neutrino:

ν_e	ν_μ	ν_τ
e	μ	τ

I tre sapori sono fenomenologicamente ben distinti

Sperimentalmente, si producono fasci di neutrini di alta energia:

p su bersaglio $\rightarrow \pi, K \rightarrow \mu + \nu$



◆ Steinberger et al. osservano che i neutrini interagiscono nel rivelatore producendo μ e non e (1962)

La massa

Non si hanno per ora **evidenze dirette** di una massa finita per nessuno dei tre tipi di neutrino.



Le masse dei neutrini, se finite, sono **molto più piccole** di quelle dei corrispondenti leptoni carichi (**Fermi, 1932**)

Gli attuali limiti sperimentali sono:

$$\nu_e: \quad m < 2.2 \text{ eV}$$

$$\nu_\mu: \quad m < 0.17 \text{ MeV}$$

$$\nu_\tau: \quad m < 15.5 \text{ MeV}$$

da considerazioni di carattere cosmologico:



$$m_\nu < 1 \text{ eV}$$

Se i neutrini hanno masse finite, allora sono possibili in linea generale

tre autostati di **massa**
distinti dai tre autostati di **sapore**

$$\nu_1 - \nu_2 - \nu_3$$

$$\nu_e - \nu_\mu - \nu_\tau$$

Oscillazione di neutrini



- L'idea che i neutrini potessero avere una massa è stata suggerita per la prima volta da B. Pontecorvo nel 1957

I neutrini sono creati o annichilano come autostati dell'interazione debole

$|\nu_e\rangle, |\nu_\mu\rangle, |\nu_\tau\rangle$ = autostati dell'interazione debole
 $|\nu_1\rangle, |\nu_2\rangle, |\nu_3\rangle$ = autostati di massa

I neutrini propagano come una sovrapposizione di autostati di massa

Gli autostati di sapore e gli autostati di massa

Una trasformazione connette gli **autostati di sapore** agli **autostati di massa**:

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

$|\nu_e\rangle$ e' un autostato di sapore che viene prodotto nelle interazioni deboli, ed e' una combinazione lineare degli autostati di massa, i coefficienti della combinazione sono dati dalla prima riga della matrice di mixing.

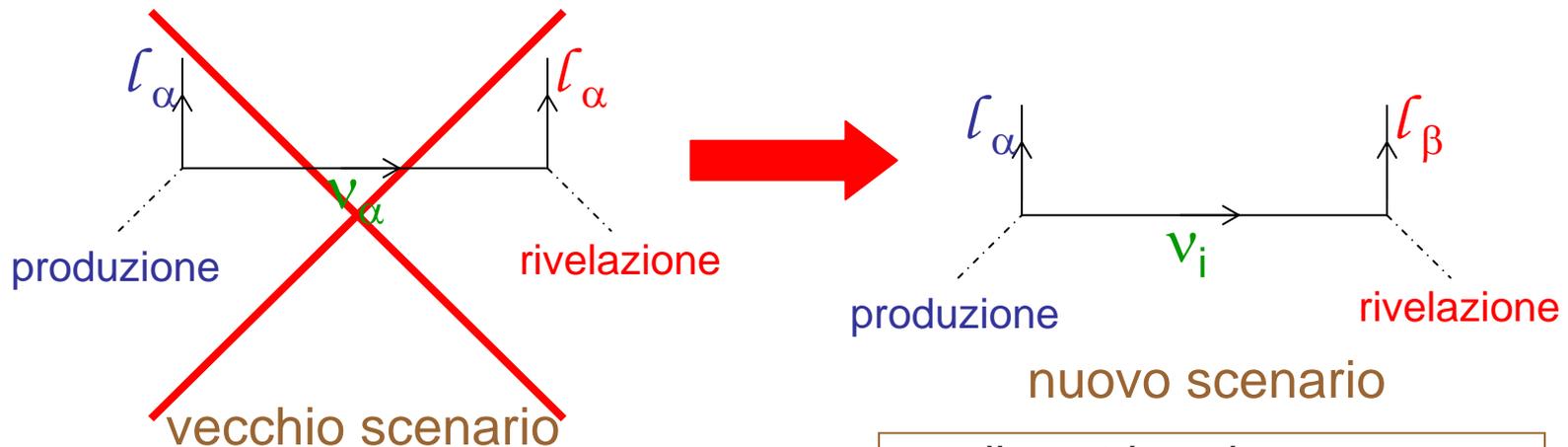
La matrice viene detta "matrice di mixing dei neutrini" o "matrice di Pontecorvo, Maki, Nakagawa, Sakata"

