

A.I.F.
SEZIONE DI PAVIA
Via Bassi n. 6 - Tel. 31341

VI^o Corso di Aggiornamento in Fisica - Anno 1981

"Alcuni argomenti di fisica moderna. L'uso dell'oscilloscopio per esperienze didattiche"

A. Piassoli

"Dalla fisica atomica alla fisica subnucleare"

INTRODUZIONE

La fisica delle particelle elementari può ben essere considerata, al di là di schemi ministeriali, un settore della Struttura della Materia, perchè di questo in definitiva si occupa, anzi si occupa in realtà dell'ULTRASTRUTTURA della materia.

In una panoramica di carattere culturale generale sui contenuti concettuali e sui risultati conseguiti in tale disciplina, può perciò essere utile assumere come punto di partenza le nozioni fondamentali su due strutture più conosciute e più familiari: l'atomo e il nucleo atomico.

Dato il punto di partenza, la presente trattazione si svolgerà inevitabilmente, almeno in una certa misura, su una falsariga storica.

1 - STRUTTURA ATOMICA E NUCLEARE

Omettiamo qualunque considerazione sul modello planetario classico dell'atomo, limitandoci a osservare che un atomo è esaurientemente descritto dalla successione dei suoi livelli energetici a prescindere da qualunque modello. Questi sono discreti e solo la M.Q. relativistica è capace di giustificarne l'esistenza e la posizione. Ogni livello energetico è relativo a un particolare "stato dell'atomo" cioè, pensando per semplicità all'atomo di idrogeno, a una particolare "disposizione" dei suoi costituenti: elettrone e protone. L'interazione tra questi costituenti è puramente elettromagnetica (l'interazione gravitazionale a conti fatti risulta più piccola di un fattore 10^{40} !) e ogni "disposizione" è caratterizzata dai valori di quattro numeri quantici: tutto ciò è ben noto.

Forse è un po' meno noto che fino al 1948 c'era una piccola ma inquietante discrepanza (chiamata "Lamb shift") tra lo spettro sperimentale dell'idrogeno, fornito dalle più raffinate tecniche spettroscopiche, con quello teorico fornito dai più meticolosi calcoli eseguibili sulla base della M.Q. relativistica, cioè dell'equazione di Dirac. Per togliere tale discrepanza fu necessario ipotizzare l'esistenza di meccanismi fino ad allora impensati. Uno di questi consiste nell'emissione di un fotone da parte dell'elettrone e di un successivo riassorbimento, come schematicamente rappresentato in Fig. 1.

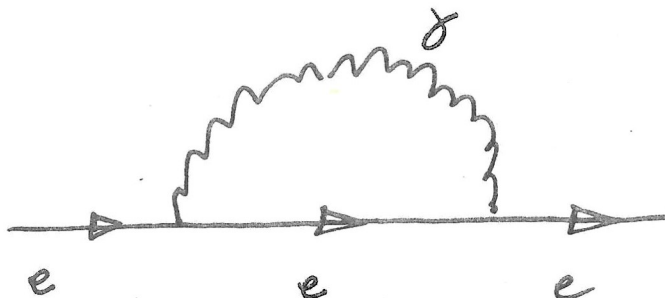


Fig. 1

La stranezza di questo meccanismo dovrebbe essere evidente, perchè è come se "l'elettrone si mangiasse la coda" e infatti si chiama "interazione dell'elettrone con sè stesso".

L'introduzione di tali meccanismi ha portato alla cosiddetta "ri-normalizzazione" che è stata un vero toccasana. Spettro teorico e sperimentale si accordano ora con una precisione fantastica (una parte su 10^{16}) e per di più ha risolto una vecchia questione che fu una spina nel cuore per la M.Q. relativistica di Dirac. Questa prevede infatti che l'elettrone sia puntiforme, ma l'energia potenziale elettrica associata a una carica puntiforme deve essere ovviamente infinita e allora la massa dell'elettrone dovrebbe essere infinita. Risulta che l'autointerazione porta alla

massa un contributo sottrattivo e anch'esso infinito. A prima vista sembrerà impossibile, soprattutto a un matematico, ma alcuni fisici teorici hanno dimostrato che $\infty - \infty = 0.5 \text{ MeV}$, che è la massa sperimentale dell'elettrone.

Possiamo concludere che una teoria che ha come ingredienti fondamentali l'Elettromagnetismo, la Meccanica Quantistica, la Relatività Speciale e la Rinormalizzazione, rende perfettamente conto della struttura atomica, come di tutti i fenomeni elettromagnetici in generale. Tale teoria è denominata QED (Quantum Elettrodinamica).

La spaziatura dei livelli energetici atomici è dell'ordine degli eV e vale la pena di ricordare il valore esatto del livello fondamentale dell'atomo di H: 13.59 eV, che può anche essere visto come energia di legame o di ionizzazione.

La più piccola energia di legame nucleare è quella del deutone (nucleo del deuterio, costituito da un protone (P) e un neutrone (N) ed è pari a circa 2 MeV.

C'è un fattore $10^5 + 10^6$ tra le due energie di legame e ciò è un sintomo sicuro che l'interazione N-P, che non può essere evidentemente nè gravitazionale, nè elettromagnetica, è molto più "potente" di queste due: fu perciò chiamata "interazione forte".

A parte la differente interazione, la comprensione della struttura nucleare apparve subito più complessa di quella atomica, perchè le forze non sono centrali, nel senso che un nocciolo massivo di un nucleo non esiste. Si scoprì però che anche i nuclei, come gli atomi, posseggono uno spettro energetico, cioè possono esistere nello stato fondamentale o in stati eccitati: questa metodologia sperimentale fu detta "II[^] spettroscopia". La spaziatura dei livelli nucleari, come c'era d'aspettarsi, è dell'ordine del MeV. Solo che i meravigliosi successi della QED non si sono a tutt'oggi ripetuti, nel senso che una QND (Quantum Nucleodinamica) non è an-

cora nata e ciò perchè l'interazione forte non è ancora abbastanza nota e la sua "potenza" ha impedito fino a qualche anno fa di ripetere il giochino della rinormalizzazione.

