



I fantasmi esistono

Storia e gloria della fisica dei neutrini

Che cosa sono i neutrini?

La più piccola quantità di realtà mai immaginata da un essere umano (F.Reines)

...entità sottilissime: come i messaggi del Dna, gli impulsi dei neuroni, i quarks, i neutrini vaganti nello spazio dall'inizio dei tempi... (I. Calvino)

Geppi Cucciari: “Ma a cosa servono questi neutrini?”
Margherita Hack: “Beh, a niente, ma...”.

Più seriamente...

...i neutrini sono particelle subatomiche prodotte nel decadimento dei nuclei radioattivi

Oggetti elementari, perché privi di struttura: non sono fatti di qualcos'altro, come gli oggetti 'grandi' con cui siamo familiari

Parte della famiglia dei costituenti fondamentali: i mattoni dell'Universo

Particelle elementari dotate di strane proprietà

I mattoni dell' Universo

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 →	u up	c charm	t top	γ fotone
Quark	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
	d down	s strange	b bottom	g gluone
Leptoni	<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
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	Z^0 forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e elettrone	μ muone	τ tauone	W^\pm forza debole

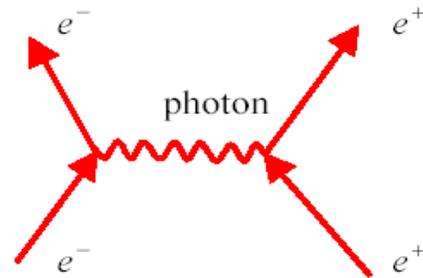
Bosoni di gauge

Particelle mediatrici

Le interazioni fondamentali

Scambio di particelle mediatrici: Emissione / Assorbimento

Possibile in regime relativistico \equiv Massa \leftrightarrow Energia



All'origine delle forze fra i costituenti:

Elettromagnetica, Debole, Forte (, Gravitazionale)

I leptoni

	<p>Carica elettrica</p> <p>Spin</p>	<p>$< 2.2 \text{ eV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>ν_e</p> <p>$1/2$</p> <p>neutrino elettronico</p>	<p>$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>ν_μ</p> <p>$1/2$</p> <p>neutrino muonico</p>	<p>$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>0</p> <p>ν_τ</p> <p>$1/2$</p> <p>neutrino tauonico</p> <p>Massa</p>
Leptoni		<p>$0.511 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>-1</p> <p>e</p> <p>$1/2$</p> <p>elettrone</p>	<p>$105.7 \text{ MeV}/c^2$</p> <p>-1</p> <p>μ</p> <p>$1/2$</p> <p>muone</p>	<p>$1.777 \text{ GeV}/c^2$</p> <p>-1</p> <p>τ</p> <p>$1/2$</p> <p>tauone</p>

+ i corrispondenti *antileptoni*

Antileptoni ?

Sì, sono i 'gemelli diversi' dei leptoni

Una scoperta straordinaria, conseguenza di meccanica quantistica e relatività': *Antimateria*

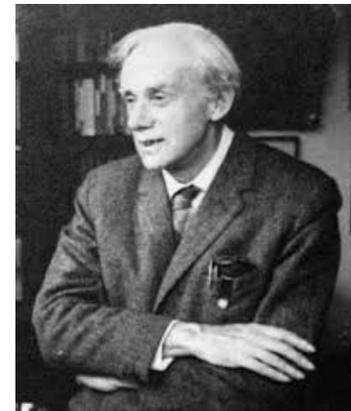
Previsione teorica (Dirac, fine anni '20):

Ogni particella, come l'elettrone, il protone o il neutrino, ha una 'sorella' in tutto simile, ma con carica opposta

$e^- \leftrightarrow e^+$ Elettrone , Positrone

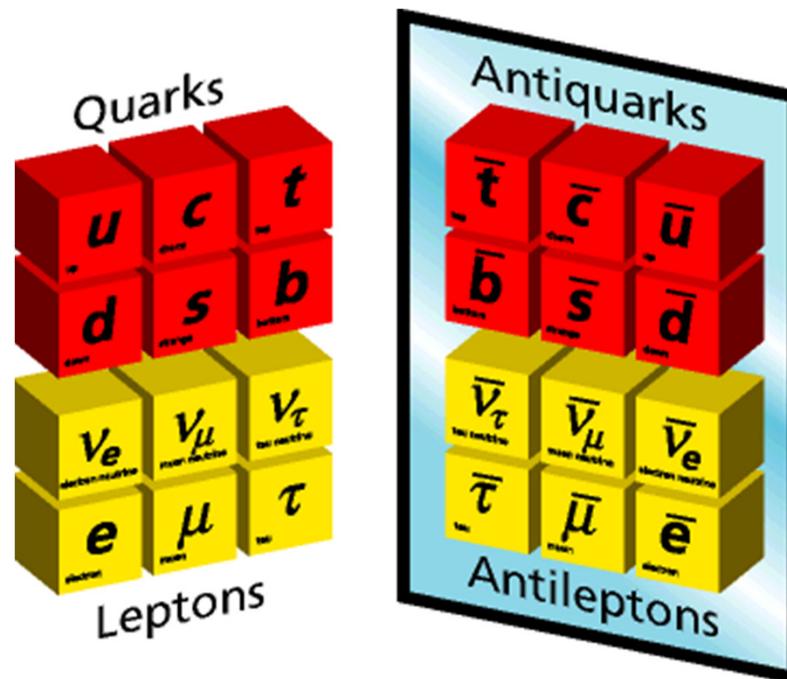
$p \leftrightarrow \bar{p}$ Protone , Antiprotone

etc



Per fare l'antimateria...

