

Alcuni concetti fondamentali di Fisica delle alte energie  
e delle Teorie Grandi Unificate (GUT)

1) Introduzione

La fisica delle alte energie tratta il problema dei costituenti barionici della materia e delle interazioni tra di essi. Come e' noto i fisici sperimentali usano macchine molto sofisticate e potenti costituite essenzialmente da acceleratori di particelle e di sistemi di detezione di eventi.

Le alte energie sono necessarie per due ragioni:

- nello studio delle particelle elementari sono in gioco distanze molto piccole quindi per il principio di indeterminazione di Heisenberg ( $\Delta p \Delta x = \Delta E \Delta t \sim h$ ) occorrono alte energie per localizzare gli eventi.
- molti dei costituenti fondamentali hanno grandi masse e per produrli abbiamo perciò bisogno di alte energie.

Spieghiamo bene questi 2 punti. Il principio di indeterminazione di Heisenberg stabilisce che, per la dualita' particella-onda della descrizione quantomeccanica della materia, una particella non potra' essere localizzata nello spazio e nello spazio delle velocita' esattamente. Infatti, essendo una particella niente di piu' che una sovrapposizione di onde (funzione d'onda), ed essendo la sua velocita' pari alla trasformata di Fourier della sua funzione d'onda,

il prodotto delle indeterminazioni sulla posizione occupata dalla particella in un certo istante e sulla velocita' nello stesso istante non puo' mai essere inferiore alla costante di Plank  $h$ .

Questa indeterminazione si riflette su di una indeterminazione coinvolgente energia e tempo, con lo stesso significato di prima. In altri termini se una particella ha energia totale media  $E$ :

$$E = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + V(x,y,z)$$

energia di massa      energia cinetica      energia potenziale

essa puo' tuttavia assumere ad un certo istante energia  $E+dE$ , a condizione che lo faccia per un tempo  $dt$  non superiore a quello stabilito dalla relazione di Heisenberg:  $dE \cdot dt \sim h$ .

In pratica quindi una violazione del principio di conservazione dell'energia si puo' verificare in qualsiasi punto dell'Universo, ma solo per un tempo  $t$  tale che  $E \cdot t \sim h$ . In altri termini in un punto dell'Universo si possono produrre particelle di massa  $m$  (la cui energia sia  $E=mc^2$ ) ma esse possono 'vivere' soltanto per un tempo  $t$  tale che  $E \cdot t \sim h$ .

Queste si chiamano 'particelle virtuali'. Ma se invece in un determinato punto c'e' una energia  $2E$  diffusa nello spazio (per esempio radiazione), li' si possono formare coppie di particelle (questa volta reali) la cui massa sia  $m=E/c^2$ . Il perche' si formino coppie (particella ed antiparticella) lo si deve a vari principi di conservazione (conservazione del numero barionico, del numero leptonico etc.) che vedremo piu' avanti.

Fino a 40-50 anni fa erano considerati solo i

vertiginosamente fino ad arrivare ad alcune centinaia.

In particolare si scoprirono moltissimi ADRONI (particelle con interazione forte) che sono instabili nelle condizioni ambientali terrestri, ma che sono della stessa famiglia dei piu' stabili neutroni e protoni. Gli adroni possono essere raggruppati, come vedremo brevemente, in famiglie o multipletti; il protone ed il neutrone occupano, in uno di questi multipletti, un posto equivalente. Il fatto che protoni e neutroni siano oggi predominanti nell'universo e' il risultato accidentale delle leggi di conservazione e dell'ambiente.

L'opinione attuale dei fisici e' che protoni e neutroni come gli adroni in generale siano costituiti a loro volta di fermioni (spin 1/2) detti quarks con carica frazionaria (+2/3e e -1/3e). Accanto agli adroni nella materia troviamo i LEPTONI, anch'essi fermioni (ad esempio il neutrino e l'elettrone) con carica intera.

