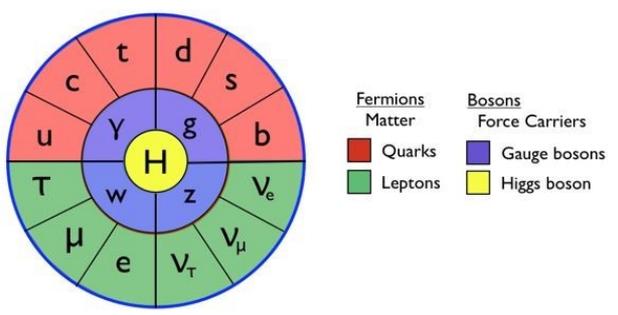
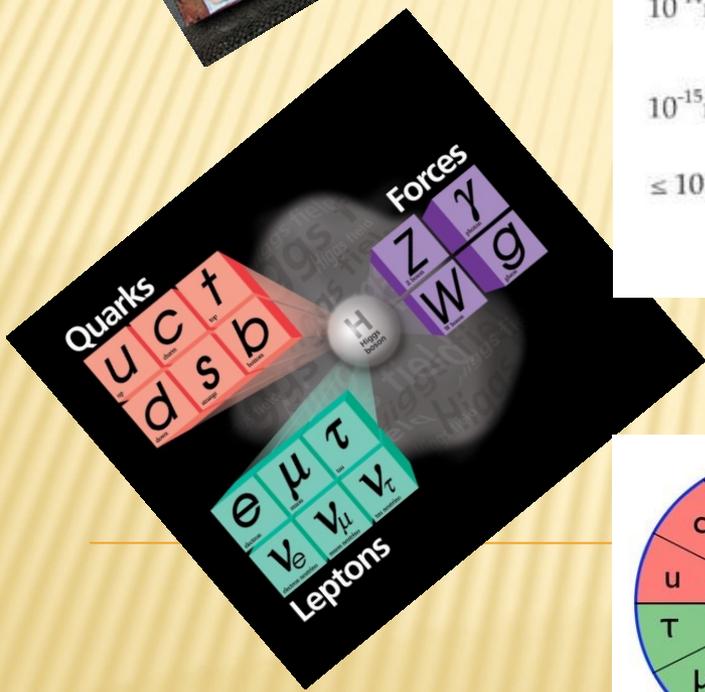
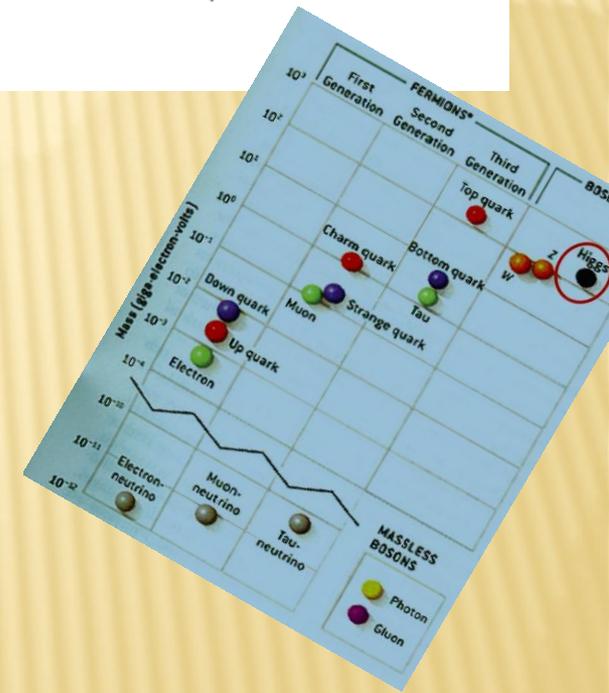
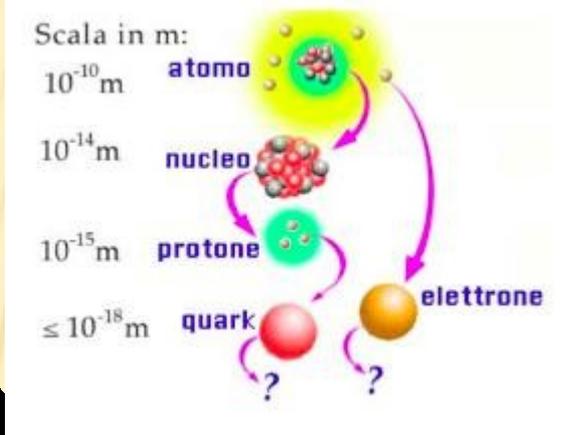
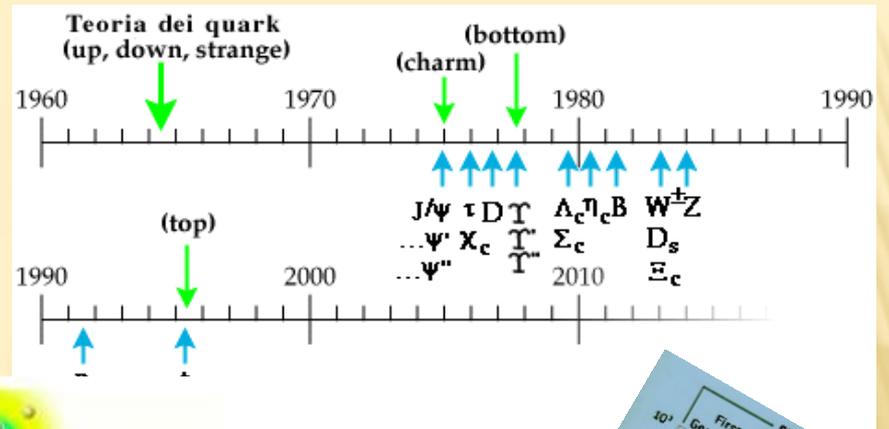


