

ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE  
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-86/20(R)  
21 Aprile 1986

B. Barbiellini e G. Barbiellini:  
UNIFICAZIONE DELLE FORZE FONDAMENTALI

Servizio Documentazione  
dei Laboratori Nazionali di Frascati  
Cas. Postale 13 - Frascati (Roma)

## UNIFICAZIONE DELLE FORZE FONDAMENTALI

Bernardo Barbiellini  
Istituto di Fisica dell'Università di Ginevra (Svizzera)

Guido Barbiellini  
INFN - Laboratori Nazionali di Frascati, e CERN, Ginevra (Svizzera)

### 1.- INTRODUZIONE

Lo stato della materia, nel livello che oggi consideriamo elementare, è descritto da un numero relativamente ristretto di costituenti fondamentali, le cui interazioni sono regolate da quattro tipi di forze. Il concetto di costituente fondamentale è un concetto dinamico, relativo alla distanza alla quale eseguiamo le nostre osservazioni e alla loro modalità. Una definizione logicamente soddisfacente di costituente elementare è la seguente: una particella è elementare quando è costituita di se stessa. Per esempio un mattone osservato ad una opportuna distanza risulta costituito di se stesso e ci appare come l'oggetto fondamentale nella realizzazione di complessi edifici. Per questo motivo si usa spesso l'analogia matrone-particella elementare. Riportiamo un esempio per illustrare cosa si intende per concetto dinamico di particella elementare. Se si studia il comportamento di un sistema gasoso alla temperatura ambiente i trasferimenti di energia tra le molecole e le pareti del contenitore sono molto inferiori all'energia di legame delle molecole le quali possono essere con ottima approssimazione considerate particelle fondamentali (vedi schema della Fig. 1). Il concetto di atomo, come ci proviene dalla logica del mondo greco, si è rivelato soddisfacente per molti secoli. Questo concetto logico si può ancora oggi applicare per esempio al protone (il nucleo dell'atomo di idrogeno) ma come vedremo nel seguito non corrisponde esattamente al concetto di particella elementare emerso dalle più recenti ricerche sperimentali.

Alle piccole distanze tra particelle attualmente accessibili con le più potenti e sofisticate macchine acceleratrici (distanze pari a circa  $10^{-17}$  cm) il comportamento della materia risulta comprensibile in termini delle particelle e delle forze descritte in Tabella I.

**TABELLA I** - Classificazione delle particelle elementari e delle forze fondamentali comprendente 24 particelle di "materia" (a - fermioni) e 12 particelle di forza (b - mediatori bosonici) più il gravitone.

**a) Fermioni**

Leptoni			
Nome	Simbolo	Massa a riposo (MeV/c <sup>2</sup> )	Carica elettrica
Neutrino elettronico	$\nu_e$	Circa 0	0
Elettrone	$e$ o $e^-$	0.511	- 1
Neutrino muonico	$\nu_\mu$	Circa 0	0
Muono	$\mu$ o $\mu^-$	106.6	0
Neutrino tauonico	$\nu_\tau$	Meno di 164	0
Tau	$\tau$ o $\tau^-$	1784	- 1
Quarks			
Up	u	310	2/3
Down	d	310	- 1/3
Charm	c	1500	2/3
Strange	s	505	- 1/3
Top	t	> 22 500 non sicuro	2/3
Beauty	b	Circa 5000	- 1/3

**b) Mediatori delle forze: bosoni vettoriali**

Forza	Portata	Intensità a 10 <sup>-13</sup> cm in rapporto con l'interazione forte
Gravità	Infinita	10 <sup>-38</sup>
Elettromagnetismo	Infinita	10 <sup>-2</sup>
Debole	Meno di 10 <sup>-16</sup> cm	10 <sup>-13</sup>
Forte o di colore	Meno di 10 <sup>-13</sup> cm	1

Mediatore	Massa a riposo (MeV/c <sup>2</sup> )	Spin	Carica elettrica	Note
Gravitone	0	2	0	Previsto
Fotone	0	1	0	Osservato
Bosoni intermedi	W <sup>+</sup>	81	- 1	Osservato
	W <sup>-</sup>	81	+ 1	Osservato
	Z <sup>0</sup>	93	1	Osservato
Gluoni	0	1	0	Confinati

Queste particelle sono considerate indivisibili e composte di se stesse. Il primo gruppo di particelle (fermioni), è dotato di momento angolare a riposo o spin di valore  $1/2$ , in unità convenzionali, e contiene due sottogruppi: leptoni (dotati di interazione debole e elettromagnetica); quarks (dotati delle due precedenti interazioni più l'interazione di colore). Ogni tipo di quark (u,d,s,...) appare tre volte nella tabella, una per ogni "carica" di colore. Il gruppo dei mediatori, a parte il gravitone, contiene particelle di spin 1 (bosoni). Per le prime tre forze (gravitazionale, elettromagnetica e debole) la portata della forza è legata alla massa del mediatore nel rapporto  $\sim 1/m$ , in opportune unità. La forza di colore ha una portata finita ( $10^{-13}$  cm), nonostante la massa del mediatore sia nulla, per il meccanismo di confinamento che spiegheremo più avanti.

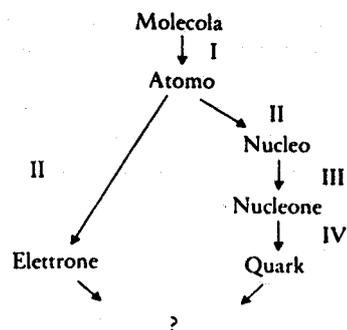


FIG. 1 - Concetto dinamico di particella elementare della materia.

Le particelle elementari, chiamate fermioni, costituiscono la base della materia e sono divise in due gruppi, i leptoni e i quarks, caratterizzati come accennato sopra dal possedere o meno una delle interazioni fondamentali, la forza forte o di colore, il cui significato sarà chiarito nel seguito: i leptoni, al contrario del quark, non hanno interazione forte. La Tabella Ia descrive le interazioni tra le "particelle" elementari dando la portata e l'intensità; la quarta colonna della tabella descrive il mediatore della forza. Come vedremo in seguito le forze sono mediate da particelle elementari; la grande differenza tra le particelle della Tabella Ia e quelle della Tabella Ib risiede nel valore del momento angolare di riposo (spin). I leptoni e i quarks chiamati fermioni hanno spin  $1/2$ , mentre i mediatori delle forze hanno spin 1 e sono chiamati bosoni. I fermioni hanno un comportamento spaziale antisociale nel senso che lo spazio occupato da uno di loro non può essere diviso con un altro fermione con gli stessi connotati; questa proprietà determina alcune caratteristiche fondamentali della materia a noi familiari quali la regolarità della famosa tavola di Mendeleieff. Le forze tra i fermioni descritte nella Tabella Ib sono di due tipi principali: forze a portata lunga (forze gravitazionali e forze elettromagnetiche) e le forze a portata corta (forze deboli e forze forti o di colore). Le forze a portata lunga ci sono più familiari in quanto sperimentabili dai nostri sensi e quindi osservate nella nostra pratica di vita quotidiana. La forza di attrazione gravitazionale sempre attrattiva fa, per esempio, cadere le mele dagli alberi. La forza elettromagnetica di natura sia attrattiva che repulsiva è certamente nota a quasi tutti nelle sue manifestazioni classiche quali l'attrazione dei pezzetti di carta da parte di un bastoncino di ambra strofinato o l'orientamento dell'ago di una bussola nel campo magnetico terrestre.

Le forze a corta portata sono osservabili solo quando la distanza tra le particelle è dell'ordine della portata stessa e sono quindi del tutto inavvertibili ai nostri sensi; ne vediamo le conseguenze solo nei processi che si verificano all'interno di sistemi di particelle (decadimenti) o nelle interazioni tra particelle che si avvicinano tra loro a distanze minori della portata della forza. Le forze deboli sono state osservate per la prima volta nei decadimenti radioattivi dei nuclei nel 1897 nelle famose esperienze di Becquerel, e poi più profondamente studiate dai coniugi Joliot-Curie nel famoso Istituto del Radon a Parigi. Il processo debole che ha fornito il maggior numero di risultati e le misure più precise è il decadimento del muone,  $\mu$  (il fratello pesante dell'elettrone nella famiglia dei leptoni). Le interazioni deboli sono attualmente state studiate in gran dettaglio presso le moderne macchine acceleratrici usando fasci intensi di neutrini ( $\nu$ ) inviati contro bersagli fissi di materia che, vista dai  $\nu$ , si presenta come una zuppa di elettroni e quarks. Lo studio delle interazioni deboli alle più corte distanze o alle

più alte energie è eseguito mediante l'urto materia-antimateria (per esempio elettrone ( $e^-$ )-positrone ( $e^+$ ) o protone (p)-antiprotone ( $\bar{p}$ )) realizzate con speciali macchine acceleratrici chiamate anelli di accumulazione. Gli esperimenti con fasci incrociati di p e  $\bar{p}$  condotti con il Superprotosincrotrone (SPS) del CERN (Centro Europeo di Ricerche Nucleari, Ginevra), opportunamente modificato secondo un suggerimento di Carlo Rubbia, hanno portato alla scoperta dei mediatori delle forze deboli (W,Z) verificando che il loro spin è uguale a 1 e il valore delle loro masse è esattamente quello previsto dalla teoria.

Questi risultati sperimentali sono il meraviglioso coronamento di cinquanta anni di lavoro teorico e sperimentale iniziato con le prime scoperte sperimentali sui decadimenti dei nuclei, continuato con la famosa teoria di Fermi (1934) e concluso con una teoria di campo unificatrice di due forze, quella debole e quella elettromagnetica, che a prima vista ci apparivano tanto diverse e separate!

L'attuale formulazione della teoria elettrodebole, dovuta a S.Glashow, A.Salam e S. Weinberg, rappresenta come vedremo il punto di partenza per più ambiziose teorie di unificazione delle forze. L'unificazione di tutte le forze e la spiegazione di tutti i fenomeni ad esse connesse in termini di un unico schema matematico, rappresenta chiaramente il fine ultimo della scienza, che cerca l'unità nascosta dietro la varietà dei fenomeni naturali.

## 2.- LA NATURA DELLE FORZE

Una descrizione soddisfacente delle forze fondamentali è fornita dalle teorie denominate teorie di invarianza di calibratura (nella letteratura scientifica "Gauge Theories").

La nozione di simmetria è alla base di queste teorie.

