



# I neutrini

2 – Proprietà, violazioni e  
altre sorprese



# Neutrini, particelle fantasma



# Una lunga *detective story*

Se la materia e' cosi' trasparente ai neutrini, come sono stati previsti, individuati e studiati?

Storia interessante, direttamente collegata ad alcune fra le piu' stupefacenti scoperte della fisica del '900

Revisione di molte idee assai radicate

Introduzione di concetti nuovi

Essenziale per la costruzione del Modello Standard

# La scommessa

Sconforto iniziale:

‘Ho fatto una cosa terribile: ho postulato l’esistenza di una particella che non si può osservare’

Wolfgang Pauli, 1930

‘Si può concludere che in pratica non esiste modo di osservare il neutrino’

Bethe e Peierls, 1934

Ma, meno di 20 anni dopo,....

# Numeri, grandi e piccoli

Interazione debolissima dei neutrini con la materia:

'Lunghezza di interazione'  $\sim 10^{16}$  km =  $10^{19}$  m

→ Probabilità di interazione di un  $\nu_e$  da decadimento  $\beta \sim 10^{-19}$  per metro!

Tuttavia, con  $10^{19}$   $\nu_e$  si ha in media un'interazione in 1 m

Ma: dove li prendiamo ??

Prima della II Guerra Mondiale: *impossibile*

# Dopo la guerra...

Possibile sorgente di neutrini: Esplosione nucleare

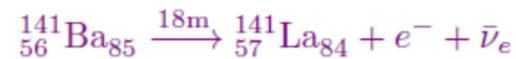
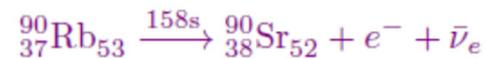
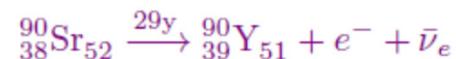
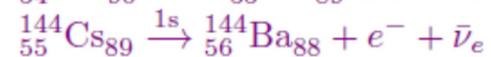
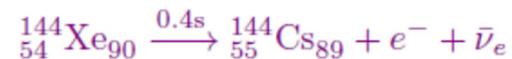
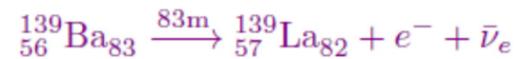
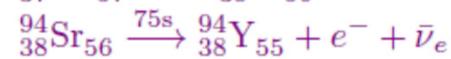
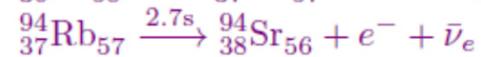
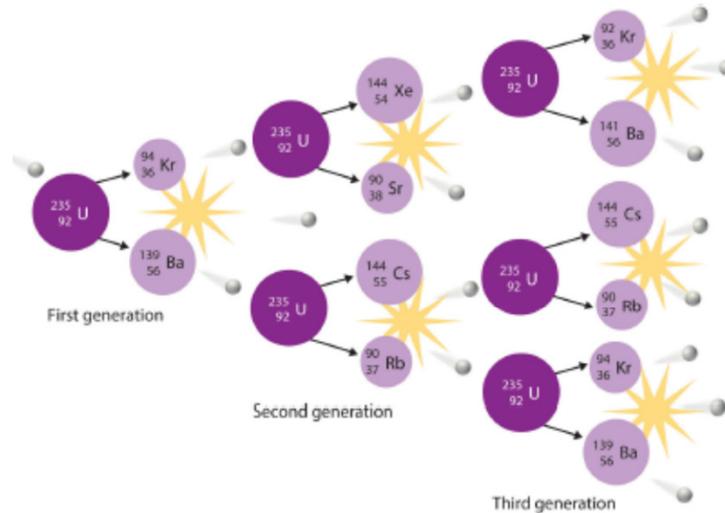
F. Reines lavora a Los Alamos dopo la guerra