Questi parametri (gli elementi della matrice di mixing) vanno misurati **sperimentalmente**

Le oscillazioni

Autostato di sapore = sovrapposizione di autostati di massa

un neutrino prodotto insieme a un leptone carico si trova in un **autostato di sapore** che è una **sovrapposizione di autostati di massa** (“mixing”)



il neutrino si propaga attraverso gli **stati invisibili** $|\nu_i\rangle$

Un caso limite notevole

2 leptoni carichi si accoppiano solo a 2 neutrini massivi

sottomatrice di U parametrizzabile
con un unico angolo ϑ
oscillazione a 2 sapori

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta \\ -\sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{bmatrix}$$

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27 \delta M^2(\text{eV}^2) \frac{L(\text{km})}{E(\text{GeV})})$$

Sorgenti di neutrini

Ci sono 4 tipi di sorgenti di neutrini rilevanti per le oscillazioni:

	reazione	L(km)	E(GeV)	L / E (km/GeV)	minimo δM^2 esplorabile (eV ²)	
sole (scomparsa)	$p+p \rightarrow d+e^++\nu_e$	10^8	10^{-3}	10^{11}	10^{-11}	
atmosfera (scomparsa)	$p+N \rightarrow \pi+\text{adroni}$ $\pi^+ \rightarrow \mu^++\nu_\mu$ \downarrow $e^++\nu_e+\bar{\nu}_\mu$ $\pi^- \rightarrow \dots + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$	10^4	1	10^4	10^{-4}	
reattori (scomparsa)	$(A,Z) \rightarrow (A,Z+1)+e^-+\bar{\nu}_e$	1	10^{-3}	10^3	10^{-3}	
acceleratori (apparizione e scomparsa)	$p+N \rightarrow \pi+\text{adroni}$	10^3	10	10^2	10^{-2}	“long baseline”
	$\pi^+, K^+ \rightarrow \mu^++\nu_\mu$ $\pi^-, K^- \rightarrow \mu^-+\bar{\nu}_\mu$	1	1	1	1	“short baseline”

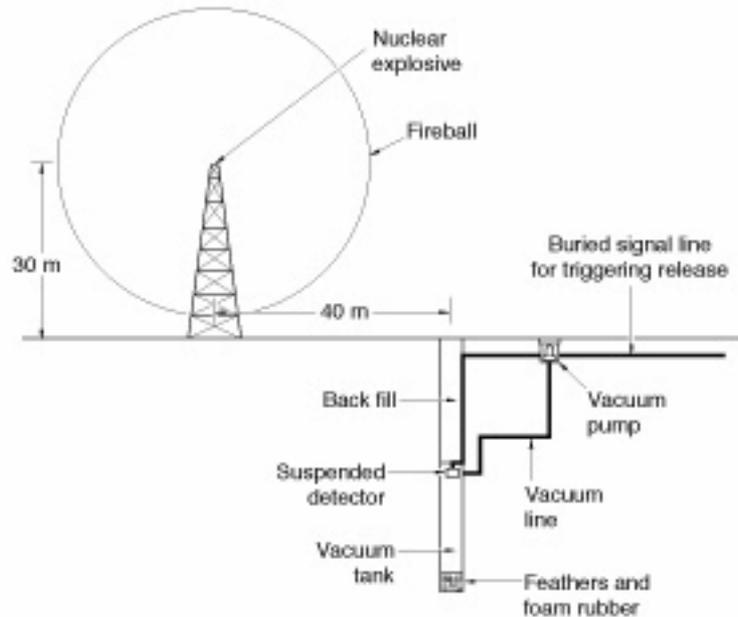
Idea per rivelare questa elusiva particella

β -inverso \rightarrow una possibilità per il rivelare il neutrino attraverso la rivelazione dei prodotti:___