La parola simmetria viene dal greco  $\sigma\upsilon\nu$  = con e  $\mu\epsilon\tau\rho\omicron\nu$  = misura; in geometria è intesa come invarianza di una struttura rispetto a certe trasformazioni (per esempio le traslazioni, le rotazioni, le riflessioni, ecc.). Un cristallo, insieme ordinato di molecole, è invariante per traslazioni discrete multiple del passo reticolare; inoltre un cristallo cubico ruotato di  $90^\circ$  intorno a uno spigolo della cella fondamentale riproduce la configurazione di partenza.

Una simmetria, in senso matematico, si presenta quando la forma di un'equazione è preservata per la trasformazione di una coordinata generalizzata del sistema da essa descritto. Per esempio, la forma dell'equazione della caduta libera di un grave non dipende dall'origine del tempo; ne risulta allora l'esistenza di una quantità conservata: l'energia meccanica. Infatti, sia l'equazione del moto

$$d^2x/dt^2 = mg,$$

l'energia cinetica è data da

$$T = 1/2 m (dx/dt)^2,$$

l'energia potenziale da

$$U = - mgx,$$

l'energia meccanica è la somma

$$E = T + U,$$

che non varia nel tempo

$$dE/dt = dT/dt + dU/dt = 0.$$

Una conseguenza importante dell'invarianza delle leggi fisiche per certe trasformazio-

ni è quindi l'esistenza di grandezze conservate nel tempo (v. Tabella II). Riassumiamo con la sequenza logica:

Simmetria - inosservabile - invarianza - legge di conservazione

TABELLA II - Esempi di simmetrie.

Quantità non osservabile	Invarianza per trasformazione	Grandezza conservata
Posizione assoluta nello spazio	Traslazione di spazio $\vec{r} \rightarrow \vec{r} + \vec{\Delta}$	Impulso $\vec{p}$
Tempo assoluto	Traslazione del tempo $t \rightarrow t + \tau$	Energia E
Direzione assoluta	Rotazioni	Momento angolare $\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$
Velocità assoluta	Trasformazione di Lorentz	Generatore del gruppo di Lorentz (relatività ristretta di Einstein)
Differenza tra accelerazione e gravità	Trasformazione locale di coordinate generali	Relatività generale di Einstein (teoria di gauge)
Nozione assoluta di destra e sinistra	Riflessione spaziale $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$	Parità

Oltre alle traslazioni e alle rotazioni esistono altre operazioni di simmetria che sono chiamate discrete perché i loro parametri non possono variare in modo continuo come uno spostamento o un angolo. Tra esse distinguiamo la riflessione spaziale P a cui corrisponde la simmetria tra destra e sinistra (v. Tabella II), l'inversione del tempo T ( $t \rightarrow -t$ ) e la coniugazione di carica C, che trasforma le particelle in antiparticelle (per esempio l'elettrone  $e^-$  in positrone  $e^+$ ) cambiando quindi il segno delle cariche (elettriche, deboli e forti) e dei numeri quantici (stranezza, bellezza, ec.). La forza elettromagnetica è simmetrica rispetto a ognuna di queste simmetrie mentre l'interazione debole viola P e C. La violazione di P, scoperta sperimentalmente nel 1957, in alcune disintegrazioni  $\beta$ , ha dato torto alla convinzione che le leggi fisiche non potessero distinguere la destra dalla sinistra; in altre parole si riteneva che, dato un qualsiasi fenomeno fisico, dovesse sempre essere realizzabile in natura quello che si ottiene guardando il fenomeno di partenza riflesso in uno specchio. D'altronde si può dimostrare matematicamente che ogni interazione è simmetrica rispetto al prodotto CPT (cioè l'applicazione successiva delle tre operazioni) e ciò sembra sperimentalmente ben confermato.

Se una teoria fisica è sempre valida quando una coordinata varia della stessa quantità in ogni punto dello spazio, si dice che le equazioni sono globalmente simmetriche rispetto a questa coordinata.

Invece, quando la coordinata può essere modificata indipendentemente in ogni punto dello spazio mantenendo la teoria valida, le equazioni sono localmente simmetriche e si ottiene una teoria di gauge locale.

Per capire come tali teorie possano spiegare le forze fondamentali possiamo fare l'analogia con un disco elastico. Compariamo la forma del disco elastico ad una legge della

natura e consideriamo lo spostamento di un punto sul disco come un'operazione di simmetria locale: il disco deve conservare la sua forma anche quando ognuno dei suoi punti è spostato indipendentemente.

Gli spostamenti tendono a stendere il disco e introducono delle forze di tensione tra i punti. Allo stesso modo, nelle teorie di gauge, le forze fondamentali sono la conseguenza inevitabile delle operazioni di simmetria locali: esse sono necessarie per mantenere le simmetrie.

Certe teorie di gauge hanno origine dalla richiesta di invarianza per operazioni applicate localmente alla funzione d'onda del sistema che è l'elemento di base per la descrizione di un sistema quantistico.

Per descrivere il campo di materia determinato dalla presenza di un elettrone in una certa regione dello spazio (r)-tempo (t), si usa una funzione d'onda indicata spesso con il simbolo  $\psi(r,t)$ ; essa è una funzione complessa cioè equivalente a una coppia ordinata di funzioni reali. Le grandezze fisiche osservabili sono sempre esprimibili in termini di numeri reali e sono di conseguenza correlate alla  $\psi$  tramite forme quadratiche reali. Per esempio, nel caso non relativistico,  $|\psi|^2$  rappresenta la densità di probabilità di presenza d'una particella. Le grandezze fisiche, come  $|\psi|^2$ , sono quindi invarianti per l'operazione di moltiplicazione di  $\psi$  per una fase

$$\psi \rightarrow \psi \cdot \exp(i\alpha).$$

Le grandezze fisiche esprimibili tramite la  $\psi$  sono indipendenti dalla trasformazione di fase. In base al principio precedentemente accennato, a questa invarianza deve corrispondere una grandezza conservata e in effetti la conservazione della carica elettrica è la conseguenza matematica del principio di invarianza di fase per i campi carichi. Una proprietà notevole della elettrodinamica è che le sue equazioni (le equazioni di Maxwell) sono invarianti per trasformazioni di fase locali: la funzione d'onda può essere moltiplicata per una fase dipendente dalla coordinata spazio-temporale (r,t) a patto che simultaneamente il campo elettromagnetico sia opportunamente modificato

$$\psi \rightarrow \exp(ie\alpha)\psi; \quad A \rightarrow A - ied\alpha/dx$$

dove  $e$  è la carica elettrica e  $A$  è il campo elettromagnetico che assicura la simmetria locale.

Nella teoria quantistica dell'elettrodinamica il campo elettromagnetico si quantizza nei fotoni che sono le particelle (bosoni con spin 1) che mediano le interazioni tra particelle cariche.

L'interpretazione fisica e grafica di questo fondamentale principio è la seguente: in un punto dello spazio-tempo l'elettrone cambia impulso e contemporaneamente viene emesso un fotone che ristabilisce il bilancio impulso-energia (Fig. 2). Il principio di in-

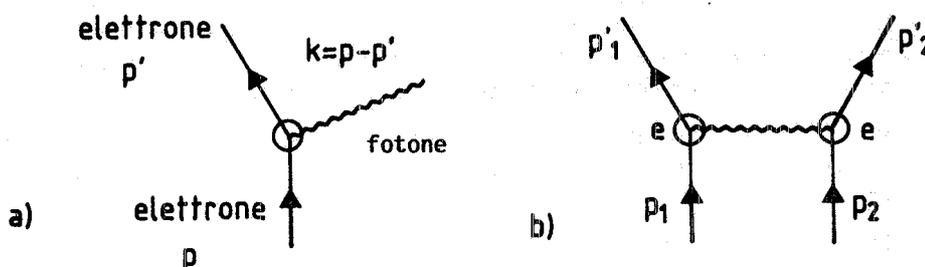


FIG. 2 - a) Diagramma di Feynman fondamentale dell'interazione elettromagnetica: l'elettrone cambia impulso  $p$  (fase) con probabilità proporzionale a  $e^2$  e acquista impulso  $p'$  emettendo un fotone di impulso  $k=p-p'$ . b) Interazione elettrone-elettrone (e-e) mediata dal fotone  $\gamma$  tramite il processo di emissione e assorbimento nei due vertici dove i due elettroni cambiano impulso.

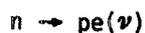
varianza per trasformazione locale di fase è così potente che se partiamo dalle equazioni della particella libera in assenza d'interazione (il che è chiaramente un'astrazione logica) e richiediamo l'invarianza per trasformazione di fase locale, il tipo di interazione risulta fissato. Tutte le interazioni note tra le particelle elementari sono derivabili dal principio di invarianza precedentemente illustrato per l'elettrodinamica. Per vedere come questo principio generi le interazioni forte e debole abbiamo bisogno del concetto di grado di libertà interno che esamineremo nel prossimo paragrafo.

### 3.- GRADI DI LIBERTA' INTERNI E INTERAZIONI FONDAMENTALI

Le simmetrie di un sistema fisico possono dipendere dalla scala di distanze alla quale osserviamo il sistema. Per esempio, se osserviamo un cristallo a distanze molto superiori al passo reticolare ( $a$ ), le manifestazioni della sua simmetria risultano evidenti per molti aspetti quali la regolarità delle sue faccie e la precisa separazione dei suoi spigoli. Un immaginario esploratore in possesso della facoltà di diminuire le proprie dimensioni procedendo nel suo viaggio all'interno del cristallo, registrerebbe una totale mancanza di simmetrie nelle sue osservazioni eseguite a distanze minori di ( $a$ ); a piccoli spostamenti corrisponderebbero violente variazioni dell'ambiente. Ma la sorpresa maggiore è costituita dal fatto che il nostro esploratore potrà ritrovare delle regolarità spaziali nel mondo dell'atomo, a patto che, naturalmente, disponga di strumenti adeguati al nuovo universo.

Una situazione analoga si riscontra quando osserviamo a distanze diverse due protagonisti fondamentali delle interazioni deboli, l'elettrone  $e^-$  e il suo partner di carica elettrica nulla, il neutrino  $\nu$ . Elettrone e neutrino sono i più leggeri fermioni della Tabella Ia, la nostra tabella della materia.

