

Il Modello Standard delle particelle elementari

Fabio Bossi

Laboratori Nazionali di Frascati INFN

fabio.bossi@lnf.infn.it

Incontri di Fisica 2002

Frascati, 17 Settembre 2002

Disclaimer:

Raccontare *con rigore* *tutta* la fisica delle particelle in un'ora
e' impossibile

Ho dovuto scegliere tra un numero limitato (ed arbitrario) di argomenti. **Non** parlero' (tra l'altro) di:

Oscillazione di neutrini

Violazione della simmetria CP

Supersimmetria

Daro' rilevanza maggiore agli ***aspetti fenomenologici***
piuttosto che al rigore teorico degli argomenti

La Meccanica Quantistica (MQ) descrive correttamente molti aspetti del mondo microscopico

- Natura corpuscolare-ondulatoria dell'elettrone
- Spettroscopia Atomica
- Legame Chimico

Tuttavia l'equazione di Schroedinger :

$$i \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\hbar \frac{\nabla^2}{2m} \psi$$

non e' relativisticamente invariante

Meccanica Quantistica

Relativita'



Equazione di Dirac


$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \sum_i \alpha_i \frac{\partial \psi}{\partial x_i} + \beta m \psi$$

Due importanti conseguenze:

- Elettrone dotato di *spin*
- Soluzioni con *energia negativa*

Un elettrone in un campo magnetico esterno B interagisce con esso tramite un ***momento magnetico intrinseco*** μ_e dato da

$$\vec{\mu}_e = -\frac{q_e}{2m} \vec{\sigma} = -g \frac{q_e}{2m} \vec{S}$$

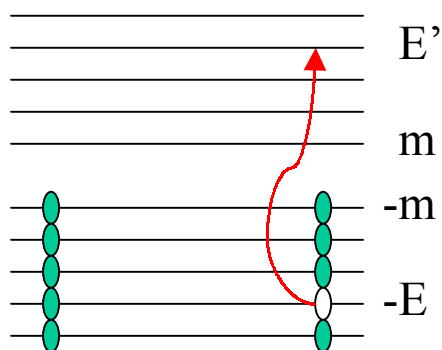

Spin

Questo *fatto osservativo* e' *inserito a mano* nella MQ classica, ma e' *predetto* dalla equazione di Dirac con $g = 2$

La misura attualmente piu' accurata per il fattore g da'

$$g_{mis} = 2.0023193043638 \pm 0.00000000000082$$

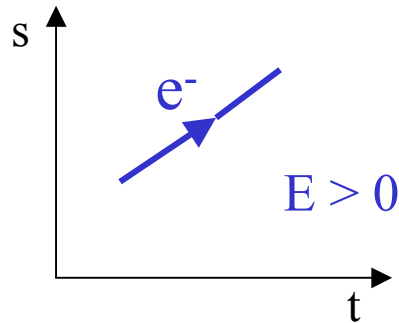
Dirac propose che tutti gli stati ad $E < 0$ fossero occupati (da elettroni cosiddetti del “*mare di Dirac*”), cosicche’ ogni nuovo elettrone fosse costretto ad avere $E > 0$ (*Principio di Esclusione*)



Se eccitato, un elettrone del mare puo’ pero’ saltare ad uno stato con $E > 0$ lasciando una “buca” nel mare

L’*assenza* di un elettrone (carica $-q_e$) con $E < 0$ e’ equivalente alla *presenza* di un *positrone* (carica $+q_e$) con $E > 0$

Il risultato netto e’ la produzione di una *coppia* di particelle: $e^-(E')$ $e^+(E)$



Consideriamo un elettrone in moto nello spazio-tempo

$$\psi \propto e^{-Et}$$

Se $E < 0$ \rightarrow $\psi \propto e^{-(-E)t} = e^{-E(-t)}$

Un positrone che si muova *in avanti* nel tempo e' in tutto equivalente ad un elettrone che si muova *indietro* nel tempo (e viceversa)



Il processo di un elettrone che emetta nel vuoto un fotone *non e' permesso* classicamente: *l'energia non viene conservata!*

In MQ tuttavia vale il *Principio di Indeterminazione* per cui

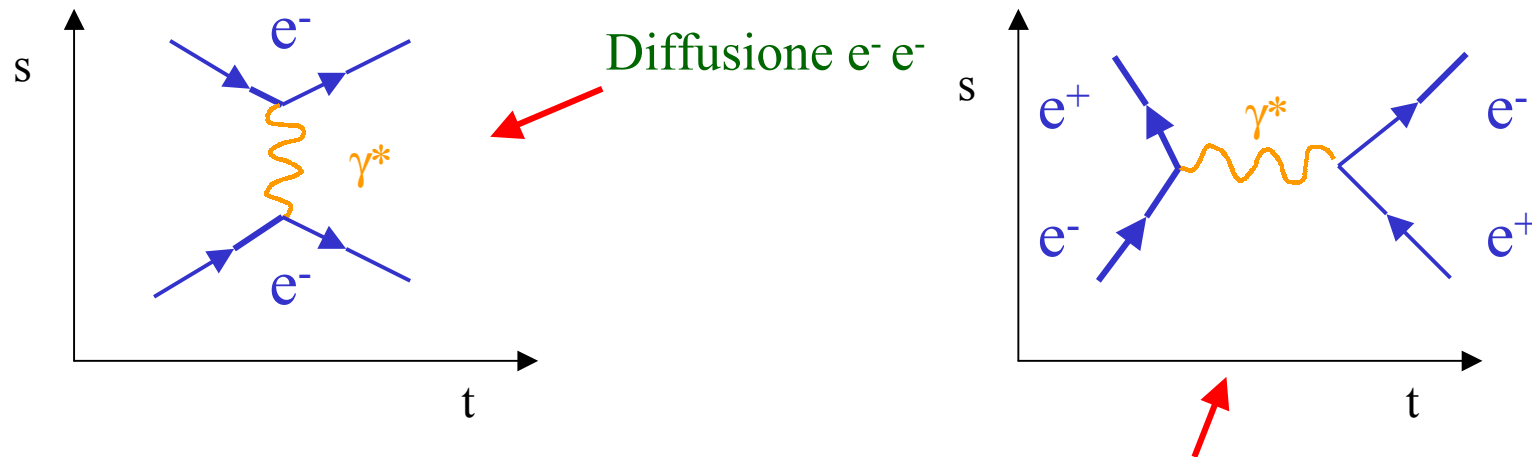
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

e dunque l'energia "mancante" si puo' trovare a patto che il fotone sia riassorbito entro un tempo

$$\Delta t \leq \hbar / \Delta E$$

Questo fotone "fantasma" e' detto essere *virtuale*

La presenza di particelle virtuali e' una inevitabile conseguenza della natura quantistica delle interazioni e.m. ed anzi le spiega proprio in termini di scambio di fotoni virtuali



Il *raggio di azione* di una particella virtuale di massa m e' limitato da

$$R_{\max} = v \cdot \Delta t_{\max} \leq \frac{c\hbar}{\Delta E_{\min}} = \frac{c\hbar}{m}$$