Questi costituenti possono interagire con scambio di BOSONI fondamentali (particelle con spin intero) che sono i portatori di 4 interazioni fondamentali: gravitazionale, elettromagnetica (che rende conto della maggior parte delle interazioni extranucleari poiche' e' a lungo raggio di azione), debole (decadimenti beta) e forte che tra l'altro tiene assieme i QUARKS negli adroni e i cui effetti residui contribuiscono a tenere assieme i protoni e i neutroni nel nucleo.

Ci sono aspetti strani e non ancora compresi in questo quadro. Ad esempio, i quarks non sono mai stati osservati come particelle libere e forse essi sono permanentemente confinati negli adroni.

I quarks si distinguono fra loro per il 'flavour' (sapore) di almeno cinque tipi, quasi sicuramente sei, cosi' come i leptoni (tre tipi di leptoni carichi e tre con carica zero).

La molteplicita' di quarks e leptoni e' legata alla molteplicita' delle interazioni. Da questo punto di vista si sono compiuti negli ultimi anni progressi stupendi. Si e' predetto, e poi provato sperimentalmente, che le interazioni elettromagnetiche e deboli hanno lo stesso accoppiamento tra fermioni e rispettivi bosoni.

Confrontata con l'elettromagnetismo (in cui l'interazione avviene tramite il bosone privo di massa che e' il fotone, che ha un raggio di azione infinito), la debolezza dell'interazione debole e' da attribuirsi al brevissimo raggio d'azione, poiche' l'interazione avviene tramite i bosoni muonici W e Z<sub>0</sub> la cui massa e' circa 100 volte quella del protone. Ad alte energie, molto al di sopra dell'energia di riposo di questi bosoni, ci si attende che l'interazione elettromagnetica e debole abbiano la stessa forza.

L'idea piu' generale, che nella base della verifica dell'unificazione elettrodebole e' andata affermandosi in questi anni, e' che ci sia una rottura delle simmetrie a basse energie e che via via che si procede verso energie piu' alte le interazioni si unifichino. Ad esempio, oggi si pensa che anche l'interazione forte si unifichi a quella elettrodebole ad un'energia dell'ordine di 10<sup>14</sup> GeV e c'e' chi gia' pensa ad una completa e totale unificazione in cui anche la gravitazione si dimostri essere uno degli aspetti di un'unica grande interazione fondamentale.

(Un elettronvolt (eV) e' l'energia che un elettrone (carica -e = -1.6 x 10<sup>-19</sup> Coulomb) acquista sotto una differenza di potenziale di 1 Volt. In termini di Joules, 1 eV = 1.6 x 10<sup>-19</sup> Joules)

2) Classificazione di Particelle - Fermioni e Bosoni

Uno dei concetti fondamentali delle interazioni tra le particelle elementari e' il teorema di Pauli, che connette le statistiche cui le particelle obbediscono al loro momento angolare totale di spin. Le particelle a spin semi-intero obbediscono alla statistica di Fermi-Dirac e sono percio' chiamate fermioni, mentre le quelle a spin intero sono chiamate bosoni e obbediscono alla statistica di Bose-Einstein.

La statistica a cui le particelle obbediscono determina la simmetria della funzione d'onda  $\psi$  che descrive una coppia di particelle, 1 e 2, in caso di scambio tra le due. Se le particelle sono identiche, allora il quadrato della funzione d'onda,  $\psi^2$ , che da' la probabilita' di trovare la particella 1 in una posizione e la 2 in un'altra, rimarra' inalterata nello scambio  $1 \leftrightarrow 2$ . Vale la regola:

Bosoni identici  $\psi(1 \leftrightarrow 2) = + \psi$  (simmetrica)  
 Fermioni identici  $\psi(1 \leftrightarrow 2) = - \psi$  (antisimmetrica)

Per capire meglio la situazione ricordiamo come la funzione d'onda  $\psi$  della coppia possa essere divisa in due parti di cui una spaziale e l'altra dipendente dall'orientazione dello spin:

$\psi = a(\text{space})b(\text{spin})$

La parte spaziale  $a$  descrive ogni moto orbitale di una particella attorno all'altra e puo' essere rappresentata con una funzione armonica sferica. Uno scambio di coordinate e' equivalente all'introduzione di un fattore  $-1$  davanti ad  $a$ : se  $a$  e' antisimmetrica. Anche  $b$  a sua volta puo' essere simmetrica o antisimmetrica rispetto allo scambio di particelle  $1 \leftrightarrow 2$ , a seconda che le particelle abbiano spin paralleli o antiparalleli.

