

# Fisica al Large Hadron Collider

Daniele Treleani





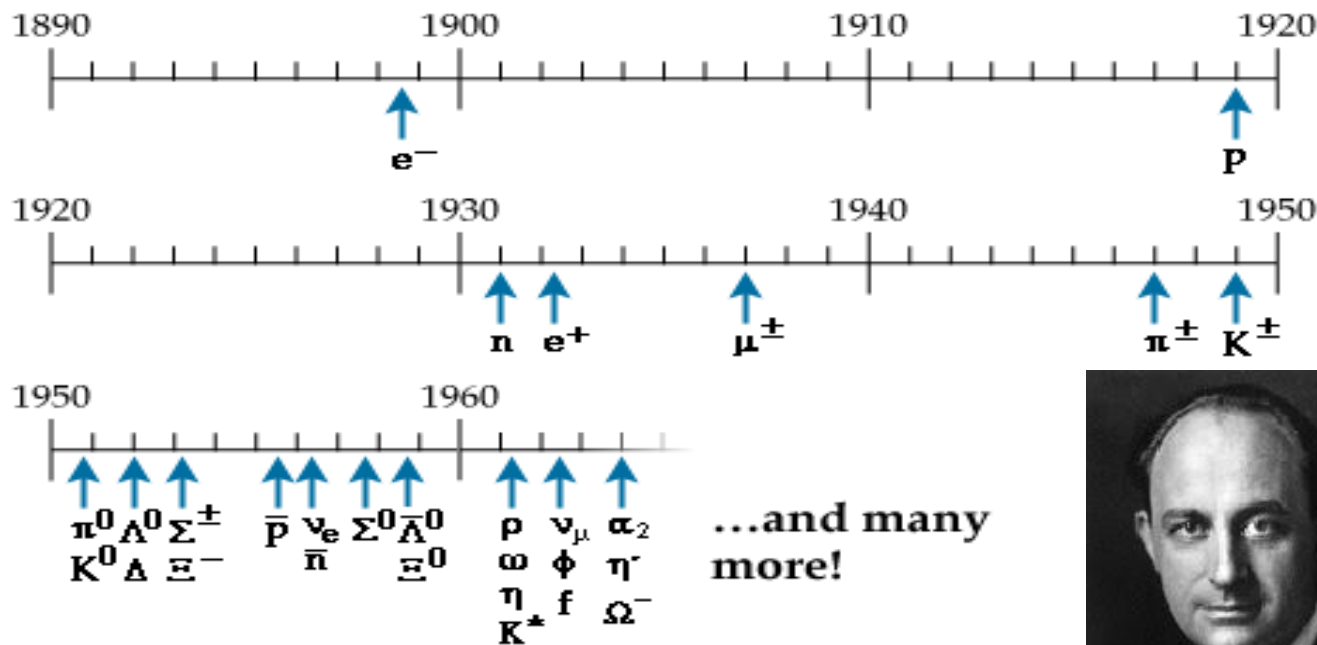
La tavola periodica rappresenta una semplificazione enorme, riducendo l'immensa complessità del mondo che ci circonda alle infinite combinazioni dei pochi elementi della tavola periodica.

Ogni elemento nella tavola periodica è costituito da un atomo diverso e una semplificazione ancora più drastica si ebbe quando si scoprì che la struttura dell'atomo è costituita da tre soli costituenti: il neutrone, il protone e l'elettrone.

Lo studio delle particelle che costituiscono la struttura dell'atomo riserva tuttavia delle grosse sorprese. Neutrone, protone ed elettrone non sono infatti le uniche particelle 'elementari'.

# Una miriade di nuove particelle

Dopo il protone, il neutrone e l'elettrone, i fisici scoprirono il positrone e poi tantissime altre particelle, diverse da quelle che costituiscono normalmente la materia :  
 $\pi$ ,  $K$ ,  $\mu$ ,  $\Lambda$ ,  $\nu$ ,  $\omega$ ,  $\rho$ , ..... etc etc etc