In Fig. 2 sono mostrati, uno accanto all'altro, uno spettro atomico e uno nucleare.

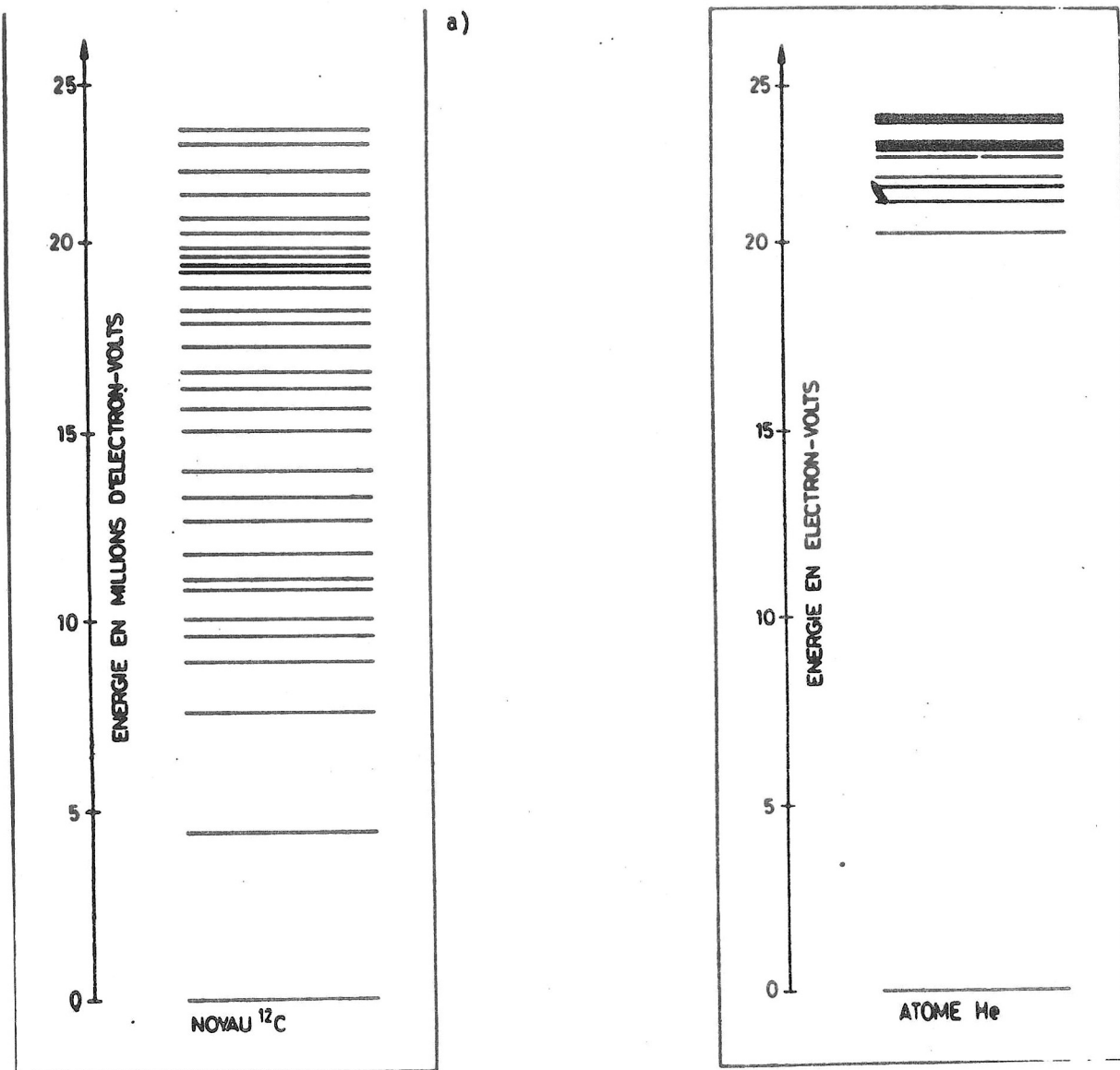


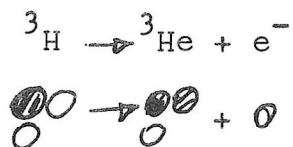
Fig. 2

Ancor prima che il problema dell'origine e della natura delle interazioni forti venisse affrontato, vennero in luce due importanti proprietà dei nuclei.

- a) Il celebre esperimento di Rutherford dimostrò che le interazioni forti dovevano essere a "corto range", cioè che a distanze dell'ordine del fermi ($= 10^{-13}$ cm) queste interazioni erano praticamente spente.
- b) esistono dei nuclei radioattivi β^- e radioattivi β^+ . I primi emettono un elettrone con la conseguente trasformazione di un neutrone, in essi contenuto, in un protone.

I secondi emettono un positrone con una conseguente trasformazione inversa: la carica elettrica deve pur conservarsi!

Un tipico decadimento β^- è il seguente



Anche N e P liberi decadono rispettivamente β^- e β^+ ? Il N decade, ma il P no. La ragione è banale: è una questione di bilancio energetico. Infatti la massa di N, P e e^+ sono rispettivamente 939.3, 938 e 0.5 MeV.

Pauli studiò i dati sperimentali relativi al decadimento

${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^-$ e concluse che si trattava di una ben strana reazione: essa non conservava né l'impulso, né il momento angolare, né l'energia. Tutto sarebbe andato a posto se insieme all'elettrone fosse stata emessa una particella di massa piccolissima, neutra perchè nessun sperimentatore l'aveva mai vista e con spin $1/2$ come N, P, ${}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}$, e^+ , e^- .

A tale particella fu dato il nome di "neutrino" (ν) e solo più tardi venne in chiaro che in realtà nel decadimento di ${}^3\text{H}$ veni

va emessa la sua antiparticella: "l'antineutrino" ($\bar{\nu}$). Responsabile dei decadimenti β dei nuclei e del neutrone è un'interazione che risultò subito diversa da quelle note fino a quel momento (gravitazionale, elettromagnetica e forte). Infatti il N libero risulta avere una vita media di circa mille secondi: la interazione all'opera nell'interno del N per disintegrarlo in $P + e^- + \bar{\nu}$ impiega quasi un quarto d'ora per ottenere il suo risultato: deve trattarsi di una interazione molto più debole sia di quella e.m. che di quella forte. La gravitazione è improponibile per evidenti ragioni.