01 APRILE 2021



Particles of the Standard Model

La Teoria del... quasi Tutto!

Un viaggio nel
Modello Standard

Introduzione alla fisica delle particelle elementari

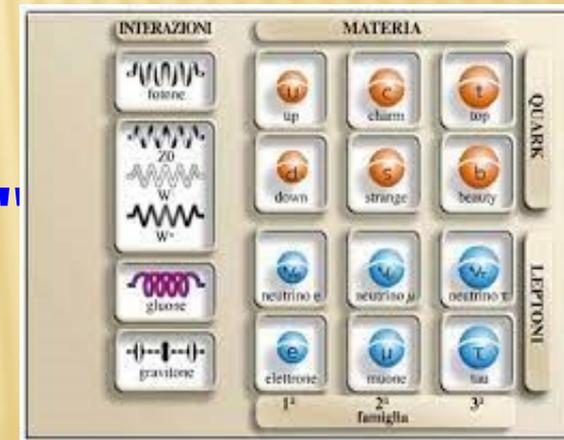
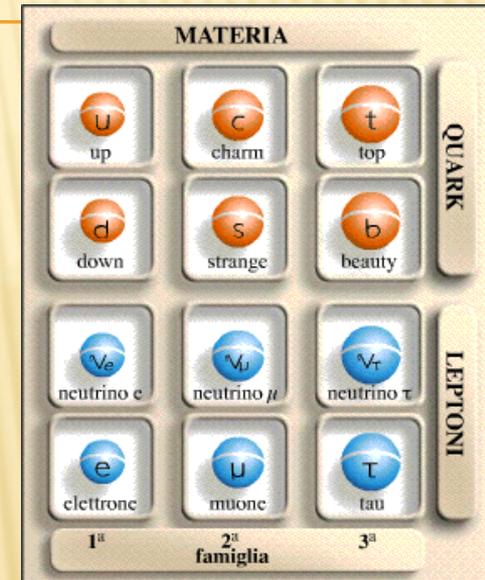
- *Un po' di storia*
 - *Le particelle elementari*
 - *Le forze*
 - *Il Modello Standard*
 - *Bosone di Higgs, LHC ed oltre ...*
- 

Il modello Standard (1964)

Idea chiave:

Ci sono due generi di particelle:

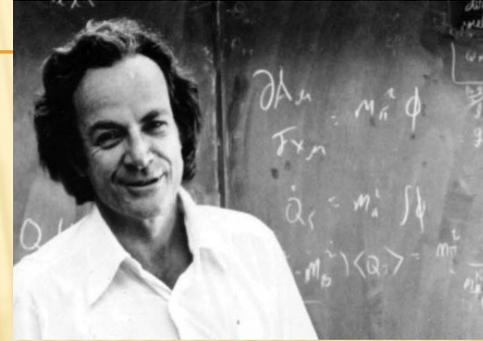
- **particelle che sono materia**
(i quark ed i leptoni)
- **particelle che mediano le forze**
**(ogni tipo di interazione
fondamentale agisce "mediante"
una particella mediatrice
di forza)**



In seguito la gravita` viene inclusa nella discussione anche se in realta' non appartiene al modello standard.