Fissione nucleare → Produzione di *prodotti di fissione*

Molti isotopi radioattivi  $\beta$  – instabili

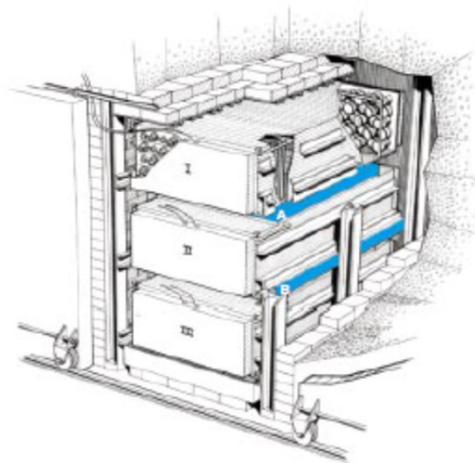
→ Enorme flusso di neutrini

# Fissione e antineutrini

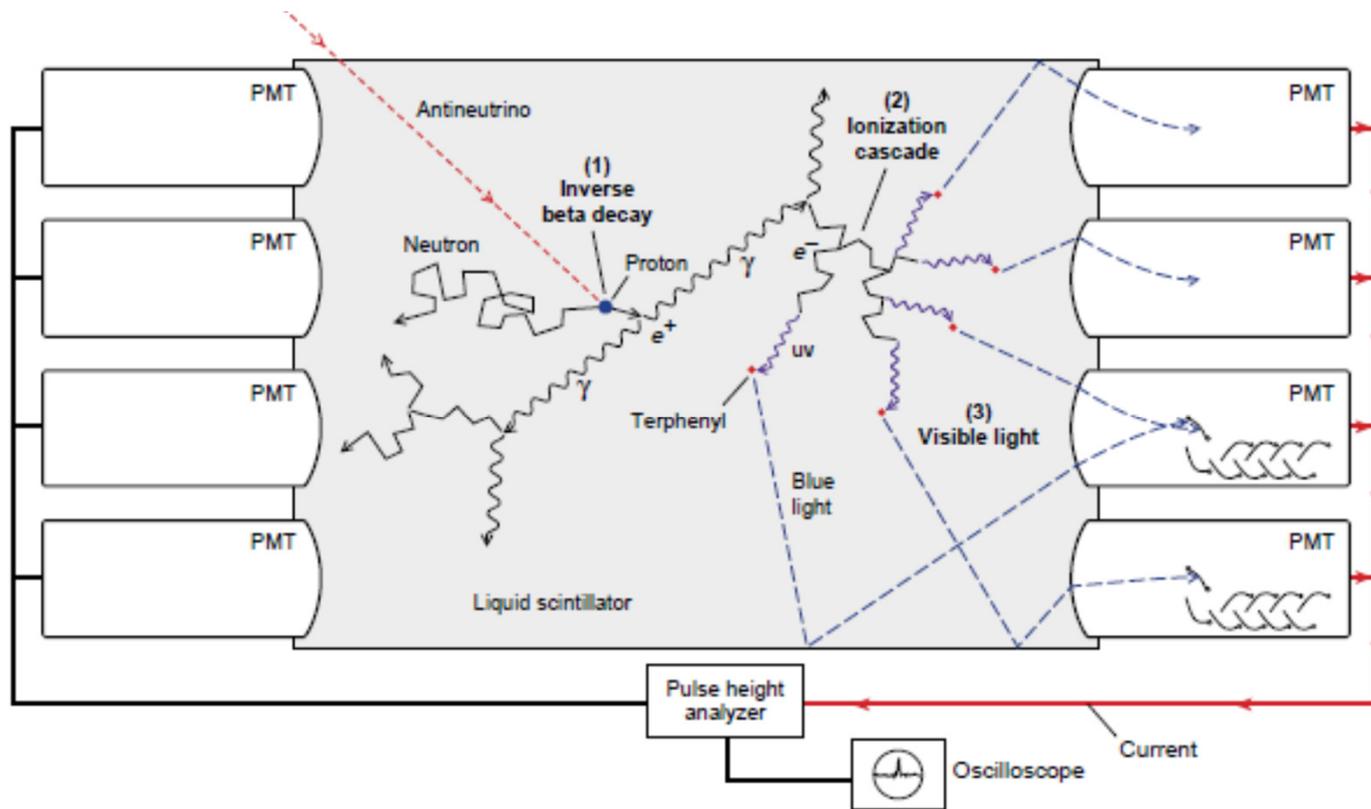


# El Monstro

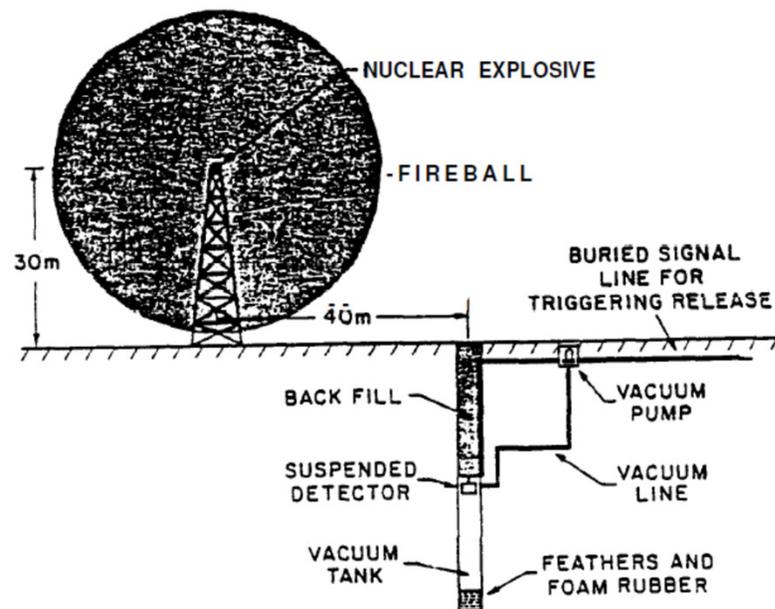
Primi anni '50: inizio progetti di rivelazione dei neutrini  
3 m<sup>3</sup> di *scintillatore liquido* : *El Monstro*  
[Composto chimico che emette un lampo di luce ogni volta  
che è attraversato da una particella carica]



# Rivelatore



# Sottoprodotti della guerra fredda



Progetto approvato a Los Alamos, ma poi abbandonato

# Più pacificamente...

Progetto Poltergeist(1956): Reines e Cowan

Reattore nucleare a fissione di Savannah River, SC

Reazione nucleare tipica:

$U^{235}+n \rightarrow X+Y$ ,  $X$  e  $Y$  prodotti di fissione spesso instabili

Decadimento  $\beta^-$ :  $X \rightarrow Z + e^- + \bar{\nu}_e$

Enorme flusso di antineutrini:  $10^{13}$  per  $\text{cm}^2$  sec

[In generale:  $10^{20}$  antineutrini/sec per 1 GW di potenza termica]