All'interazione responsabile dei decadimenti β fu dato il nome di "interazione debole".

Facciamo osservare che il positrone era stato scoperto da Anderson nel 1938 nella radiazione cosmica e che Dirac ne fu molto felice perchè ne aveva previsto teoricamente l'esistenza.

2 - PARTICELLE E INTERAZIONI FONDAMENTALI

A questo punto il parco particelle era così costituito:

P N e⁻ costituenti stabili di tutta la materia esistente (i decadimenti β trasformano in definitiva P in N e viceversa)

e⁺ prodotto nei decadimenti β^+ e presente nella radiazione cosmica

ν e $\bar{\nu}$ particelle che devono essere necessariamente prodotte nei decadimenti β sotto pena di mandare a carte 49 tutta la fisica.

γ quanto delle interazioni elettromagnetiche prodotto nelle diseccitazioni degli atomi e dei nuclei.

Qualunque interazione doveva appartenere a una delle seguenti 4 categorie:

- gravitazionali
- deboli
- elettromagnetiche
- forti

Solo la 1^a e la 3^a erano sufficientemente note, ma la prima è praticamente fuori gioco nel mondo delle particelle, data la loro piccolissima massa.

3 - L'IPOTESI DI YUKAWA

Sulla base del risultato dell'esperimento di Rutherford e per analogia con le interazioni elettromagnetiche, Yukawa nel 1935 suppose che due nucleoni (protone o neutrone) interagissero fortemente scambiandosi un quanto di massa circa $100 + 150$ MeV, quanto che egli denominò mesone π . Il π doveva esistere in tre stati di carica elettrica +, -, 0.

La valutazione della massa era legata al range dell'interazione determinato da Rutherford. Se l'ipotesi era buona, il π doveva essere prodotto in un urto di sufficiente energia tra i protoni cosmici e i nuclei dell'atmosfera. La caccia al mesone incominciò e nel 1938 Neddermeger e Anderson scoprirono una particella di massa circa 110 MeV che fu senz'altro ritenuta quella aspettata da Yukawa fino al 1947. In tale anno ci fu però un'amara

sorpresa: Pancini - Piccioni - Conversi dimostrarono che la particella di Neddermeyer non poteva essere quella di Yukawa per la semplice ragione che di interagire fortemente, la particella scoperta non era neppure capace. Qualche mese dopo però, Lattes, Occhialini e Powell misero tutto a posto: scoprirono che la particella del 38, che chiamarono μ , e che esisteva in due soli stati μ^\pm , era in realtà il prodotto di decadimento del π che essi rivelarono per la prima volta: $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$ (o $\bar{\nu}$) con una vita media di 10^{-8} sec.

Così, per cercare la particella di Yukawa, se ne trovarono due: il π e il μ .

Il μ arrivò inaspettato come un intruso e tale rimase per trent'anni: non si capì mai chi fosse e a cosa servisse. Solo da pochi anni si ha qualche idea sul suo ruolo, come vedremo più avanti.

Ora dobbiamo ampliare il parco particelle con le seguenti aggiunte:

$$\begin{array}{c} \pi^+ , \pi^- \\ \pi^0 \\ \mu^+ , \mu^- \end{array}$$

Rimaneva ancora tanto da capire sulle interazioni forti e tutto su quelle deboli (esisterà anche un quanto delle interazioni deboli?) ed era nato anche un nuovo problema: l'esistenza inaspettata del μ . Però tutti i fisici erano fundamentalmente convinti di aver scoperto tutte le particelle e tutte le interazioni esistenti: con le interazioni hanno avuto probabilmente ragione, ma con le particelle si sono sbagliati di grosso!

Anche il μ è una particella instabile e con una vita media di $\sim 10^{-6}$ sec decade nel seguente modo:

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu + \bar{\nu}$$

Il decadimento radiativo $\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \gamma$ risultava completamente assente e ciò escludeva decisamente che il μ fosse un elettrone eccitato.

In Fig. 3 è mostrato un fotogramma originale di Occhialini et al. che mostra il doppio decadimento del π in μ e del μ in e .



Fig. 3

4 - IL NUMERO BARIONICO E IL NUMERO LEPTONICO

Lo studio di un numero enorme di interazioni tra particelle, inizialmente condotto con i raggi cosmici e in seguito con gli acceleratori, portò a una constatazione: tutte le particelle, eccettuato il fotone, possono essere classificate in tre famiglie, barioni, leptoni e mesoni e in qualunque reazione il numero di barioni e il numero di leptoni deve essere conservato, il numero di mesoni no. Ciò significa che in una generica reazione:

$$A + B \rightarrow x + y + z + t + \dots$$

il numero di barioni presenti nello stato iniziale è presente anche nello stato finale. Ugualmente per il numero di leptoni.

Risulta che e^- , ν , μ^- sono leptoni, P e N sono barioni, π^+ , π^- , π^0 sono mesoni.

E' questione di facile algebra simbolica attribuire a ogni leptone un "numero leptonico" pari a +1 e a ogni barione "numero barionico" +1. Per i mesoni, sia l'uno che l'altro sono nulli.

E e^+ , $\bar{\nu}$, μ^+ ? Sono antileptoni e quindi il loro numero leptonico è -1.

Poichè i leptoni non interagiscono mai fortemente, mentre mesoni e barioni lo possono fare, si è indicato l'insieme dei mesoni e dei barioni con un unico nome: "adroni".

5 - L'ANTIMATERIA

L'antimateria non ha affatto quel fascino misterioso che certa divulgazione vorrebbe attribuirle. Il positrone è l'antiparticella dell'elettrone il μ^+ del μ^- e il π^+ del π^- .

L'antiparticella ha le proprietà elettromagnetiche (carica e momento magnetico), il numero leptonico e il numero barionico, di segno opposto rispetto alla corrispondente particella: tutto qui! Si era sicuri da tempo dell'esistenza dell'antiprotone e dell'antineutrone e furono in seguito scoperti senza clamori (salvo in verità un premio Nobel): di ogni particella deve esistere la sua antiparticella.