...ecco gli ingredienti:



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

Ogni costituente ha una massa, ma....

Massa zero

... 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*

All'origine delle forze

Carica dei costituenti: Determina l'intensita' dell'emissione/assorbimento di particelle mediatrici

Elettrica: Come quella dei corpi 'grandi'

Debole, Colore: Non osservata nei corpi 'grandi'

Cariche dei costituenti elementari:

Quark: *Tutte*

Leptoni: *Elettrica, Debole*

Neutrini: Solo debole → Pochissimo interagenti

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

Radioattività

Scoperta nel 1896 da Becquerel:

Emissione di radiazioni da disintegrazioni nucleari

Studiata da vari fisici fra fine '800 e inizio '900:
i Curie, Rutherford, ...

Si osservano 3 diversi tipi di radiazioni: α, β, γ

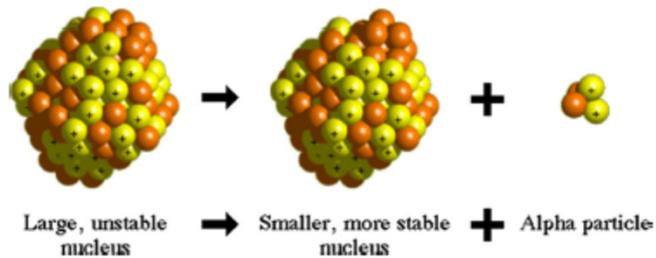
α : Emissione di nuclei di Elio

β : Emissione di elettroni (+vi o -vi)

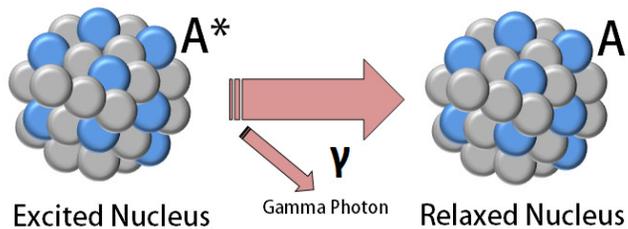
γ : Emissione di fotoni di alta energia

Decadimenti α e γ

Decadimento α



Decadimento γ



Conservazione dell'energia:

$$E_{\text{nucleo iniz}} = E_{\text{nucleo fin}} + E_{\alpha}$$

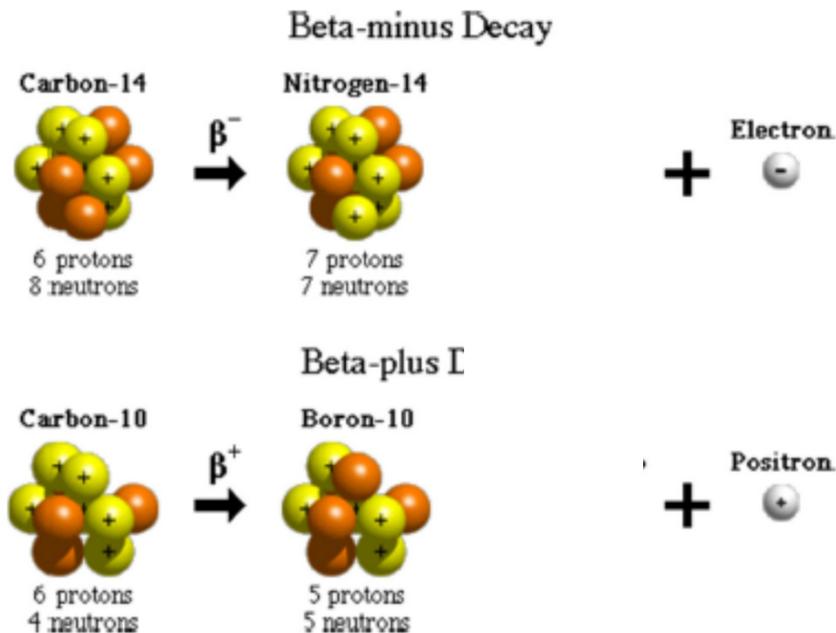
$$\rightarrow E_{\alpha} = E_{\text{nucleo iniz}} - E_{\text{nucleo fin}}$$

$$E_{\text{nucleo iniz}} = E_{\text{nucleo fin}} + E_{\gamma}$$

$$\rightarrow E_{\gamma} = E_{\text{nucleo iniz}} - E_{\text{nucleo fin}}$$

$\rightarrow E_{\alpha}, E_{\gamma}$: **unico valore**

Decadimento β : un serio problema



Se:

$$E_{\text{nucleo in}} = E_{\text{nucleo fin}} + E_{\beta}$$

$\rightarrow E_{\beta}$: **unico valore**

Invece si osserva una **gamma continua di valori!**

Soluzioni strampalate

Come risolvere la questione?