L'elettrone, corriere della corrente elettrica nei metalli e costituente della nuvola elettronica intorno agli atomi, è ben noto sin dalla scoperta di J.J.Thompson nel 1897; il suo partner è passato inosservato alla pur vigile sorveglianza degli scienziati sino a circa cinquanta anni fa (Pauli: ipotesi del neutrino, 1930). La sua presenza è stata notata in maniera indiretta nello studio del decadimento radioattivo dei nuclei. La radioattività  $\beta$  dei nuclei consiste nella trasmutazione di un nucleo padre in un nucleo figlio avente un protone in più e un neutrone in meno tramite l'emissione di un elettrone. Essa fu interpretata in base al processo elementare



dove  $n, p$  indicano rispettivamente il neutrone (del nucleo padre) e il protone (del nucleo figlio).

Lo studio dello spettro di energia dell'elettrone mostrò che la distribuzione dell'energia dell'elettrone era continua in contrasto con la ipotesi che nello stato finale fossero presenti solo le particelle osservate cioè  $e+p$  (Fig. 3), nel qual caso l'energia dell'elettrone avrebbe avuto un solo valore corrispondente alla cinetica del decadimento a due corpi  $n \rightarrow p e$ .

Per spiegare la distribuzione di Fig. 3, W. Pauli ipotizzò la creazione di una particella neutra emessa nel decadimento che sfuggiva alla rivelazione sperimentale, il  $\nu$ . Molti fisici dell'epoca furono riluttanti nell'accettare un oggetto non verificabile sperimentalmente con

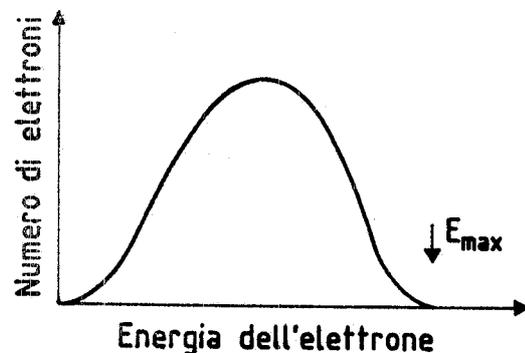


FIG. 3 - Distribuzioni di energia degli elettroni prodotti dal decadimento radioattivo  $\beta$  per es. di un nucleo.

gli strumenti di quell'epoca. Ma, nel 1934 Enrico Fermi rese quantitativa l'idea di Pauli, formulando la famosa teoria delle interazioni deboli che porta il suo nome e che, ancora oggi, con alcune opportune modifiche, può considerarsi la base della presente teoria di questo campo.

Fermi formulò la sua teoria in analogia alla ben nota teoria dell'elettrodinamica quantistica, sostituendo all'emissione del fotone nella diseccitazione dell'atomo l'emissione della coppia  $e\nu$  nel decadimento del neutrone.

Nel linguaggio attuale dell'interazioni tra particelle elementari con il vocabolario contenuto nelle Tabelle Ia e Ib, il neutrone e il suo decadimento sono interpretati nella seguente maniera: il neutrone è lo stato legato dei tre quarks  $d, d, u$  di carica  $-1/3, -1/3, 2/3$  (v. Tabella I e Fig. 4); uno dei due quarks  $d$  subisce una transizione  $d \rightarrow u$  e il mediatore  $W$  virtuale (v. glossario: particella virtuale) decade rapidamente nella coppia  $e\nu$  secondo il diagramma (b) di Fig/ 4.

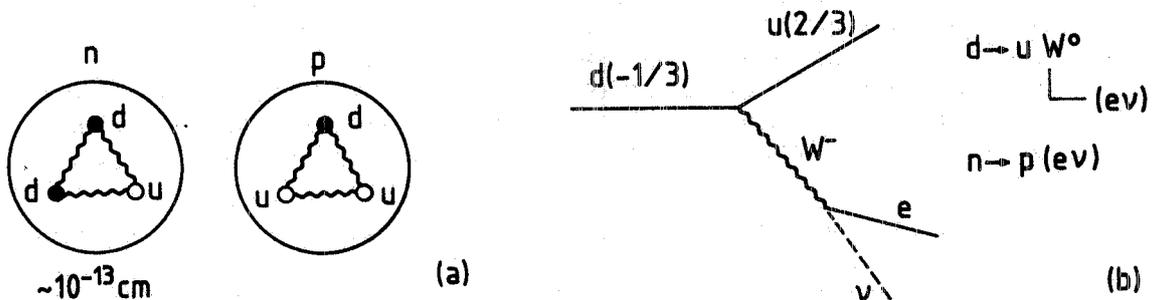


FIG. 4 - (a) Struttura dei nucleoni. (b) Decadimento del neutrone.

La coppia  $e\nu$  priva di "colore" può sfuggire dalla prigione adronica mentre il quark u vi rimane trasformando l'iniziale n (ddu) nel finale p (uud).

Nelle moderne macchine acceleratrici, dove si producono abbondantemente particelle adroniche instabili e se ne controllano i prodotti di decadimento, si possono generare intensi fasci di  $\nu$  con i quali si può studiare il processo inverso del decadimento dal neutrone:  $\nu p \rightarrow W^+ \rightarrow ne$ . Come vedremo in seguito il "fotone" pesante  $W$  ha una massa elevata ( $M = 83$  GeV, pari a circa 100 masse protoniche) e la portata delle forze deboli mediate dal  $W$  è corta secondo la relazione  $\lambda \propto 1/M$ .

La coppia  $e\nu$  costituisce un'unione di due partners che osservati a distanze macroscopiche appaiono completamente diversi; osservandoli invece al momento di una interazione a distanze  $\lambda < 1/M$ , essi possono essere considerati una stessa entità in quanto un  $\nu$  nell'atto di emettere un  $W$  carico è indistinguibile da un elettrone. Questa simmetria contenuta nella coppia  $(e, \nu)$ , che si realizza ad alte energia o a piccole distanze, si esprime matematicamente con il gruppo delle trasformazioni generate dalle matrici  $2 \times 2$ , complesse, unitarie e a determinante uguale a uno:  $SU(2)$ . Queste trasformazioni operano sul doppietto  $(e, \nu)$ . I simboli  $e, \nu$  stanno per le funzioni d'onda dei due fermioni  $e, \nu$ . Se si richiede che la fisica del sistema  $e, \nu$  sia localmente invariante per  $SU(2)$ , si ottiene la moderna teoria delle interazioni deboli, nota sotto il nome di Modello Standard (MS), dove le forze sono mediate da tre bosoni vettoriali (cioè di spin 1), di cui due elettricamente carichi ed uno neutro ( $W^+, W^-, Z^0$ ). Nella EDQ, teoria invariante locale per il gruppo di moltiplicazione per una fase ( $U(1)$ ), s'era ottenuto un solo mediatore: il fotone  $\gamma$ .

Una caratteristica che contraddistingue le trasformazioni  $SU(2)$  rispetto alle trasformazioni  $U(1)$  è che il risultato di due trasformazioni, successive di  $SU(2)$  dipende dall'ordine nel quale vengono applicate. Questo comportamento non commutativo degli  $SU(n)$  caratterizza una classe di gruppi denominati, in matematica, non abeliani.

Un esempio di gruppo non abeliano è rappresentato dal gruppo delle rotazioni nello spazio a tre dimensioni, per le quali il risultato, come mostrato in Fig. 5, dipende dall'ordine nel quale esse sono eseguite, contrariamente alle rotazioni in un piano. Una

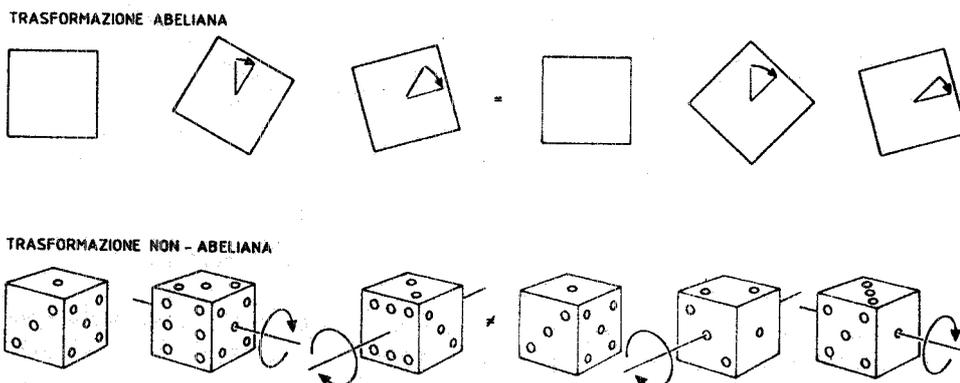


FIG. 5 - Il risultato dell'applicazione di più trasformazioni distingue l'elettrodinamica quantistica (EDQ), che è una teoria abeliana, dalla simmetria elettro-ne-neutrino ( $SU(2)$ ) che è una teoria non abeliana. Una trasformazione abeliana è commutativa, il risultato di due trasformazioni successive è indipendente dall'ordine nel quale esse sono applicate. La rotazione in un piano (spazio a due dimensioni), figura superiore, è un esempio di commutabilità. Le rotazioni nello spazio ordinario (spazio a tre dimensioni), figura inferiore, sono un esempio di operazioni non commutative. Le trasformazioni successive condurranno a risultati diversi a secondo dell'ordine nel quale sono eseguite.

caratteristica fisica molto importante dei mediatori di forza, derivati dai gruppi di gauge non abeliani, è che essi sono dotati di "carica" relativa al gruppo; e sono quindi possibili interazioni tra soli mediatori (Fig. 6), a differenza di quanto avviene in EDQ, dove il  $\gamma$  non interagisce mai direttamente con se stesso.

La teoria delle interazioni elettrodeboli ottenuta dal principio di invarianza locale per trasformazioni di gauge è stata formulata da S.Glashow, A.Salam e S. Weinberg, nel 1967; la sua capacità predittiva è stata ulteriormente potenziata dai lavori di 't Hooft.

L'esistenza di un mediatore neutro delle interazioni deboli ebbe come importante conseguenza la previsione di un tipo d'interazione, precedentemente sconosciuto, chiamata corrente neutra e sperimentalmente verificata in una serie di importanti esperienze al CERN.