Una faccenda un poco più sottile è la differenza tra neutrino e antineutrino. Il neutrino ha lo spin diretto in senso opposto alla sua direzione di moto, l'antineutrino nello stesso senso. Il fascino dell'antimateria è di natura cosmologica. Infatti possono benissimo esistere antinuclei, antiatomi e antimateria a livello macroscopico, persino organico. Perché non c'è?

Sappiamo che nell'universo il rapporto tra il numero di nucleoni e di antinucleoni è 10^9 . Una tale asimmetria è originaria, cioè fin dall'istante del big-bang, o si è instaurata dopo? Questa sì che è una buona domanda e la risposta ancora non la sappiamo!

6 - I MESONI K

Tanto per complicare un po' le cose, negli anni cinquanta comparve un altro grosso problema. Fu scoperto un nuovo tripletto di mesoni, di massa circa 500 MeV, denominati K^+ , K^- e K^0 . Con una vita media di circa 10^{-10} essi decadono in vari modi tra i quali ci sono decadimenti in due e tre π .

Il problema è qui. L'interazione responsabile dei decadimenti in π non può essere che quella forte che, pur sostanzialmente sconosciuta ha sicuramente una "potenza" circa mille volte maggiore di quella elettromagnetica e 10^{15} volte quella debole. A conti fatti la

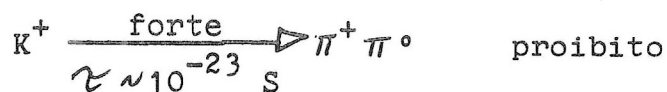
vita media dei K doveva essere 10^{-23} sec e non 10^{-10} sec. Quest'ultima è una vita media tipica da interazione debole. Sarebbe come se qualcosa impedisse all'interazione forte di agire e allora i K, per decadere, devono aspettare le molto più lente interazioni deboli.

Questo qualcosa non poteva essere che la conservazione di un nuovo numero quantico, detto "stranezza" (S).

Lo schema proposto per il seguente:

- il K^+ ha $S = +1$, il K^- $S = -1$ e il K^0 è da stabilire
- tutte le altre particelle (note fino a questo momento) hanno $S = 0$
- le interazioni forti (e quelle elettromagnetiche) devono conservare S, quelle deboli no.

Allora



Un po' gratuito, ma bello, questo schema!

Rimaneva da capire come vengono prodotti i K. Se la produzione non è debole, S deve essere conservata e allora deve esistere un'altra famiglia di particelle strane. Per esempio nell'interazione fotone-protoni ($\gamma + P$) si può produrre un K^+ , ma insieme al K^+ deve essere prodotta una particella X con $S = -1$, che non può assolutamente essere un K^- , perchè deve essere un barione. Poco dopo ne furono scoperti 6 di questi barioni "strani":

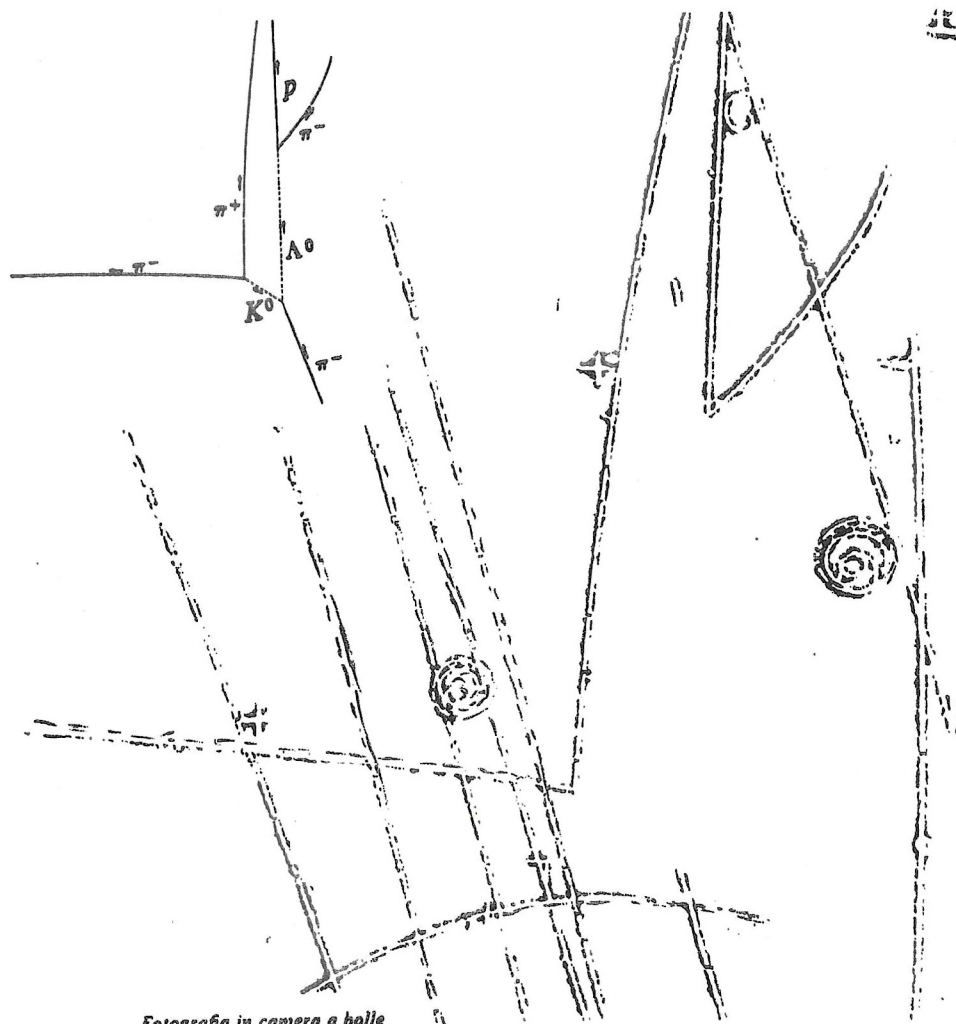
$\Lambda_0, \Sigma^+ \Sigma^- \Sigma^0$ con $S = -1$, Ξ^- e Ξ^0 con $S = -2$.