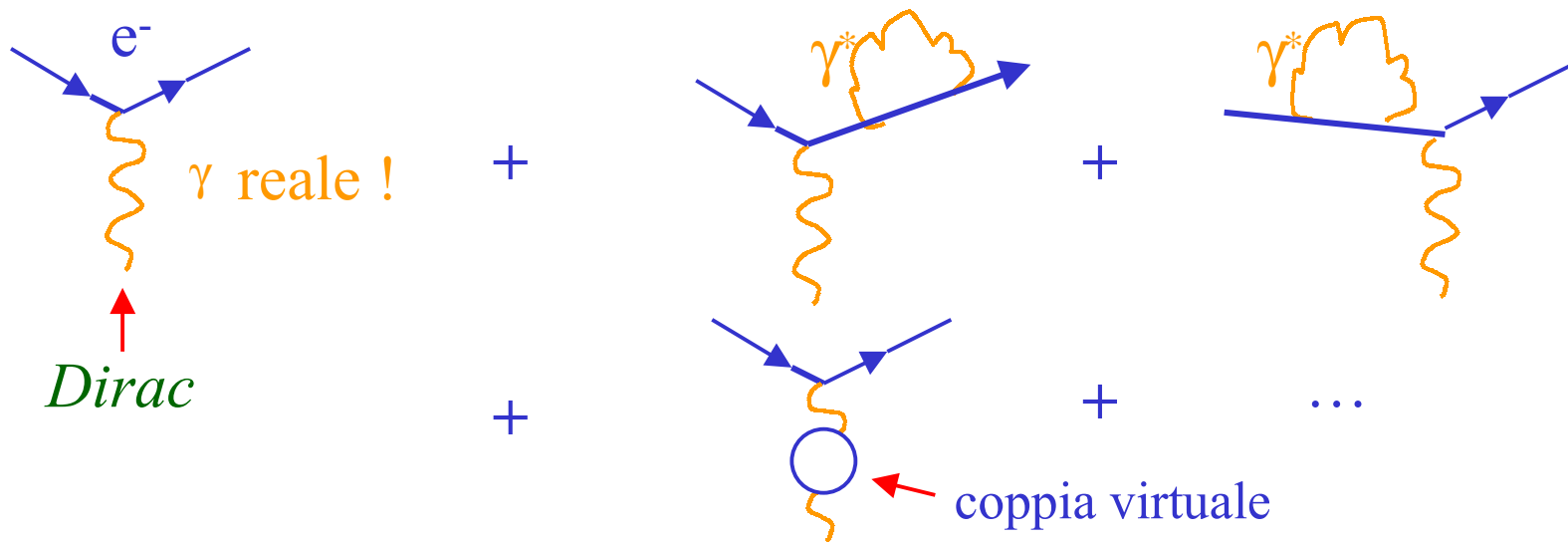
$$m_{\gamma} = 0$$



$$R_{e.m.} = \infty !$$

In *elettrodinamica quantistica* (QED) le particelle virtuali hanno effetti visibili sulle quantità osservabili che vanno tenuti in conto nei calcoli di precisione

Momento magnetico dell'elettrone



$$g_{teo} = 2.0023193108 \quad \pm 0.00000000066$$

$$g_{esp} = 2.0023193043638 \pm 0.000000000000082$$

Quanto e' "forte" la forza elettromagnetica?

Legge di Coulomb

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2} \quad \textit{definisce} \text{ la carica elettrica}$$

La carica elettrica e' una quantita' dimensionale!

Consideriamo $r_e = \hbar/m_e c$ $q_1 = q_2 = q_e$

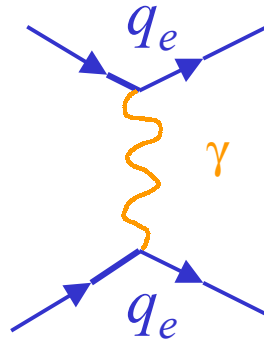
$$E_{Coul} = q_e^2 m_e c / 4\pi \hbar$$

$$E_e^{rip} = m_e c^2$$

$$\alpha_{em} = \frac{E_{Coul}}{E_e^{rip}} = \frac{q_e^2}{4\pi \hbar c} \approx 1/137$$

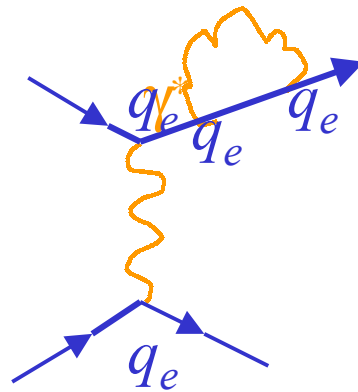
Questo ha senso perche' la carica elettrica e' quantizzata!

Il diagramma (1)



$\sim \alpha$

Il diagramma (2)



$\sim \alpha^2$

(1) pesa, dunque, circa $\alpha \sim 100$ volte piu' di (2) e cosi' via...

Per questo e' sensato avere un approccio perturbativo in QED

Le osservazioni sui raggi cosmici ed in esperimenti di collisione in laboratorio hanno rivelato l'esistenza di un gran numero di nuove particelle, per lo più *instabili*

Un processo di decadimento avviene quando una particella di massa a riposo M si trasforma in altre particelle di masse a riposo m_i tali per cui $\sum_i m_i \leq M$

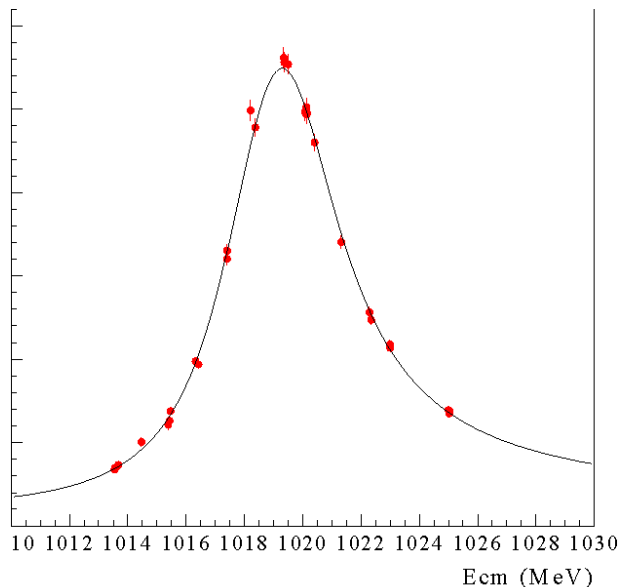
Decadimento β : $n(939.5) \rightarrow p(938.2) + e(0.5) + \nu_e(0)$

(Le masse sono in MeV/c^2)

La vita media della particella è inversamente proporzionale alla forza che determina il decadimento ed alla energia a disposizione per il moto delle particelle prodotte (“*spazio delle fasi*”)

Molte di queste particelle *non sono direttamente osservabili* ma si manifestano come aumenti sensibili nella probabilita' di produzione di un determinato processo (“*risonanze*”)

Per esempio per il processo $e^+e^- \rightarrow K^+K^-$ si osserva un picco di produzione per una energia del sistema di ~ 1020 MeV, che interpretiamo come la produzione di una particella (la “ Φ ”) di massa 1020 MeV/c² che decade in una coppia K^+K^-