Bohr: L'energia si conserva solo in media



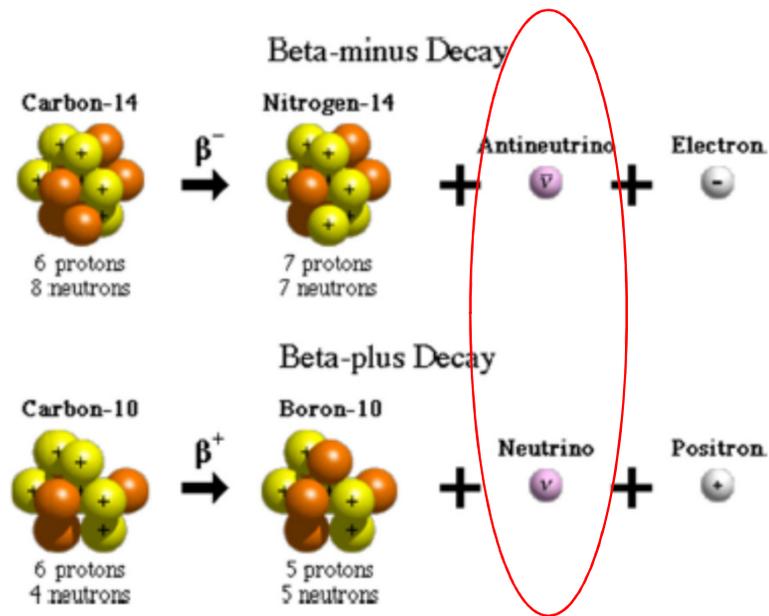
Altri: Le misure sono sbagliate



Pauli: Le misure sono giuste e l'energia si conserva, ma l'interpretazione è sbagliata !



Manca qualcosa !



Elettrone e neutrino si spartiscono l'energia disponibile
→L'energia dell'elettrone *non* e' costante !

Predizioni visionarie

Previsione di una nuova particella:

Carica elettrica = Zero

Massa = Zero

Solo interazione debole

→ *Grandi* difficoltà osservative !

Ma che razza di roba è ?

Un paio di domande piuttosto scontate:

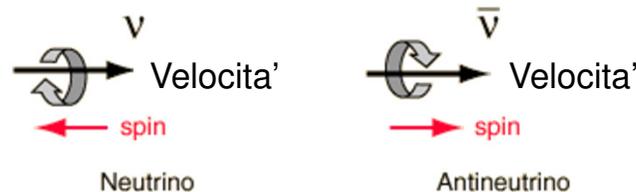
Se non ha carica elettrica, che cosa distingue
un neutrino da un antineutrino?

C'e' qualcosa che abbiamo dimenticato?

Risposte poco scontate (1)

Quella elettrica non è l'unica carica che esiste
'Carica' debole: più complicata di quella elettrica
Posseduta da tutti i costituenti, inclusi i neutrini;
sempre nulla per i corpi macroscopici
Neutrino e Antineutrino : carica debole opposta

Neutrino e antineutrino hanno anche *elicità* opposta:
'girano' in verso opposto attorno alla loro velocità'



Risposte poco scontate (2)

Per ogni famiglia leptonica:

Conservazione del *numero leptonico*

In ogni processo debole:

$N. \text{ Leptoni} - N. \text{ Antileptoni} = \text{costante}$

Simile a conservazione della carica elettrica

Origine non interamente capita

Come e' fatta l'interazione debole?

Primo modello: Fermi, 1934

Ancora parzialmente valido: Primo abbozzo di Modello Standard

Modificato e generalizzato in diversi passi, fino ai ruggenti anni '60

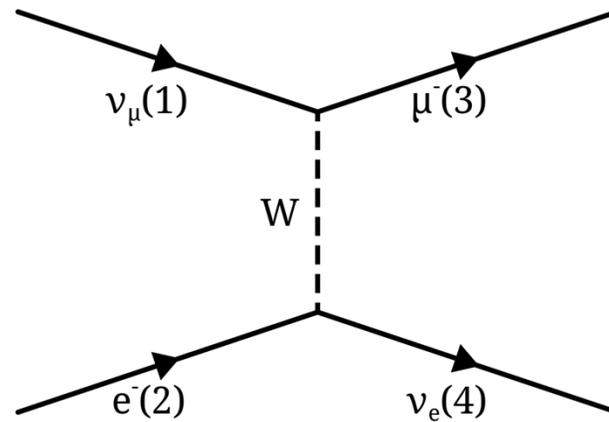
Modifiche piu' importanti:

Violazione della parita'

Scambio di particelle mediatrici pesanti

Processi deboli

Scambio di particelle pesanti, W e Z



→Raggio d'azione e intensita' ridottissimi

Confronto

Distanza media che un fotone percorre in acqua senza che si verifichino collisioni con le molecole del mezzo circostante: **circa 20 cm**

Distanza media che un neutrino percorre in acqua senza che si verifichino collisioni con le molecole del mezzo circostante: **circa 10 anni luce**

(10 anni luce ~ **10 miliardi di miliardi di cm** !!!)

→Universo, noi inclusi: *molto* trasparente ai neutrini

→Neutrini: particelle fantasma

Tutti possono sbagliare

Sconforto iniziale:

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

Wolfgang Pauli, 1930

Ma, un quarto di secolo dopo,....

Scoperta del neutrino

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

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



Metodo sperimentale

Reazione indotta da antineutrini

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

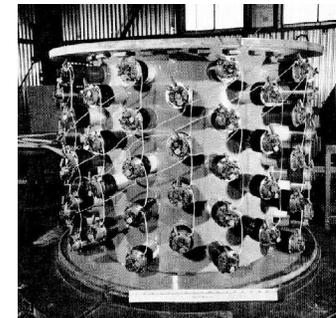
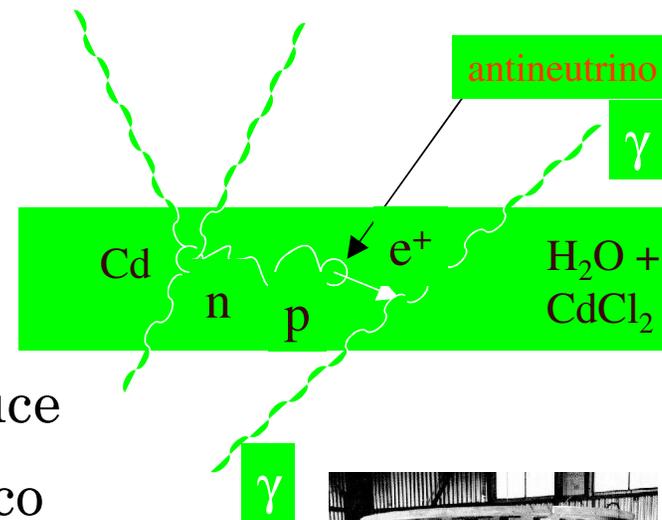
$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$, 'rapida'