Poichè la loro massa è superiore a quella dei nucleoni, essi furono chiamati "IPERONI".

Venne poi in chiaro che i K_0 sono in effetti due: K_0 con $S = +1$ e \bar{K}_0 con $S = -1$.

Così dobbiamo introdurre nel "parco" altre 10 particelle: 4 mesoni (K^+, K^-, K_0, \bar{K}_0) e 6 barioni ($\Lambda_0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Sigma^0, \Xi^-, \Xi^0$).

Si osservi che K^- e \bar{K}_0 sono le antiparticelle di K^+ e K_0 rispettivamente, mentre devono esistere anche i 6 antiiperoni a numero barionico -1 nessuno dei quali, nemmeno Λ_0 e Σ_0 coincide con il



Fotografia in camera a bolle
che mostra le seguenti reazioni:

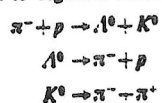


Fig. 4

corrispondente iperone.

Tra l'altro l'antiparticella di una particella strana ha stranezza opposta.

La Fig. 4 mostra una "produzione associata" di due particelle strane ripresa in una camera a bolle.

7 - L'AVVENTO DEGLI ACCELERATORI E LA TERZA SPETTROSCOPIA

Negli anni 50 entrarono in funzione i primi acceleratori di particelle che sostituirono i raggi cosmici come sorgenti di particelle proiettile.

Incominciò allora lo studio sistematico, che dura tuttora, di moltissime reazioni subnucleari al variare del tipo di proiettili e della sua energia. Nello studio dello "scattering π -N" si scoprì una cosa molto interessante: la probabilità che il proiettile interagisca con il nucleone bersaglio presenta un massimo per un valore dell'energia totale pari a 1236 MeV e con un momento angolare pari a $3/2$.

Per "energia totale" s'intende la somma delle masse di riposo di π e di N più le loro energie cinetiche misurate da un osservatore in quiete rispetto al loro centro di massa.

Il fenomeno ha profonde analogie con il fenomeno della risonanza in fisica classica e ciò suggerisce che il sistema π -N presenta una "risonanza" a 1236 MeV. La larghezza Γ della risonanza risulta sperimentalmente pari a ~ 100 MeV e se volessimo audacemente interpretare tale risonanza come una nuova particella di massa pari a 1236 MeV e che decade in $\pi + N$, la vita media di questa è data da $h/\Gamma \sim 10^{-23}$ s.

Questa vita media è terribilmente piccola, anche per la fisica delle particelle e ci furono perciò riluttanze a interpretare questa risonanza come una particella vera e propria.

Potrebbe trattarsi di uno stato eccitato del nucleone?

In questo caso ne dovrebbero esistere altri: negli anni successivi furono infatti rinvenute molte altre risonanze, alcune con spin $1/2$ come il protone e il neutrone e altre con spin $1/3$, come la Δ .

In Fig. 5 è mostrato lo "spettro del nucleone".

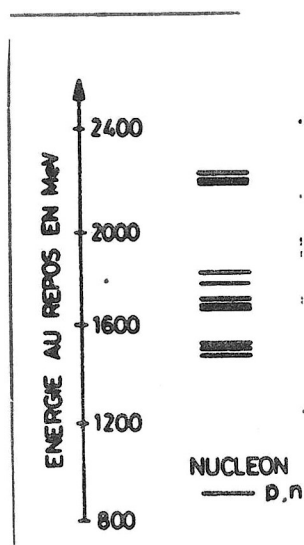


Fig. 5

Forse siamo di fronte a una "terza spettroscopia" e la brevissima vita media di questi stati eccitati è semplicemente dovuta al fatto che questi stati decadono via interazione forte.

Poichè gli stati eccitati di un atomo e di un nucleo non sono concettualmente diversi dai rispettivi stati fondamentali, il parco particelle deve subire un notevole ampliamento, magari in un apposito reparto denominato "particelle instabili". Si scoprì in seguito che anche due π posseggono molte risonanze e incominciò una caccia spietata a tutte le possibili risonanze.

Oggi ne sono note circa 200, alcune delle quali "strane".

All'inizio degli anni 60 questa situazione era diventata teoricamente insostenibile per almeno due motivi:

- a) Il parco particelle era diventato immenso e ciò era inaccettabile perchè, se le particelle elementari devono essere i mattoni fondamentali di tutta la materia dell'Universo, questi mattoni devono essere di pochi tipi diversi, certamente non 200 o 250.
- b) La presenza di uno spettro energetico di un "oggetto" è un chiaro indizio che tale "oggetto" non può essere "elementare", ma che deve possedere una struttura interna, cioè dei costituenti: ogni livello energetico corrisponde a una diversa disposizione di questi costituenti. Allora il nucleone non sarebbe elementare, ma costituito da un insieme di particelle ancora sconosciute.

Iniziarono allora molti tentativi teorici di raggruppare le particelle in famiglie allo scopo di ridurre il più possibile il numero di "oggetti" veramente fondamentali. Citiamo alcuni di questi tentativi:

- a) Sakata suppose che gli adroni veramente fondamentali fossero 3:

P , N e Λ_0 .

Le altre sarebbero state costituite da opportune combinazioni di queste e delle loro antiparticelle. Per esempio π^0 non sarebbe stato altro che il sistema $P\bar{P}$, il K^+ , $P\Lambda_0$, il K^- , $\bar{P}\Lambda_0$ ecc.

- b) Chew ebbe un'idea veramente balzana, chiamata "bootstrap": ogni particelle sarebbe stata costituita da un insieme di tutte le altre e non sarebbero esistiti costituenti fondamentali. L'idea era decisamente "democratica", ma allucinante e ha qualcosa in comune con il Taoismo. Fortunatamente si rivelò sbagliata!
- c) Gell-Mann raggruppò le particelle in "multipletti" come mostrato in Fig. 6.