Q.E.D.-PARTICELLA MEDIATRICE DELL'INTERAZIONE

La risposta al trasferimento dell'interazione elettromagnetica fu fornita da Richard Phillips Feynman (New York, 11 maggio 1918 – Los Angeles, 15 febbraio 1988),



Fu Feynman ad avere l'idea giusta per formulare una Teoria Quantistica dei Campi. Egli propose che l'interazione elettromagnetica si svolgesse attraverso lo scambio tra due corpi di una particella intermedia, chiamata **mediatore di forza o quanto di forza o bosone vettore** (dal latino "che trasporta"), la cui massa risulta inversamente proporzionale alla distanza di interazione.

Visto il successo che ottenne, questo meccanismo fu poi esteso agli altri tipi di forze conosciuti.

Dal momento che la forza elettromagnetica ha un raggio d'azione infinito, i quanti responsabili di tale interazione devono avere massa nulla; Feynman identificò tali particelle con i **fotoni**, i quanti di luce introdotti da Einstein nel 1905

ELETTROMAGNETISMO

Molte delle forze che sperimentiamo ogni giorno sono dovute alle interazioni elettromagnetiche nella materia, anche la nostra stessa esistenza.

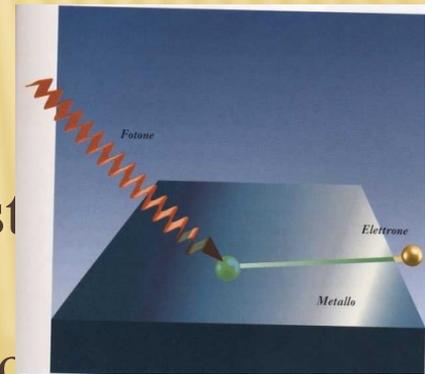
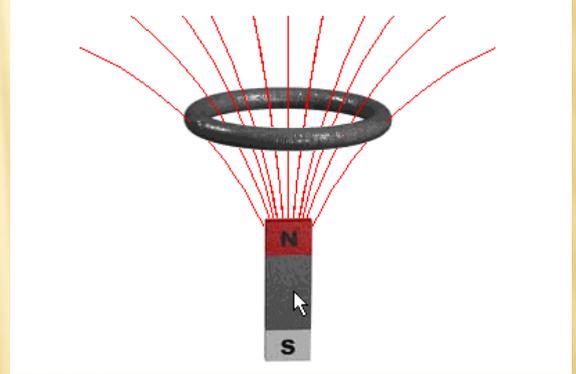
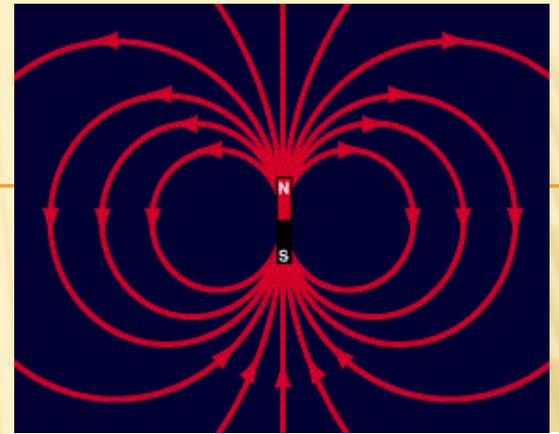
La carica elettrica (positiva/negativa) e il magnetismo (nord/sud) sono aspetti diversi di una stessa interazione, l'elettromagnetismo.

La particella mediatrice dell'interazione elettromagnetica si chiama **fotone**.

In base alla loro energia, i fotoni sono distinti come:

raggi gamma, luce (visibile), microonde, onde radio, etc.

L'evidenza che le onde elettromagnetiche sono composte da pacchetti di energia chiamati fotoni si ebbe nel 1905 con l'interpretazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico.