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

Scintillatore liquido → Lampo di luce

→ Fotorivelatore → Impulso elettrico

Coincidenza 'ritardata' fra gli impulsi
originati dai γ segnala l'antineutrino



Il fantasma che è in noi

Produzione di neutrini nel nostro corpo: ^{40}K

Isotopo radioattivo del potassio: 20 mg nel nostro corpo

Decadimento β : $^{40}K \rightarrow ^{40}Ca + e^- + \bar{\nu}_e$

4000 neutrini al secondo

Neutrini da altre sorgenti attraverso il nostro corpo:

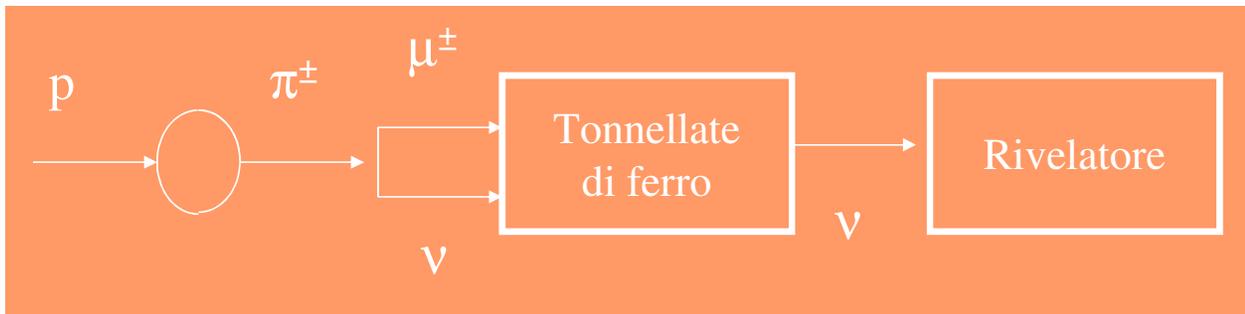
400000 miliardi al secondo dal Sole

100 miliardi al secondo da materiali radioattivi

50 miliardi al secondo dalle centrali nucleari

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:

Non si osservano elettroni $\rightarrow \nu \neq \nu_e$ $\nu, \bar{\nu} + N \rightarrow \mu^\pm + X$

Tre neutrini, e poi basta

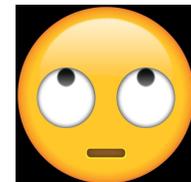
1977: A Stanford, CA viene scoperto un terzo leptone carico, dopo elettrone e muone: il *tau*, simile ma molto piu' pesante



Se il Modello Standard e' corretto,
anche lui deve avere il suo neutrino
Infatti: ν_τ 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 ?



I neutrini

LE FAMIGLIE DI NEUTRINI



Ma che cosa distingue 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

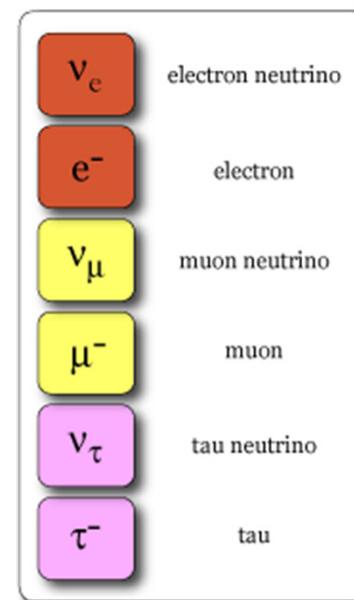
Riassumendo...

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

LEPTONI		
NEUTRINO ELETTRONICO ν_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.	NEUTRINO MU ν_μ  Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i muoni.	NEUTRINO TAU ν_τ  Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i leptoni tau.
ELETTRONE 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.	MUONE μ^-  Carica elettrica: -1 Massa: 106 MeV Versione più pesante dell'elettrone, vita media di 2,2 microsecondi, scoperto come componente dei raggi X cosmici.	TAU τ^-  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



Dalla terra al cielo

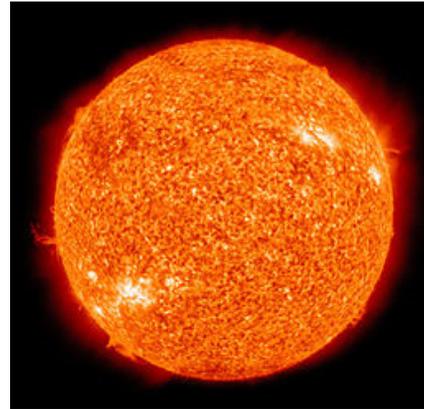
Neutrini: inizialmente osservati in presenza di reazioni nucleari in un reattore a fissione

Dove trovare in giro altre reazioni nucleari?

Nelle stelle: reazioni nucleari di fusione

Produzione di neutrini

→ Neutrini dal Sole!