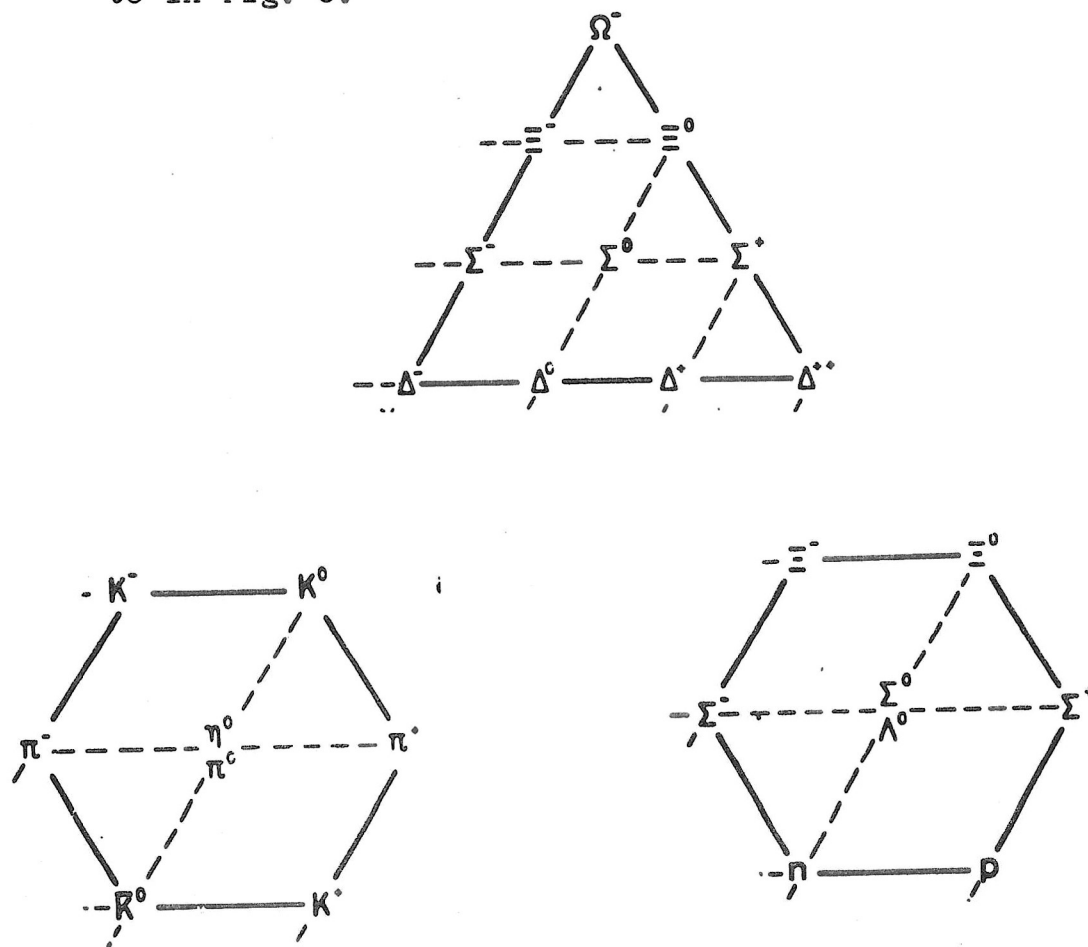


Fig. 6

Sugli assi di questi diagrammi ci sono grandezze che ora non è il caso di spiegare. L'idea era che l'interazione forte fosse in effetti costituita da due interazioni diverse e che se una di queste potesse essere spenta, allora tutto il multipletto si ridurrebbe a un'unica particella: il multipletto esisterebbe quindi per una sorta di effetto Zeeman.

8 - I QUARKS

Sulla base di considerazioni di teoria dei gruppi, Gell-Mann comprese che i multipletti, sia di mesoni che di barioni, potevano essere generati dalla composizione di un tripletto di particelle. Tali particelle dovevano però avere caratteristiche fino a quel momento ritenute impensabili: numero barionico pari a $1/3$, carica elettrica frazionaria ($+ \frac{1}{3} e$ o $- \frac{2}{3} e$). Queste particelle furono denominate "quarks" e indicate globalmente con il simbolo q . I tre quarks furono indicati individualmente con i simboli u , d , s e le loro caratteristiche sono riassunte in Tabella.

	Q	N_B	S	Spin
u	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{2}$
d	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{2}$
s	$-\frac{2}{3}$	$\frac{1}{3}$	-1	$\frac{1}{2}$

Tutti e tre hanno spin $\frac{1}{2}$, u e d hanno stranezza zero e s stranezza -1.

Un barione qualunque sarebbe allora una combinazione di tre quarks ($q q q$) e un mesone una combinazione quark-antiquark: $q\bar{q}$. Naturalmente ogni antiquark ha carica e stranezza opposta al corrispondente quark.

La teoria di Gell-Mann non era in grado di prevedere la massa dei quarks, nè se questi fossero stabili oppure no. Comunque almeno uno dei tre doveva essere certamente stabile per assicurare la conservazione del numero barionico.

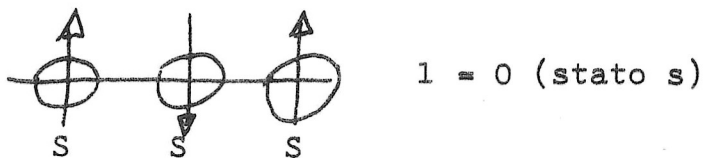
La caccia alla rivelazione diretta dei quarks partì immediatamente su vasta scala, cioè con molti metodi diversi, ma senza successo fino ai giorni nostri. Però il modello a quarks riscosse clamorosi successi, tra i quali :

- a) doveva esistere un barione con la composizione sss e quindi con stranezza -3 , denominato Ω^- e a quel tempo non ancora scoperto: fu scoperto poco dopo e con la massa prevista.
- b) Il modello era in grado di giustificare il fatto che il rapporto tra i momenti magnetici del neutrone e del protone è pari a $\sim \frac{2}{3}$: nessun'altra teoria, o modello, era in grado di farlo.

