



I neutrini

1 - Una storia di fantasmi



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

Alla fine dell' '800

Esistenza di raggi emessi all'esterno dei tubi catodici (“raggi X”)

Esistenza di raggi emessi dall'uranio (“raggi uranici”)

Struttura corpuscolare dei raggi catodici: Scoperta dell'elettrone (Thomson 1897)

ossia:

Esistenza di una particella di massa molto piccola rispetto alla scala atomica, di cui vari sperimentatori determinano il rapporto tra carica e massa, e/m

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

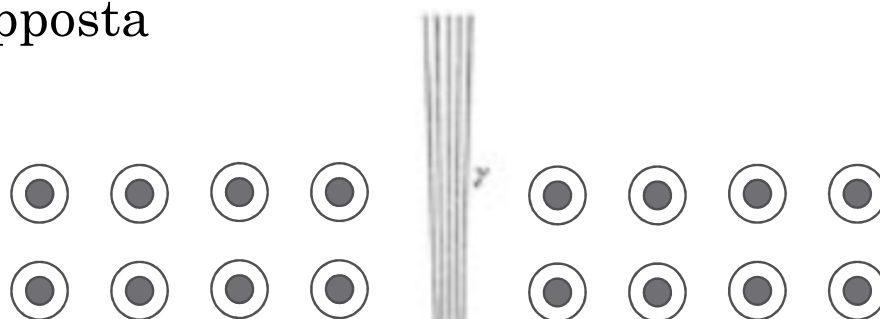
α : Emissione di nuclei di Elio

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

γ : Emissione di fotoni di alta energia

Diverse radioattività

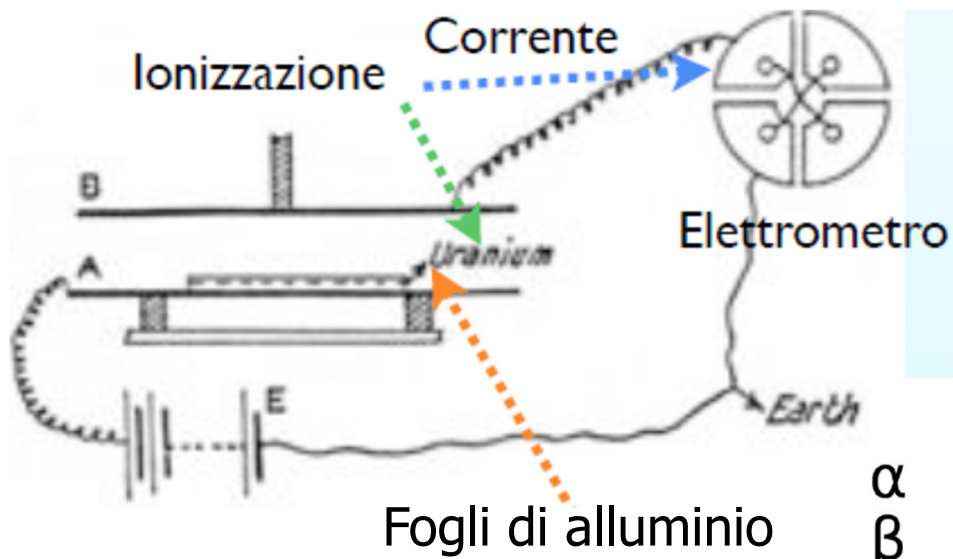
Sorgenti radioattive in un campo magnetico:
Azione su cariche elettriche in movimento
 α e β carica opposta
 γ Neutra