Stelle e neutrini

Da dove viene l'energia delle stelle?

Processi termonucleari

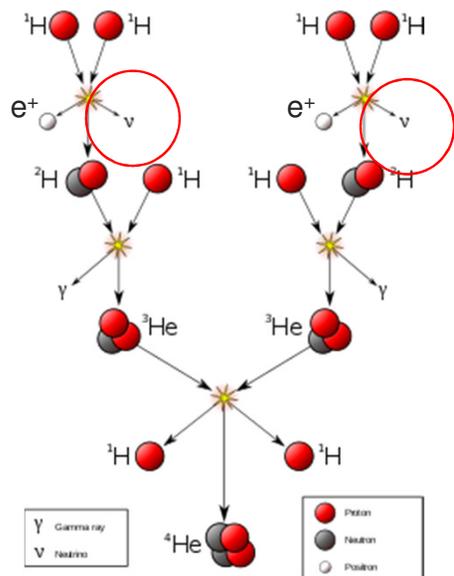
Reazioni di fusione richiedono temperature elevate per vincere la repulsione elettrostatica fra i nuclei

Le temperature elevate sono fornite dall'attrazione gravitazionale:

Compressione del plasma → Riscaldamento

Ciclo dell'idrogeno

Sequenza di reazioni nucleari che parte da 2 nuclei di idrogeno e porta alla formazione di 1 nucleo di elio



Esempio: Sequenza di tipo I

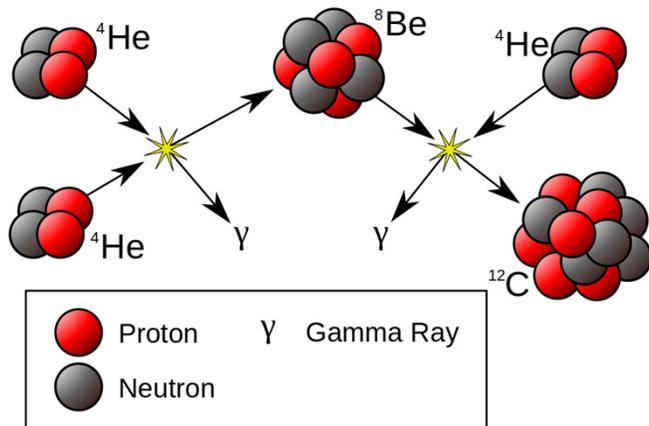
Resa energetica: $E = 26.7 \text{ MeV}$ per ciclo
 $E = (4M_{\text{prot}} - M_{\text{elio}}) c^2$

Emissione di 2 neutrini elettronici!

Totale dal Sole: **$2 \cdot 10^{38}$** neutrini al secondo!

Ciclo dell' elio

Sequenza di reazioni di fusione che parte da 3 nuclei di elio e porta a un nucleo di carbonio



Resa energetica 7.275 MeV
$$E = (3M^4_{\text{He}} - M^{12}_{\text{C}})c^2$$

Fine di ogni stella

Dopo alcuni altri cicli, produzione di nuclei di *Fe*

Fusione del *Fe*: processo *endotermico*

Evoluzione stellare si arresta (esaurimento combustibile..)

Possibili finali (a seconda della massa):

Nana bianca , non esplosiva

Supernova, esplosiva

Resto di supernova: *Stella di neutroni* o *Buco nero*

Neutrini da supernova

Esplosioni stellari conseguenti a esaurimento del combustibile nucleare

Includono una fase di elevata compressione del nucleo stellare → Innesco di reazioni come $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$

Densità elevate → Neutrini 'intrappolati'

Densità decrescente → Emissione di neutrini

99% dell'energia totale liberata trasportata dai neutrini !

Emissione nel visibile ritardata rispetto a quella di neutrini

Cifre astronomiche

Numero totale neutrini emessi $\sim 10^{58}$

Durata 'flash neutrino' ~ 20 secondi

Energia tipica 10 – 20 MeV

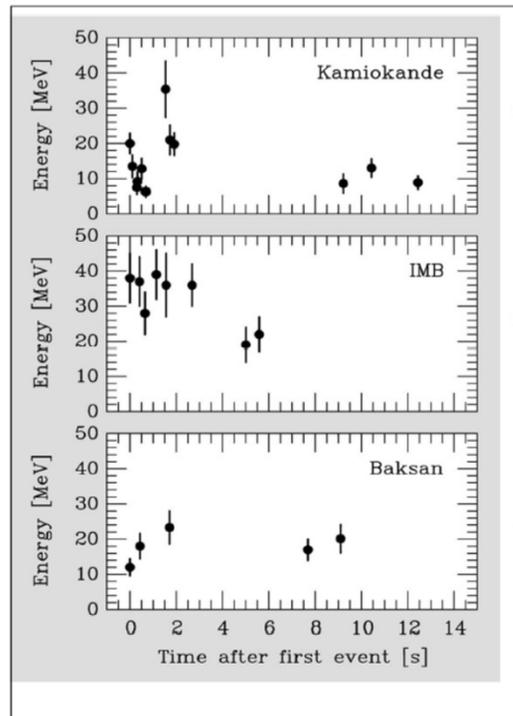
Nella nostra galassia 2 – 4 supernove al secolo

Per una supernova galattica distante ~ 35000 anni luce:

Neutrini che arrivano sulla Terra $\sim 5 \cdot 10^{11}$ per cm^2

SN1987A

23/2/1987: Supernova piu' brillante degli ultimi 4 secoli



Kamiokande (Giappone)
Rivelatore Cerenkov
Incertezza sul tempo ± 1 min

Irvine-Michigan-Brookhaven (US)
Rivelatore Cerenkov
Incertezza sul tempo ± 50 ms

Baksan (Unione Sovietica)
Scintillatore
Incertezza sul tempo $+2/-54$ s

I segnali sono contemporanei entro
le incertezze sul tempo

Origine nella Grande
Nube di Magellano,
galassia nana a 168000
anni luce da noi

3 rivelatori in US, URSS
e Giappone osservano in
totale 24 neutrini entro
13 secondi, 3 ore prima
dell'osservazione ottica!