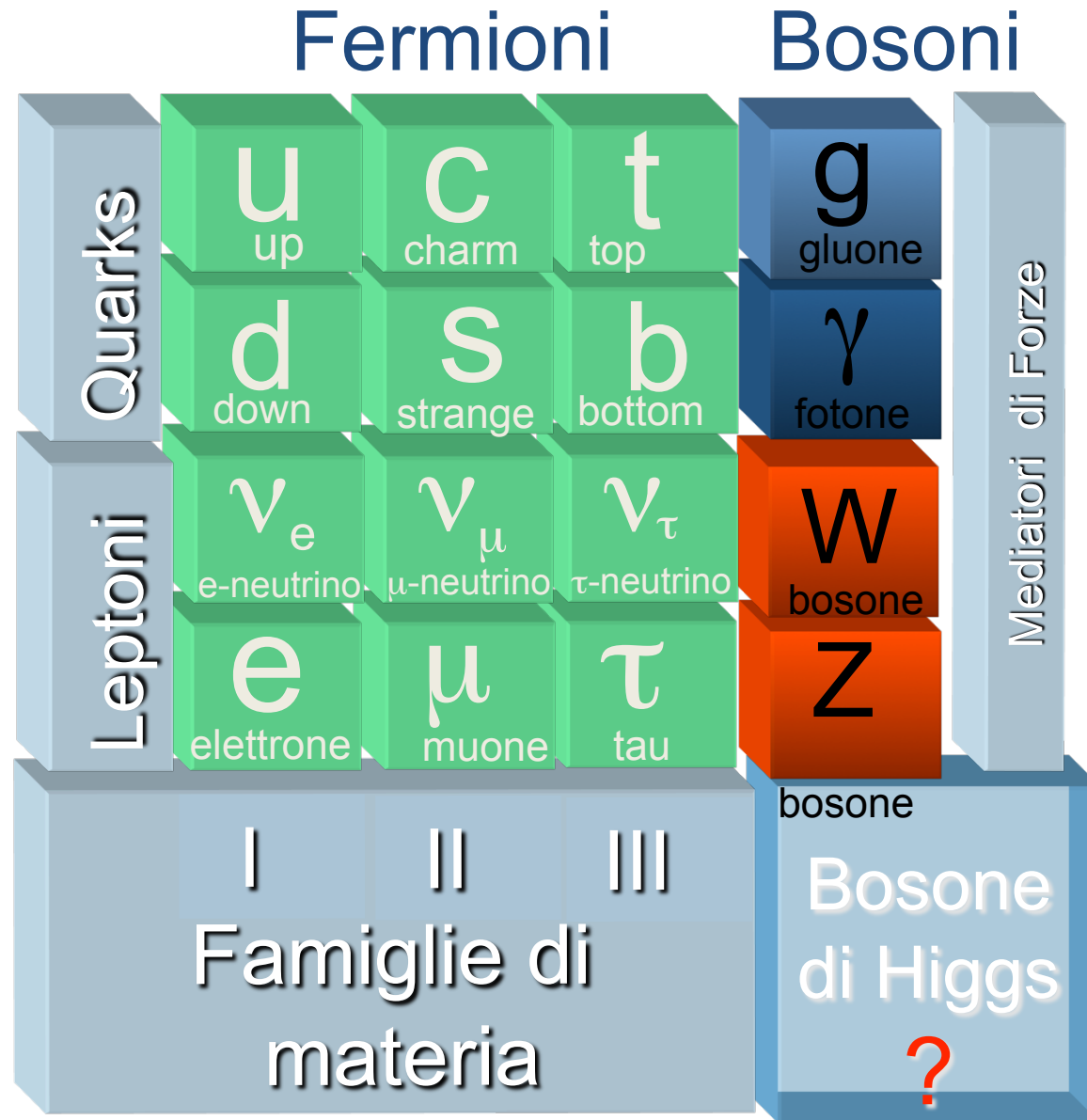


**Enrico Fermi:** “Ragazzo, se io potessi ricordare il nome di tutte queste particelle sarei un botanico!”

Ma allora: cosa significa **FONDAMENTALE??**

Di cosa siamo veramente “fatti”?

# Il Modello Standard, 1970-2000





# Il Modello Standard



Richard P.  
Feynman

Julian  
Schwinger

Sin-Itiro  
Tomonaga

QED

Premio Nobel per la Fisica 1965

( [www.nobel.se/physics/laureates/1965/](http://www.nobel.se/physics/laureates/1965/) )



Sheldon Lee  
Glashow

Abdus  
Salam

Steven  
Weinberg

Interazioni  
elettrodeboli

Premio Nobel per la Fisica 1979

( [www.nobel.se/physics/laureates/1979/](http://www.nobel.se/physics/laureates/1979/) )

E le interazioni forti (QCD)?? Niente Nobel per ora!

# La Fisica Moderna

Due **“rivoluzioni scientifiche”** stanno alla base della FISICA MODERNA – entrambe occorse nella prima metà del 20esimo secolo.

- **La Relatività**
- **La Meccanica Quantistica**

# La Relativita'


Esiste in natura una velocita' limite la velocita' della luce nel vuoto, **c**. La velocita' limite deve essere uguale per tutti e quindi nel vuoto la luce si muove con la stessa velocita' per tutti gli osservatori, indipendentemente dalla velocita' con cui questi si muovono. Una conseguenza notevole e' che il tempo impiegato dalla luce per raggiungere un determinato punto e' di diverso per un osservatore fermo e per un osservatore in moto.