# Metodo sperimentale

Reazione indotta da antineutrini

$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ , seguita da

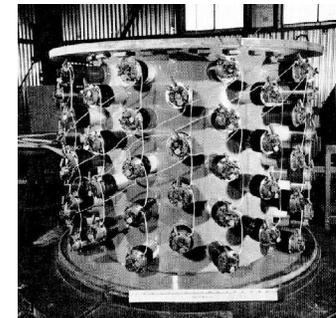
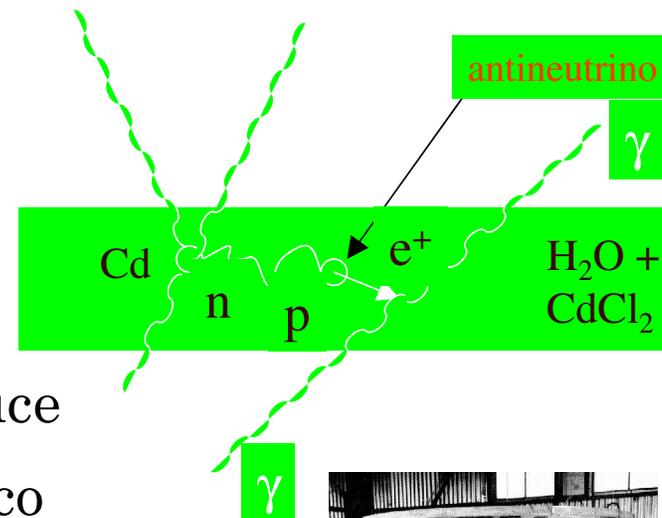
$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ , 'rapida'

$n + Cd \rightarrow \dots + \text{alcuni } \gamma$ , 'lenta'

Scintillatore liquido → Lampo di luce

→ Fotorivelatore → Impulso elettrico

Coincidenza 'ritardata' fra gli impulsi  
originati dai  $\gamma$  segnala l'antineutrino



# Tutti possono sbagliare

Osservati circa 3 eventi/ora

Probabilità di conversione in linea con le attese

Eventi ~ scompaiono a reattore spento

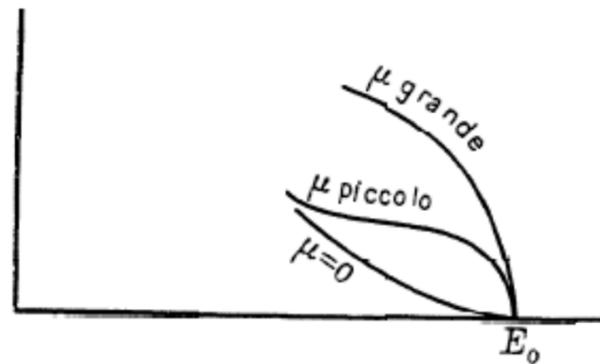
Non era vero che il neutrino fosse inosservabile!

*I confronted Bethe with this pronouncement some 20 years later and with his characteristic good humor he said, “Well, you shouldn’t believe everything you read in the papers”.*

*[Reines, Nobel Lecture 1995]*

# Fermi sulla massa del neutrino

$\mu$  = ipotetica massa del neutrino



Decadimento  $\beta$ :

La forma della distribuzione dell'energia dell'elettrone, vicino al limite superiore, dipende marcatamente da  $\mu$ .

I dati favoriscono  $\mu = 0 \rightarrow$  Neutrino particella *priva di massa*

# Masse

L'equazione piu' famosa della fisica:

$$E = mc^2 \leftrightarrow m = E/c^2$$

In unità opportune, la massa si puo' esprimere come energia equivalente

Unita' di energia adatta alla fisica delle particelle:

Elettronvolt = En. acquistata da un elettrone accelerato con una pila da 1 volt

# Massa zero

Ogni costituente ha una massa, ma... c'è una differenza fra la fisica non relativistica e quella relativistica:

Non relativistica: Ogni oggetto ha massa, e talvolta anche energia

Relativistica: Ogni oggetto ha energia, e talvolta anche massa

→ Esistono oggetti privi di massa

Quando un oggetto non ha massa ha sempre velocità  $c$

I neutrini sono *quasi* privi di massa

# Neutrini girevoli, e violazioni

Un'altra strana proprietà: Diverse particelle 'girano' attorno alla loro velocità, mentre sono in movimento, tanto a destra quanto a sinistra



Il neutrino 'gira' solo a sinistra, e l'antineutrino solo a destra!

Fenomeno curioso, strettamente legato alla *violazione della parità*

# Simmetria e parità

**simmetria** s. f. [dal gr. συμμετρία, comp. di σύν «con» e μέτρον «misura»]. –

1. Ordinata distribuzione delle parti di un oggetto (di un edificio, di una struttura, di un'opera d'arte, ecc.) tale che si possa individuare un elemento geometrico (un punto, una linea, una superficie) in modo che a ogni punto dell'oggetto posto da una parte di esso corrisponda, a uguale distanza, un punto dall'altra parte:...