Inoltre il mediatore neutro si mescola con il quanto relativo a un gruppo di invarianza di fase  $U(1)$ , dando origine alle due particelle fisiche e quindi osservabili:

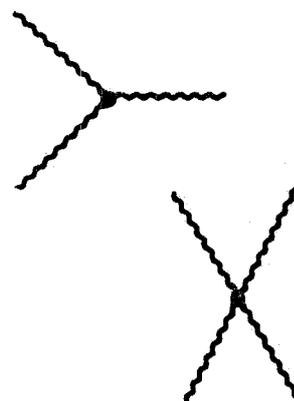


FIG. 6 - Interazione tra soli mediatori in una teoria non abeliana.

il  $\gamma$  e lo  $Z^0$ . La mescolanza dei due bosoni neutri di gauge è profondamente legata al meccanismo di origine delle masse dei bosoni ed è quantitativamente espressa da angolo di mixing o angolo debole  $\theta_W$ . L'esistenza di due mediatori neutri permette le interazioni tra fermioni carichi, illustrate dai due diagrammi di Fig. 7, che producono stati finali indistinguibili, il che dà luogo a interferenze. Questo fenomeno, sperimentalmente verificato, costituisce una prova inconfutabile della miscibilità del  $\gamma$  con il suo partner pesante lo  $Z^0$ .

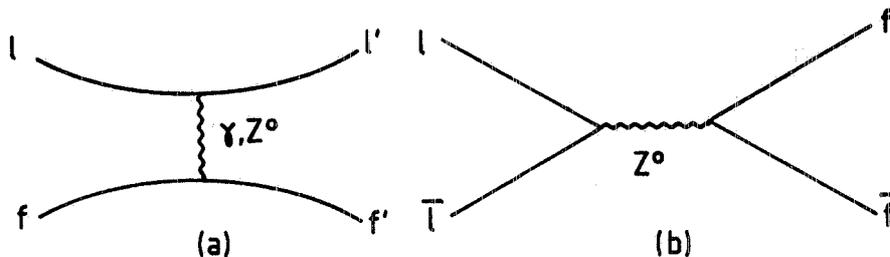


FIG. 7 - (a) Mediatori neutri  $\gamma$  e  $Z^0$ . (b) Corrente neutra.

Le precedenti considerazioni sono ricche di contenuto fisico e di potenziale generalizzazione; infatti l'unione dei mediatori delle due simmetrie  $U(1)$  e  $SU(2)$  realizza quella che viene definita come unificazione delle forze elettriche e deboli in una sola forza elettrodebole; essa rappresenta l'esempio di base nella direzione della ricerca di una unificazione generale di tutte le forze esprimibili come mediatori di un unico gruppo di simmetria che si realizza a energie ancora inesplorate.

La teoria completa elettrodebole contiene un altro ingrediente molto importante per giustificare la massa dei mediatori deboli, ma il meccanismo detto di Higgs, che rende conto dell'origine di queste masse non è essenziale per procedere nella nostra illustrazione.

La teoria elettrodebole ha ricevuto un meraviglioso coronamento, con la scoperta sperimentale, ottenuta nel 1983, al SPS del CERN, dei bosoni vettoriali  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  (Fig. 8). Il valore della loro massa è risultato coincidente con il valore teorico determinato in base ai parametri essenziali della teoria: la carica elettrica e l'angolo debole  $\theta_W \approx 28^\circ$  ottenuto con misure eseguite a più basse energie.

#### 4.- LE FORZE ADRONICHE E LA SIMMETRIA INTERNA DI COLORE $SU(2)$

L'ipotesi che le particelle adroniche scoperte in grande abbondanza negli esperimenti di urto adrone-adrone, eseguiti con potenti macchine acceleratrici di particelle, non fossero oggetti fondamentali, come si credeva negli anni '60, ma fossero composti, fu avanzata, nel 1963, da alcuni fisici teorici tra cui, e con molta chiarezza, da Murray Gell-Mann.

I fatti sperimentali che invitavano alla formulazione di una teoria basata su un livello più fondamentale di quello osservato direttamente dai rivelatori, sono molteplici e vanno dalla richiesta di economia descrittiva per catalogare il dilagante numero di particelle scoperte, con grande entusiasmo dagli sperimentali, all'indicazione precisa proveniente dagli esperimenti di diffusione di elettroni su protoni. La frequenza e la distribuzione angolare susseguente agli urti era infatti interpretabile con l'interazione elettrone-oggetto puntiforme contenuto nel protone.

Essendo gli adroni noti sistemi con spin intero ( $J=0,1$ ) o semintero ( $J=1/2,3/2$ ), i loro costituenti devono essere fermioni, per essere dotati del più piccolo momento angolare.

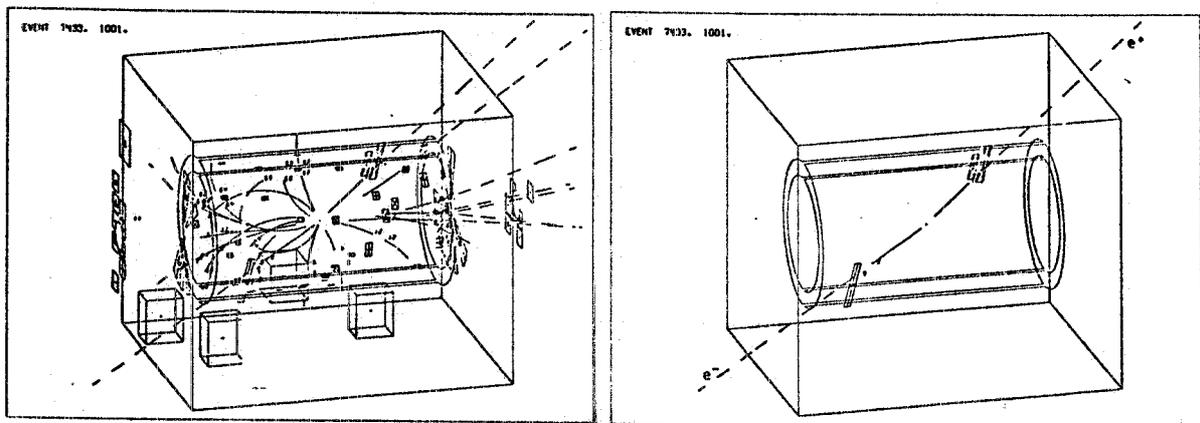
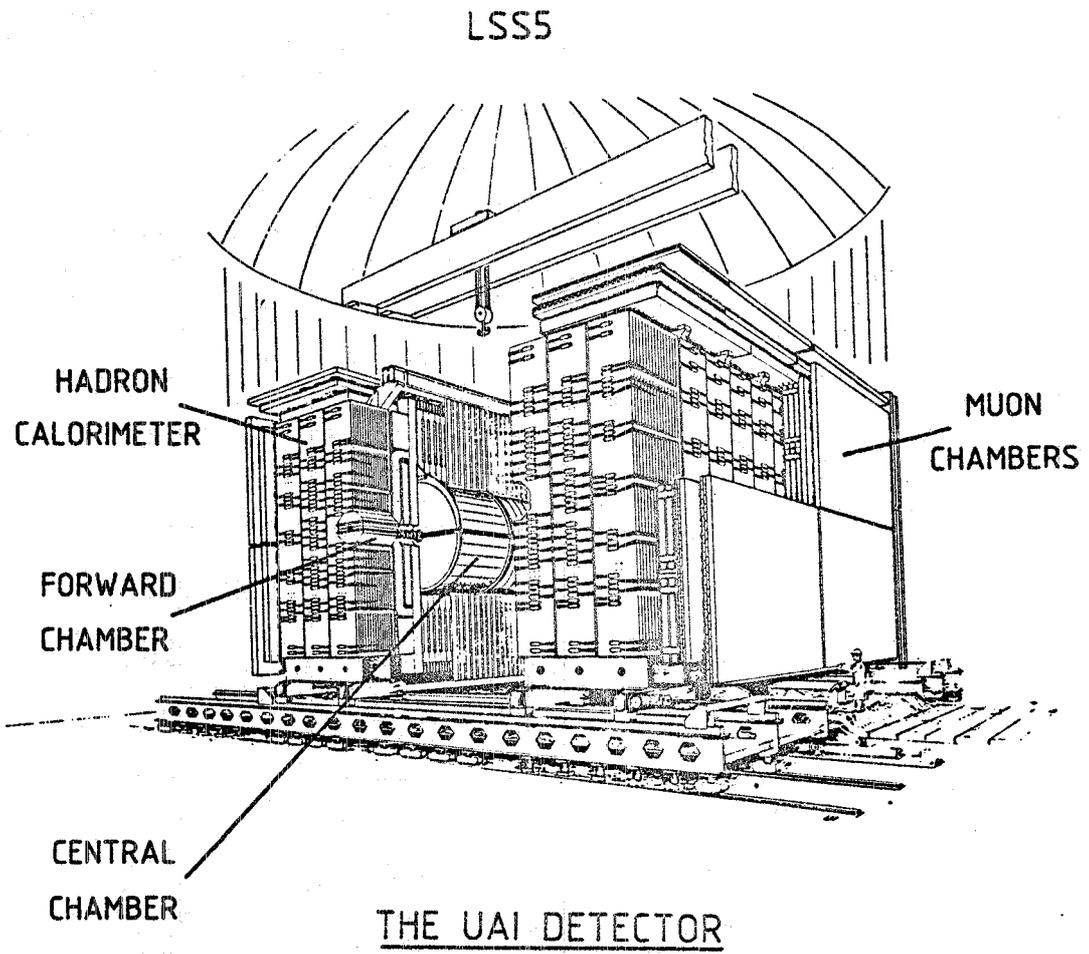


FIG. 8 - Esperimento UA1 ed evento  $Z^0$ .

lare, col quale si possono formare le precedenti combinazioni. La formazione dei mesoni con  $J=0,1$ , si può ottenere con una coppia costituente-anticostituente. La formazione di un adrone con spin  $1/2$  (barione), si può avere solo con un numero dispari di costituenti, e se vogliamo essere economici con tre costituenti. I costituenti degli adroni sono stati chiamati da Gell-Mann "quarks". La carica che tiene legati tre quarks all'interno dei barioni e che risulta totalmente schermata all'esterno, richiama, almeno meccanicamente, il comportamento della combinazione dei colori fondamentali (rosso, verde, blu). Questi tre colori combinati insieme danno luogo al bianco (carica neutra). In base a questa analogia, le forze tra i quarks sono chiamate forze di colore, e la teoria delle loro interazioni che descrive le forze tra i quarks, e in maniera indiretta le forze tra gli adroni, viene chiamata la cromodinamica quantistica CDQ. Il colore di un quark rappresenta quindi la carica della forza che tiene i quarks legati sotto forma di adroni bianchi; un tipo di quark, per esempio il quark u di carica elettrica  $2/3$  può esistere all'interno dell'adrone in tre stati diversi: u (rosso), u (verde), u (blu).