9 - IL COLORE

Il modello a quarks presentava però una grave difficoltà teorica. Trattandosi di fermioni, i quarks dovevano ubbidire al principio di Pauli e invece di fatto lo contraddicevano. Si pensi per esempio a Ω^- . Per ragioni teoriche si è sicuri che i momenti angolari orbitali dei tre quarks S sono tutti nulli (in gergo si dice " Ω^- è uno stato s "). Quindi lo schema di Ω^- deve essere il

seguinte:



e ciò viola il principio di Pauli, a meno che i tre quarks S siano particelle non identiche, ma abbiano un diverso valore di qualche nuovo numero quantico, che fu chiamato "colore". Allora ognuno dei tre quarks può essere di tre colori diversi; per esempio "rosso", "verde" e "blu".

Qualche anno dopo, in un articolo di Glashow-Iliopoulos e Maiani, si proponeva l'esistenza di un quarto tipo di quarks chiamato "charm" e indicato col simbolo c. L'ipotesi avrebbe potuto spiegare certe caratteristiche misteriose delle interazioni deboli.

10 - "LA LUNGA NOTTE DEL '74"

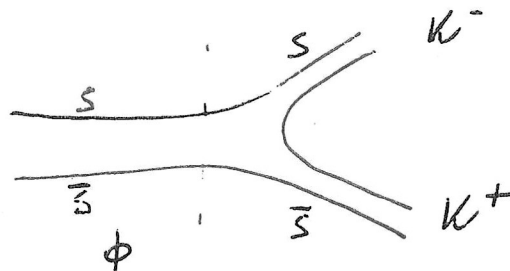
L'articolo di Glashow-Iliopoulos e Maiani non fu molto popolare fino al 3 + 4 novembre 1974. In quei giorni un gruppo di ricercatori, guidati da Ting, trovò un'indicazione sperimentale indiretta dell'esistenza di un mesone di massa elevata (~ 3100 MeV) e con vita media di $\sim 10^{-20}$ s. Ting avvertì telefonicamente i Laboratori di SLAC e di Frascati, suggerendo loro di cercare tale particella tra i prodotti di decadimento dell'annichilazione e^+e^- : nel giro di due giorni entrambi i laboratori trovarono la particella, chiamata J/ψ , che risultò evidentissima. Era sfuggita fino ad allora a causa della sua "lunga" vita media ("lunga" ri-

spetto a 10^{-23} sec.).

Con linguaggio spettroscopico, la J/ψ è una riga strettissima, anche se evidentissima, e può essere facilmente perduta se non la si cerca esattamente al punto giusto. Proprio la sua vita media, rendeva enigmatica la J/ψ . Per quanto se ne sapeva nel '74, la J/ψ avrebbe potuto decadere "fortemente" in $\pi^+ \pi^-$ e quindi con una vita media di $\sim 10^{-23}$ sec. Che cosa la rallentava di un fattore mille?

Essendo un mesone, la J/ψ sarebbe dovuta essere $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ o $S\bar{S}$.

Forse le interazioni forti non consentono la trasformazione da un tipo a un altro di quarks. Per esempio, poteva essere che il mesone ϕ , costituito da $S\bar{S}$, pur avendo stranezza zero non può decadere in due particelle non strane, ma solo in due particelle di stranezza opposta $\phi \rightarrow K^+ + K^-$. In altre parole i quarks costituenti devono ritrovarsi nei prodotti di decadimento:



Fu allora risfoderata l'ipotesi del charm.

L'idea fu la seguente: la J/ψ ha costituzione $C\bar{C}$ e, in analogia con la ϕ , potrebbe decadere fortemente in una coppia di particelle "charmate" e con charm opposto. Se non esistono particelle charmate di massa inferiore alla metà della massa della J/ψ , i decadimenti forti della J/ψ risultano proibiti, rimanendo consentiti solo i decadimenti deboli che possono violare la conservazione del charm e sono naturalmente di più lunga vita media. L'idea era buona e suggerì un ampio programma di ricerche:

a) Cercare mesoni e barioni charmati (cioè contenenti un quark C non bilanciato da \bar{C} , o viceversa).

- b) Cercare stati eccitati della J/ψ (4^a spettroscopia?)
 c) Cercare altri mesoni "stretti" (a lunga vita media) nelle annichilazioni e^+e^- e alle energie più alte possibili: sarebbero potuti esistere altri tipi di quarks.

Tutte e tre le ricerche hanno avuto successo.

In particolare fu scoperto un mesone stretto di massa ~ 9.5 GeV chiamato "upsilon" (Υ) interpretabile come uno stato $b\bar{b}$, dove b è un quinto tipo di quark portatore di un nuovo numero quantico detto "beauty" in Europa e "bottom" in USA. Per ragione teoriche di simmetria deve allora esistere un sesto tipo di quark indicato con t , portatore di un nuovo numero quantico, detto "truth" in Europa e "top" in USA. Lo stato $t\bar{t}$ non è ancora stato scoperto a tutt'oggi e nemmeno mesoni o barioni "veri". Mentre qualche mese fa è stato scoperto un barione "bello" indicato con Λ_b ; di composizione $u\bar{d}b$, e pubblicizzato dai giornali con il nome eclatante di "bellezza nuda".

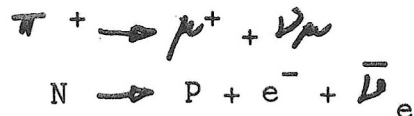
11 - I LEPTONI

Nel campo della fisica dei leptoni, le scoperte sensazionali furono decisamente meno numerose, ma non meno importanti. A differenza degli adroni, essi non hanno rivelato nessun stato eccitato e sembra che siano proprio puntiformi: il loro raggio è sperimentalmente certamente minore di 2×10^{-2} fermi. Queste sono caratteristiche da "vere particelle elementari".

Negli anni 60, su proposta di B. Pontecorvo, si scoprì che esistono due tipi di neutrini: uno "di tipo μ " indicato con ν_μ e

uno "di tipo e" indicato con ν_e .

Per esempio:



Nell'esperimento originale si dimostrò che un fascio di neutrini (ν_μ) provenienti dai decadimenti di π^+ dava luogo a 57 eventi attribuibili alla reazione $\nu_\mu + N \rightarrow P + e^-$ e a nessun evento attribuibile alla reazione $\nu_\mu + N \rightarrow P + e^+$.

A questo punto il parco leptoni era costituito da 4 particelle: e^- , ν_e ; μ^- , ν_μ .