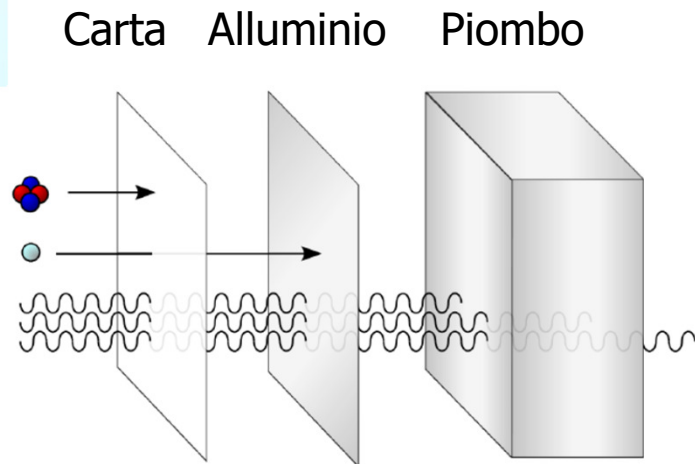
Per ogni data sorgente:
 α monoenergetiche
 β energia variabile



Diverse radioattività



α
 β
 γ



Raggi β

Diversi da raggi α , identificati come nuclei di He:

Massa molto più piccola

Carica di segno opposto

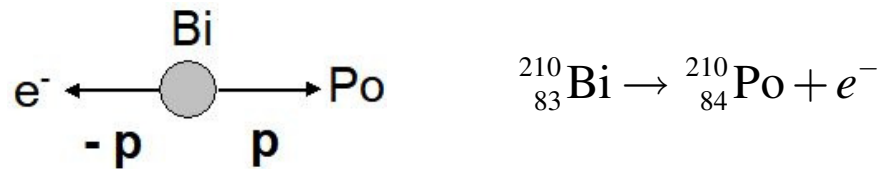
Natura corpuscolare

Carica \sim Carica elettrone

Massa \sim Massa elettrone

→ Sono elettroni !

Disintegrazione in *due* corpi



Conservazione della quantità di moto:

$$\mathbf{p}_{Po} + \mathbf{p}_e = 0 \rightarrow \mathbf{p}_{Po} = \mathbf{p}, \mathbf{p}_e = -\mathbf{p}$$

Conservazione dell'energia (di massa + cinetica):

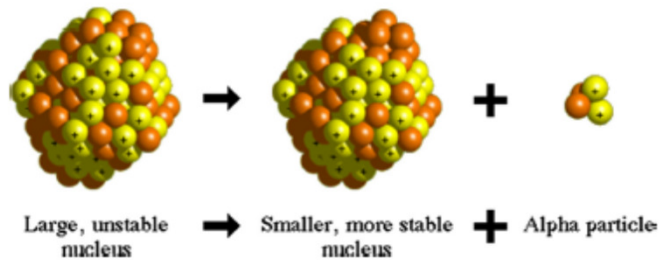
$$E_{Bi}^m + \cancel{E_{Bi}^{cin}} = E_{Po}^m + E_{Po}^{cin} + E_e^m + E_e^{cin} = E_{Po}^m + \frac{p^2}{2m_{Po}} + E_e^m + \frac{p^2}{2m_e}$$

$$\rightarrow p^2 = 2 \left(E_{Bi}^m - E_{Po}^m - E_e^m \right) \frac{m_{Po} m_e}{m_{Po} + m_e}$$

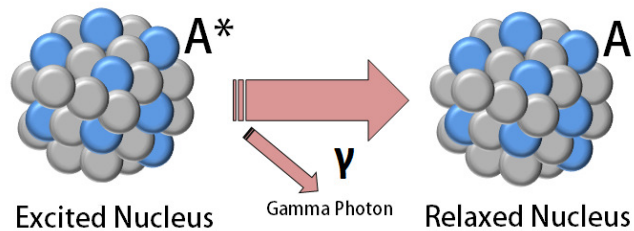
$$\rightarrow E_e = E_e^m + \left(E_{Bi}^m - E_{Po}^m - E_e^m \right) \frac{m_{Po}}{m_{Po} + m_e} \rightarrow 1 \text{ solo valore!}$$

Decadimenti α e γ : Tutto regolare

Decadimento α



Decadimento γ



Conservazione dell'energia:

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

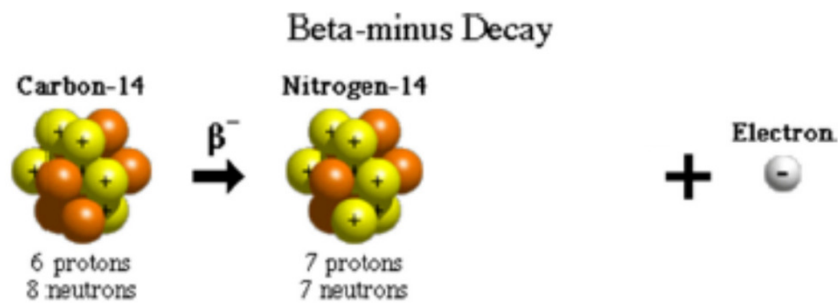
$$\rightarrow E_{\alpha} = E_{\text{nucleo iniz}} - E_{\text{nucleo fin}}$$

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

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

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

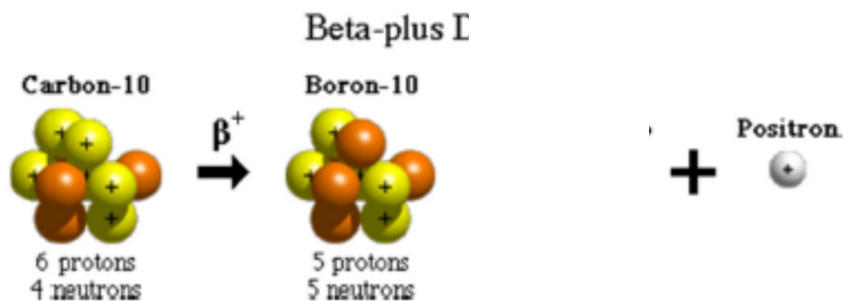
Decadimento β : Un serio problema



Se:

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

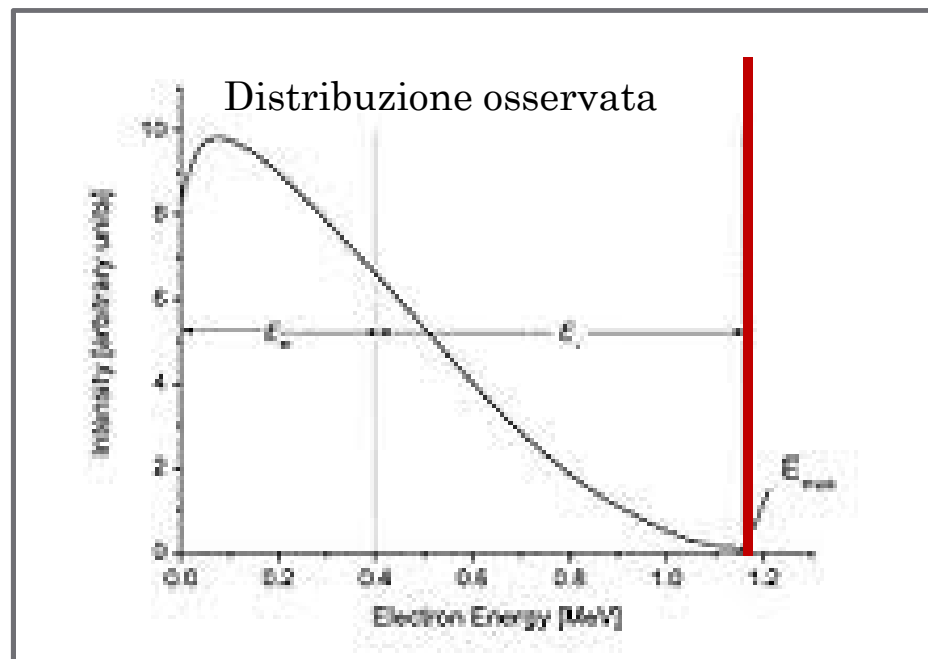
$\rightarrow E_{\beta}$: **unico valore**



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

Chadwick 1914

Distribuzione attesa
per decadimento in 2 corpi

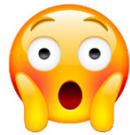


Spettro continuo!

Soluzioni strampalate

Come risolvere la questione?