La relazione appena scritta per i bosoni implica che per essi  $a$  e  $b$  siano o entrambe simmetriche o entrambe antisimmetriche, mentre la per i fermioni dice che, se  $a$  e' simmetrica, allora  $b$  deve necessariamente essere antisimmetrica, e viceversa.

Il principio di Pauli e' una ben nota applicazione della antisimmetria della funzione d'onda che descrive due fermioni identici quando avviene uno scambio tra le due particelle. Esso stabilisce che due fermioni non possano mai occupare lo stesso stato quantico. Essendo la loro funzione d'onda antisimmetrica, e dovendo essere antisimmetrica anche la funzione d'onda  $\psi(1 \leftrightarrow 2)$  relativa allo scambio tra le 2 particelle, la sovrapposizione di 2 onde antisimmetriche identiche annullerebbe entrambe le funzioni d'onda (e quindi le particelle stesse), violando pero' il principio di conservazione dell'energia. Quindi cio' non puo' accadere.

### 3) Particelle ed Antiparticelle

L'equazione d'onda relativistica proposta da Dirac nel 1928 era in grado di dare conto del momento angolare intrinseco, o numero quantico di spin, dell'elettrone, che precedentemente era stato introdotto per spiegare l'effetto Zeeman. Nella teoria di Dirac l'elettrone libero e' descritto da una funzione d'onda a 4 componenti, corrispondenti a due sottostati di spin, ognuno con energia positiva e negativa. Gli stati con energia negativa sono interpretati in termini di antiparticella, il positrone. L'esistenza dei positroni e' stata poi verificata sperimentalmente.

L'esistenza delle antiparticelle e' una proprieta' generale sia dei fermioni che dei bosoni, l'antiparticella avendo la stessa massa della particella, ma carica e momento magnetico (spin) opposto.

Fermioni ed antifermioni possono essere creati e distrutti in coppie. Il numero di fermioni viene conservato se si attribuisce al fermione il numero +1 ed il numero -1 all'antifermione.

#### 4) I Fermioni Fondamentali: Quarks e Leptoni

I dati sperimentali finora raccolti sulla struttura della materia indicano che essa e' costituita da due tipi di fermioni fondamentali: i quarks e i leptoni, che sono privi di struttura, almeno fino a  $10^{-15}$  cm.

I quarks trasportano cariche elettriche frazionarie di  $+2/3e$  e  $-1/3e$ .

Essi si distinguono per i "flavours" o sapori cui si associa un numero quantico interno e si indicano con u, d, s, c, b, (t):

u = quark	'up'
d = "	'down'
s = "	'strange'
c = "	'charme'
b = "	'bottom'
t = "	'top'

I quarks u e d hanno all'incirca la stessa massa entro 1 MeV circa.

I neutroni ed i protoni sono considerati costituiti di quarks u e d e percio' la quasi ugual massa dei due nucleoni implica la uguaglianza di massa tra i quarks u e d.

I quarks hanno interazioni forti con gli altri quarks, ma differiscono per la carica elettrica, percio' per le interazioni elettromagnetiche tra di essi.

I BARIONI consistono di tre quarks mentre i MESONI di un quark e di un antiquark. I LEPTONI trasportano cariche intere. Per ogni valore della carica vi sono tre tipi di leptoni differenti.

I leptoni neutri sono chiamati neutrini ed hanno massa molto piccola o nulla.

L'elettrone e' familiare a tutti, il MUONE e' noto da tempo, mentre il leptone tau o TAUONE e' stato isolato la prima volta nel 1974. I leptoni compaiono in doppietti, il neutrino avendo una lettera sottoscritta che indica la corrispondente particella carica.