Le forze cromodinamiche sono ovviamente invarianti per trasformazioni globali del colore. Prendiamo per esempio il caso di un adrone costituito da tre quarks colorati, come in Fig. 9, tali che la combinazione dei tre colori sia il bianco. Se modifichiamo simultaneamente i colori dei tre quarks, il che simbolicamente corrisponde nella figura a una

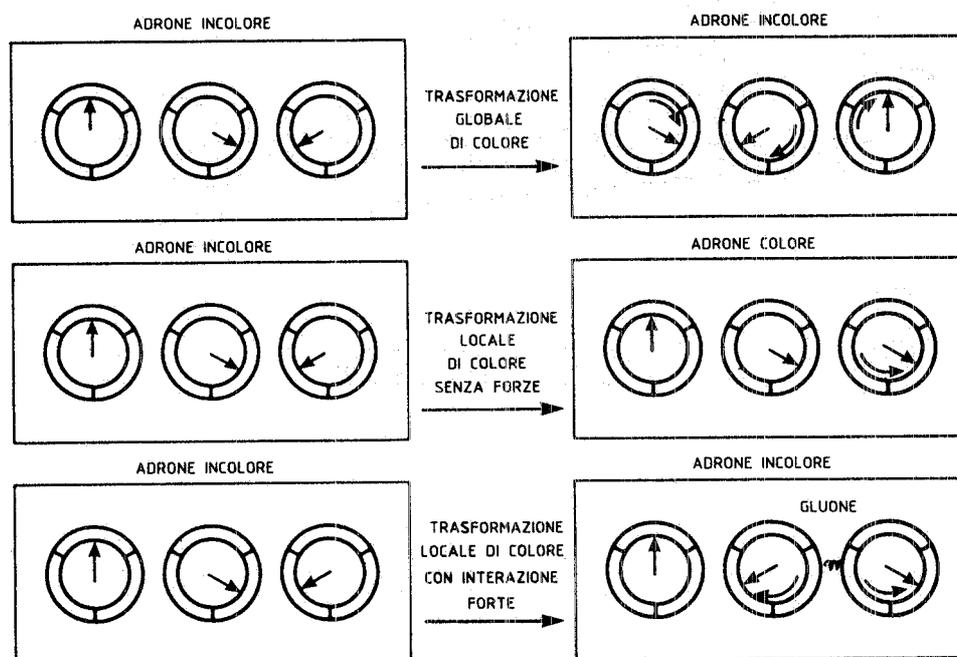


FIG. 9 - Nella simmetria di colore ogni adrone deve restare bianco o privo di colore quando i colori dei suoi costituenti (quarks e gluoni) cambiano. Consideriamo un adrone costituito da tre quarks (barione) se il colore di ciascun quark è indicato dalla posizione angolare di una freccia in uno spazio interno all'adrone. La simmetria globale di colore è evidentemente rispettata. Il cambiamento simultaneo di colore (rotazione di  $60^\circ$  delle frecce) produce un barione che dall'esterno risulta ancora bianco. La simmetria globale non può trasformarsi in simmetria locale in assenza di forze. Se cambiamo la posizione di una freccia lasciando fissa la posizione delle altre due il nuovo adrone risulta colorato (inesistente in natura). Se il colore di un quark cambia, è necessario che un quanto di colore trasmetta l'informazione all'altro quark in maniera che l'adrone rimanga incolore. Esistono 8 quanti di colore (gluoni) che sono i mediatori delle forze e sono, come il fotone per EDQ i vettori della cromodinamica quantistica (CDQ).

rotazione di 60 gradi di ognuno dei tre costituenti, l'adrone in esame rimane bianco ed uguale a se stesso; una trasformazione del genere risulta quindi inosservabile.

Una trasformazione locale di colore, o il cambiamento di colore di uno solo dei tre quarks, risulta inosservata solo se un agente o mediatore, dotato sia di un colore che di un anticoloro (colore complementare o al rosso o al verde o al blu), porta via dal quark il suo colore originale e il complementare del suo nuovo colore. Lo stesso mediatore, incontrandosi con un altro quark, ne assorbe il colore originale e gli trasmette il colore del primo quark. L'invarianza locale è quindi possibile se esistono dei mediatori simili al fotone. La richiesta di invarianza locale sotto le trasformazioni di colore genera una simmetria descritta matematicamente dal gruppo di trasformazioni SU(3). I quanti delle forze di colore, chiamati gluoni (dall'inglese glue = colla), sono  $8 = 3 \times 3 - 1$  e sono provvisti di carica di colore, poichè SU(3) è non abeliano. Una sola combinazione colore-anticoloro risulta bianca ed è sottratta dalla conta.

La carica dei gluoni è responsabile d'una caratteristica molto peculiare delle forze di colore, denominata "confinamento".

I sistemi legati neutri, formati da cariche elettriche di segno opposto (un esempio classico è l'atomo d'idrogeno), sono separabili o ionizzabili a patto che sia fornita loro opportuna energia di legame. Un sistema neutro legato da cariche di colore non è "ionizzabile" qualsiasi quantità di energia gli sia fornita. Più avanti spiegheremo le cause del confinamento del colore. Qui vogliamo solo ricordare che vari ricercatori hanno tentato, per adesso invano, di liberare i quarks dalla prigionia adronica.

Per indagare più a fondo questi fenomeni, dobbiamo illustrare almeno qualitativamente, il comportamento del vuoto sotto le sollecitazioni di forze intense.

Quando una carica elettrica passa attraverso la materia, formata dall'equilibrio di cariche + e -, il campo elettrico ad essa associato determina delle modifiche nella distribuzione delle cariche, richiamando a sé le cariche di segno opposto e allontanando quelle dello stesso segno; ciò è noto come la polarizzazione della materia. La carica elettrica della particella risulta così schermata. Un fenomeno simile può verificarsi anche nel vuoto, per effetto delle cosiddette fluttuazioni del vuoto. A causa della simmetria materia-antimateria e della possibilità di violazione della conservazione dell'energia, a livello quantistico, per intervalli di tempo molto brevi (creazione di particelle "virtuali") e a distanze molto piccole, si può generare una coppia di elettrone-positrone virtuali che, orientata come un dipolo elettrico dalla carica, induce la polarizzazione del vuoto; ciò modifica la carica apparente della particella, creando una schermatura.

Nel caso della forza di colore interviene un altro fenomeno predominante, caratteristico delle teorie non abeliane, opposto alla schermatura e chiamato mimetismo: il quark diffonde la sua carica di colore emettendo gluoni virtuali colorati, provocando una diminuzione dell'interazione con un altro quark a piccole distanze e un aumento a grandi distanze.

Il mimetismo (Fig. 10) rende conto del comportamento apparentemente paradossale dei quarks: quando essi si trovano a piccole distanze relative hanno un'interazione trascurabile, crescente quando i quarks si allontanano. Il primo effetto dà luogo al fenomeno conosciuto sotto il nome di libertà asintotica, mentre il secondo provoca il confinamento delle particelle colorate su distanze di circa  $10^{-13}$  cm = 1 fermi. Quando i quarks tentano di separarsi a distanze maggiori della dimensione degli adroni (1 fermi), si generano delle forze che mantengono i quarks imprigionati entro il volume delle particelle adroniche. Queste particelle sono quindi come dei contenitori ermetici della carica di colore.

I meccanismi di schermatura e di mimetismo predicono che la carica di una particella si comporti come una quantità variabile, funzione della distanza a cui viene misurata. La carica forte è stata misurata nei sistemi legati quark-antiquark e trovata variare

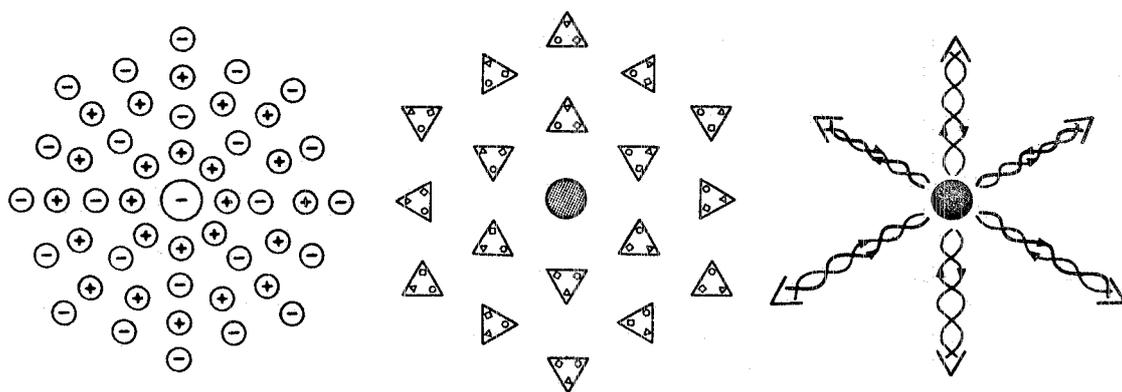


FIG. 10 - Gli effetti di schermatura e di mimetismo modificano l'intensità delle forze fondamentali con la distanza. Il disegno a sinistra illustra il fenomeno di polarizzazione del vuoto, dove la creazione di coppie virtuali permette il realizzarsi di uno schermo della carica centrale, schermo di efficacia variabile a secondo di dove la carica viene misurata. Le cariche positive del vuoto (il vuoto resta globalmente neutro) sono attratte dalla carica negativa e le negative sono allontanate. Le forze di colore producono un effetto di schermatura analogo a quello della carica elettrica, come illustrato nella figura centrale. A causa della natura non abeliana delle forze di colore, i quanti gluoni sono dotati di carica e questo produce un fenomeno antagonista alla schermatura, chiamato mimetismo, predominante per l'interazione forte (illustrato dalla figura di destra). Il quark emette e riassorbe i gluoni che diffondono la sua carica, provocando una diminuzione dell'interazione con un altro quark a piccole distanze e un aumento a grandi distanze. Il risultato è quindi che a corti distanze i quarks sono quasi liberi mentre a grandi distanze i quarks sono fortemente legati e confinati nel volume adronico.

in funzione della massa del quark. ("L'atomo" charm-anticharm risulta più legato di quello beauty-antibeauty).

## 5.- TEORIE GRAND-UNIFICATE

Nei paragrafi precedenti si è visto come sia possibile derivare le varie forze conosciute dal principio di invarianza locale di gauge applicato a diversi tipi di trasformazione:  $SU(2) \times U(1)$  forze elettrodeboli,  $SU(3)$  forza di colore. A ognuno di questi gruppi è associata una costante analoga alla carica elettrica e.