Bohr: L'energia si conserva solo in media



Altri: Le misure sono sbagliate

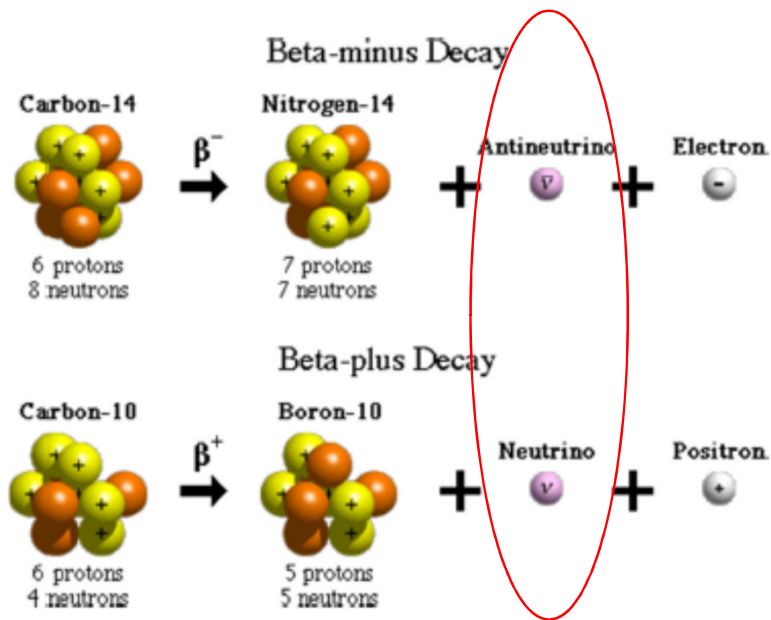


Pauli



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 !

Predizione visionaria

Previsione di una nuova particella:

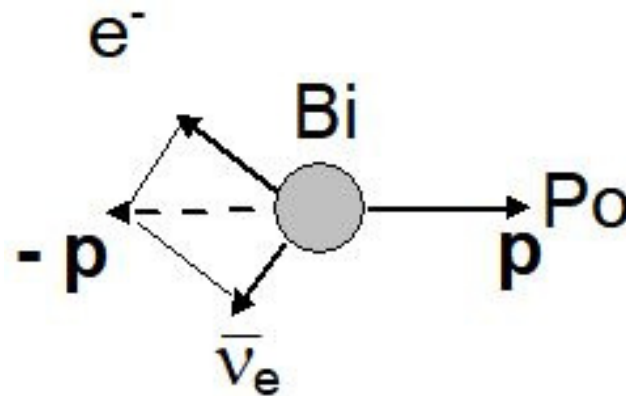
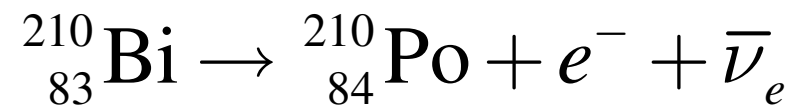
Carica elettrica = Zero

Massa = Zero

Solo interazione debole

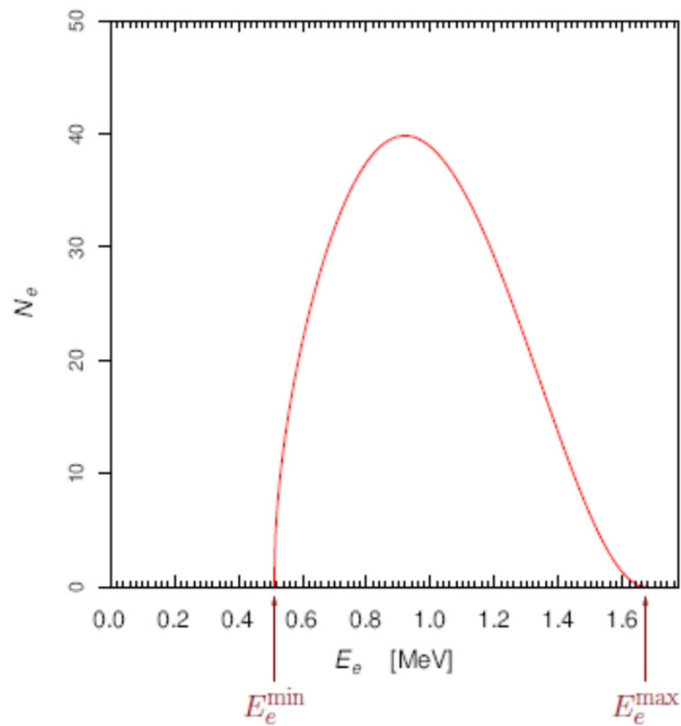
→ *Grandi* difficoltà osservative !