Neutrini dal Big Bang

Formazione di enormi quantità di neutrini di bassa energia entro il primo secondo dal Big Bang

Poco interattivi → Presenti ancora adesso

Densità tipica 330ν per cm^3 , in tutto l'Universo !!

Molto difficili da osservare:

Energia *molto* bassa ~ 1 miliardesimo di quelli da SN

Fondo che copre il segnale

Nondimeno, progetti in corso...

Neutrini solari

Sole: Stella piu' vicina

Cicli solari: copiosa emissione di neutrini

Naturale cercare neutrini provenienti dal Sole

Attesi sulla Terra:

$6.6 \cdot 10^{10}$ per cm^2 per secondo

con diverse energie

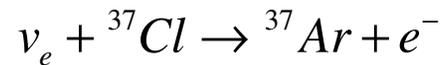
Acchiappafantasma

Prima osservazione dei neutrini solari:

Esperimento di Davis e collaboratori in una miniera d'oro a 1500 m di profondità a Homestake, SD (1968)

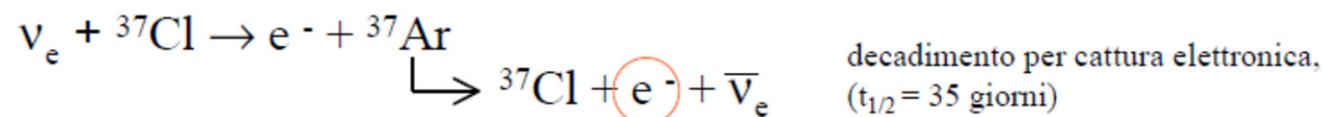
380 m³ di tetra**cloro**etilene – solvente organico usato per il lavaggio a secco

Reazione usata nel rivelatore:



Tecnologia e arte

^{37}Ar instabile:

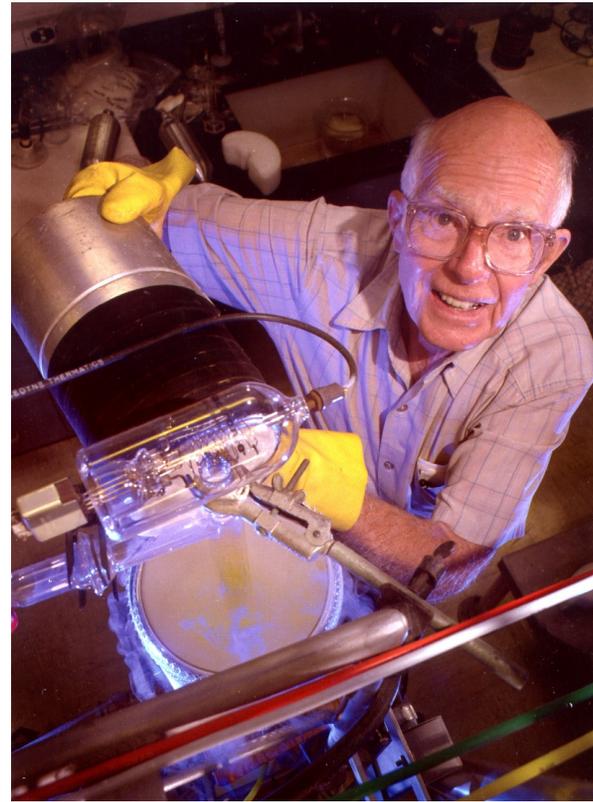
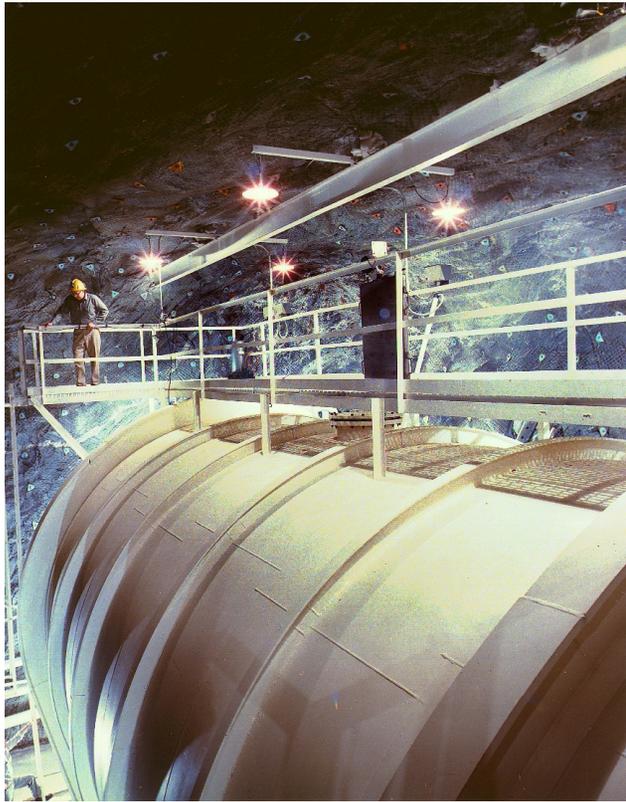


Raccolto allo stato gassoso ogni due settimane con uno speciale filtro

Identificato dal suo decadimento in ^{37}Cl + elettrone per mezzo di rivelatori miniaturizzati attraverso i quali veniva flussato

Circa 1 evento ogni 2 giorni

Ray Davis e il suo baby



Dove spariscono i neutrini ?