I leptoni carichi sono distinti dagli antileptoni corrispondenti per la carica opposta. I neutrini hanno spin polarizzato longitudinalmente con  $J_z = -1/2$  (sinistrorso) dove z e' la direzione del vettore velocita', mentre gli antineutrini hanno  $J_z = +1/2$  (destrorso).

I leptoni carichi hanno interazioni deboli ed elettromagnetiche mentre i neutrini hanno solamente interazioni deboli con le altre particelle.

I quarks, oltre ad interazioni deboli ed elettromagnetiche, hanno anche interazioni forti con gli altri quarks.

Mentre le interazioni forti portano a composizioni di quarks (ADRONI), le combinazioni di leptoni sono molto fragili ed instabili (es. positroni o coppie  $e^+$  (positrone),  $e^-$  (elettrone) tenute insieme dall'interazione coulombiana).

Vediamo due tipici decadimenti che conservano i numeri leptonici elettronico e muonico:

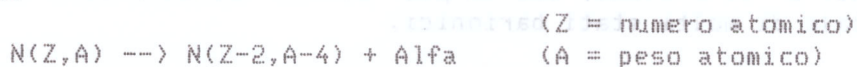
	gamma	(--)	$e^+$	+	$e^-$	(creazione di una coppia)	
$L_e$ :	0		-1		+1		
	$\mu^+$	(--)	$e^+$	+	$\nu_e$	+	$\nu_\mu$
$L_\mu$ :	-1		0		0		-1

$L_e = 0 \quad -1 \quad +1 \quad 0$

(gamma e' un fotone (di energia  $2m_e$ ),  $\nu_e$  sono neutrini ( $\nu_e$  elettronico...),  $\mu^+$  e' un muone,  $L_e$  e' il numero leptonico,  $L_\mu$  il numero muonico)

Interrompiamo per un attimo la trattazione per introdurre il concetto di decadimento. Questo concetto e' fondamentale nella fisica delle particelle in quanto generalmente ad ogni interazione e' associato un decadimento. Da un punto di vista piu' intuitivo, ad ogni forza fondamentale e' associata una energia, quindi se due o piu' particelle hanno una certa energia, esse potranno decadere in altre particelle che, rispetto a quella forma di interazione, hanno energia minore. Così possiamo distinguere tre tipi di decadimenti:

Decadimento Alfa: da un nucleo complesso (neutroni e protoni) si stacca una particella alfa (2 protoni e 2 neutroni = nucleo dell'elio), diminuendo quindi il numero atomico dell'elemento di 2 ed il peso atomico di 4. Questo tipo di decadimento e' provocato dal fatto che le particelle Alfa sono particolarmente stabili rispetto all'interazione nucleare forte, ed e' responsabile della radioattivita' di nuclei come Uranio, Cesio, Radio ecc.



Decadimento Beta: questo e' provocato da interazioni deboli che trasformano protoni in neutroni e viceversa tramite produzione di neutrini:



(Si noti che la produzione dell'antineutrino elettronico e' richiesta dalla conservazione del numero leptonico elettronico).

Decadimento Gamma: sono di questo tipo i processi che generano fotoni. Ovviamente l'interazione responsabile di cio' e' l'interazione elettromagnetica.

Mentre il numero di quarks e' conservato sempre, il numero di quarks di un certo "flavour" e' conservato rigidamente soltanto nelle interazioni forti. La conservazione del numero di fermioni e' stata formulata per i barioni nel 1938 e nel 1953 per i leptoni. Oggi e' messa in discussione, tuttavia appare corretta ad un grado elevato di accuratezza. Ad esempio, il limite inferiore del tempo di vita medio del protone e' di circa  $10^{30} - 10^{31}$  anni.

La difficolta' per una legge di conservazione assoluta del numero barionico e' che, in analogia alla legge di conservazione della carica (legata, come e' noto, all'esistenza del campo elettromagnetico), dovrebbe esserci un nuovo campo con grande scala di distanza, accoppiato con i barioni, che dovrebbe risultare in una differenza nella forza gravitazionale apparente sui corpi con uguale massa inerziale ma differente numero barionico. Gli esperimenti di tipo Eotvos piu' recenti non indicano alcun effetto del genere ed implicano percio' un campo molto piu' debole della gravita'.