Poiche' la vita media e' molto breve l'incertezza nella determinazione della sua massa $\sim \hbar/\Delta t$ si manifesta come una *larghezza* Γ osservabile della risonanza!

$$\Gamma_{\Phi} \sim 4 \text{ MeV} \rightarrow \tau_{\Phi} \sim 10^{-22} \text{ s}$$

I modi di produzione e di decadimento, così come le loro masse e vite medie, di queste particelle sono le più disparate

<i>Particella (Massa MeV/c^2)</i>	<i>Principali modi di decadimento</i>	<i>Spin</i>	<i>Vita Media (s)</i>
$\mu^\pm(105)$	$e^\pm \nu_\mu \nu_e$	1/2	$\sim 2.2 \cdot 10^{-6}$
$\pi^0(135)$	$\gamma\gamma$	0	$\sim 10^{-16}$
$\pi^\pm(105)$	$\mu^\pm \nu_\mu$	0	$\sim 2.6 \cdot 10^{-8}$
$\rho^{0\pm}(770)$	$\pi\pi$	1	$\sim 10^{-23}$
$\Lambda^0(1115)$	$p\pi^\pm \quad n\pi^0$	1/2	$\sim 2.6 \cdot 10^{-10}$
$D^\pm(1870)$	molti	1/2	$\sim 1.1 \cdot 10^{-12}$

In totale sono state osservate circa **400** di queste particelle. *Non possono essere tutte considerate “elementari”!*

Si e' osservato che il protone possiede un *momento magnetico* ben diverso da quello aspettato per una particella puntiforme di Dirac

$$\mu^p = 2.792847337 \pm 0.000000029$$

Ed anche il neutrone ($Q = 0$) e' dotato di un momento magnetico!

$$\mu^n = -1.91304272 \pm 0.000000045$$

Protone e neutrone sono oggetti composti!

Protone e neutrone, così come la maggior parte delle particelle osservate (a parte 12), sono formati da oggetti elementari di **spin 1/2** detti **quark**. Esistono **6** tipi o “sapori” di quark con i relativi antiquark

<i>sapore</i>	<i>u</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>s</i>	<i>t</i>	<i>b</i>
<i>Q</i>	2/3	-1/3	2/3	-1/3	2/3	-1/3
<i>m(GeV/c²)</i>	0.005	0.01	1.5	0.2	170	4.7

Una combinazione di **3 quark** forma un **barione**

$$p = (uud) \quad n = (udd) \quad \Lambda^0 = (uds) \quad \Lambda_B^0 = (udb)$$

Una combinazione **quark-antiquark** forma un **mesone**

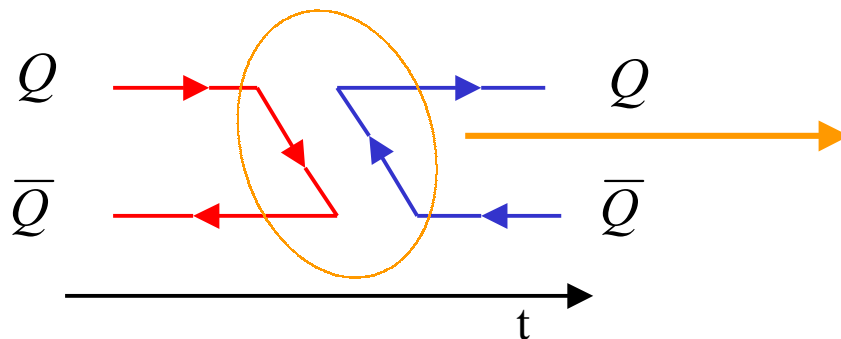
$$\pi^+ = (u \bar{d}) \quad \pi^- = (\bar{u}d) \quad K^0 = (d\bar{s}) \quad \phi = (s\bar{s})$$

L'insieme di barioni e mesoni forma gli **adroni**

Che cosa tiene insieme i quark in un adrone?

Un nuovo tipo di “carica”, detta “colore” che puo’ assumere 3 differenti valori, convenzionalmente indicati come **R**, **G**, **B**

I quark interagiscono tra loro scambiandosi colore



gluone: il quanto della interazione di colore

Poiche’ in natura il colore non e’ direttamente osservabile gli adroni devono essere “neutri” rispetto al colore. Questo spiega il fatto che non si osservano stati del tipo qq oppure $qqqq$

Esistono *evidenze indirette* (ma solidissime!) sulla esistenza del numero quantico di colore

Senza il colore la particella Δ^{++} di spin 3/2 sarebbe descritta da

$$\Delta^{++} = (uuu) (\uparrow\uparrow\uparrow) \quad \text{3 fermioni identici nello stesso stato:}$$

viola il Principio di Esclusione!

Il *momento magnetico* degli adroni e' dato dalla combinazione dei momenti magnetici dei quark costituenti. Il modo di combinarli e' diverso in presenza o assenza del colore.

$$\begin{array}{l} \mu^n / \mu^p = -2 \quad \text{no colore} \\ \mu^n / \mu^p = 2/3 \quad \text{colore} \end{array} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Esperimento} \\ \mu^n / \mu^p = 0.68497934 \\ (16) \end{array}$$

Piu' tecnicamente, le tre cariche di colore **R**, **B**, **G** formano la rappresentazione fondamentale di un gruppo di simmetria $SU_c(3)$ i cui generatori sono matrici 3 x 3.

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Tutti gli *adroni* sono postulati essere *singoletti* di colore. La f.d.o. di colore per un barione e' dunque

$$(qqq)_{\text{sing}} = \sqrt{1/6} (\text{RGB} - \text{RBG} + \text{BRG} - \text{BGR} + \text{GBR} - \text{GRB})$$

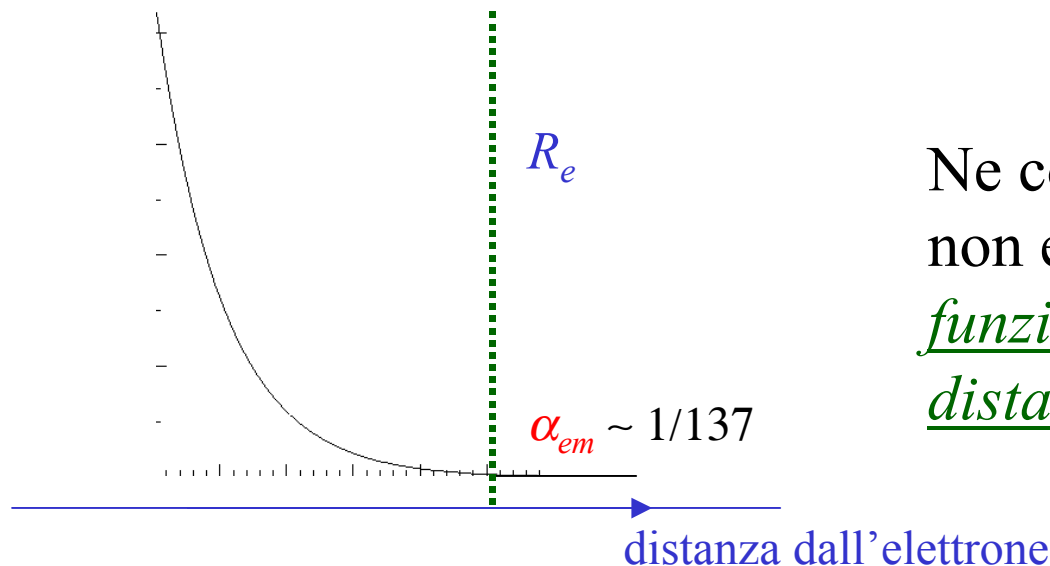
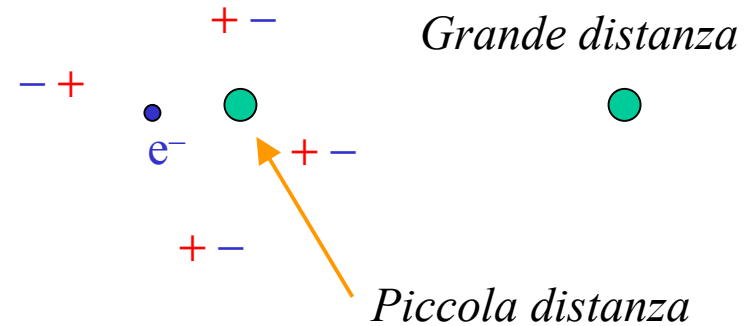
I *gluoni* formano un *ottetto* di colore cioe' si presentano in otto diverse combinazioni di colore (che non scrivo...)