Effetto fotoelettrico

Q.E.D.-PARTICELLA MEDIATRICE DELL'INTERAZIONE

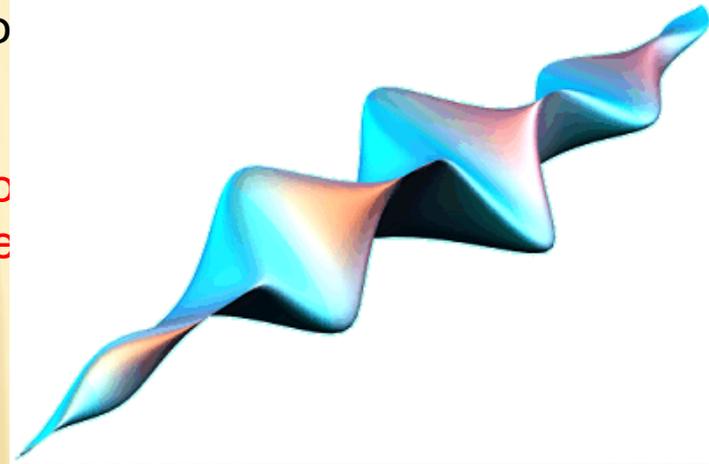
L'interazione tra due corpuscoli carichi elettricamente non si esplica in modo diretto ed istantaneo, bensì viene trasmessa con una velocità finita (quella della luce) in seguito all'emissione e al riassorbimento di fotoni VIRTUALI da parte delle cariche stesse.

Questa teoria supera l'elettrodinamica classica, aggirando le sue inalienabili difficoltà, come l'azione a distanza e la propagazione a velocità infinita, e prende il nome di **Elettrodinamica Quantistica**, abbreviata con la sigla **QED, dall'inglese Quantum Electro-Dynamics.**

Essa descrive tutti i fenomeni che coinvolgono le particelle cariche interagenti per mezzo della forza elettromagnetica, includendo la teoria della Relatività (es. la quantità come il momento magnetico anomalo del muone).

l'interazione elettromagnetica- in sintesi

- L'interazione elettromagnetica è trasportata dal fotone
- Il fotone, la Z, il W^+ e il W^- sono **quattro diversi bosoni** provengono dalla stessa interazione, "elettrodebole"
- Il fotone media interazioni fra particelle con carica elettrica: non si accoppia a particelle neutre.



Quello che i fisici delle particelle chiamano "fotone" è il quanto della Radiazione elettromagnetica.

Le proprietà corpuscolari del fotone sono più evidenti ad alta energia, mentre a bassa energia sono più efficaci le descrizioni ondulatorie.

Ma anche quando telefonate con un telefono cellulare, ricevete e emettete fotoni (non voi ,ma il cellulare!)

Ci sono altre due forze, ipotizzate intorno agli anni 1921-1933 (Fermi e altri), a raggio d'azione corto (oltre una distanza dell'ordine di $10^{-15} \sim 10^{-18}$ metri non si fanno più sentire):

- **nucleare forte** è indipendente dalla carica dei nucleoni (protoni e neutroni), quindi agisce nello stesso modo per i protoni così come per i neutroni (mediatori di forza i gluoni);
- **nucleare debole** (mediata dai bosoni W e Z) si chiama debole perché è circa 10^9 volte, migliaia di migliaia di migliaia di volte, minore della forza nucleare forte.

È responsabile di certi decadimenti nucleari come il decadimento beta- che trasforma un neutrone in protone più elettrone, più antineutrino e/o il decadimento beta+ che trasforma un protone in un neutrone, più positrone e neutrino

LA FORZA DEBOLE.

L'unificazione dell'elettricità e del magnetismo, inoltre, fu solo l'inizio. Oggi sappiamo che c'è un'altra forza, la **forza nucleare debole**, che ha la stessa origine.

Un atomo ha un involucro di elettroni a carica elettrica negativa, disposti su orbitali, in equilibrio col nucleo a carica positiva. Questo è composto da protoni, positivi, tenuti insieme dalla forza nucleare forte, e da neutroni, neutri.

I nucleoni (protoni e neutroni) sono circa 2000 volte più massicci degli elettroni, ma la loro massa è data al 99% dal lavoro incessante svolto dai gluoni, cioè dall'energia delle particelle responsabili dell'interazione forte.

I neutroni collaborano a garantire la stabilità del nucleo: se in un nucleo ci fossero troppi protoni, che si respingono fra loro, questo diverrebbe instabile. Qui interviene la forza nucleare debole, in grado di trasformare un protone in neutrone (e viceversa).