Il meccanismo di polarizzazione del vuoto impone che le tre costanti che caratterizzano le forze non siano veramente costanti, ma abbiano una lenta evoluzione con la distanza o l'energia a cui avviene l'interazione. L'evoluzione del loro valore può essere studiata matematicamente; il risultato ottenuto mostra che le tre costanti  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$  convergono ad un valore comune  $g$  ad energie molto alte pari a circa  $10^{15}$  GeV (vedi Fig. 11).

Questo risultato suggerisce la possibilità che le forze a noi note attualmente, derivate dalle simmetrie separate  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ , siano l'espressione di un unico gruppo  $G$ , contenente i precedenti tre gruppi. La simmetria  $G$  caratterizzata da una sola costante  $g$  verrebbe rotta all'energia di  $10^{15}$  GeV. Il meccanismo di rottura è responsabile del separarsi di  $g$  in  $g_1$ ,  $g_2$ ,  $g_3$ .

Il più piccolo gruppo semplice contenente  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$  è  $SU(5)$ ; le sue caratteristiche come le conseguenze sperimentali sono state ampiamente studiate. Se la forza di colore e quella elettrodebole sono due aspetti di un'unica realtà, la suddivisione dei

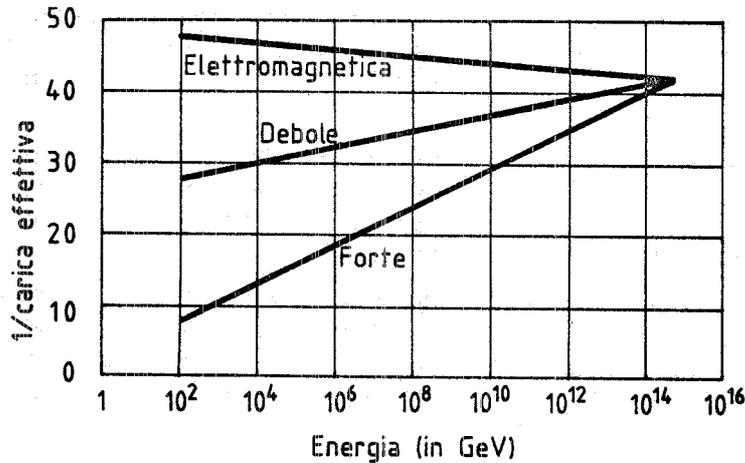


FIG. 11 - Converggenza delle "costanti" proporzionali alla forza. La convergenza del valore delle costanti delle forze fondamentali ad energie estremamente elevate o a distanze, tra le particelle, molto piccole è prevista dalle teorie unificate. Nel grafico è rappresentato l'inverso del valore della costante di accoppiamento delle tre interazioni più rilevanti tra le particelle elementari (Tab. I). Le interazioni, forte e debole, diminuiscono con l'energia mentre l'interazione elettromagnetica aumenta. La più semplice teoria grand-unificata prevede la convergenza delle tre costanti all'energia di  $\approx 10^{15}$  GeV che corrisponde a una distanza di  $10^{-29}$  centimetri. Le esperienze eseguibili con le più potenti macchine acceleratrici hanno esplorato distanze tra particelle di  $10^{-17}$  cm. Per la verifica diretta delle teorie grand-unificate bisogna studiare processi molto rari (quali il decadimento del protone).

fermioni in leptoni e quarks (vedi Tab. Ia) diviene fittizia. All'energia di unificazione le transizioni leptone-quark si dovrebbero verificare così come all'energia del W avvengono le transizioni e- $\nu$ . Quindi, alle basse energie (1 GeV), le transizioni leptone-quark sono depresse (a causa della grande massa dei mediatori responsabili della transizione quark-leptone) ma non proibite da una legge di conservazione assoluta. Se questa ipotesi è vera, il protone e il neutrone, costituiti da tre quarks, possono decadere (vedi Fig. 12) in un leptone e un mesone, adrone leggero composto da una coppia quark-antiquark.

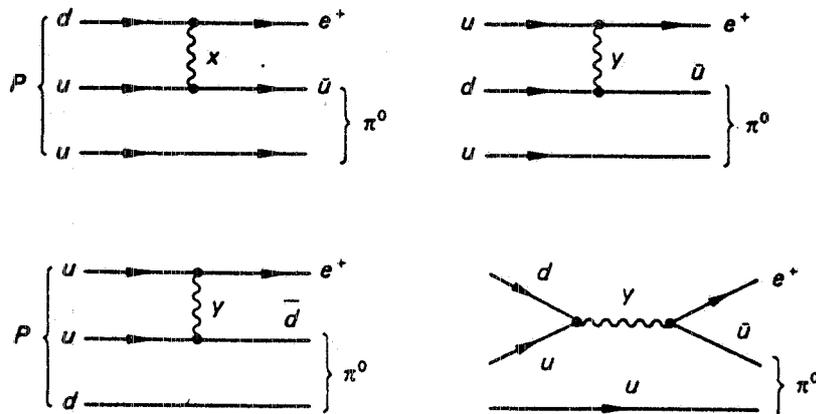


FIG. 12 - Diagrammi di Feynman del decadimento del protone. Il decadimento del  $\bar{e}$ , nel modello SU(5) reso possibile dalle transizioni elementari  $(u,d) \rightarrow (\bar{u}e^+)$  o  $(u,u) \rightarrow (e^+d)$  che sono mediate dai bosoni vettoriali X,Y generati insieme ad altri mediatori dalla richiesta di invarianza locale di gauge di SU(5).

Il valore di aspettazione di vita  $\tau$  del protone può essere o meno precisamente calcolato in questo schema di grand-unificazione. Nel modello SU(5), il valore di  $\tau$ , per nostra fortuna assai elevato, risulta essere  $\tau = 10^{29-32}$  anni, di gran lunga superiore all'età dell'universo, che è di  $10^{10}$  anni.

A prima vista sembra impossibile misurare una durata di vita del protone così lunga, e certamente sarebbe impossibile se non si potesse disporre di un enorme numero di protoni paragonabile al valore di  $\tau$  in anni e della possibilità di tenerli sotto osservazione per un periodo di tempo dell'ordine dell'anno.

Così come in un giorno possiamo determinare il valore di aspettazione di vita dell'uomo, domandando al comune di un centro abitato da qualche milione di anime il numero di decessi avvenuti in quel giorno, la vita media del protone viene misurata mantenendo sotto osservazione qualche migliaia di tonnellate di materia, costituita, come noto, da protoni e neutroni (nucleoni), per un tempo di circa un anno (1 ton  $\approx 10^{30}$  nucleoni).

Significativi risultati sperimentali, ottenuti da esperienze complesse e sofisticate, nonostante l'enorme mole dei rivelatori, sono stati recentemente raccolti e sono in disaccordo con le previsioni di SU(5). Nessun decadimento di protoni osservato in esperienze che avrebbero dovuto osservarne qualcuno, se  $\tau$  fosse stato  $10^{32}$  anj. Quindi possiamo sostenere che  $\tau$  è sperimentalmente accertato essere maggiore di  $10^{32}$  anni. In conseguenza delle ricerche negative sul decadimento del protone, l'attraente schema di unificazione SU(5), che pur contiene alcune predizioni verificate sperimentalmente in maniera precisa, è diventato meno credibile. La strada della grand-unificazione è però troppo interessante per poter essere abbandonata e molte operazioni di salvataggio più o meno radicali sono state suggerite o sono in corso di elaborazione. Le più evidenti sono la ricerca di altri gruppi che contengono i nostri gruppi SU(3)xSU(2)xU(1), sperimentalmente verificati, ma sono più grandi di SU(5). I migliori candidati che si possono disporre in un'affascinante sequenza di diagrammi, detti di Dynkin, sono elencati nella Fig. 13.

Il gruppo adottato dalla natura per realizzare la grand-unificazione, nel caso la natura abbia voluto fare una scelta del genere, deve risultare in base a qualche principio generale. La validità di questa scelta deve essere naturalmente confermata dai risultati sperimentali.

Un approccio più radicale del problema consiste nella critica all'estrapolazione alle energie di unificazione totale dei concetti da noi verificati sperimentalmente sino ad energie di 100 GeV. Il salto da 100 GeV a  $10^{15}$  GeV è molto grande e i fenomeni dovuti alla gravitazione che sono attesi essere importanti, per le particelle elementari, a  $10^{18}$  GeV, potrebbero essere già determinanti prima. In questo caso l'unificazione dovrebbe essere accompagnata da un'operazione che facesse entrare la gravitazione nel gioco delle particelle elementari. Nel paragrafo seguente un esempio particolarmente interessante di teoria unificante che include la gravitazione viene presentato in dettaglio.

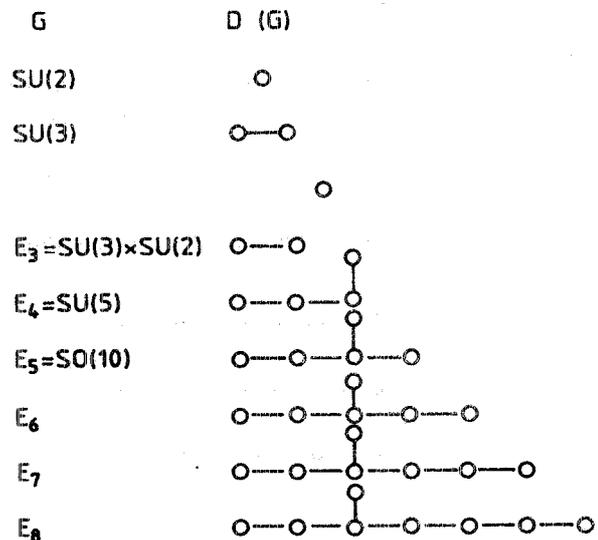


FIG. 13 - Diagrammi di Dynkin dei gruppi di grand-unificazione.

## 6.- L'UNIFICAZIONE DI TUTTE LE FORZE E LE CORDE

Fino ad ora abbiamo considerato un'eventuale unificazione delle forze elettromagnetiche, debole e forte, lasciando da parte la gravitazione, che paradossalmente fu la prima forza fondamentale ad essere descritta a livello classico da Newton. Una recente descrizione unificata di tutte le interazioni, molto elegante nel suo formalismo matematico, richiede che a piccolissime distanze ( $10^{-33}$  cm), le particelle non siano puntiformi ma abbiano la forma di cordicelle infinitesimalmente sottili. La ragione dell'abbandono degli oggetti puntiformi è motivata dal fatto che la costante gravitazionale  $G_N$  contiene una scala intrinseca di  $10^{-33}$  cm, e perciò, a tali distanze, il quadro a noi noto delle teorie di campo quantistiche dovrebbe lasciare posto a qualcosa di nuovo.