##### 5) Adroni - Composti di Quarks ed Antiquarks

Come abbiamo gia' detto, per spiegare gli adroni sono richieste combinazioni di quarks:

per i barioni :  $Q Q Q$ ;  
per i mesoni :  $Q \bar{Q}$  (  $\bar{Q}$  e' un anti-quark )

poiche' i quarks hanno spin semi-intero e i barioni sono caratterizzati da spin semi-intero mentre i mesoni da spin intero. Ad esempio, sono possibili queste combinazioni:

Barioni	Mesoni
$u u d = p$ (protone)	$u \bar{d} = \pi^+$ (pione)
$u d d = n$ (neutrone)	$\bar{u} s = K^-$ (kaone)
$u d s = \Lambda$	$c \bar{c} = \Psi$ (mesone)

La regola di conservazione dei quarks si riflette nella conservazione del numero di barioni, mentre non c'e' conservazione di mesoni.

Sono note molte centinaia di stati adronici, con masse che arrivano a 2500 MeV. La maggior parte di essi sono stati molto larghi che decadono per interazione forte con tempi di vita brevissimi ( $10^{-23}$  sec). Pochi stati decadono via interazione debole, con tempi di vita che variano tra  $10^{-10}$  sec fino a 15 minuti per i neutroni. Il prodotto comune di questi decadimenti e' il protone, che si puo' perciò pensare come lo stato fondamentale di molti stati barionici.

Analogamente, ci sono alcune decine di stati mesonici. Tutti sono instabili e danno alla fine, attraverso interazioni forti, deboli ed elettromagnetiche, leptoni e fotoni.

#### 6) Interazioni e Campi nella Fisica delle Particelle

Classicamente, l'interazione a distanza e' comunemente descritta in termini di un potenziale o campo dovuto ad una particella che agisce su di un'altra.

Nella teoria quantistica cio' e' visto in termini di scambio di quanti specifici ( bosoni ) associati con un particolare tipo di interazione.

Dal punto di vista della meccanica quantistica la forza viene imputata invece allo scambio di FOTONI VIRTUALI di momento  $q$ , dovendo il cambiamento di momento generare la forza. I fotoni sono detti virtuali in quanto essi esistono solo per tempi limitati dal principio di indeterminazione.

Ogni fotone scambiato comporta un trasferimento di momento  $q$  su un tempo  $t=r/c$ , ovvero una forza:

$$dq/dt = h c/r^2.$$

Il numero di fotoni emessi o assorbiti da ambedue le cariche e' assunto proporzionale al prodotto delle cariche, per cui si riottiene la legge classica di Coulomb:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Il concetto quantistico di fotone virtuale e' tanto fittizio quanto quello classico di campo; infatti, in entrambi i casi l'unica cosa che si osserva e' l'intensita' della forza.

La teoria dei campi usata per calcolare le sezioni d'urto (probabilita') di questi processi elettromagnetici e' detta Elettrodinamica Quantistica (QED). Una proprieta' fondamentale della QED e' quella di essere una teoria rinormalizzabile.

Un singolo elettrone puo' per esempio emettere e riassorbire fotoni virtuali (o coppie) e questo termine autoenergetico contribuisce alla massa ed alla carica dell'elettrone; in verita', questi processi danno integrali divergenti quindi la massa e la carica fondamentali dell'elettrone, calcolate teoricamente, divergono. Termini divergenti di questo tipo sono presenti in tutti i processi elettrodinamici e nei calcoli rispettivi di QED. Tuttavia e' stato possibile annullare tutte le divergenze in massa e carica e quindi ridefinire la massa e la carica, sostituendo ad essi i valori sperimentali  $m$  ed  $e$ . Questo processo e' detto rinormalizzazione e la QED si e' dimostrata, dopo la rinormalizzazione, una teoria in grado di predire con precisione incredibile i risultati dei processi elettrodinamici.