Possibile sorgente di anti- ν_e : *un'esplosione atomica*

L'idea di F. Reines & C. Cowan: "El Mostro"



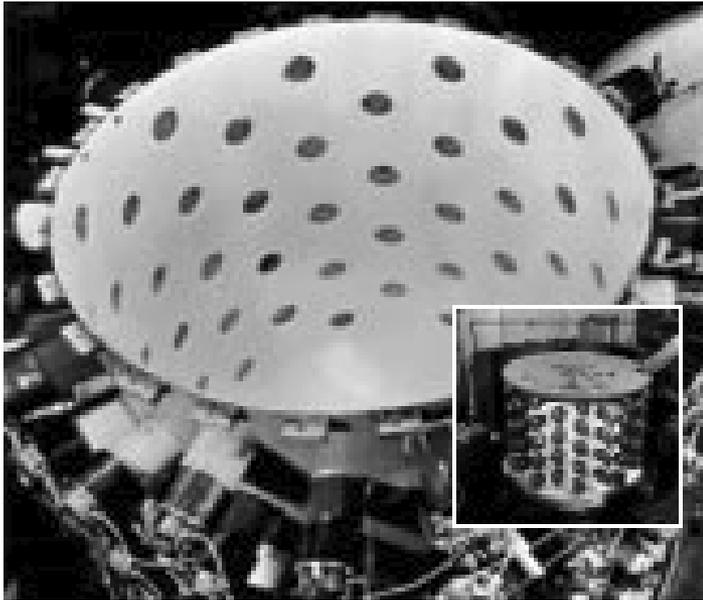
Rimase solo un'idea...ma era stata approvata dalle autorità del laboratorio di Los Alamos dove si sarebbe dovuto svolgere.

Il I esperimento per rivelare il $\bar{\nu}_e$

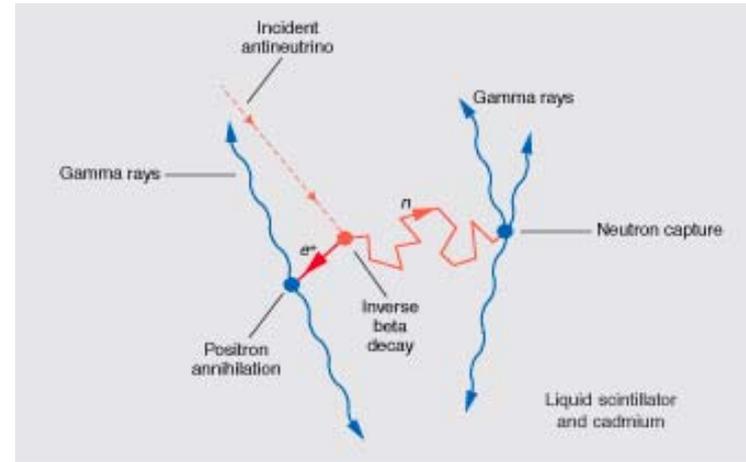
Una sorgente piú sicura di anti- ν_e : *un reattore nucleare*

Ancora F. Reines & C. Cowan:

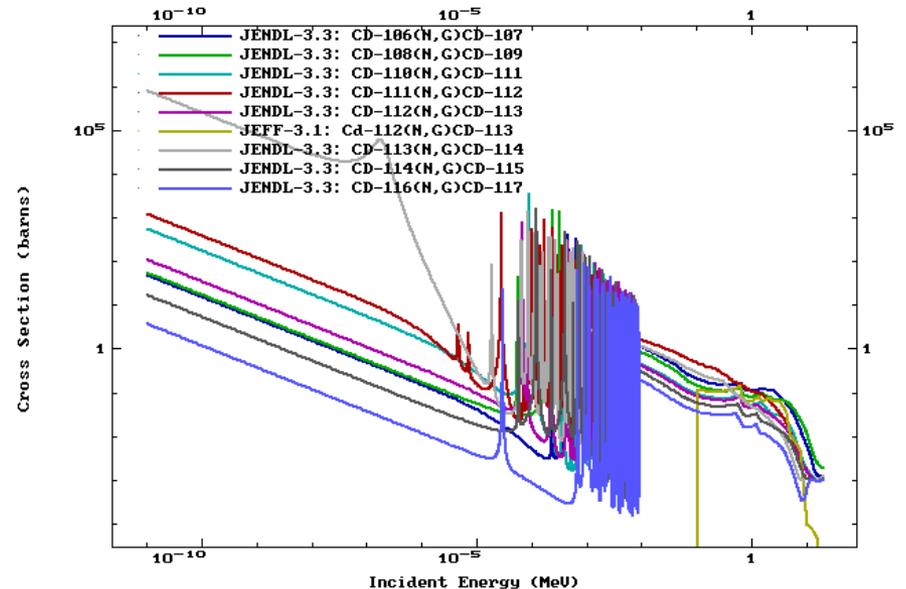
1953 Hanford (Washington)