La *costante di accoppiamento* che si associa ad ogni vertice di interazione di colore (l'analogo di α_{em}) e' detta α_s

In QED un elettrone e' sempre circondato da una "nuvola" di particelle virtuali tra cui coppie e^+e^-

Lo spazio intorno ad esso risulta quindi "*polarizzato*" e, a *grandi distanze*, la sua carica appare schermata ad una sonda esterna

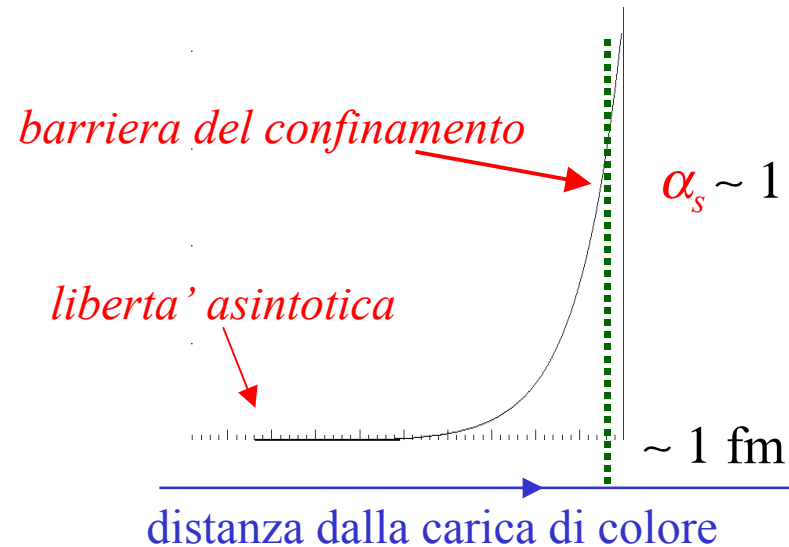
A *piccole distanze*, invece, la sonda puo' vedere la carica "nuda" dell'elettrone



Ne consegue che α_{em} (cioe' q_e) non e' costante ma diviene funzione (decrescente) della distanza

A differenza dei fotoni ($q=0$), i gluoni sono portatori di colore. Ne consegue che un quark di un dato colore è circondato da una “nuvola” di portatori di carica prevalentemente dello stesso colore

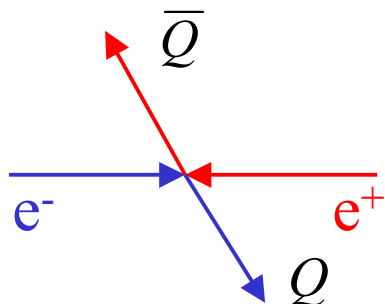
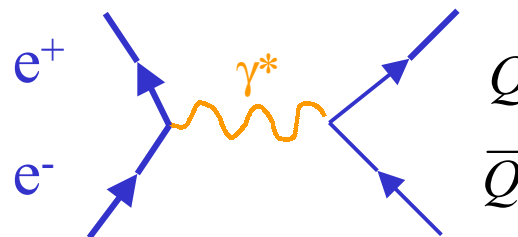
A piccole distanze (grandi energie) i quark appaiono liberi (“*liberta' asintotica*”) e nei calcoli si possono applicare metodi perturbativi



A grandi distanze, $R_\pi \approx \hbar/m_\pi c$, α_s è così forte che i quark di un adrone rimangono intrappolati in esso (*confinamento*)

Per questa ragione non si osservano quark liberi in natura

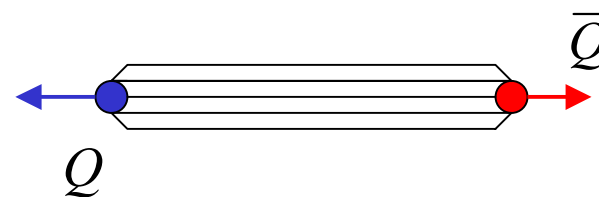
Una coppia $Q\bar{Q}$ puo' essere creata in collisioni e^+e^-



Ad energie suff. elevate i due quark rinculeranno l'uno rispetto all'altro

A distanza crescente le loro interazioni di colore diventeranno sempre piu' forti aumentando l'energia potenziale del sistema

Le interaz. tra gluoni fanno si' che le linee di forza siano "strizzate" in una piccola regione tubolare di spazio