Una seconda proprieta' fondamentale delle interazioni elettromagnetiche e' la cosiddetta INVARIANZA DI GAUGE. In elettrostatica, ad esempio, l'energia di interazione, che puo' essere misurata sperimentalmente, dipende dal cambiamento del potenziale da un punto ad un altro, non dal suo valore assoluto lungo il percorso, ed e' percio' invariante rispetto ad un cambiamento di scala del potenziale (gauge).

Ad esempio, in meccanica quantistica la forma dell'equazione d'onda di un elettrone e' arbitraria ed uno e' libero di sceglierla come vuole dovunque. Questa invarianza di gauge locale porta alle considerazioni della corrente e delle cariche.

Cio' che e' estremamente interessante e' che le teorie per le particelle che non godono dell'invarianza di gauge e che non siano rinormalizzabili hanno sempre mostrato difficolta' insormontabili nel confronto con i dati sperimentali. Tenuto conto di cio' e del successo particolarmente brillante della QED, i fisici delle particelle oggi sono orientati nel credere che invarianza di gauge e rinormalizzabilita' siano due proprieta' fondamentali per ogni teoria che ambisca a spiegare la fisica delle particelle elementari.

## 7) Interazioni Gravitazionali

La gravitazione non e' importante nella fisica delle particelle, ma e' interessante ricordarla qui per confrontarne la forza con le altre interazioni. Essa e' descritta in termini di una costante  $G$ : la forza tra due masse uguali  $M$  e' data da

$$F = \frac{G M * M}{r^2}$$

dove  $r$  e' la separazione tra le due masse. Un confronto diretto con la forze elettromagnetica, introducendo masse e cariche delle particelle in gioco ci porta a concludere che, la forza gravitazionale e' trascurabile rispetto alle altre interazioni (questo invece non e' vero, anzi e' vero il contrario in contesti astronomici in cui ci troviamo di fronte ad oggetti con carica globale nulla (stelle, pianeti), ma con masse enormi).

Gli effetti quantistici di tipo gravitazionale possono diventare importanti solo quando le masse e le distanze coinvolte sono tali che l'energia gravitazionale sia dell'ordine dell'energia di massa a riposo delle masse interessate. La lunghezza di Planck (lunghezza alla quale cominciano ad essere importanti gli effetti quantistici della gravitazione) per un protone e'

$$l_{pl} = G \frac{m}{c^2} = 10^{-52} \text{ cm.}$$

Un protone e', come noto, piu' esteso di  $l_{pl}$ . Gli effetti quantistici legati alla gravitazione sono percio' importanti per particelle o sistemi cosi' massicci e puntiformi da avere un raggio di Compton dell'ordine di  $l_{pl}$

(ricordiamo che il raggio di Compton e' il prodotto del tempo di Compton per la velocita' della luce c. Il tempo Compton, a sua volta, e' il tempo per il quale e' ammessa una violazione della conservazione dell'energia pari alla massa a riposo della particella in questione:

$$dE \ t_c = h \quad e \quad dE = 2 m c^2;$$

$$\text{da cui} \quad t_c = \frac{h}{2 m c^2}$$

La massa che deve avere una particella puntiforme perche' gli effetti quantistici della gravitazione diventino importanti si ricava quindi dall'eguaglianza:

$$l_c = \frac{h}{2 m c^2} = l_{pl} = G \frac{m}{c^2}$$

La massa che ricaviamo da tale relazione e' detta massa di Planck:

$$m_{pl} = \sqrt{\frac{hc}{2G}} = 10^{19} \text{ GeV}$$

$$t_{pl} = \frac{h}{m_{pl} c^2} = \sqrt{\frac{2Gh}{c^5}}$$

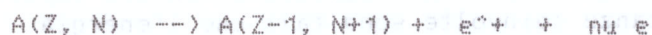
Questa scala di energia e' circa  $10^{15}$  volte piu' grande di ogni scala di energia che finora sia mai stata considerata nella teoria delle particelle elementari. Percio', gli effetti gravitazionali possono essere tranquillamente ignorati.