Queste corde possiedono proprietà notevoli. Esse possono esistere solo in certe dimensioni dello spazio-tempo, 26 e 10! Ma allora come possiamo conciliare le corde col nostro spazio-tempo a 4 dimensioni? Una soluzione è di considerare l'arricciamento delle dimensioni in eccesso in cilindretti di piccolissimo raggio, eventualmente utili per spiegare gli spazi interni. Inoltre le corde non hanno lunghezza ben definita, ma sono infinitamente estensibili con tensione sempre costante. Se si potesse immaginare di stendere una corda essa non diventerebbe più tesa, bensì solamente più lunga: un materiale come il mastice si comporta in modo pressoché analogo.

Come interagiscono le corde? Come il mastice, la corda, quando viene tirata in modo repentino, si spezza in due; i due pezzi, però, si possono risaldare, così come avviene per gli spaghetti del prestigiatore. Quindi queste corde interagiscono per contatto tramite il taglio e la ricombinazione e tra di loro non si esercita alcun tipo di forza (Fig.14). Pertanto, mentre l'elettrodinamica quantistica e altre teorie simili suddividono le particelle in costituenti della materia (leptoni e quarks) e in mediatori delle interazioni (fotoni, gluoni, W, Z), il modello a corde introduce una sola classe di particelle: le corde stesse.

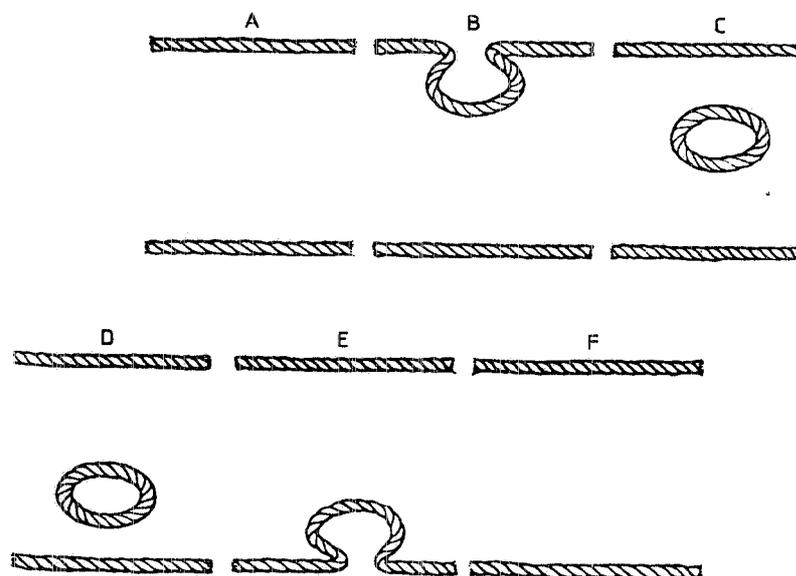


FIG. 14 - Schema d'interazione tra le corde. Una recente formulazione della teoria delle particelle prevede che a distanze molto piccole ( $\sim 10^{-33}$  cm) le particelle non avrebbero una struttura puntiforme ma avrebbero la forma di una cordicella. Secondo questa teoria l'interazione tra le particelle avverrebbe per la rottura e l'incollaggio delle corde, come mostrato in figura. Questa visione dell'interazione renderebbe approssimato lo schema attuale dell'interazione tra la materia (fermionica) mediata dai bosoni.

Quest'idea poteva sembrare bizzarra fino agli anni '70, poichè i costituenti della materia erano assimilati a dei fermioni (particelle individualiste) mentre i mediatori ai bosoni (particelle sociali).

Si è potuto rendere conto di questa differenza nel modello delle corde grazie alle nozioni di supersimmetria e di superspazio. Il superspazio è uno spazio normale a cui sono aggiunte delle dimensioni "fermioniche" intese come quelle lungo le quali è possibile compiere un solo passo o spostamento elementare: così come non si potranno mai trovare due fermioni nello stesso stato quantico, non si potranno mai compiere due passi lungo la stessa dimensione fermionica. La supersimmetria è una teoria che si basa sulla simmetria tra bosoni e fermioni prevedendo per ogni bosone l'esistenza di un partner fermionico o vice versa. La teoria delle corde supersimmetrica risulta compatibile solo in un superspazio a 10 dimensioni.

Quando agisce su scale molto maggiori di  $10^{-33}$  cm la teoria delle corde ritorna ad essere una teoria di gauge locale con particelle puntiformi. L'invarianza di gauge è allora correlata all'invarianza delle grandezze fisiche rispetto alla scelta delle coordinate della superficie spazzata dalla corda nel tempo.

La teoria delle corde dipende da un solo parametro: la tensione "cordale". Questa peculiarità presenta di per sè un notevole interesse dato che per un modello teorico, all'aumentare del numero dei parametri che lo caratterizzano, aumentano pure le difficoltà di previsione e di riscontro sperimentale.

D'altra parte il sistema di forze previsto dalla teoria delle supercorde è gigantesco; esso contiene, infatti, ben 496 mediatori, mentre, per il momento, se ne conoscono solamente 12: il fotone  $W^-$ ,  $W^+$ ,  $Z^0$  e otto gluoni. Un intenso lavoro aspetta, dunque, i fisici di oggi e di domani; infatti, a detta di alcuni dei maggiori esperti in questo campo, occorreranno alcune decine di anni prima di riuscire ad ottenere risposte più significative da questa teoria.

#### RINGRAZIAMENTI

Desideriamo ringraziare Carlo Bernardini per averci suggerito l'argomento, Ugo Amaldi e Giuseppe Cocconi per gli interessanti commenti. Infine ringraziamo calorosamente Marco Ricci per l'attenta lettura dell'ultima stesura e per i suoi suggerimenti.

## GLOSSARIO

**Adrone:** Particella che è interessata dall'interazione forte. Tutti gli adroni sono barioni (spin semintero) o mesoni (spin intero).

**Anello di accumulazione o Acceleratore:** Tubo a vuoto toroidale, circondato da uno speciale sistema di magneti, che serve per accelerare e immagazzinare fasci di particelle. Generalmente vengono accelerati in opposte direzioni due tipi di particelle, come ad esempio gli elettroni e i positroni. Si fanno poi collidere le particelle in apposite apparecchiature di rilevamento. In tali collisioni si può talvolta trasformare l'energia cinetica totale disponibile in massa. Per questo motivo gli esperimenti effettuati negli anelli di accumulazione sono più convenienti dal punto di vista energetico che non quelli - consueti nella fisica delle particelle - in cui una particella in moto viene scagliata contro una particella in quiete che fa da bersaglio (target).

**Antiparticella:** Ad ogni particella corrisponde un'antiparticella con massa e spin uguali, ma con carica, numero barionico, ecc. di segno opposto. L'antiparticella dell'elettrone, ad esempio, è il positrone. Alcune particelle neutre coincidono con la loro antiparticella, come ad esempio il fotone o il pione  $\pi^0$ . L'antimateria è composta dalle antiparticelle dei nucleoni (antiprotoni, antineutroni) e dai positroni.

**Barioni:** Classe di adroni con spin semintero a cui appartengono, in particolare, i protoni e i neutroni. Il numero barionico di un oggetto elementare è pari al numero dei barioni meno il numero degli antibarioni.

**Beauty (bellezza):** Numero quantico analogo alla "stranezza" (strangeness), che, in una particella, fornisce il numero dei quarks dotati di beauty meno quello degli antiquarks dotati di beauty. Le particelle più leggere con beauty  $\neq 0$  sono i mesoni B, la cui massa è circa 6 volte quella del protone.

**Bosone:** Categoria che comprende tutte le particelle di spin intero.

**Bosone Z:** Bosone pesante neutro, la cui esistenza è prevista dalla teoria dell'interazione "elettrodebole".

**Bosone W:** Bosone intermedio che rende possibile l'interazione debole.

**Charm (incanto):** Numero quantico analogo alla "stranezza" (strangeness), che, in una particella, fornisce il numero dei quarks dotati di charm meno quello degli antiquarks dotati di charm. Le particelle più leggere con charm  $\neq 0$  sono i mesoni D, la cui massa è circa il doppio del protone.

**Charmonium:** Sistema adronico composto da un quark e da un antiquark entrambi dotati di charm.

**Corda (string):** Modello di particella descritta come una linea unidimensionale (dell'ordine di  $10^{-33}$  cm) dal quale deriva una teoria che unifica la gravitazione con le altre forze fondamentali (elettrodebole e forte).

**Costante di Fermi:** Costante fondamentale della natura, che descrive l'intensità dell'interazione debole. Il suo simbolo è  $G_F$ . In unità di energia, si ha  $G_F = 294 \text{ GeV}^{-2}$ .

**Costante di Planck:** Costante fondamentale della teoria quantistica (il suo simbolo è  $h$ ). Il suo valore numerico è  $h = 6.6 \times 10^{-34}$  joule secondi.

**Costante di struttura fina:** Costante fisica fondamentale che caratterizza l'intensità dell'interazione elettromagnetica. Essa è definita come il quadrato della carica elettrica dell'elettrone, diviso per il prodotto della costante di Planck per la velocità della luce. È spesso contrassegnata dal simbolo  $\alpha$ . Il suo valore numerico è  $1/137.04$ .

**Cromodinamica:** Teoria dell'interazione tra quarks e gluoni. Con la cromodinamica quantistica (CQD) si ritiene di aver trovato la giusta teoria dell'interazione forte.

**Decadimento beta ( $\beta$ ):** Decadimento del neutrone in un protone, un elettrone e un antineutrino dell'elettrone. Esso è prodotto dall'interazione debole.

**Diagrammi di Feynman:** Diagrammi intuitivi con cui si possono descrivere le interazioni delle particelle. Essi sono stati introdotti in fisica da Richard Feynman.

**Distanza elementare di Planck:** Limite inferiore delle misure lineari determinato, nell'ambito della teoria quantistica, dall'interazione gravitazionale. Per distanze inferiori a quella elementare di Planck, le nostre consuete categorie di spazio e di tempo risultano inutilizzabili. Il suo valore numerico è pari a  $4 \times 10^{-33}$  cm.