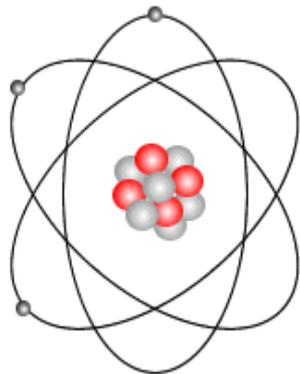
LA FORZA DEBOLE.

Le teorie che descrivevano le due forze si assomigliavano misteriosamente per molti aspetti.

La teoria delle forze elettromagnetiche, nota come elettrodinamica quantistica, (Q.E.D.) e la teoria della forza «debole», responsabile di alcuni tipi di radioattività e della fusione nucleare all'interno del Sole, sembravano due facce di una stessa medaglia.

oggi sappiamo che la forza nucleare debole, che agisce tra le particelle che costituiscono il nucleo dell'atomo - i protoni e i neutroni - e che ha una portata estremamente ridotta (dell'ordine di 10^{-17} metri circa), è strettamente correlata alla forza elettromagnetica.

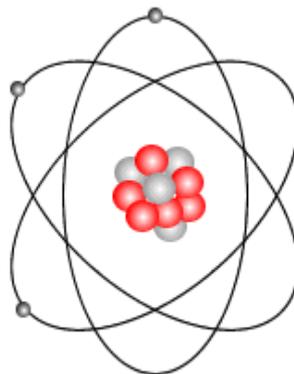
ECCESSO DI NEUTRONI



6 neutroni e 4 protoni

- PROTONE
- NEUTRONE
- ELETTRONE

DIFETTO DI NEUTRONI



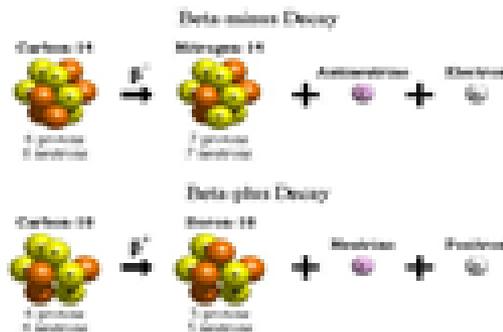
4 neutroni e 6 protoni

- PROTONE
- NEUTRONE
- ELETTRONE

Lo sappiamo perché la forza debole è all'origine della radiazione «**beta**», ovvero dell'**emissione**, da parte di un atomo. **di un elettrone** oppure della sua antiparticella, **il positrone**

Un nucleo instabile decade in un altro nucleo emettendo un elettrone o un positrone. Possono verificarsi due tipi di decadimento beta, in caso di **eccesso** o **difetto** di neutroni.

Decadimento β

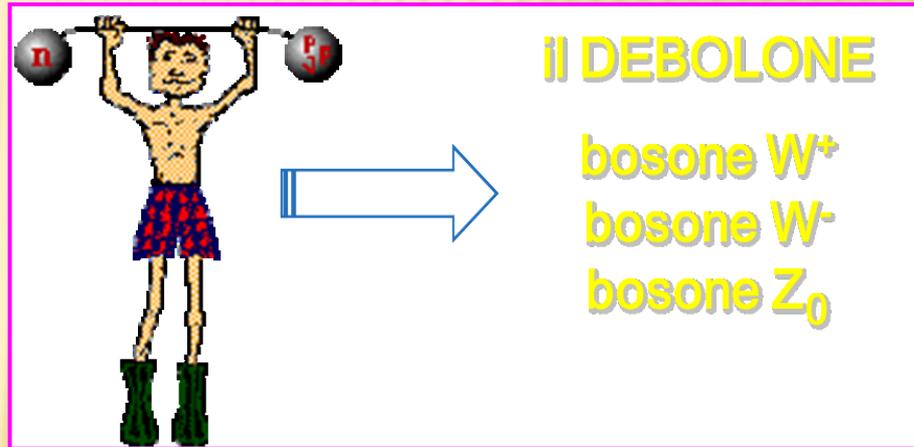


1967 - Weinberg e Salam ,quindi , proposero separatamente una teoria unificante dell'elettromagnetismo e dell'interazione debole.

C'era però un problema: la nuova teoria aggiungeva al cosiddetto zoo delle particelle due oggetti che nessuno aveva ancora mai osservato:

i **bosoni W^\pm e Z_0**

(un bosone è una particella che trasmette una forza).