(Dizionario Treccani)

Di particolare interesse per noi:

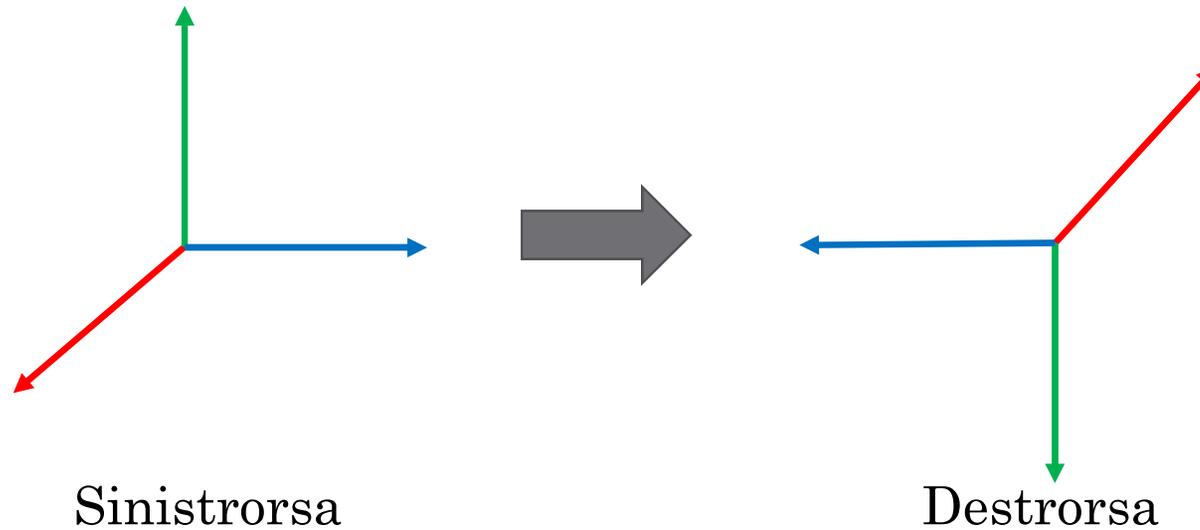
Simmetrie dei sistemi e processi fisici

Espressione matematica:

Proprietà di *invarianza* del sistema o del processo considerato rispetto a varie trasformazioni di coordinate

# Parità

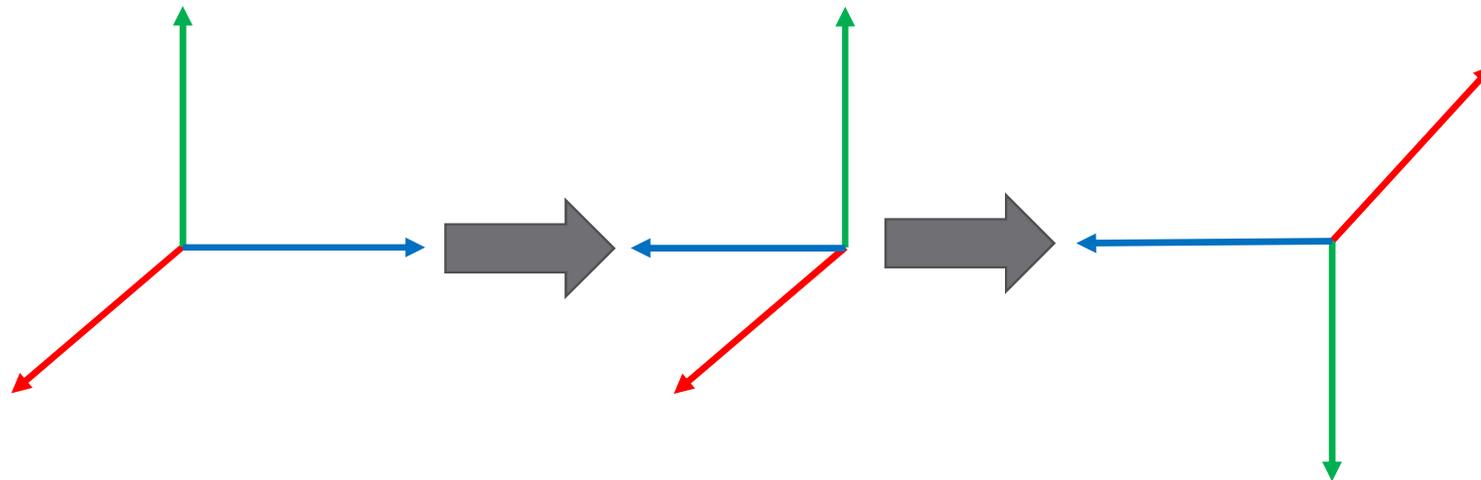
Trasformazione di coordinate :  
Inversione del verso positivo degli assi



Terne non sovrapponibili: come una scarpa destra e una sinistra

# Equivalenze

Inversione degli assi = Riflessione speculare + Rotazione



Invarianza per rotazioni: OK sempre

Invarianza per riflessioni: ???

# Invarianza ?

Processi legati a interazioni forti ed elettromagnetiche: OK

Processi deboli: ???

Sospetti fin dai primi anni '50

Lee e Yang (1956):

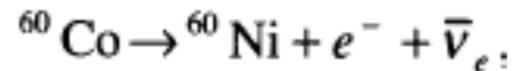
*La conservazione della parità nei processi deboli  
non è provata sperimentalmente*

“Mirror, mirror on the wall,....”