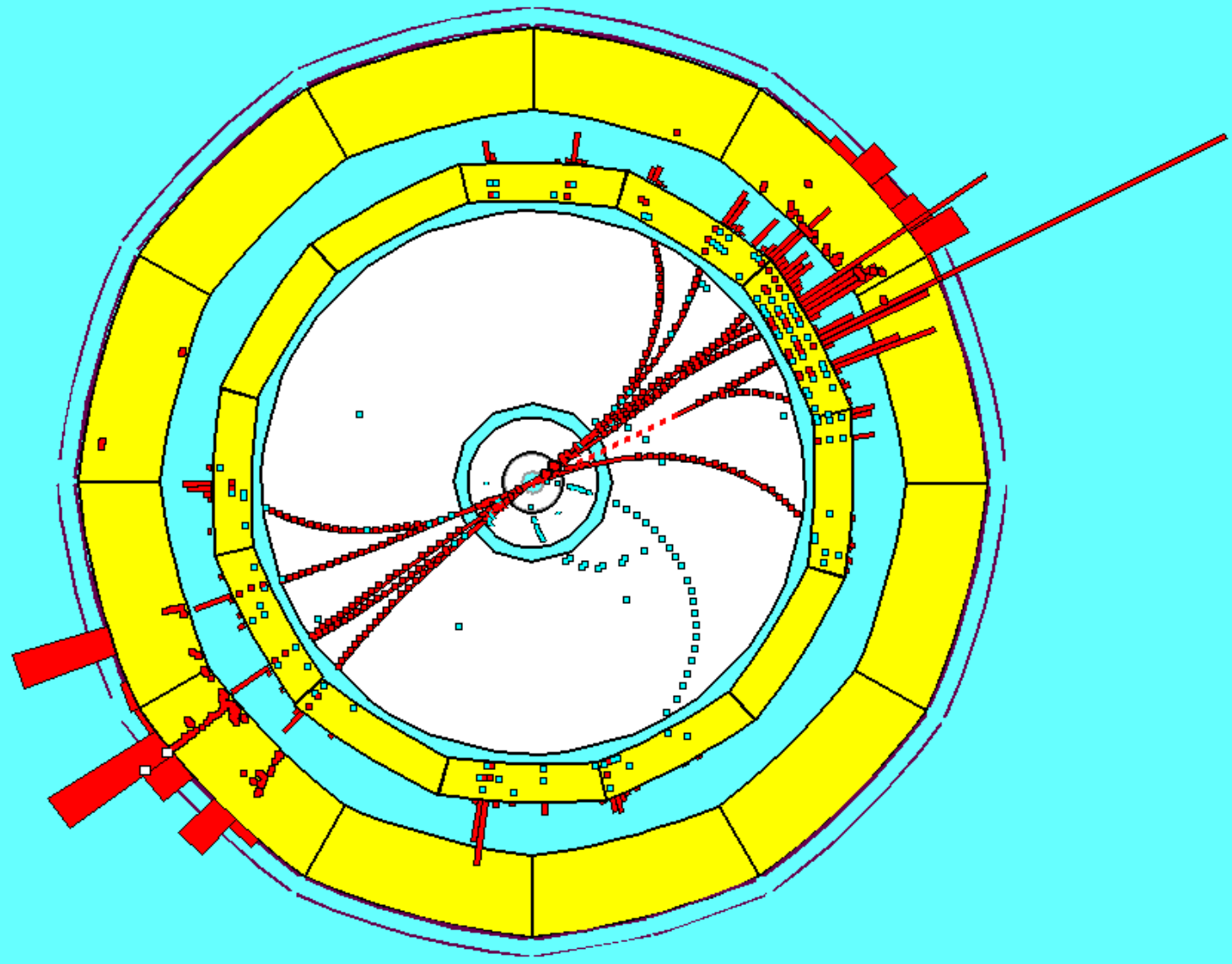


Quando l'energia potenziale e' sufficientemente elevata si puo' creare dal vuoto *una nuova coppia* $Q\bar{Q}$. Il processo e' ricorsivo e risulta nella produzione di **getti** di particelle.

un evento a 2 jets

ALEPH DALI

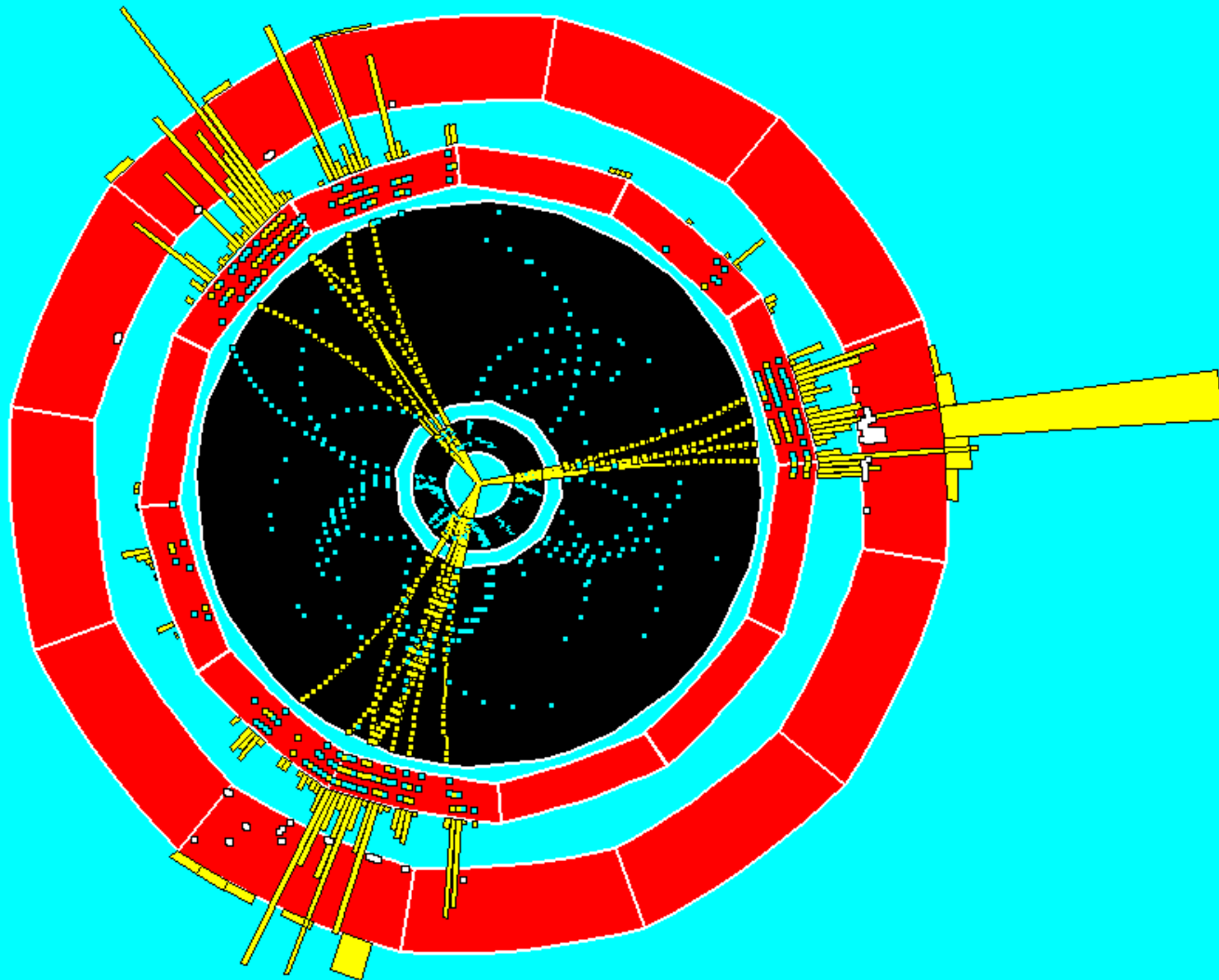
Run=15768 Evt=5906



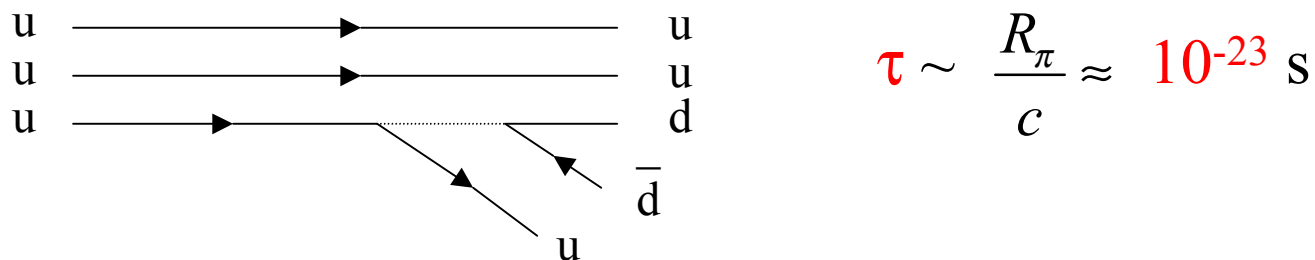
ed uno a tre jets (emissione di un gluone!)