1972 - Formulazione di una teoria delle interazioni forti, suggerita da Fritzsche e Gell-Mann

INTERAZIONE DEBOLE



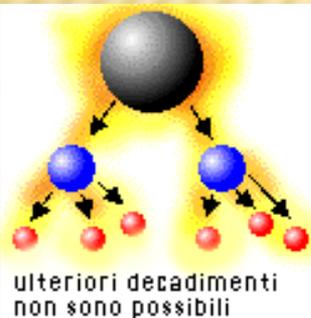
il DEBOLONE

bosone W^+
bosone W^-
bosone Z_0

Le particelle più massicce non sono stabili.

Esse **decadono** (cambiano *sapore*) trasformandosi in particelle più leggere.

Il decadimento è dovuto all'interazione debole.



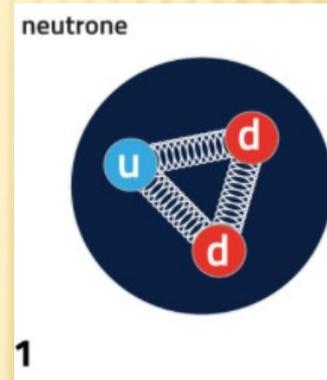
LA FORMAZIONE DI W^\pm E Z_0

Come esempio consideriamo una delle manifestazioni delle interazioni deboli, il decadimento BETA : $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e \Rightarrow$ decadimento β

la trasformazione di un neutrone in un protone più un elettrone e un antineutrino della famiglia dell'elettrone.

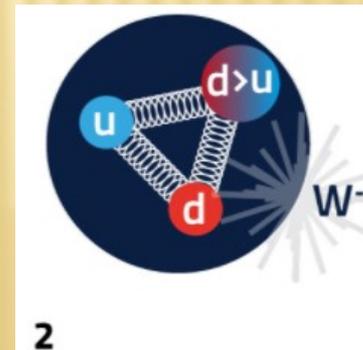
Seguiamo le singole fasi di questa trasformazione:

disegno 1: lo stato iniziale è un neutrone composto da due quark **down** e un quark **up**



CARICA ELETT:
Down : $-1/3$
Down : $-1/3$
Up : $+2/3 =$
Car.neutrone 0

disegno 2: un quark **down** interagisce con il campo associato all'interazione debole ed emette il mediatore di quel campo, il bosone intermedio **W**, trasformandosi in un quark **up**

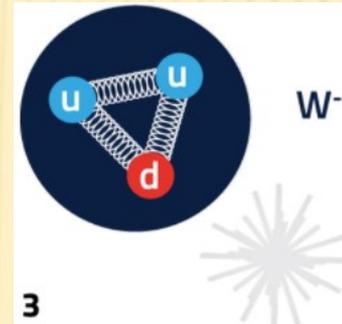


CARICA ELETT:
Down : $-1/3$
Up : $+2/3$
Up : $+2/3 =$
Car.protone +1
Car.bosone W^{-1}

LA FORMAZIONE DI W^\pm E $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e \Rightarrow$ decadimento β

la carica elettrica iniziale del quark down è $-1/3$, mentre la carica finale è la somma della carica del quark up ($2/3$) e del bosone W (-1). Questo vuol dire che la carica totale in un processo di trasformazione - o come tecnicamente si dice di "decadimento debole" - si conserva.

disegno 3: il neutrone iniziale è ora diventato un protone (ricordiamo che un protone è composto da due quark **up** e di uno **down**)



**CARICA
ELETT:**

Down : $-1/3$

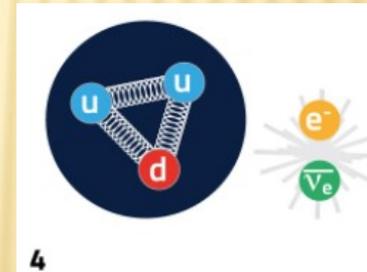
Up : $+2/3$

Up : $+2/3 =$

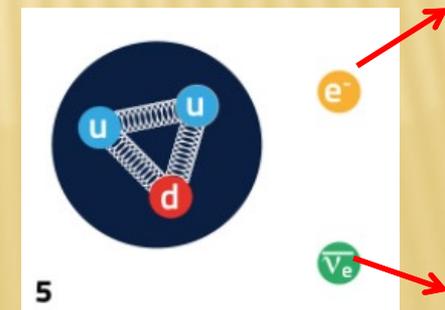
Car. protone $+1$

Car. bosone W -1

disegno 4: il bosone W decade in un **elettrone** (carica elettrica **-1**) e in un **anti-neutrino** (privo di carica elettrica). Anche in questo passaggio la carica elettrica è conservata.