Risultato inatteso:

Flusso misurato $\sim 1/3$ del flusso previsto

Esperimento poi ripetuto diverse volte da Davis e altri, con tecniche modificate, sensibili a finestre di energia dei neutrini più estese

Risultato confermato:

Flusso misurato $\sim 1/2$ del flusso previsto

Errore nella previsione ? Errore nella misura ??

Super Kamiokande

Esperimento in una miniera in Giappone

Originariamente costruito per cercare il decadimento del protone: Non basato su tecniche radiochimiche

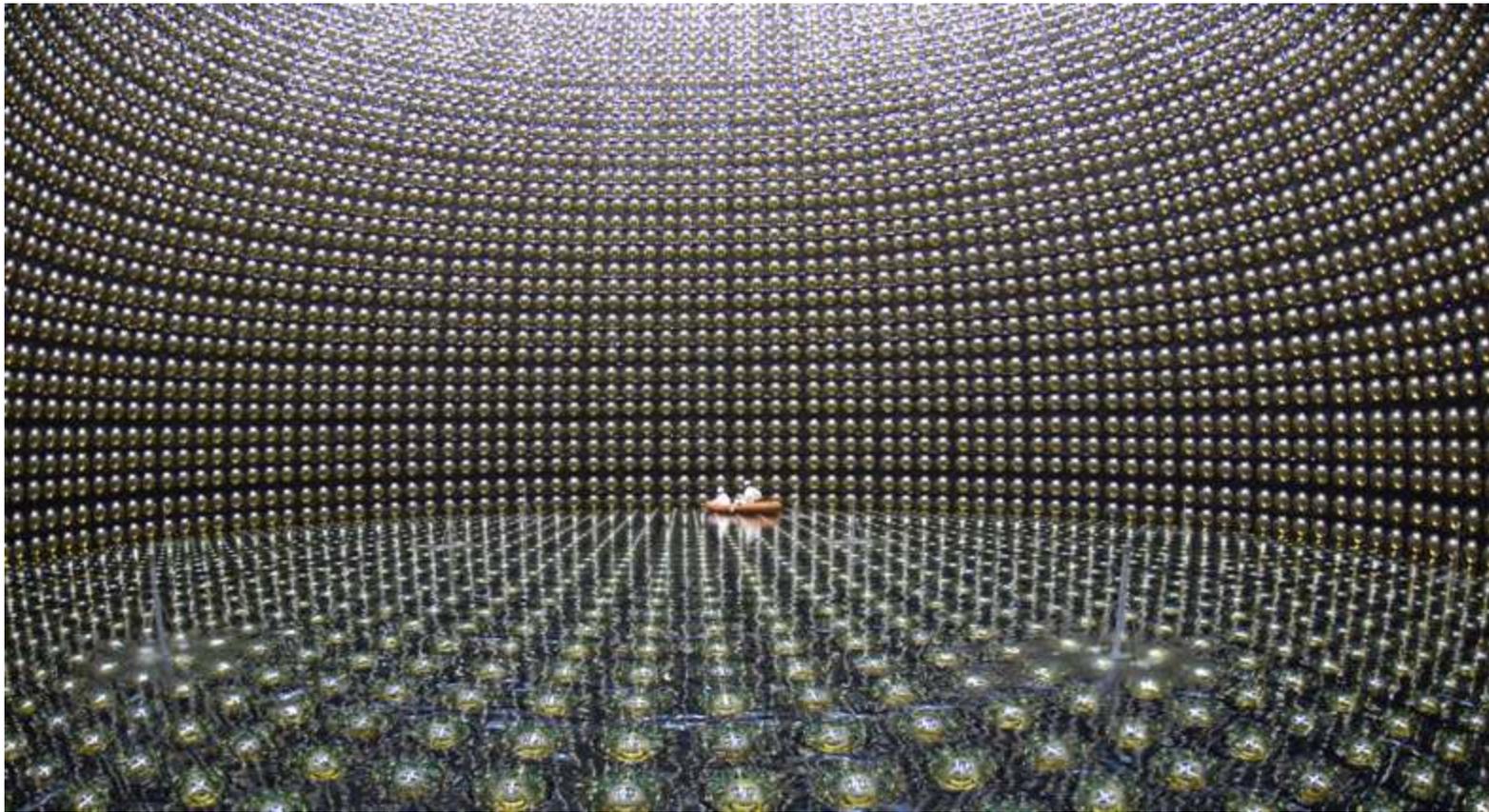
Modificato per osservare i neutrini solari