 I due osservatori vedono il tempo scorrere con velocita' diverse

Applicando una forza ad una massa produciamo una variazione della sua velocita'. Quando la velocita' si avvicina a **c** (velocita' limite) la forza produce una variazione di velocita' sempre piu' piccola

 La massa cresce con la velocita'

L'espressione **mc<sup>2</sup>** rappresenta un'energia (l'energia cinetica e'  $\frac{1}{2}mv^2$ )  
**c** tuttavia e' una costante universale mentre la massa puo' cambiare

 Un processo in cui la massa cambia da **m<sub>1</sub>** a **m<sub>2</sub>** implica uno scambio di energia pari a **(m<sub>2</sub>-m<sub>1</sub>)c<sup>2</sup>**

**c=3x10<sup>8</sup> m/sec**, se **m<sub>2</sub>-m<sub>1</sub>=1gr** l'energia scambiata vale **9x10<sup>16</sup> Joule**  
corrispondente all'energia sviluppata da circa **2 miliardi di litri di benzina !**



# La Meccanica Quantistica

Per misurare una sua proprietà e' necessario interagire con l'oggetto a cui siamo interessati.

Se l'oggetto e' molto piccolo (ad es. un atomo) non e' possibile interagire senza modificarlo.

Ne segue che una misura che localizzi la posizione dell'oggetto lascia indeterminata la sua quantità di moto e viceversa

$$\Delta r \Delta p \geq \hbar$$

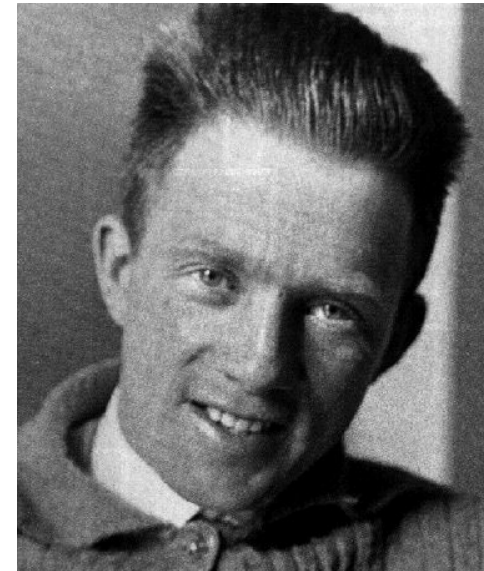
una misura che individui l'oggetto in un determinato istante lascia indeterminata

la sua energia e viceversa  $\Delta t \Delta E \geq \hbar$

## Principio di indeterminazione di Heisenberg

Uno stato quantistico possiede quindi solo alcune delle proprietà che caratterizzerebbero uno stato macroscopico.

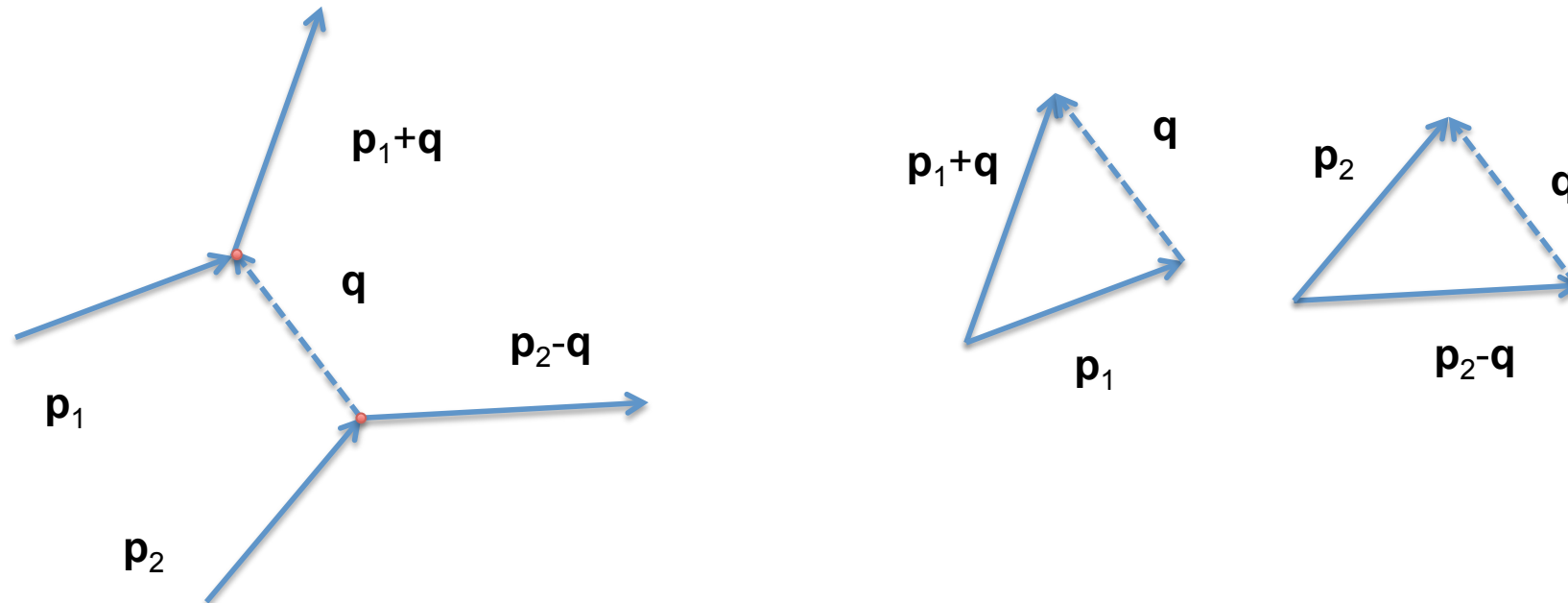
Uno stato quantistico risulta pertanto caratterizzato da un insieme di grandezze fisiche, che possono venir misurate contemporaneamente