Non esiste una teoria soddisfacente della quantizzazione della gravitazione, percio' non esiste nemmeno una probabilita', al momento, di una unificazione completa di tutte le interazioni.

Un quanto detto GRAVITONE e' richiesto come mediatore della interazione gravitazionale. Poiche' il campo gravitazionale ha un raggio d'azione infinito, il gravitone ha massa a riposo nulla. Esso ha spin  $J = 2$ . Questo e' dovuto al fatto che, non esistendo una massa negativa, il piu' semplice irraggiatore di gravitoni e' un quadrupolo massivo oscillante.

## 8) Interazioni Deboli

Storicamente la prima interazione debole osservata e' stato il decadimento beta nucleare. Indicando un nucleo con N neutroni e Z protoni con  $A(Z,N)$ , le reazioni tipiche sono:



Questi sono tutti esempi di decadimenti di protoni e neutroni legati in cui il cambiamento nell'energia di legame nucleare fornisce abbastanza energia per le reazioni tra leptoni:



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

o le reazioni inverse:

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

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

Si possono immaginare le interazioni deboli come mediate da un quanto tra correnti di fermioni, aventi una "carica debole"  $g$  in analogia con la carica elettromagnetica. Il quanti intermediatori in questo caso sono piu' di uno (non come l'elettromagnetica che ha solo il fotone). Essi sono il bosone  $W$  (quando c'è nel decadimento una variazione di carica) ed il bosone  $Z_0$  (quando invece non c'è cambiamento di carica). (in questo caso si parla di "correnti neutre")

Una formidabile massa di risultati sperimentali hanno confermato l'ipotesi precedentemente avanzata da Weinberg, che le interazioni deboli ed elettromagnetiche hanno la stessa costante intrinseca di accoppiamento tra bosoni e leptoni, ossia che  $g$  è circa uguale a  $e$  (carica elettrica); questa teoria è nota come "unificazione elettrodebole".

L'uguaglianza dell'accoppiamento ed altri fatti di cui non discuteremo, portano a prevedere che la massa del bosone  $W$  sia circa 80 GeV ed la massa del bosone  $Z_0$  sia circa 90 GeV. Queste previsioni sperimentali sono state, ai primi del 1983, ampiamente confermate dagli esperimenti condotti al CERN sotto la guida di Carlo Rubbia.

In conclusione, le interazioni deboli hanno lo stesso accoppiamento intrinseco di quelle elettromagnetiche e, a brevi distanze, o per alti trasferimenti di momento, hanno la stessa sezione d'urto

A basse energie, la apparente debolezza dell'interazione debole è legata al raggio d'azione estremamente breve associato ad un propagatore massiccio (bosoni  $W$  e  $Z_0$ ). Così il raggio d'azione dell'interazione debole non supera i  $10^{-16}$  cm, mentre il raggio d'azione dell'interazione coulombiana, con la massa dei fotoni = 0, è infinito.

Nella discussione appena conclusa sono state descritte le interazioni deboli tra leptoni e bosoni. Piu' in generale esse capitano tra leptoni e quarks costituenti i nucleoni.

#### 9) Interazioni Forti tra Quarks

Il nucleo della teoria delle interazioni deboli ed elettromagnetiche si basa sull'idea che le reazioni tra quarks e leptoni, o tra leptoni e leptoni, siano dominate dallo scambio di un quanto. Questo dipende dal fatto che la sezione d'urto del processo ( $\alpha$ ) sia  $\ll 1$ , cosicché processi di ordine piu' alto (scambi di due quanti) sono proporzionali a potenze sempre piu' elevate di  $\alpha$  e quindi sono piccole correzioni e perciò possono essere trattate con la teoria delle perturbazioni.

Il termine "interazione forte" è applicato alle interazioni quark-quark che tengono i quarks insieme negli adroni, e l'idea dello scambio di un singolo quanto, in questo caso, sembra inadeguata.