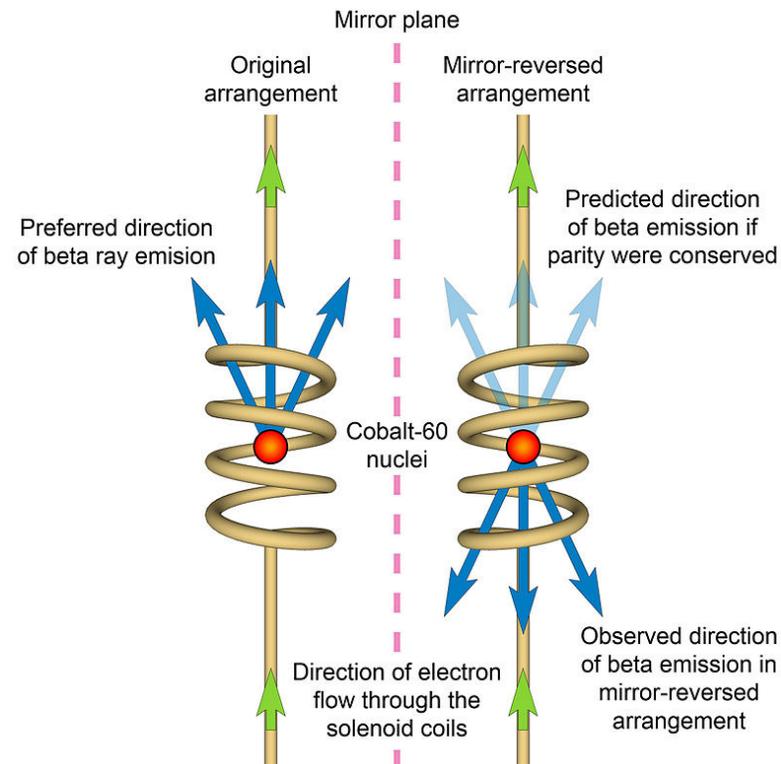
Quindi la domanda di Lee e Yang è:

*Un processo debole e la sua immagine speculare  
hanno la stessa intensità?*

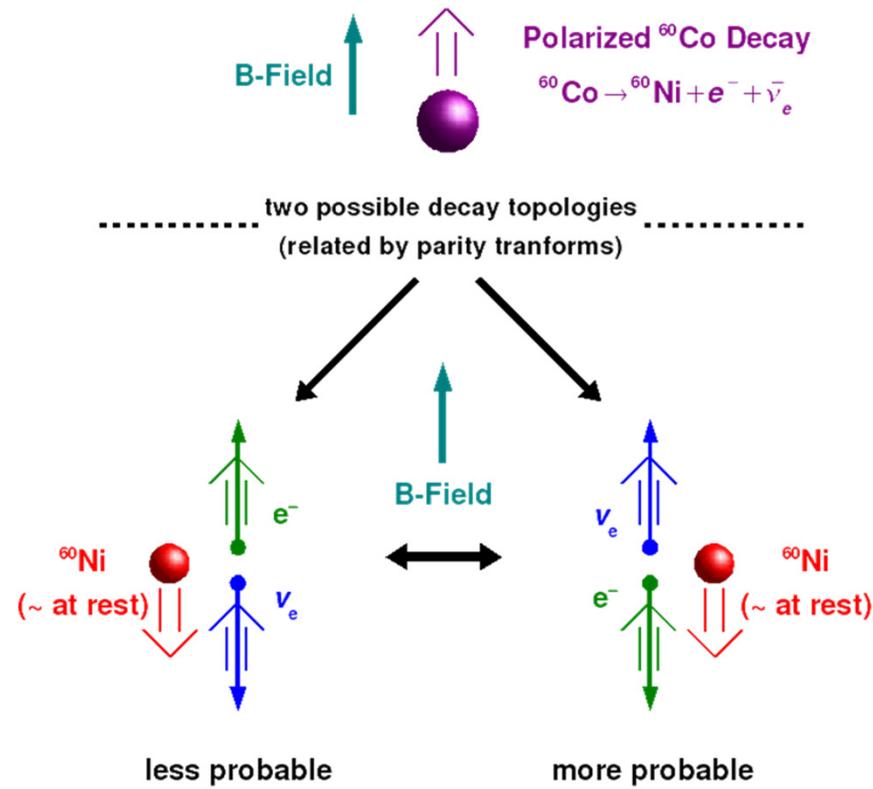
Test eseguito da Mme Wu e collaboratori nel 1957:  
Decadimento  $\beta$  del  $\text{Co}^{60}$



# Parità e violazioni



# Dettagli



# $\nu$ di sinistra e $\bar{\nu}$ di destra

Caratteristica speciale dei neutrini privi di massa :

Spin sempre nella direzione della velocità

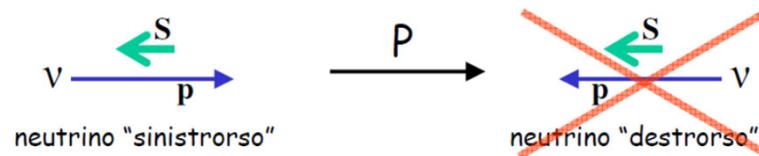
→ 'Girano' in senso orario (R) /antiorario (L) attorno alla velocità

Proprietà valida in tutti i riferimenti

Altra proprietà vera in generale: se  $\nu_L$  allora  $\bar{\nu}_R$  e viceversa

→ Ipotesi: I neutrini sono tutti R o L

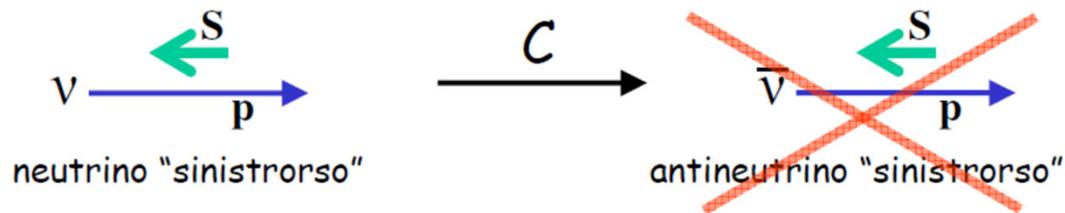
Possibile solo se la parità è violata, infatti:



Esperienza mostra  $\nu_L$  ,  $\bar{\nu}_R$

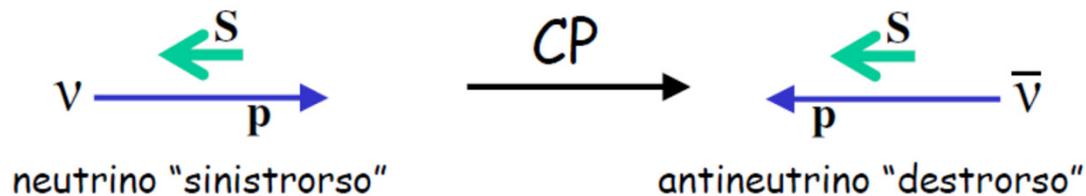
# Coniugazione di carica

Operazione C: Altra simmetria  
 Trasforma particelle  $\leftrightarrow$  antiparticelle  
 Applicata a un neutrino



→ Anche C, come P, è violata  
 Ma CP è OK:

**Nota:** In realtà CP è violata, anche se poco  
 Fenomeno molto studiato, poco compreso



# Allargamento degli orizzonti

Anni '30-'40: Scoperte nei raggi cosmici

*Pione*  $\pi$ , primo esempio di *mesone*

*Muone*  $\mu$ , fratello pesante dell'elettrone

Entrambi instabili: decadimenti deboli

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad ?$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

# Pontecorvo I

Domanda:

I neutrini che hanno origine nei decadimenti di  $\pi$  e  $\mu$  sono tutti uguali?

Ipotesi (Pontecorvo, 1960):

Neutrino da decadimento del  $\pi \neq$  Neutrino da decadimento  $\beta$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

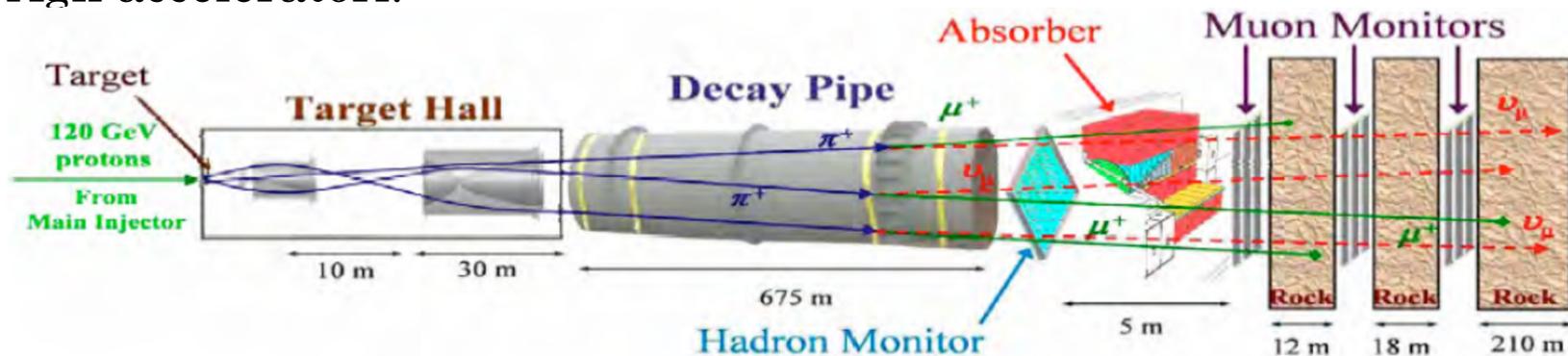
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Test sperimentale per verificare la catena di reazioni:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \Rightarrow \text{neutrino propagato} \Rightarrow \bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^-$$

# Neutrini di alta energia

Agli acceleratori:



Prodotti nei decadimenti

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$\nu_\mu$  contaminati da  $\nu_e$ , provenienti da  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

Simile per  $\bar{\nu}_\mu$

# Due neutrini

Primi esempi di fasci di neutrini (Brookhaven, NY - 1962)