ALEPH DALI

Run=9063 Evt=7648



Le interazioni di colore (o “*forti*”) danno conto di molti decadimenti adronici. Per esempio $\Delta^{++} \rightarrow p^+ \pi^+$



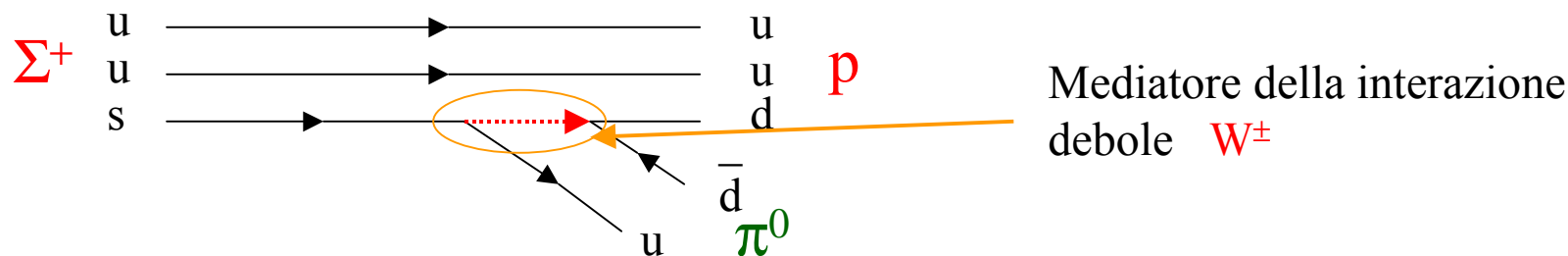
Ma si osservano molti decadimenti adronici le cui vite medie sono *molti ordini di grandezza* piu' lunghe

$$\Sigma^+ \rightarrow n\pi^+, p\pi^0 \quad K_S^0 \rightarrow \pi\pi \quad \dots \quad (\tau \sim 10^{-10} \text{ s})$$

E' necessario postulare l'esistenza di un nuovo tipo di interazione, *l'interazione debole*, i cui mediatori siano cosi' pesanti che la loro probabilita' di emissione sia molto piccola

(In realta' si potrebbe pensare equivalentem. che la costante di accoppiamento $\alpha_W \ll \alpha_S$. Ma questi sono i *fatti sperimentali*...)

Le interazioni deboli trasformano un quark di carica 2/3 in uno di carica -1/3 e viceversa. Esse, quindi, *cambiano i sapori dei quark*



Esiste una gerarchia di probabilita' per cui queste transizioni avvengono, descritta dalla cosiddetta *matrice CKM*

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{u} \\
 \mathbf{c} \\
 \mathbf{t}
 \end{array}
 \begin{pmatrix}
 \mathbf{d} & \mathbf{s} & \mathbf{b} \\
 1 & 0.2 & 0.004 \\
 0.2 & 1 & 0.03 \\
 0.003 & 0.04 & 1
 \end{pmatrix}$$

I valori di questa matrice sono determinati sperimentalmente.

Non sappiamo perche' siano questi e non altri!

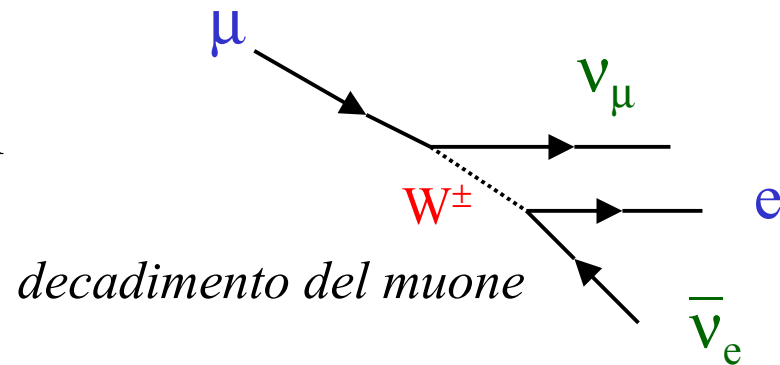
Questi valori sono approssimati!

Le 12 particelle che non “sentono” le interazioni forti, i leptoni, sottostanno, invece, a quelle deboli. Esse sono organizzate in “doppietti”, ovvero appaiono sempre in coppie ben definite

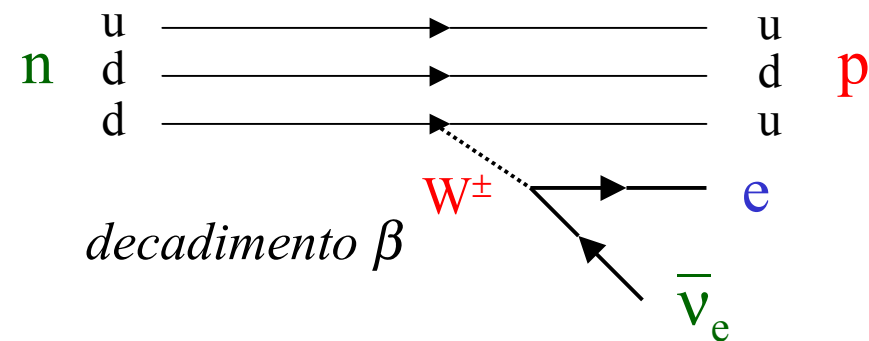
$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

+ i doppietti delle relative antiparticelle

Si possono avere processi puramente leptonici ...

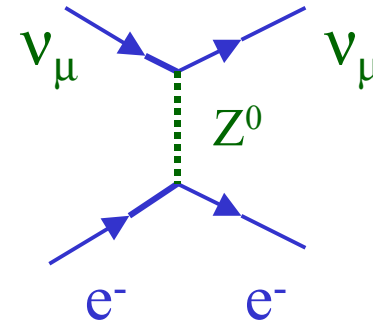


...ma anche semileptonici



Esiste anche un *mediatore neutro* delle interazioni deboli, la Z^0

La sua esistenza è dimostrata dalla osservazione del processo di diffusione $\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e$ che altrimenti non potrebbe avvenire



I mediatori delle forze deboli W^\pm e Z^0 sono copiosamente prodotti ed osservati in collisioni e^+e^- e $p\bar{p}$. Le loro masse sono state misurate essere

$$M_W = (80.423 \pm 0.039) \text{ GeV}/c^2$$

$$M_Z = (91.1876 \pm 0.0021) \text{ GeV}/c^2$$

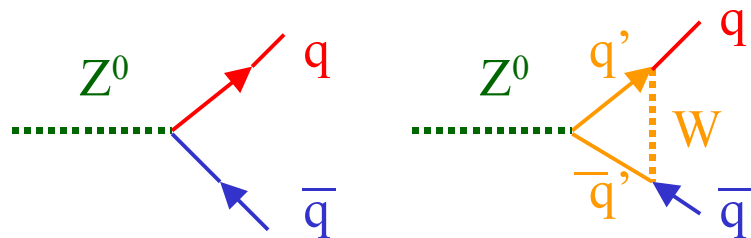
Che relazione intercorre tra le interazioni deboli neutre e cariche?