Disintegrazione in *tre* corpi...



...Energia dell'elettrone: indeterminata

Finestra di valori attesi per E_e



β : Misteri, reali e apparenti

1) Da dove vengono gli elettroni (e i neutrini) ?

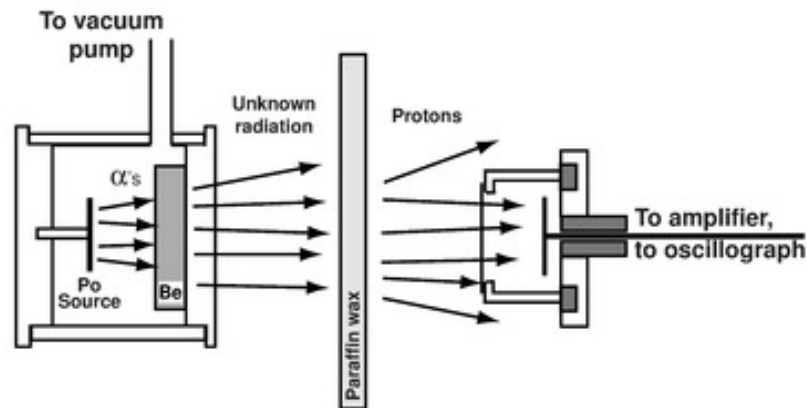
Contenuti nel nucleo prima della disintegrazione ?

Vecchio modello nucleare:

A protoni, $A-Z$ elettroni

2) Perché gli elettroni hanno energie distribuite in un intervallo continuo?

Chadwick 1932



Scoperta del neutrone

Modifica del modello del nucleo: Protoni + Neutroni
→ Nessun elettrone contenuto nel nucleo !

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

Un passo indietro: Dirac e la QED

Nel 1928 Dirac formula un'equazione quantistica relativistica, che prevede elegantemente lo spin dell'elettrone e predice l'esistenza dell'*antielettrone*

Previsione stupefacente, presto confermata: l'antielettrone, o *positrone*, viene osservato nella radiazione cosmica

Generalizzando: per ogni particella si prevede l'esistenza di un'*antiparticella*, in tutto simile ma con carica opposta

Quindi accanto al neutrino deve esistere l'antineutrino, anche lui neutro: Ma allora cosa lo distingue dal neutrino ??

Sottigliezze decisive

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

Inoltre, neutrini e antineutrini hanno *numero leptonico*
opposto (vedi dopo...)

Il valore dei dettagli

Usando l'eq. di Dirac insieme all'elettromagnetismo, tutta la fisica atomica risulta ben interpretabile con elevata precisione

Ma:

Nel 1947 Lamb, che durante la guerra aveva lavorato al MIT sul radar e aveva sviluppato potenti tecniche sperimentali nel campo delle microonde, misura con estrema precisione i livelli energetici dell'atomo di idrogeno, dimostrando che la teoria di Dirac è sbagliata per 1 parte su 1 milione!

La QED riformulata



Julian Schwinger



Richard Feynman

Insieme ad altri, nel primo dopoguerra sviluppano una Teoria Quantistica di Campo che estende l'*Elettrodinamica Quantistica* di Dirac a processi di creazione e distruzione di particelle – con incredibile precisione

Interazione elettromagnetica

Materia e Radiazione descritte in termini di «Campi»