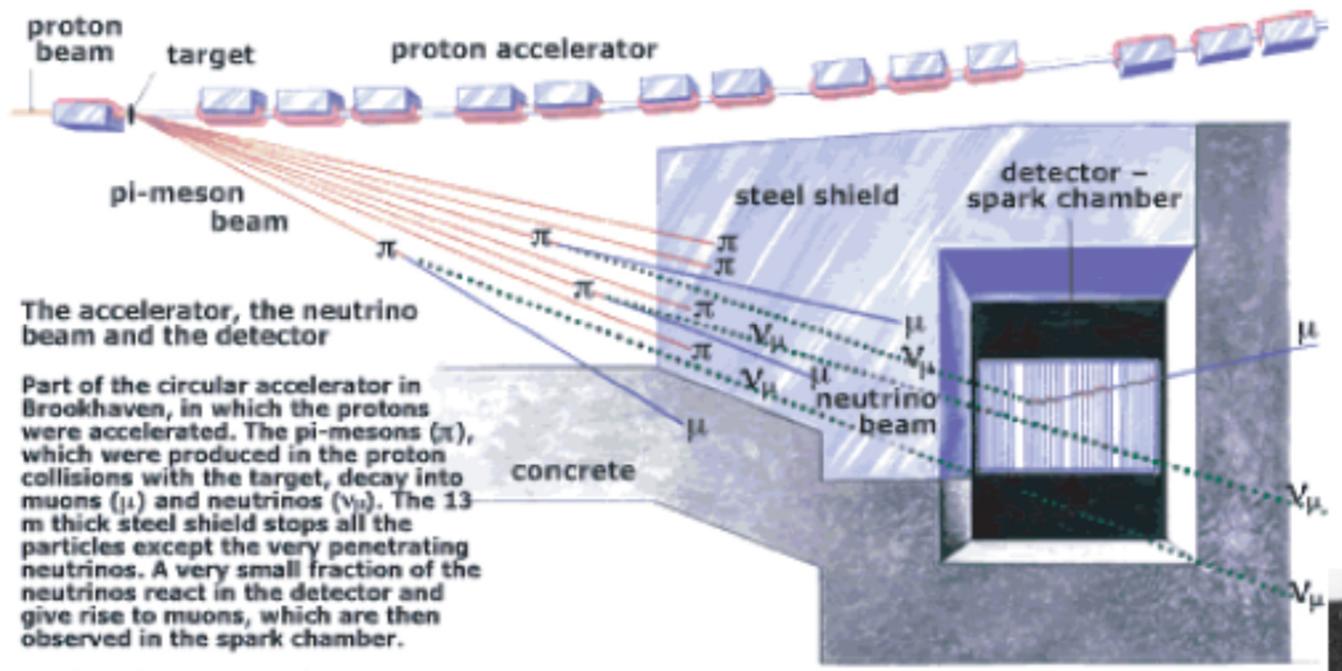


Protoni di alta energia da un acceleratore su un bersaglio  
Produzione di particelle instabili, che si disintegrano in  
muoni + neutrini: Muoni assorbiti, neutrini nel rivelatore

Reazione osservata nel rivelatore:  $\nu, \bar{\nu} + N \rightarrow \mu^\pm + X$

Non si osservano elettroni  $\rightarrow \nu \neq \nu_e$

# Esperimento dei due neutrini



Brookhaven, NY - 1962

# Tre neutrini, e poi basta

1977: A Stanford, CA viene scoperto un terzo leptone carico, dopo elettrone e muone: il *tau*, simile ma molto piu' pesante

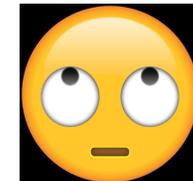
Se il Modello Standard e' corretto, anche lui deve avere il suo neutrino

Infatti:  $\nu_\tau$  scoperto a Fermilab nel 2000

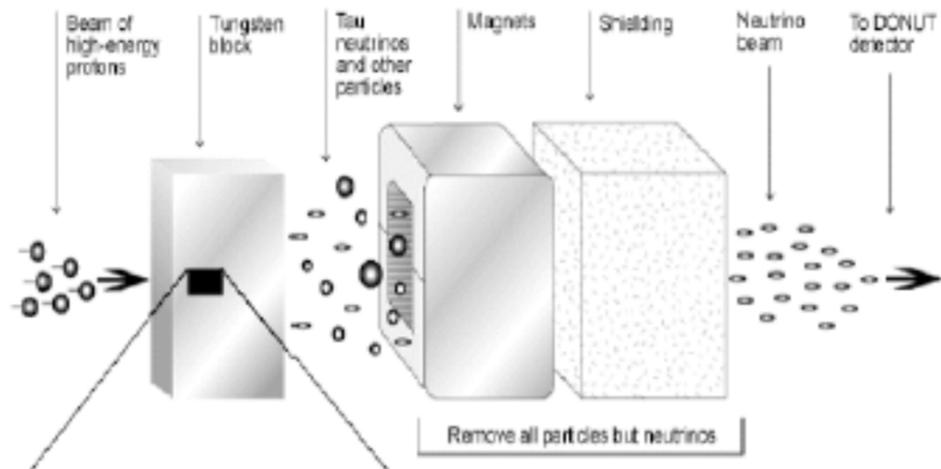


Indicazioni indirette ma convincenti che *non ci sono* altre famiglie; per altro, le tre famiglie di leptoni si comportano in modo identico.

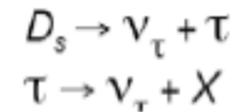
Perche' ce ne sono tre ?