Si dimostra che la sola richiesta di *invarianza* delle equazioni del moto per trasformazioni di *simmetria locale* $SU(2) \otimes U(1)$ predice l'insorgere di 4 mediatori di interazioni che hanno precisamente le strutture delle interazioni deboli cariche e neutre e dell'elettromagnetismo! (*Teoria Elettrodebole*)

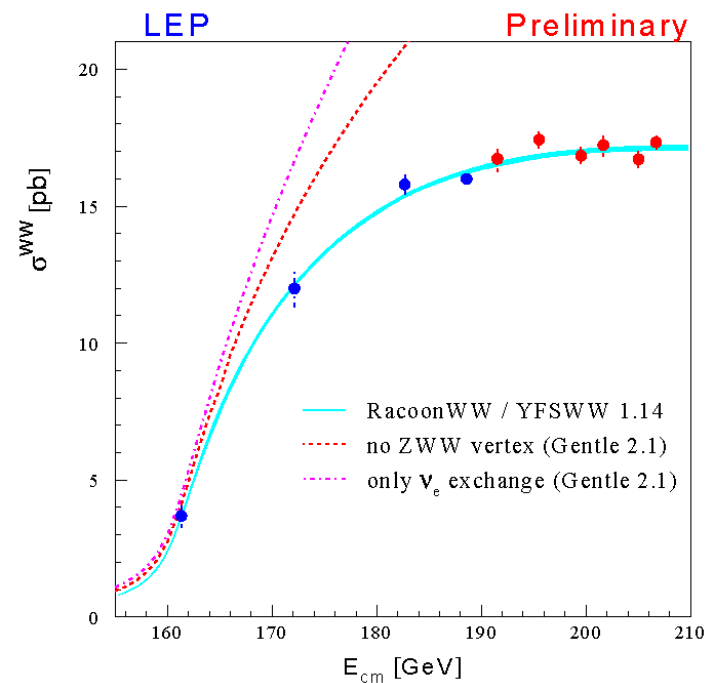
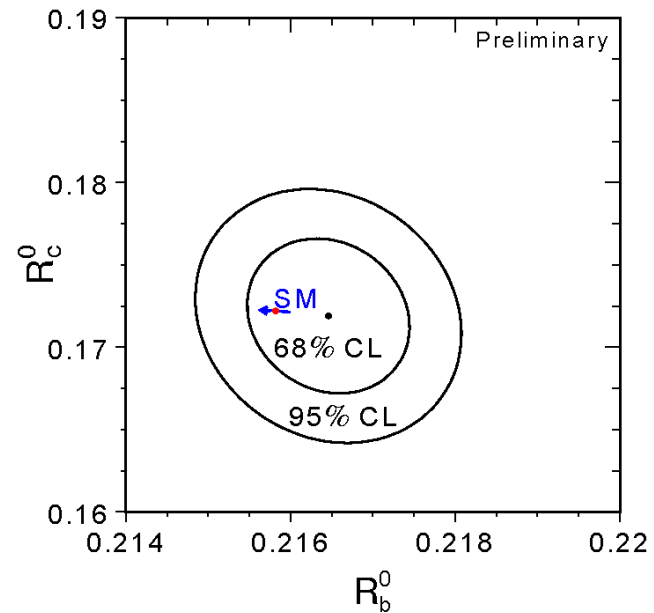
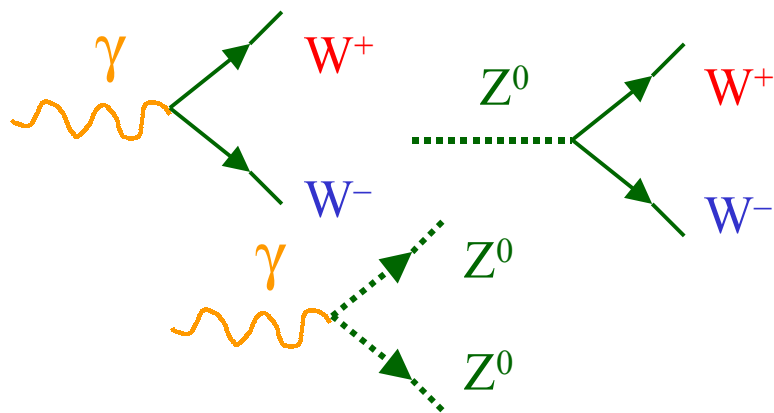
Anche la teoria delle *interazioni forti* (*cromodinamica quantistica, QCD*) puo' essere dedotta da una analoga richiesta di invarianza per trasformazioni locali $SU(3)$

Teorie per cui vale una invarianza per trasformazioni di simmetria *locale* (cioe' dipendente dalle coordinate spaziotemporali) sono chiamate *Teorie di Gauge*

Le previsioni della teoria elettrodebole sono state testate in dettaglio, compresi gli effetti di "virtualita", sia negli **accoppiamenti** di **Z/W** con **quark/leptoni**



...che negli **accoppiamenti** tra mediatori di gauge



...riepilogando...

La **materia** e' composta di **particelle di spin 1/2**, i **quark** e i **leptoni**

Esistono **6** tipi di quark e **6** di leptoni con le relative antiparticelle

Le **interazioni** tra queste particelle risultano dallo scambio di **mediatori di spin 1** e precisamente

mediatore	massa(GeV/c ²)	interazione
fotone	0	elettromagnetica
gluoni (8)	0	forte
W [±] , Z ⁰	80-90	debole

...e sono descritte da **teorie quantistiche di gauge**

Tutto questo e' chiamato **Modello Standard**

Abbiamo volutamente ignorato la **gravita'**, i cui effetti sono irrilevanti su singole particelle elementari

Ma cosa determina lo spettro di massa delle particelle ?

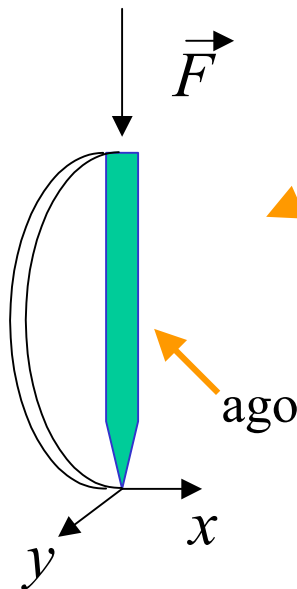
Nel caso degli **adroni** non basta supporre $M_A = \sum_i m_{q_i}$,
altrimenti $m_\pi \sim 2/3 m_p$ mentre si osserva che $m_\pi \sim 1/7 m_p$

L'energia di interazione deve giocare un ruolo. Data la natura fortemente *non perturbativa* della QCD a grandi distanze, pero', non siamo in grado di fare delle vere predizioni.