Heisenberg nel 1925,  
all'età di 24 anni

## Come si rappresenta l'interazione tra due particelle con la Meccanica Quantistica ?

Consideriamo il caso particolarmente semplice dell'urto di due particelle a massa nulla. L'interazione avviene tramite lo scambio di una terza particella



Nel nostro caso quantità di moto ed energia definiscono completamente lo stato quantistico di ogni particella

Le frecce rappresentano i vettori quantità di moto delle particelle.

L'energia e dalla quantità di moto delle particelle iniziali e finali sono legati dalla relazione relativistica

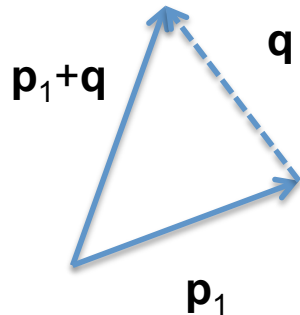
$$E^2 = |\mathbf{p}|^2 c^2 + m^2 c^4.$$

Se  $m=0$ ,  $E=|\mathbf{p}|$  e la lunghezza della freccia è proporzionale all'energia della particella.

$\mathbf{p}_1$  e  $\mathbf{p}_2$  sono le quantità di moto iniziali;  $E_1=|\mathbf{p}_1|c$  e  $E_2=|\mathbf{p}_2|c$  sono le energie iniziali

$\mathbf{p}_1+\mathbf{q}$  e  $\mathbf{p}_2-\mathbf{q}$  le quantità di moto finali;  $E_1'=|\mathbf{p}_1+\mathbf{q}|c$  e  $E_2'=|\mathbf{p}_2-\mathbf{q}|c$  sono le energie finali

Si noti che mentre la relazione tra energia e quantità di moto è soddisfatta per le particelle iniziali e finali, la relazione NON è soddisfatta per la particella scambiata.



La quantità di moto della particella scambiata infatti è  $\mathbf{q}$  e la sua energia è

$E_1'-E_1=(|\mathbf{p}_1+\mathbf{q}|-|\mathbf{p}_1|)c$  che è diverso da  $|\mathbf{q}|c$ ,

dal momento che

$|\mathbf{p}_1+\mathbf{q}|$ ,  $|\mathbf{p}_1|$  e  $|\mathbf{q}|$  sono i lati del triangolo in figura

Le particelle iniziali e finali soddisfano la relazione tra energia e quantità di moto prevista dalla relatività, la particella scambiata no. Le particelle iniziali e finali mantengono il proprio stato per tempi molto lunghi, che possono venir considerati infiniti e c'è quindi un solo valore possibile per la loro energia.

Al contrario la particella scambiata ha una vita brevissima. La sua esistenza è limitata all'istante dell'interazione e la sua energia può quindi assumere qualunque valore. Il valore che assume si può dedurre a posteriori dalla configurazione cinematica assunta dallo stato finale prodotto.

La particella scambiata è pertanto una **particella 'virtuale'**, che può vivere solo per un intervallo di tempo compatibile col principio di indeterminazione