300 l scintillatore organico drogato con Cd

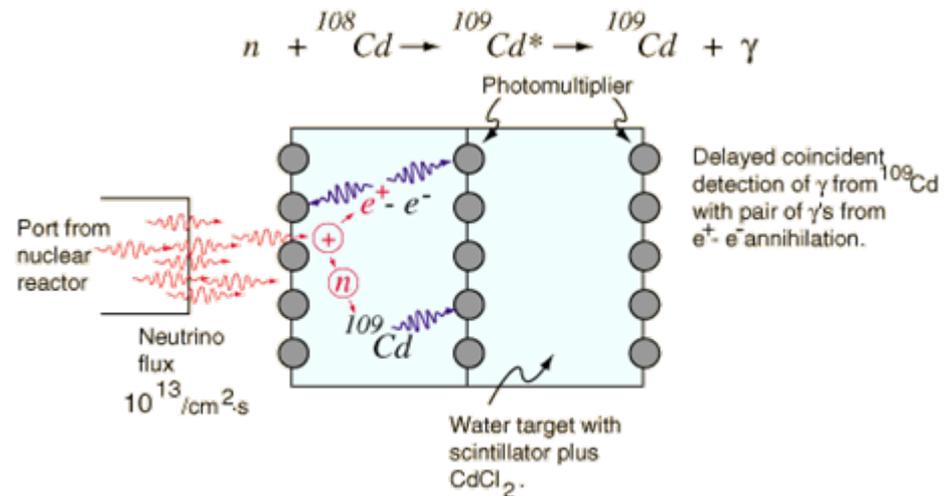
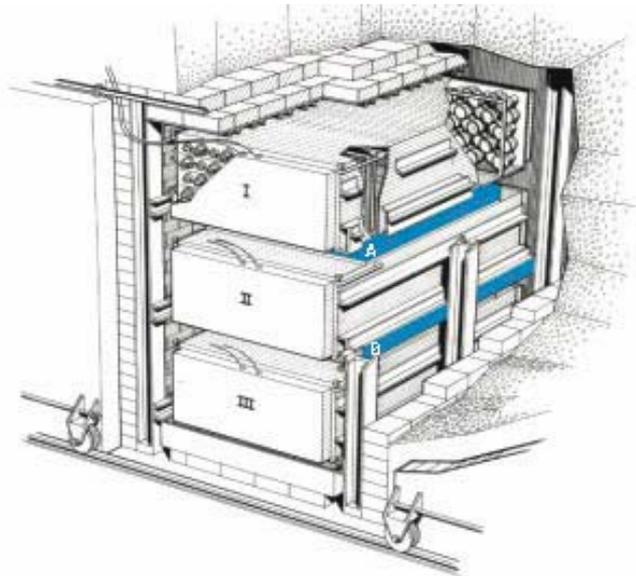


ENDF Request #1838



La prima evidenza di $\bar{\nu}$

Ancora un reattore nucleare, ancora F. Reines & C. Cowan:
1956 Savannah River (South Carolina)



- 2 bidoni (A, B) con ~ 200 l di acqua con ~40 kg di CdCl₂ disciolto.:
- 3 contenitori di scintillatore organico liquido equipaggiati con 110 PMT
- 3 n/h-1;
- Avevano previsto una sezione d'urto di 6×10^{-44} cm² e la loro misura fu 6.3×10^{-44} cm².

"Detection of the Free Neutrino: A Confirmation", C. L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse and A. D. McGuire, Science 124, 103 (1956).