Tuttavia nel 1973 venne dimostrato che esisteva una classe di teorie rinormalizzabili ed invarianti per gauge che erano asintoticamente molto deboli, nel senso che l'accoppiamento effettivo poteva diventare piccolo a distanze sufficientemente piccole o grandi trasferimenti di momento; solo su distanze confrontabili con le dimensioni degli adroni ( $10^{-13}$  cm)

l'accoppiamento diventa molto grande ed e' probabilmente in grado di confinare i quark. Gli esperimenti confermano questa teoria.

Urti di leptoni di alte energie su nucleoni bersaglio possono essere interpretati molto semplicemente in termini di urti elastici di leptoni con un costituente quasi libero e puntiforme, detto PARTONE, dentro il nucleo. Tali partoni possono identificarsi con i quarks, i quali vivono quasi liberi dentro i nuclei, ma non ne possono uscire. In altre parole, le interazioni tra quarks, in questo caso, sono molto deboli e possono essere trattate come perturbazioni.

I bosoni che mediano queste interazioni tra quarks nel nucleo sono detti GLUONI (glue=colla) e sono particelle di "sapore" 0 (flavourless), senza carica, senza massa e di spin 1. Essi portano, assieme ai quarks, una parte carica detta COLORE ("analoga" alla carica elettrica).

Invece di due tipi di carica (+ e -) come nel caso elettrico, i colori sono 3: rosso, blu e verde con i rispettivi anti-colori. I quarks trasportano ognuno un colore e un antiquark un anti-colore; i gluoni portano, invece, un colore ed un anticolore. Dipendendo dai colori, l'interazione tra i quarks tramite i gluoni puo' essere attrattiva o repulsiva.

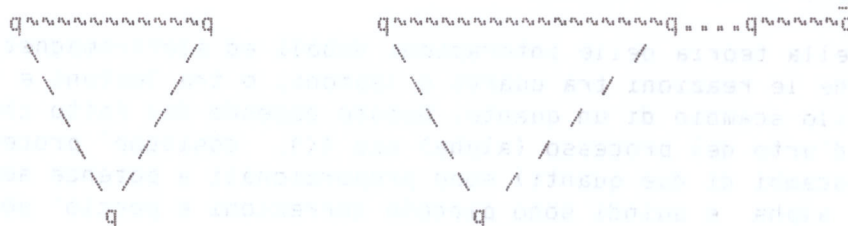
I barioni sono stati legati positivamente di tre quarks di colore zero (il colore zero si ottiene combinando il rosso, il blu ed il verde). I mesoni sono stati legati di colore zero di un quark e di un anti-quark (ad esempio, un quark rosso ed un anti-quark rosso).

La teoria quantistica delle interazioni tra quarks e' detta QUANTOCROMODINAMICA (QCD), in analogia con la QED (QUANTOELETTRODINAMICA).

La differenza principale tra QED e QCD e' che nella QCD esiste una forte interazione tra gluoni (non c'e' invece tra fotoni). Una teoria di campo di questo tipo e' detta NON ABELIANA. La gravitazione, in cui i gravitoni trasportano energia e momento e sono percio' una sorgente di campo, e' pure non abeliana. La QED e' invece abeliana.

La non abelianita' della QCD e' fondamentale per capire perche' l'accoppiamento alpha diminuisce con il diminuire della distanza, poiche' l'interazione gluone-gluone disperde tutt'intorno la forte carica di colore.

A grandi distanze, l'accoppiamento quark-quark diventa grande ed incalcolabile, e presumibilmente da' luogo al confinamento dei quarks.



Nella figura sopra riportata e' esemplificata una analogia in cui un protone e' rappresentato da tre quarks tenuti insieme dalle interazioni gluoniche, che possiamo immaginare rimpiazzate da elastici. Se gli elastici non sono tesi l'accoppiamento e' debole; ma se uno tenta di strappare un quark la tensione aumenta all'aumentare della distanza

Puo' capitare, allora, che l'eneria "elastica" diventi tale da consentire la creazione di una coppia quark-antiquark, che cambia un elastico teso in due elastici a riposo ed il tentativo di strappare un quark da un protone da' origine ad un MESONE.

Liberamente tratto dal corso di  
COSMOLOGIA del  
prof. Luigi Danese  
Universita' di Padova

---