$$\Delta t \simeq \frac{\hbar}{\Delta E}$$

La particella scambiata è quindi in grado di percorrere soltanto una distanza

$$\Delta r \simeq \frac{\hbar c}{\Delta E}$$

Dove  $\Delta E = E_2' - E_1' - |\mathbf{q}|c$

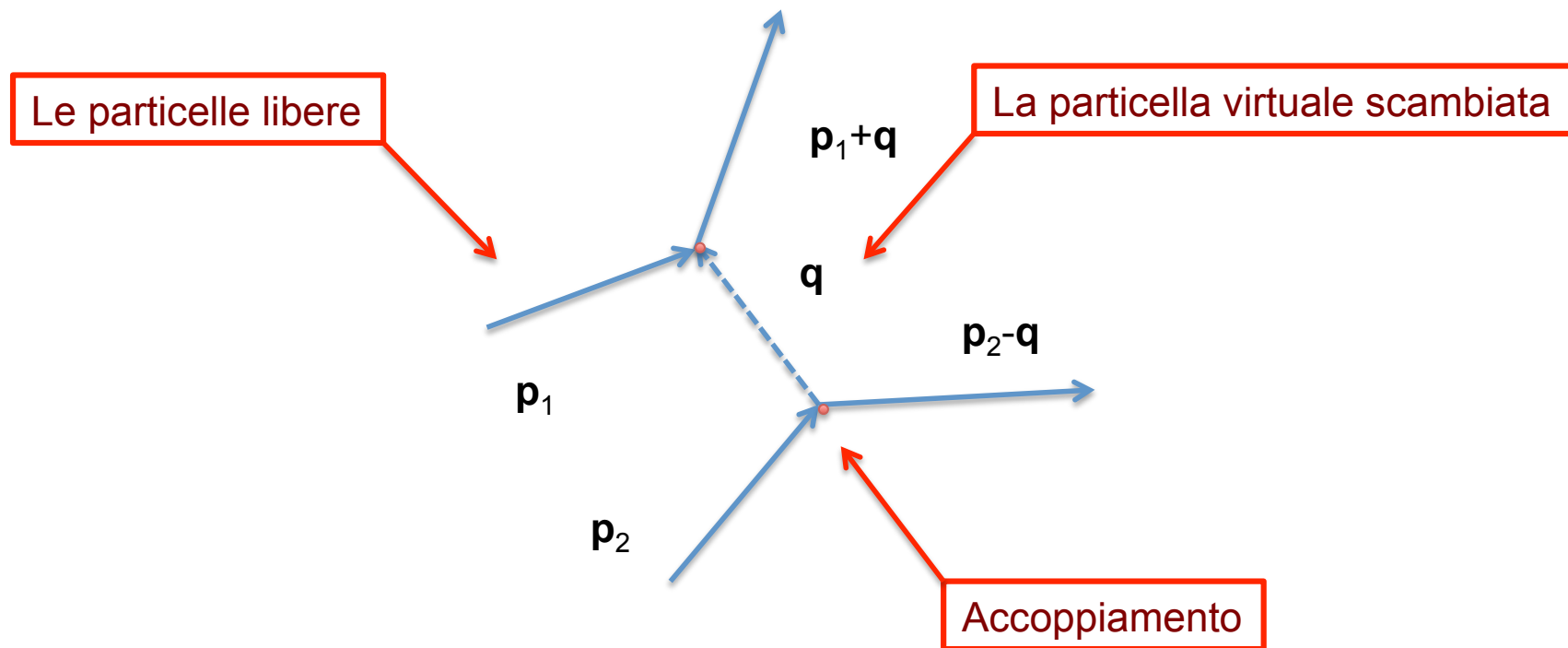
Se  $\Delta E = 1 \text{ GeV}$ ,  $\Delta r = 1/5 \text{ fm}$

$\Delta E = 100 \text{ GeV}$ ,  $\Delta r = 2 \times 10^{-3} \text{ fm}$

$r_{\text{protone}} = 0,88 \text{ fm}$ ;  $1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$

La struttura delle particelle puo quindi venir studiata utilizzando processi con valori elevati della quantita' di moto trasferita. Valori molto elevati della quantita' di moto trasferita permettono di sondare la struttura a distanze molto piccole.

Gli elementi utilizzati nell'esempio sono gli elementi basilari per la descrizione dei processi sub-nucleari:



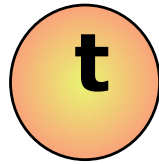
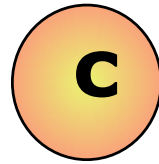
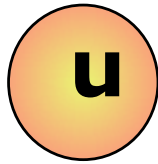
# Il Modello Standard: le particelle

Carica  
elettrica

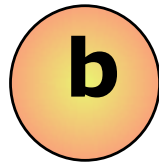
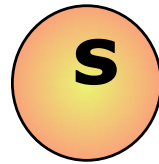
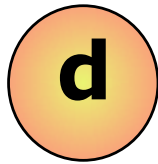
3 generazioni

piu' pesante

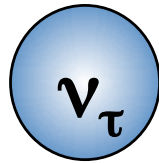
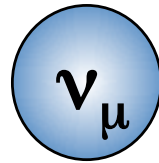
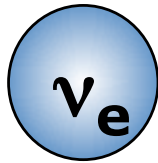
+2/3



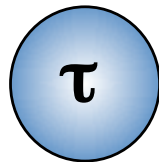
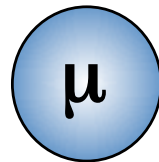
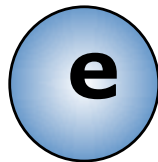
-1/3



0



-1



FERMIONI

quark

I mediatori:

g gluoni (8)

γ fotone

W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup>, Z bosoni

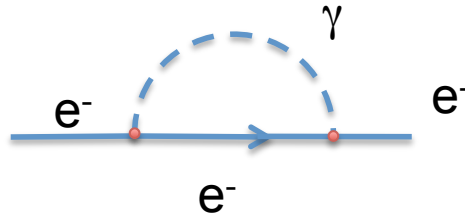
BOSONI

leptoni

Fondamentali: queste  
particelle sono ritenute  
senza struttura interna  
(anche se questa non e`  
esclusa)