# Esperimento del 3° neutrino

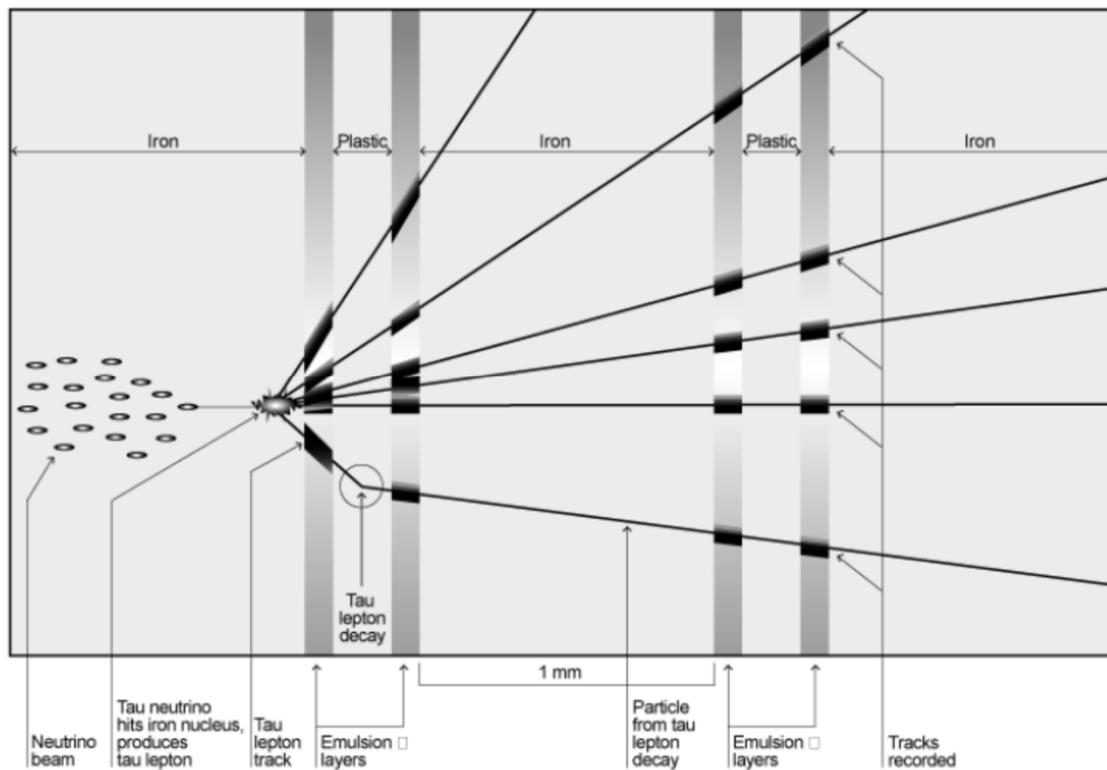


Fra i tanti, produzione di mesoni  $D_s$   
Decadimento caratteristico:



→ Neutrini  $\tau$  identificati da interazione CC in cui producono  $\tau$   
Vita media del  $\tau$  molto breve, occorre rivelatore con elevata risoluzione

# Neutrino tauonico



# I neutrini



Ma che cosa distingue *veramente* un neutrino elettronico da uno muonico o tauonico?

Domanda mal posta: I neutrini sono oggetti elementari, *non sono fatti di qualcos'altro*

La loro 'neutrinità' si manifesta in 3 modi diversi

[Inoltre: Oggi sappiamo che le loro masse sono diverse]

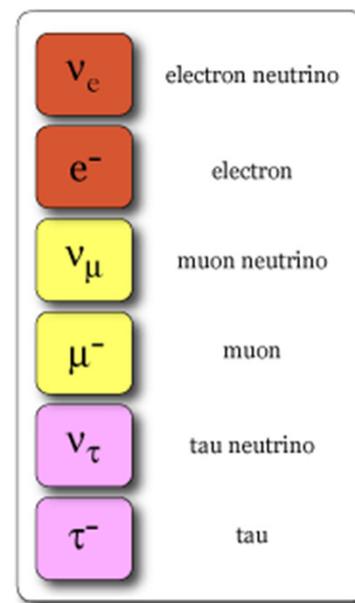
# Famiglie

Ogni 'gusto' di neutrino è associato a un diverso leptone carico, con cui forma una 'famiglia'

LEPTONI		
<b>NEUTRINO ELETTRONICO</b> $\nu_e$  Carica elettrica: 0 Immune sia all'elettromagnetismo che all'interazione forte, non prende parte a quasi nessuna interazione, ma è essenziale nei decadimenti radioattivi.	<b>NEUTRINO MU</b> $\nu_\mu$  Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i muoni.	<b>NEUTRINO TAU</b> $\nu_\tau$  Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i leptoni tau.
<b>ELETTRONE</b> $e^-$  Carica elettrica: -1 Massa: 0,511 MeV La particella più leggera dotata di carica. Trasporta la corrente elettrica e orbita intorno ai nuclei atomici.	<b>MUONE</b> $\mu^-$  Carica elettrica: -1 Massa: 106 MeV Versione più pesante dell'elettrone, vita media di 2,2 microsecondi, scoperto come componente dei raggi X cosmici.	<b>TAU</b> $\tau^-$  Carica elettrica: -1 Massa: 1,78 GeV Un'altra versione instabile e ancora più pesante dell'elettrone con una vita media di 0,3 picosecondi.

Materia ordinaria

Prodotti in processi ad alta energia



# Costituenti: Leptoni

	<p>Carica elettrica</p> <p>0</p> <p><math>&lt;2.2 \text{ eV}/c^2</math></p> <p><math>\nu_e</math></p> <p>neutrino elettronico</p>	<p><math>&lt;0.17 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>0</p> <p><math>\nu_\mu</math></p> <p>neutrino muonico</p>	<p><math>&lt;15.5 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>0</p> <p><math>\nu_\tau</math></p> <p>neutrino tauonico</p> <p>Massa</p>
Leptoni	<p>0.511 MeV/c<sup>2</sup></p> <p>-1</p> <p><math>\frac{1}{2}</math></p> <p>e</p> <p>elettrone</p>	<p>105.7 MeV/c<sup>2</sup></p> <p>-1</p> <p><math>\frac{1}{2}</math></p> <p><math>\mu</math></p> <p>muone</p>	<p>1.777 GeV/c<sup>2</sup></p> <p>-1</p> <p><math>\frac{1}{2}</math></p> <p><math>\tau</math></p> <p>tauone</p>

+ i corrispondenti *antileptoni*

# Costituenti: Quarks

mass →	2.4 MeV/c <sup>2</sup>	1.27 GeV/c <sup>2</sup>	171.2 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
Quarks	4.8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4.2 GeV/c <sup>2</sup>
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom

+ i corrispondenti *antiquarks*

# Il Modello Standard

Costituenti

Tre generazioni  
della materia (fermioni)

	I	II	III	
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quark	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptoni	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b><math>Z^0</math></b> forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b><math>W^{\pm}</math></b> forza debole

Bosoni di gauge

Particelle mediatrici

## Interazioni