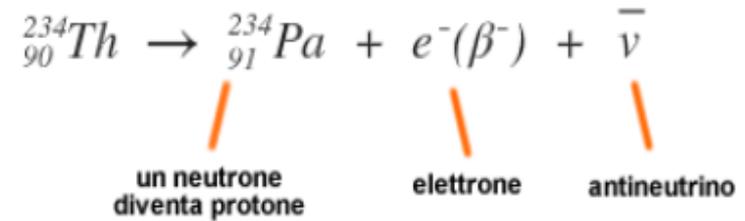
disegno 5: nello stato finale l'elettrone e l'antineutrino si allontanano dal protone.



Un esempio di reazione nucleare beta

La reazione nucleare mostra il decadimento **beta negativo** del Torio-234. Il nucleo emette un elettrone (e^-) e un neutrone si trasforma in protone. Dal nucleo fuoriesce anche un antineutrino ($\bar{\nu}$)

reazione nucleare decadimento beta



Il nucleo atomico finale non è più un isotopo del torio (Th) bensì del protoattinio (Pa) poiché è cambiata la composizione dei nucleoni e il numero atomico (da 90 a 91) a parità di massa atomica (234). Il prodotto finale è un altro elemento chimico

Interazione nucleare elettrodebole

Negli anni '60, Steven Weinberg, Sheldon Glashow e Abdus Salam teorizzarono che era responsabile della creazione della forza debole e di quella elettromagnetica un'altra forza, denominata «**forza elettrodebole**», ipotizzando che fosse esistita nella sua forma originale solo nelle condizioni di altissima energia che avevano caratterizzato l'inizio dell'Universo. ,

Dal lavoro teorico di Sheldon Lee Glashov (1932-), Steven Weinberg (1933-) ed Abdus Salam (1926-1996) , nel 1968 proposero **di unificare le forze elettromagnetica e debole nell'unico campo "elettrodebole"** : lavoro per il quale vinsero il Premio Nobel nel 1979.

ELETRONVOLT

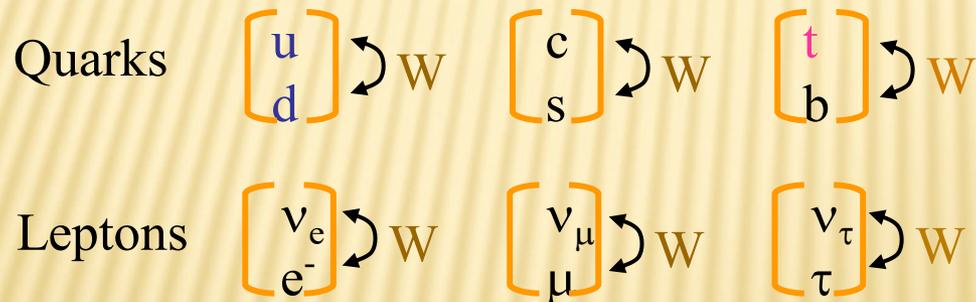
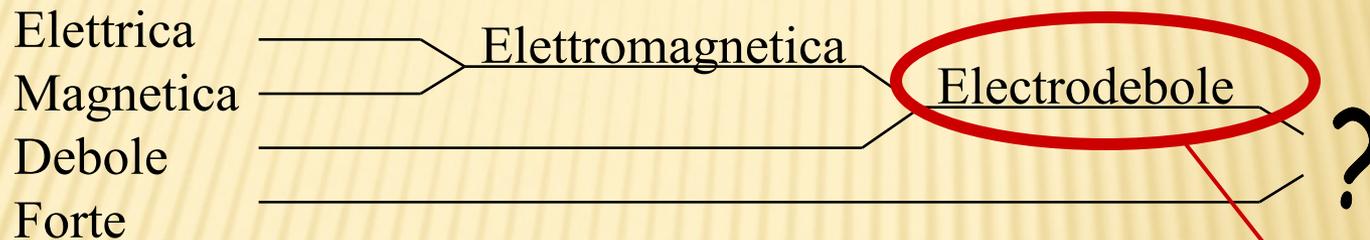
I fisici misurano l'energia di una particella in elettronvolt (eV); quando un elettrone attraversa la differenza di potenziale generata da una batteria da 100 volt, ad esempio, la sua energia cinetica aumenta di 100 eV.