Come una particella interagisce con un'altra scambiando una particella virtuale, così una particella può interagire con se stessa emettendo e poi riassorbendo una particella virtuale



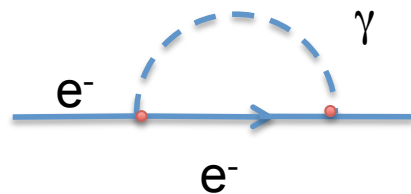
La carica elettrica genera un campo elettromagnetico che interagisce con tutte le cariche, quindi anche con la carica che lo genera. Ogni oggetto carico possiede quindi un'energia associata alla presenza del campo elettrico che produce. Nella fisica classica, l'energia associata al campo elettrico prodotto da una sfera carica di raggio  $r_e/2$  è data da

$$\Delta E_{\text{Coulomb}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_e}$$

Questa energia è indissolubilmente legata alla particella carica e quindi contribuisce alla sua massa.

Se calcoliamo il contributo alla massa dell'elettrone dovuto al processo qui sopra otteniamo un risultato il cui termine dominante a piccoli valori di  $r_e$  è quello classico.

Self-energia dell'elettrone, ovvero energia dell'elettrone associata alla presenza suo campo elettrico



Termine dominante per piccoli valori di  $r_e$

$$\Delta E_{\text{Coulomb}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_e}$$

La self-energy dell'elettrone contribuisce alla sua massa, per cui

$$(m_e c^2)_{\text{obs}} = (m_e c^2)_{\text{bare}} + \Delta E_{\text{Coulomb}}$$



$$0.511 = -9999.489 + 10000.000 \text{ MeV}$$

( sperimentalmente  $r_e < 10^{-17}$  cm, per cui  $\Delta E_{\text{Coulomb}} > 10000$  MeV )

A parte il valore negativo della massa, la cancellazione della massa nuda col termine coulombiano rappresenta indubbiamente una forzatura. Si puo quindi concludere che l'elettromagnetismo classico e' inattendibile a distanze dell'ordine di  $2,8 \times 10^{-13}$  cm, a cui corrispondono valori della correzione coulombiana superiori al valore della massa dell'elettrone.

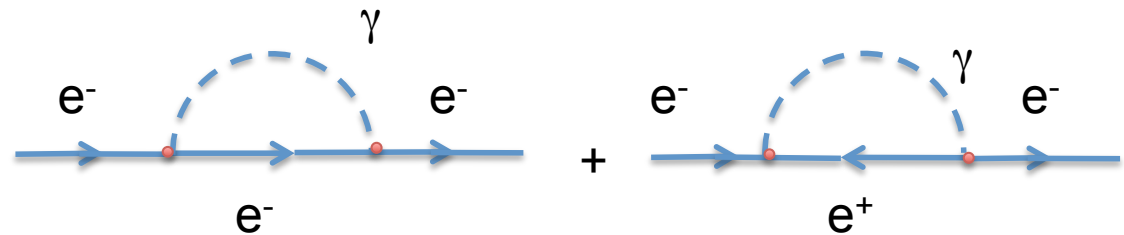
Il problema trova soluzione con l'introduzione dell'anti-elettrone. La meccanica Quantistica insegna che su scale di tempi molto piccole l'energia non e' ben definita. In un intervallo di tempo sufficientemente piccolo l'indeterminazione sull'energia supera il valore necessario alla creazione di una coppia elettrone anti-elettrone:

$$\Delta t \sim \hbar/\Delta E \sim \hbar/(2m_e c^2)$$

La distanza corrispondente e'

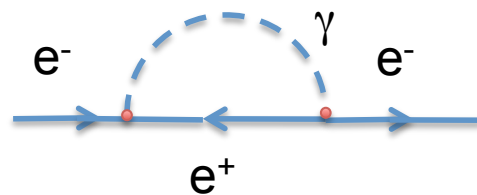
$$d \sim c\Delta t \sim \hbar c/(2m_e c^2) = 200 \times 10^{-13} \text{ cm}$$

Al termine precedente va quindi sommato un termine aggiuntivo indotto dalla relativita' e dalla meccanica quantistica.



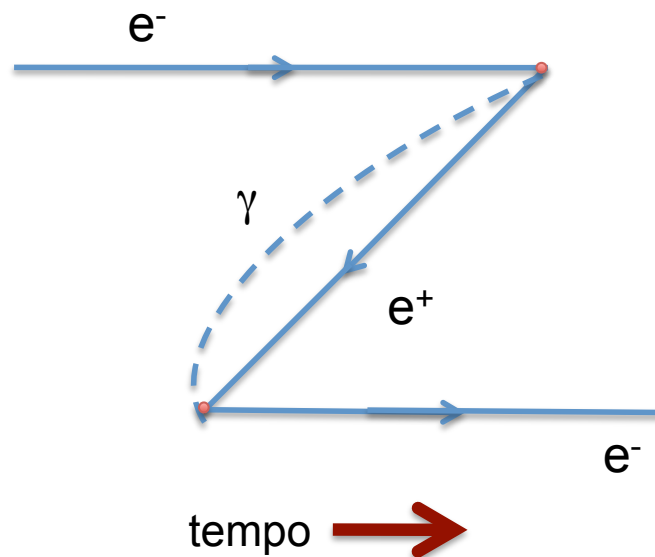
Il contributo dominante del termine aggiuntivo cancella il contributo coulombiano alla massa dell'elettrone

$$\Delta E_{\text{pair}} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_e}$$



Nel caso del positrone, il grafico qui a sinistra non rappresenta l'evoluzione nel tempo del processo.