Per quel che riguarda **quark leptoni** e **bosoni di gauge**, *non ne sappiamo proprio nulla!*

Anzi: un *qualsiasi termine di massa* nelle equazioni del moto *distrugge qualsiasi simmetria di gauge!*

Si puo' supporre l'esistenza di un *campo scalare* (cioe' con *spin* = 0) il cui potenziale rispetti la simmetria di gauge delle interazioni elettrodeboli, ma il cui *stato fondamentale* non sia gauge invariante (***Rottura spontanea della simmetria***)



Esempio:

Questo sistema ha simmetria cilindrica

La simmetria e' rotta dalla flessione dell'ago per $F > F_{crit}$

La flessione puo' avvenire ***ovunque*** intorno all'asse di simmetria

Altro esempio: l'allineamento degli spin degli elettroni in un ferromagnete

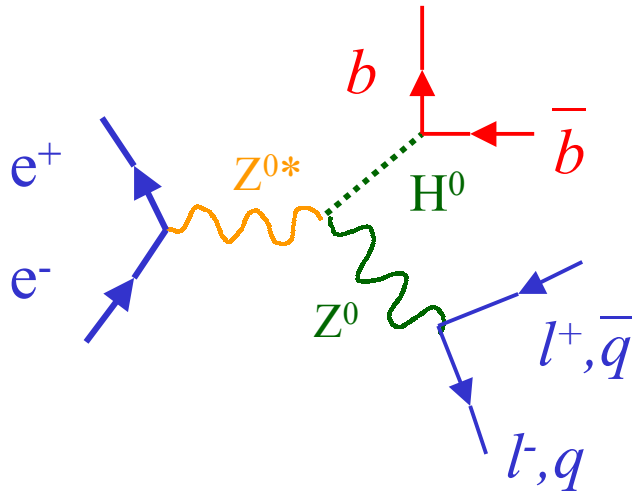
Supponiamo che la **Natura** (o chi per lei) abbia scelto di sedere su di un (arbitrario) stato di equilibrio del nostro potenziale scalare

Si dimostra che la rottura di simmetria così realizzata *equivale ad introdurre nelle equazioni del moto i termini di massa* sia per i fermioni che per i bosoni di gauge (***meccanismo di Higgs***)

La massa delle particelle fondamentali sarebbe, dunque, generata dinamicamente da una “scelta” apparentemente arbitraria della Natura

Il meccanismo di Higgs prevede altresì l'esistenza di una particella *neutra di spin 0 e massa ignota*, il **Bosone di Higgs**

L'Higgs interagisce con le altre particelle con accoppiamento proporzionale alla loro massa. Questo ci dà un criterio molto forte per il suo riconoscimento



...ma non è stato ancora trovato

$$M_H > \sim 115 \text{ GeV}/c^2 \quad (\text{esp.})$$

$$M_H < \sim 1000 \text{ GeV}/c^2 \quad (\text{teo.})$$

Perche' il MS non e' soddisfacente:

Cosa determina i valori di massa delle particelle?

Perche' ci sono tre famiglie di quark e leptoni?

Cosa determina i valori della matrice *CKM*?

Che ruolo gioca l'interazione gravitazionale?

...

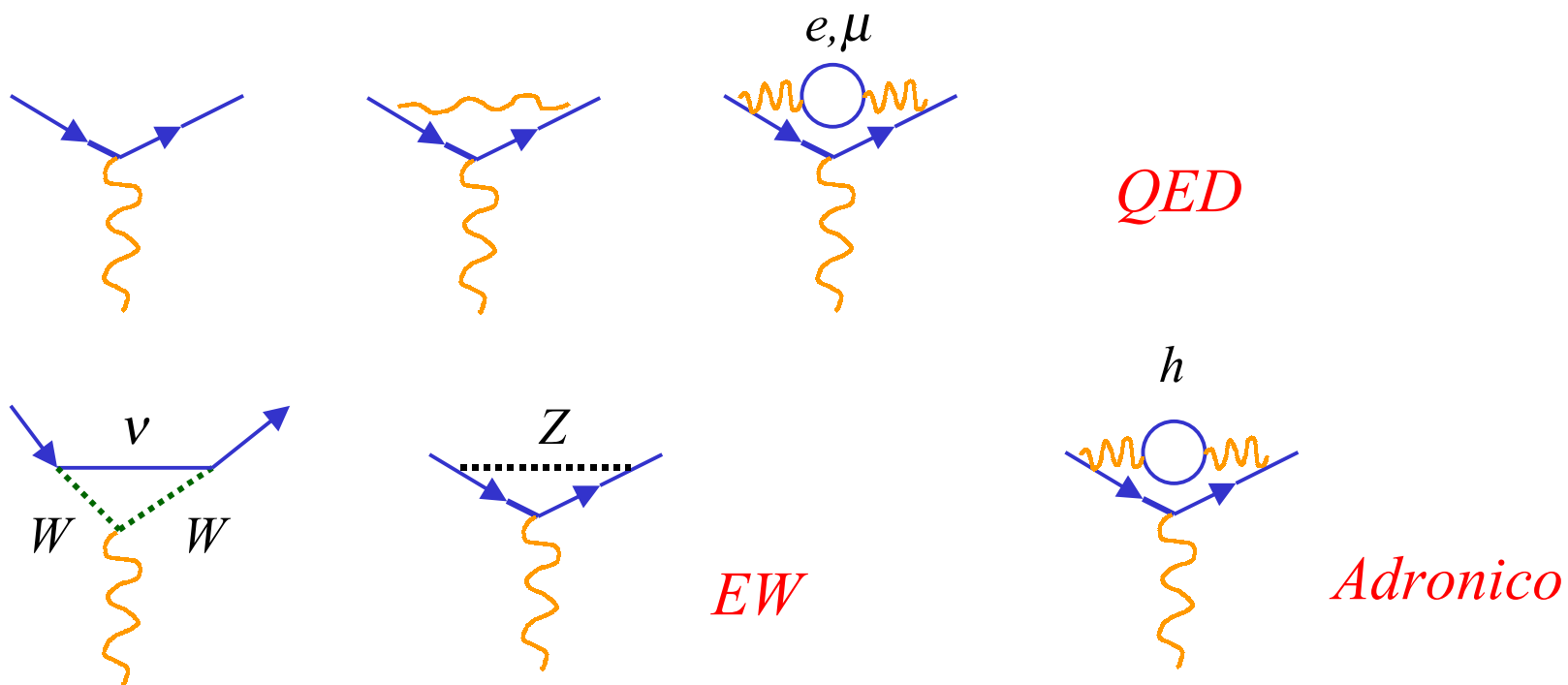
Molte teorie, nuove simmetrie, nuove ipotetiche particelle

Come cercarle? 

Nuovi acceleratori, energie inesplorate

Effetti virtuali, grandi precisioni

Momento magnetico del muone



$$\begin{array}{l}
 \mathbf{g}_{teo} = 2.0023318356 \pm 0.0000000014 \\
 \mathbf{g}_{esp} = 2.0023318406 \pm 0.0000000016
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} \mathbf{g}_{teo} \\ \mathbf{g}_{esp} \end{array}} \right\} 2.3 \sigma$$

Bibliografia essenziale:

R. Feynman :

QED ADELPHI ed.

P. Davies (a cura di) :

La Nuova Fisica Boringhieri ed.

L. Lederman, D.N. Schramm :

Dai Quark al Cosmo Zanichelli ed.

F. Halzen, A.D. Martin :

Quarks and Leptons John Wiley ed.