Reazione cercata: $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$

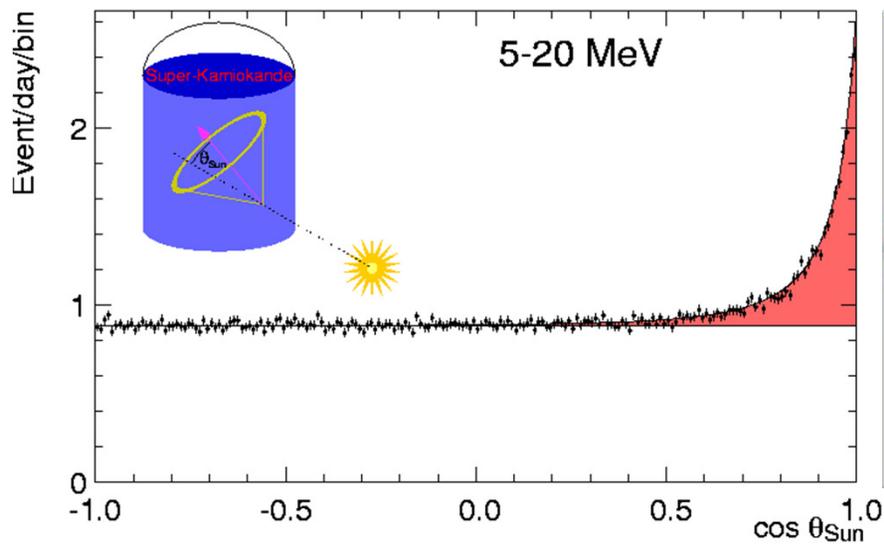
50000 tonnellate di acqua

Flash luminosi da elettroni veloci correlati alla direzione dei ν
Fotorivelatori \rightarrow Impulsi elettrici

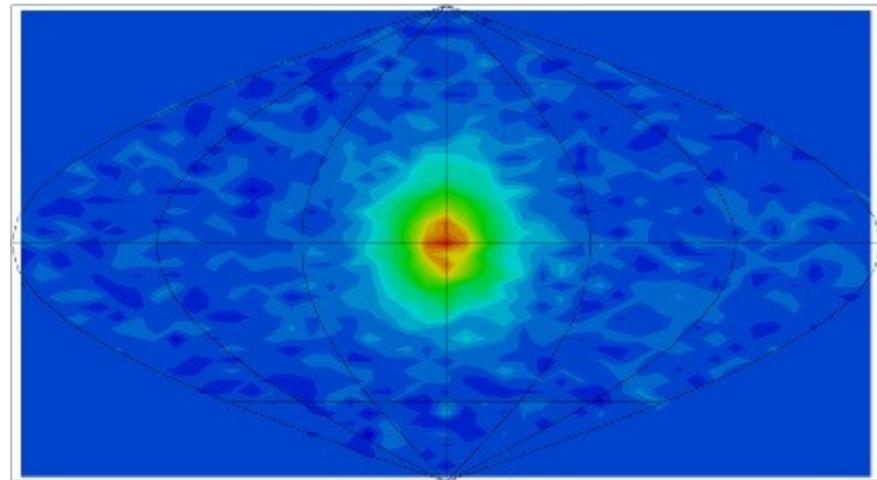
Monumento alla scienza fisica



Immagini neutriniche



Angolo fra direzione ν e Sole



Il Sole visto con i neutrini

In seguito ...

...altri esperimenti, simili a Homestake o SuperKamiokande

Soprattutto

SNO (Miniera di Sudbury, Canada)

Borexino (Laboratori del Gran Sasso)

Continuo miglioramento delle misure

Parziale chiarimento della situazione a SNO

Ci sono ma non ci sono

Stranezze quantistiche:

Una particella in un dato stato dinamico e' contemporaneamente anche in altri stati dinamici

Per es, se misurate dove si trova, essa possiede contemporaneamente molti valori di velocita'

Viceversa, se misurate la sua velocita' e poi cercate dove si trova, potete trovarla in molti posti diversi



Neutrini con tre personalità

Un neutrino che si propaga nello spazio e nel tempo ha un valore preciso e definito di massa

Ma se la massa non è zero può comportarsi come una combinazione di diversi 'sapori' di neutrino!



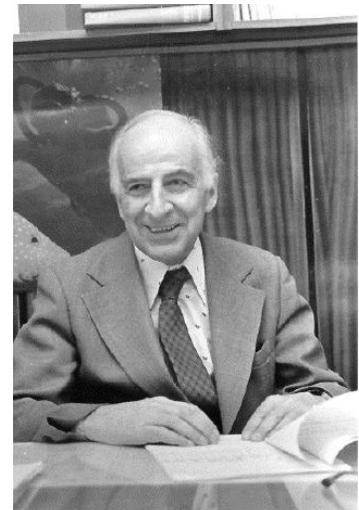
La probabilità quantistica di osservarlo in un dato sapore dipende dal tempo

Oscillazioni

Così, un neutrino elettronico partito dal Sole viene assorbito nella materia sulla Terra a volte come neutrino muonico, a volte come neutrino tauonico, a volte come neutrino elettronico

Spiegato infine il mistero dei neutrini elettronici mancanti: **Non sono osservati perché sono diventati neutrini muonici o tauonici!**

Fenomeno noto come 'Oscillazione del neutrino':
previsto molti anni fa da Pontecorvo
Osservato per la prima volta 20 anni fa a SuperK,
poi in esperimenti agli acceleratori



Here, There and Everywhere

Neutrini: Previsti per disperazione, scoperti per cocciutaggine, hanno rivelato molte proprietà sorprendenti e inattese

Presenti ovunque nell'Universo, leggeri, veloci e quasi inafferrabili, trasportano informazioni su

Big Bang

Struttura ed evoluzione stellare

Modello Standard

e forse su ciò che sta oltre

Un secolo di progresso

Da un problema apparentemente modesto e circoscritto, un intero, nuovo capitolo di fisica fondamentale, e un' inattesa finestra sull'Universo
Cosa impariamo?

I particolari contano

La testardaggine non e' sempre un difetto

Migliorare le misure non e' mai inutile

...e, naturalmente:

Il diavolo sta nel dettaglio