L'evoluzione temporale e' rappresentata nel disegno qui accanto:



su scale di tempo molto brevi e' possibile creare una coppia elettrone-positrone assieme ad un fotone virtuale. Subito dopo il positrone si annichila con l'elettrone assorbendo il fotone virtuale. Nello stato finale rimane quindi un solo elettrone.

Il processo dura circa  $10^{-17}$  sec, ma a distanze di circa  $10^{-11}$  cm dall'elettrone il processo avviene di continuo.

L'effetto della creazione e distruzione continua delle coppie elettrone-positrone e' quello di 'distribuire' la carica dell'elettrone in una regione di circa 200 fm di raggio all'interno della quale la descrizione classica del campo elettromagnetico non e' piu' valida.

La correzione complessiva alla massa dell'elettrone vale quindi

$$\Delta E = \Delta E_{\text{Coulomb}} + \Delta E_{\text{pair}} = \frac{3\alpha}{4\pi} m_e c^2 \log \frac{\hbar}{m_e c r_e}$$

e la massa osservata vale dunque

$$(m_e c^2)_{\text{obs}} = (m_e c^2)_{\text{bare}} \left[ 1 + \frac{3\alpha}{4\pi} \log \frac{\hbar}{m_e c r_e} \right]$$

Per valori di  $r_e = 10^{-33}$  cm uno ottiene in questo modo un incremento del valore della massa di circa il 9%.

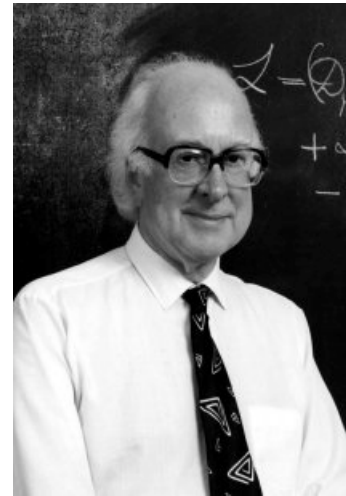
Relatività + meccanica quantistica (→ antimateria) hanno permesso di estendere il regime di validità dell'elettrodinamica fino ai regimi più spinti testabili sperimentalmente.

Il problema dell'elettrodinamica a piccole distanze ha trovato quindi soluzione dall'introduzione di tutta una nuova classe di particelle elementari, le anti-particelle.

# The Standard Model

Fermions			Bosons	
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	Force carriers
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	
	Higgs* boson			

\*Yet to be confirmed



**Domanda:** perche' l'elettrone si accoppia meno del quark top con il bosone di Higgs ed e' quindi piu' leggero?  
Tristemente non abbiamo una risposta a una domanda cosi` ovvia



## Nel Modello Standard ci sono molte altre cose che non capiamo

Per esempio:

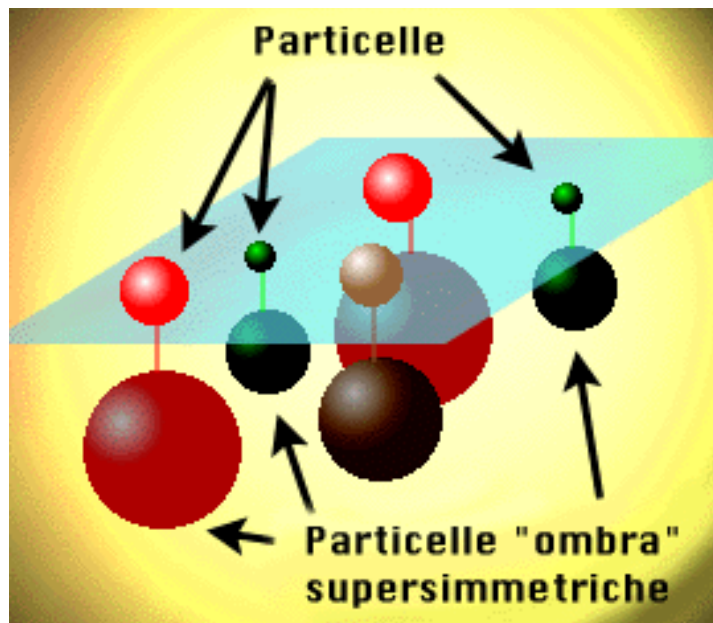
Perche le generazioni sono 3? C'e' una sottostruttura?