Sono riusciti a predire l'esistenza di particelle che poi sono sempre state trovate, e in molti casi la teoria ha detto anche con precisione dove andare a cercarle.

Salam e Weinberg dissero ai ricercatori del CERN che, se avessero fatto collidere le loro particelle a un'energia tra 80 e 90 gigaelettronvolt (GeV), avrebbero trovato i bosoni W e Z. Ed è proprio quello che accadde.

Interazione Debole

- L'interazione ,dunque ,debole e' responsabile del fatto che tutti i quark o leptoni decadono in particelle di massa minore
- I mediatori dell'interazione debole sono le particelle: W^+ , W^- e Z^0



Cambiamenti di tipo (detto “sapore”) governati dall'interazione debole

Nel Modello Standard l'interazione Debole e' unificata con quella Elettromagnetica: a piccole distanze stessa intensita'

Test della Teoria ElettroDebole

- Con l'introduzione della teoria elettrodebole furono necessarie tre nuove particelle: i mediatori dell'interazione W^+ , W^- and Z^0 .
- Le loro masse erano previste dalla teoria stessa:
 - ✗ $M_W c^2 \approx 80 \text{ GeV}$
 - ✗ $M_Z c^2 \approx 90 \text{ GeV}$

Circa la massa del Bromo (z=35) o dello Zirconio (z=40)!!!
...Pesantucce per essere "elementari"...

La W e la Z hanno una vita media brevissima, ma possono essere identificate tramite i loro prodotti di decadimento, anche essi predetti dalla teoria elettrodebole:

Scoperte nel 1983!
..e con la corretta massa

$W \rightarrow$

$e\nu_e$
 $\mu\nu_\mu$
 ud
 cs
 $tb(?)$

$Z \rightarrow$

e^+e^-
 $\mu^+\mu^-$
 $\tau^+\tau^-$
 qq

Storia anni '80 – 2002..

- 1983** Scoperta del W^\pm e dello Z^0 al sincrotrone del CERN synchrotron usando la tecnica sviluppata da **Rubbia** e **Van der Meer** per far collidere protoni ed antiprotoni.
- 1989** Gli esperimenti portati avanti a SLAC e al CERN suggeriscono fortemente che vi siano 3 e solo 3 generazioni di particelle fondamentali
- 1995** A Fermilab l'esperimento CDF vede per la prima volta il quark top.
- 1998** L'esperimento SuperK identifica oscillazioni di neutrino (I neutrini hanno massa!)
- 2000-1** Viene osservata la violazione di CP usando B-mesons dagli esperimenti BABAR, BELLE
- 2002** “Risolto” il problema dei neutrini Solari.

LA FORZA NUCLEARE ELETTODEBOLE

Le idea dell'esistenza dei bosoni vettori di forza debole venne confermata dalla scoperta degli astenoni W^- , W^+ e Z_0 , (dal greco "asthenos", "debole") mediatori della forza elettrodebole, avvenuta nel 1984 ad opera di Carlo Rubbia (1934-) e Simon van der Meer (1925-2011). Entrambi gli scienziati furono premiati con il Nobel nello stesso anno.



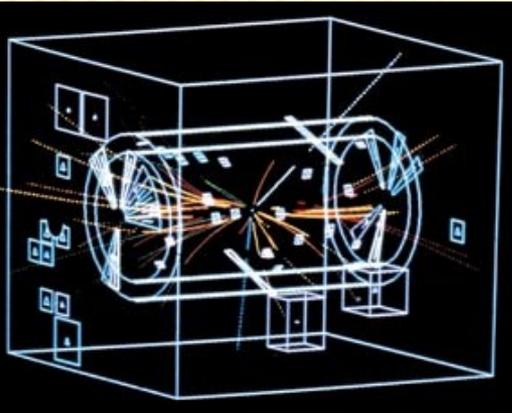
Carlo Rubbia (Gorizia, 31 marzo 1934 – vivente)

L'interazione debole - sintesi

Le interazioni deboli, responsabili della radioattività e di alcuni fenomeni fondamentali per far **brillare le stelle**, sono il risultato dello scambio di particelle molto massive, i bosoni vettori W e Z

I bosoni vettori carichi hanno capacità di trasformare un quark in un altro, o un leptone in un altro

La loro grande massa rende difficile osservarle...



Nel 1983, gli esperimenti UA1 e UA2 al CERN faranno finalmente centro, e nel 1984 Rubbia e Van der Meer ottengono il premio Nobel per la Fisica