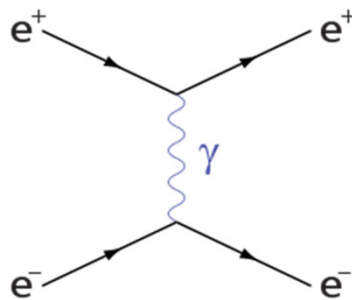
Fermi

Fermioni
Quanti di
materia

Bosoni
Quanti di
forza



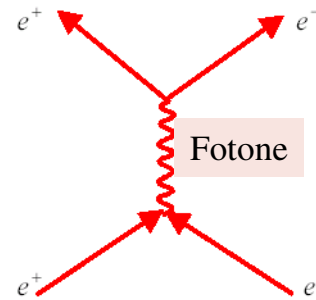
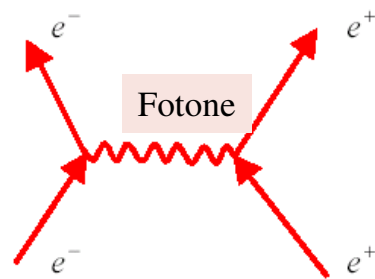
Bose



Il Bosone trasmettitore della forza elettromagnetica è il *Fotone*

Un *elettrone* e un *positrone* interagiscono emettendo ed assorbendo un fotone

QED al lavoro



Nella visione moderna, le cariche elettriche “si sentono” emettendo e assorbendo continuamente *fotoni*: quanti di luce

Diversi processi elementari :

collisione, irraggiamento, materializzazione, annichilazione,...

nei quali costituenti e mediatori vengono creati e distrutti

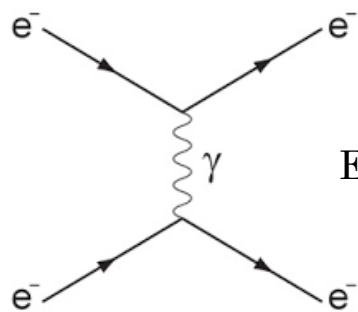
Processi virtuali

Emissione/Assorbimento di bosoni mediatori

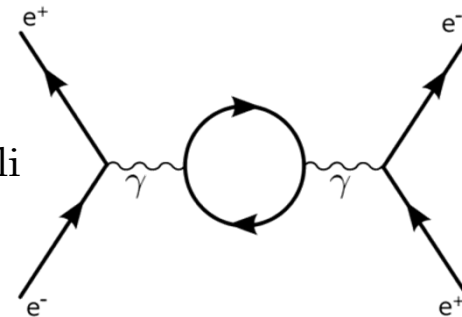
Annichilazione/materializzazione di coppie fermione-antifermione

Processi che possono coinvolgere, oltre a particelle reali, anche stati *virtuali*:

Particelle (fermioni o bosoni) emesse e riassorbite in un tempo molto breve: non rispettano la relazione relativistica fra energia e impulso, ma intervengono nella trasmissione delle interazioni



Esempi di processi virtuali



Come funziona ?

Versione quantistica delle idee classiche

Se si 'scuote' una particella carica, essa emetterà onde elettromagnetiche = quanti di luce

Le onde elettromagnetiche = quanti di luce 'scuotono' le particelle cariche che incontrano

Ma in più:

e^+ ed e^- possono *annichinarsi* in uno o più fotoni

Fotoni possono *materializzarsi* in una coppia $e^+ e^-$

La teoria di Fermi

E. Fermi, 1933:

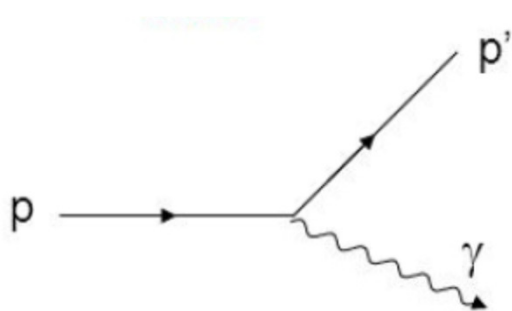
Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta

Teoria ...fondata sull'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione, ma vengano formati, insieme ad un neutrino, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce...