Perche le masse sono quelle che sono?

Dov'e' finita l'antimateria creata nel Big-Bang?

Dove la mettiamo la gravita'?

La soluzione a questi ed altri problemi non e' nota. La possibilita' piu' accettata al momento e' che il Modello Standard sia solo una parte di una teoria piu' grande chiamata la "Supersimmetria"

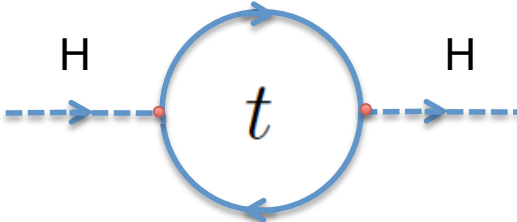


- Alcuni fisici, nel tentativo di unificare la gravita' con le altre forze fondamentali, hanno suggerito che ogni particella fondamentale dovrebbe avere una particella "ombra" (shadow). Sono piu' di 20 anni che cerchiamo queste particelle supersimmetriche



In modo analogo al caso dell'elettrodinamica, e' possibile valutare la correzione alla massa del Bosone di Higgs indotta dall'interazione del bosone col quark top (il quark top e' il quark piu' pesante e il Bosone di Higgs si accoppia con la massa).

Il termine dominante a piccole distanze e' del tutto simile a quello dell'elettrodinamica:

$$\Delta(m_H c^2)^2|_{\text{top}} = -6 \frac{g_t^2}{4\pi^2} \frac{(\hbar c)^2}{r_H^2} + \dots$$


dove  $r_H$  e' il 'raggio' del Bosone di Higgs e  $g_t$  e' la costante d'accoppiamento dell'Higgs con top (l'analogo della carica elettrica nel caso precedente)

Ponendo  $g_t=1$ , possiamo cercare il valore di  $r_H$  per cui

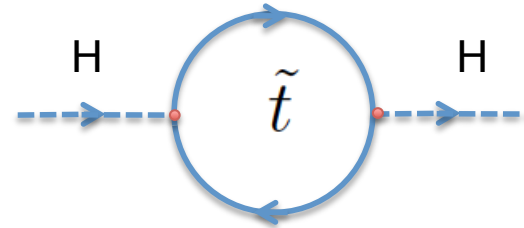
$$\Delta(m_H c^2)^2|_{\text{top}} = |100 \text{ GeV}|^2$$

In questo modo troviamo  $r_H = 3 \times 10^{-17} \text{ cm} = 3 \times 10^{-4} \text{ fm}$  ( $r_{\text{protone}} = 0,88 \text{ fm}$ )

Analogamente al caso precedente possiamo allora concludere che la regione di validita' del Modello Standard risulta limitata a distanze superiori a  $10^{-17} \text{ cm}$ .

Una soluzione possibile e', analogamente al caso precedente, quella di raddoppiare il numero di particelle, introducendo per ogni particella un partner supersimmetrico (per ogni fermione un bosone e viceversa). In questo caso alla correzione della massa dell'Higgs contribuirebbe anche lo s-top, Il partner bosonico del quark top e il termine dominante a piccole distanze cancellerebbe il contributo dominante indotto dal top:

$$\Delta(m_H c^2)^2|_{\text{stop}} = +6 \frac{g_t^2}{4\pi^2} \frac{(\hbar c)^2}{r_H^2} + \dots$$



La correzione dominante alla massa dell'Higgs diventerebbe pertanto:

$$\begin{aligned} \Delta(m_H c^2)^2|_{\text{top}} + \Delta(m_H c^2)^2|_{\text{stop}} \\ = -3 \frac{g_t^2}{\pi^2} [(m_{\tilde{t}} c^2)^2 - (m_t c^2)^2] \log \frac{\hbar}{m_{\tilde{t}} c r_H} \end{aligned}$$

L'introduzione dei partner supersimmetrici permetterebbe in questo modo di dare senso al quadro teorico anche a distanze molto più piccole di quelle testate finora.

Una differenza importante rispetto al caso discusso precedente è che, contrariamente alla massa del positrone, la massa dello s-top non è nota. La consistenza del quadro teorico richiede comunque che la massa dello s-top sia confrontabile con quella del top.

Il punto principale non è tuttavia quello di far vedere che la supersimmetria rappresenterebbe una possibile soluzione dei problemi del Modello Standard a piccole distanze.

Il punto principale è che lo studio dell'Higgs ad LHC permetterà di osservare il comportamento dei meccanismi di interazione nelle condizioni in cui lo schema teorico attuale risulta inadeguato e ci potrà quindi rivelare la soluzione realizzata in natura al problema di consistenza del Modello Standard messo qui in evidenza, aprendo in questo modo una nuova finestra sui meccanismi fondamentali che stanno alla base della struttura del nostro universo.