**Elettrodinamica quantistica:** Teoria quantistica dei fenomeni elettromagnetici (EDQ).

**Elettrone:** La più leggera delle particelle elettricamente cariche. Il guscio atomico consta di elettroni. Le proprietà chimiche della materia sono prodotte dalle interazioni elettriche nel guscio.

**Elettronvolt:** Unità di energia usata nella fisica atomica e delle particelle. 1 elettronvolt (eV) corrisponde all'energia totalizzata da un elettrone quando attraversa un gradiente di potenziale di 1 volt. 1 eV corrisponde a  $1.60 \times 10^{-12}$  erg.

**Energia:** Grandezza fisica che caratterizza con la quantità di moto lo stato dinamico di una particella. In base alla teoria della relatività di Einstein, l'energia di una particella a riposo è proporzionale alla massa.

**Equazioni di Maxwell:** Mediante le equazioni di Maxwell è possibile descrivere la dinamica dei campi elettromagnetici. Le equazioni sono state scoperte nell'Ottocento da James Clerk Maxwell.

**Fermione:** Categoria che comprende tutte le particelle di spin semintero.

**Fotone:** Particella della luce, contrassegnata dal simbolo  $\gamma$ .

**Gauge (teorie di):** Classe di teorie dei campi con cui è possibile descrivere le interazioni deboli, elettromagnetiche e forti osservate sperimentalmente. Particolarità delle teorie di gauge è di possedere un alto grado di simmetria. L'espressione (inglese gauge) significa "calibro", "taratura", e risale al matematico Hermann Weyl, che studiò sin dal 1918 teorie di questo tipo.

**Getto (jet):** Sistema di particelle che si propagano nella stessa direzione in occasione di reazioni ad alte energie. I getti sono interpretati quali frammenti di oggetti elementari come i quarks e i gluoni.

**Glueball (palla gluonica):** Mesone neutro composto di soli gluoni.

**Gluoni:** Oggetti elettricamente neutri che provocano, nell'ambito della cromodinamica, le interazioni tra i quarks. I gluoni hanno spin 1.

**Gruppo:** Sistema matematico consistente di diversi - e talvolta infiniti - elementi, in cui valgono regole ben determinate. Così, ad esempio, la moltiplicazione di due elementi è un'operazione definita all'interno di un gruppo. La teoria dei gruppi svolge una funzione assai importante nella fisica: con il suo aiuto si possono, ad esempio, descrivere semplicemente le simmetrie delle particelle.

**Interazione:** Si ha, tra due oggetti, interazione, se essi s'influenzano reciprocamente (ad esempio mediante forze).

**Leptoni:** Particelle che non prendono parte all'interazione forte e che hanno spin  $1/2$ . Vi appartengono in particolare gli elettroni e i neutrini. Il numero leptonic di un sistema fisico è pari al numero dei leptoni meno il numero degli antileptoni.

**Libertà asintotica:** La diminuzione, a brevi distanze, dell'intensità delle forze tra i quarks, fenomeno che si presenta nella cromodinamica.

Meccanica quantistica: Teoria elaborata negli anni venti, mediante la quale è possibile spiegare la struttura degli atomi. Un concetto chiave della meccanica quantistica è il dualismo tra onda e particella, due aspetti diversi di una medesima realtà fisica.

Mesoni: Particelle che prendono parte all'interazione forte, con spin intero. Il loro numero barionico si annulla. Vi appartengono in particolare i pioni, i mesoni  $\rho$ , ecc.

Muone: Leptone elettricamente carico, la cui massa è circa 207 volte maggiore di quella dell'elettrone.

Neutrini: Leptoni elettricamente neutri, contrassegnati dal simbolo  $\nu$ . Si è sinora stabilita l'esistenza di tre neutrini: il neutrino elettronico ( $\nu_e$ ), il neutrino muonico ( $\nu_\mu$ ) e il neutrino tauonico ( $\nu_\tau$ ).

Neutrone: Particella elettricamente neutra, che costituisce, con il protone, uno dei "mattoni" dei nuclei atomici.

Nucleone: "Mattone" dei nuclei atomici. Sia il protone che il neutrone sono nucleoni.

Parità: Numero quantico che caratterizza la simmetria di un sistema in caso di riflessione speculare. Se il sistema è simmetrico, la parità è descritta dalla relazione  $P = +1$ . Se è antisimmetrico, si ha invece  $P = -1$ . Nell'interazione forte e in quella elettromagnetica la parità si conserva e, pertanto, non varia nel tempo. Nell'interazione debole essa è invece violata. Un oggetto con parità positiva può ad esempio trasformarsi con il tempo in un oggetto con parità negativa.

Particella virtuale: Se si considerano minime distanze spaziali e temporali, una particella può avere una massa differente dalla propria massa fisica (detta anche massa a riposo). Così, ad esempio, il fotone ha massa a riposo nulla. I fotoni però possono avere una massa qualsiasi, purchè si considerino intorni spaziali e temporali sufficientemente piccoli. Le particelle la cui massa non corrisponde alla loro massa fisica sono dette virtuali. Le particelle virtuali non esistono sotto forma di oggetti liberi, ma si limitano ad influenzare gli stati fisici su piccole distanze spazio-temporali. Esse svolgono una funzione molto importante per le leggi che regolano le forze. Ad esempio, l'attrazione o repulsione elettrica di corpi carichi è prodotta dallo scambio di fotoni virtuali.

Pione (mesone  $\pi$ ): Il più leggero degli adroni. Ve ne sono tre: due carichi ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ) e uno neutro ( $\pi^0$ ).

Polarizzazione del vuoto: Influenza sullo spazio circostante esercitata da una particella con la sua interazione dovuta alla possibilità di creare dal vuoto coppie virtuali particella-antiparticella.

Positrone: Antiparticella di carica positiva dell'elettrone, contrassegnata da  $e^+$ .

Positronio: Stato legato consistente di un elettrone e di un positrone.

Protone: Particella di carica positiva, che è anche il nucleo dell'atomo di idrogeno. Normalmente i nuclei constano di protoni e neutroni.

Quark: Costituenti degli adroni. Si è sinora stabilita l'esistenza di cinque tipi di quark (u,d,s,c,b). Si presume che non sia possibile produrre quarks in forma di particelle isolate.

Relatività (teoria della): Teoria messa a punto all'inizio del Novecento soprattutto da Albert Einstein e con il cui aiuto è possibile spiegare la dinamica di corpi soggetti a rapido spostamento. In seno alla teoria della relatività spazio e tempo convergono in un'unità inscindibile. Si distingue spesso tra teoria ristretta e generale della relatività: nella seconda viene presa in considerazione l'interazione gravitazionale.

**Sapore** (flavour): Indice che caratterizza i vari tipi di quarks. Si usano solitamente i simboli u, d, s, c, b, t.

**Spin:** Momento angolare intrinseco delle particelle elementari, definito dalla rotazione della particella attorno al proprio asse. In base alle leggi della meccanica quantistica, lo spin di una particella può essere solo un multiplo intero o semintero della costante di Planck. Nella fisica delle particelle quest'ultima funge da unità sicché lo spin è dato semplicemente da un numero. Così, ad esempio, gli elettroni e i protoni hanno spin  $1/2$ , i fotoni spin 1 e i pioni spin 0.

**Stranezza** (strangeness): Numero quantico importante per la descrizione delle particelle "strane". Il valore negativo (positivo) della stranezza dice quanti quarks (anti-quarks) strani sono contenuti nel rispettivo stato. Così, ad esempio, nella  $\Lambda$  ( $S=-1$ ) è contenuto un quark s.

**String:** V. Corda.

**Supersimmetria:** Teoria che si basa sulla simmetria tra bosoni e fermioni prevedendo per ogni bosone l'esistenza di un partner fermionico e vice versa. Una trasformazione supersimmetrica trasforma una particella nel suo partner supersimmetrico. Due trasformazioni supersimmetriche successive provocano uno spostamento della particella nello spazio.

**Superspazio:** Spazio normale a cui sono aggiunte delle dimensioni fermioniche.

---

Il precedente glossario, a parte qualche aggiunta, è tratto dal libro "Quarks" di H. Fritzsch, edito da Boringhieri.

Dati su fermioni (leptoni, quarks) e sui bosoni (mediatori delle forze):

Le masse a riposo dei leptoni e dei quarks sono date (entro parentesi quadre) in giga-elettronvolt (GeV). Per i neutrini non c'è indicazione di massa, dal momento che non si sa ancora se ne hanno una. Per i quarks, che non vengono osservati liberi, sono le masse effettive introdotte per spiegare lo spettro delle particelle composte dai quarks.

**Prima famiglia**

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- [0.00051] \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u [0.3] \\ d [0.3] \end{pmatrix}$$

**Seconda famiglia**

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- [0.106] \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c [1.5] \\ s [0.45] \end{pmatrix}$$

**Terza famiglia**

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- [1.78] \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t [?] \\ b [4.9] \end{pmatrix} \quad \text{(I quarks t non sono stati ancora confermati)}$$

**Particelle che rendono possibili diverse interazioni osservate in natura:**

Interazione forte:	Gluone (privo di massa)
Elettromagnetismo:	Fotone (privo di massa)
Interazione debole:	Bosone W Bosone Z (masse correttamente previste)
Gravitazione:	Gravitone (privo di massa).

Mesoni piü importanti e loro struttura a quark

Mesone	Struttura	Massa in GeV
$\pi^+$	$\bar{d}u$	0.140
$\pi^0$	$\bar{u}u/\bar{d}d$	0.135
$\pi^-$	$\bar{u}d$	0.140
$K^-$	$\bar{u}s$	0.494
$K^0$	$\bar{d}s$	0.498
$D^0$	$\bar{u}c$	1.863
$D^+$	$\bar{d}c$	1.868
$J/\psi$	$\bar{c}c$	3.097
$B^-$	$\bar{u}b$	5.26
$B^0$	$\bar{d}b$	5.26
$\Upsilon$	$\bar{b}b$	9.46

Barioni piü importanti e loro struttura a quark

Barione	Struttura	Massa in GeV
p	uud	0,938
n	udd	0,940
$\Lambda$	uds	1,116
$\Sigma^+$	uus	1,189
$\Sigma^0$	uds	1,192
$\Sigma^-$	dds	1,197
$\Xi^0$	uss	1,315
$\Xi^-$	dss	1,321
$\Omega^-$	sss	1,672
$\Lambda_c^+$	udc	2,273