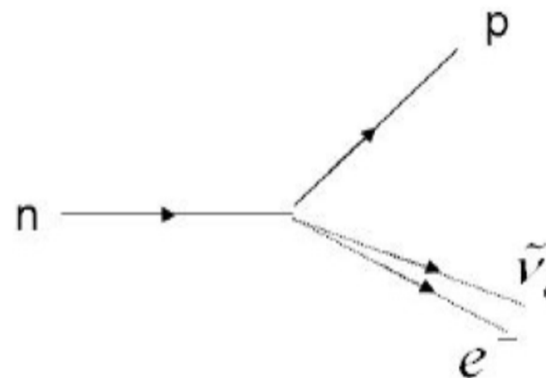
Decadimento β dovuto a una *nuova interazione*

Primo esempio di interazione *senza analogo classico*

Decadimento β vs γ



Emissione di 1 bosone
Carica della particella invariata
→ Corrente *neutra*
Processo elettromagnetico



Emissione di 2 fermioni
Carica della particella incrementa di 1
→ Corrente *carica*
Processo debole

Superficialmente (col senno di poi):

Intensità dell'interazione elettromagnetica \gg Intensità interazione debole

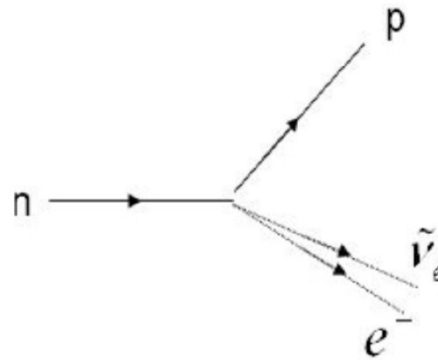
Decadimenti β nei nuclei

$$(A, Z) \longrightarrow (A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}$$

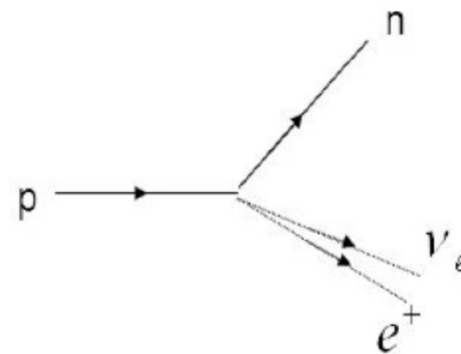
$$n \xrightarrow{\beta^-} p + e^- + \bar{\nu}$$

$$(A, Z) \longrightarrow (A, Z - 1) + e^+ + \nu$$

$$p \xrightarrow{\beta^+} n + e^+ + \nu$$



BETA MINUS DECAY



BETA PLUS DECAY

Elettroni e neutrini

...non sono pre-esistenti nel nucleo:

Vengono creati al momento della disintegrazione

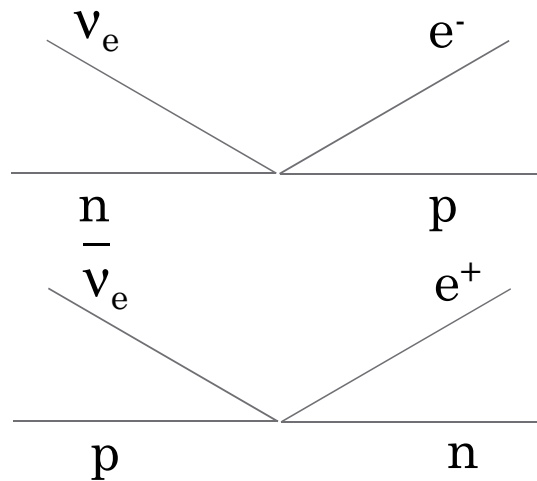
Processi quantistici-relativistici:

Emissione/Assorbimento di *singoli bosoni*

Creazione/Distruzione di *coppie fermione/antifermione*

Interazioni di neutrini

In base a proprietà molto generali di ogni interazione, devono esistere anche i processi ‘inversi’:



$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$

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

Confronto

Interazione molto debole con la materia!

Distanza media che un fotone di 1 MeV percorre in acqua senza che si verifichino collisioni con le molecole del mezzo circostante: **circa 15 cm**

Distanza media che un neutrino di 1 MeV 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