Ripetiamo che in nessun senso il μ può essere considerato un elettrone eccitato, perchè il decadimento $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$ non esiste.

Negli anni 70 fu scoperto un altro leptone, di massa circa 1800 MeV, indicato con τ . Tutti i fisici sarebbero pronti a scommettere che esiste anche il "suo neutrino" ν_τ .

Allora i leptoni sono 6:

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

esistono ovviamente i 6 corrispondenti antileptoni ... e questi 12 oggetti sono particelle veramente elementari.

Si è visto che gli adroni veramente elementari sono i 6 quarks:

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix}$$

e esistono i 6 corrispondenti antiquarks.

E' bella questa simmetria formale, 6 leptoni e 6 quarks, che non sembra per niente oscurata dal fatto che ognuno di questi ultimi esiste in tre diversi colori.

12 - I GLUONI

Quali sono le forze mediante le quali interagiscono i quarks che costituiscono un adrone?

La risposta data a questa domanda è francamente non facile da comprendere a livello intuitivo e qualitativo. La teoria che ha fornito questa risposta si chiama QCD ed è stata elaborata sulla falsariga della QED. La QCD considera il colore un qualcosa di analogo alla carica elettrica e imponendo all'interazione tra due cariche di colore certe invarianze cui soddisfa l'interazione elettromagnetica (invarianze di gauge), deduce che devono esistere 8 particelle di massa nulla e spin 1 che costituiscono i quanti delle interazioni di colore. Queste particelle furono chiamate "gluoni"; sono anch'essi colorati e naturalmente non sono ancora stati rivelati direttamente.

13 - IL CONFINAMENTO

Rimane da spiegare l'insuccesso di tutte le ricerche sperimentali, e sono molte, tese a rivelare direttamente i quarks. Potrebbe essere che le interazioni di colore abbiano una singolare dipendenza dalla distanza: la forza potrebbe essere costante o addirittura aumentare con la distanza, in entrambi i casi l'energia di legame sarebbe infinita e ciò equivale all'impossibilità di principio di rivelare quarks liberi. Si ritiene più verosimile la seconda possibilità e ciò comporta il fatto che i quarks nell'interno dell'adrone sono quasi liberi, cioè non interagenti, perchè la loro distanza

relativa è piccola.

Questo fatto è chiamato "libertà asintotica".

Questo "confinamento" dei quarks può essere riformulato mediante un sintetico enunciato detto "il dogma del colore".

Il dogma è il seguente: tutta la materia realmente osservabile è bianca.

Un barione deve contenere 3 quarks di colori diversi, in modo da renderlo bianco nel linguaggio ottico; ogni antiquark deve avere il colore complementare del corrispondente quark, in modo che tutti i mesoni siano bianchi. Ne segue che quarks e gluoni isolati non possono essere osservabili, trattandosi di particelle colorate.

14 - VERSO UN'UNICA INTERAZIONE

L'evoluzione verso l'individuazione di un numero relativamente piccolo di costituenti fondamentali della materia è stata accompagnata da un'analoga evoluzione verso l'unificazione delle 4 interazioni fondamentali, possibilmente in un'unica interazione.

Un'unificazione di questo tipo fu compiuta nel secolo scorso da Maxwell che unificò le interazioni elettriche e quelle magnetiche nell'elettromagnetismo.

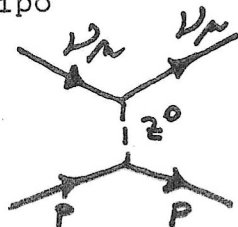
Weinberg, Salam e Glashow ebbero il Nobel nel 1980 per aver elaborato una teoria unificata delle interazioni deboli e elettromagnetiche.

Tale teoria prevede due clamorosi fatti sperimentali

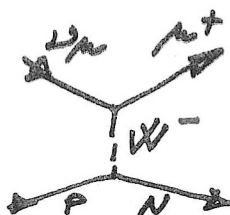
- l'esistenza di tre quanti (W^+ , W^- e Z^0) delle interazioni de-

boli, di massa elevata (intorno a 80 GeV).

- Se deve esistere un quanto di carica nulla (Z^0), allora devono esistere le così dette "correnti deboli neutre" cioè interazioni del tipo



oltre a quelle del tipo



L'esistenza di W^\pm e Z^0 non è ancora stata dimostrata, mentre le correnti neutre sono state rivelate e ciò giustifica il Nobel. Teorie tendenti a unificare le interazioni deboli elettromagnetiche e forti sono in corso di elaborazione.

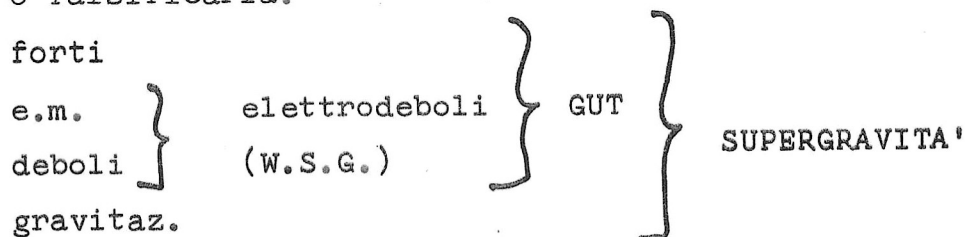
Vanno sotto il nome di "Grand Unified Theories" (GUT) e il plurale è dovuto al fatto che ne esistono alcune varianti che differiscono per alcune assunzioni per ora non direttamente verificabili. È intuitivo che tali teorie debbano prevedere anche una possibile trasformazione di leptoni in quarks e viceversa, cioè l'esistenza di una superparticella, il "leptoquark", che ha due stati possibili, quello di leptone e quello di quark. La conseguenza è ovviamente la non conservazione dei numeri barionico e leptonico e quindi per esempio l'instabilità del protone che dovrebbe decadere nel seguente modo:



L'interazione che provoca questo decadimento deve essere certamente debolissima, visto che la vita media del protone è sperimentalmente superiore a 10^{28} anni.

Ne segue che il quanto di questa interazione deve avere una massa elevatissima, per esempio 10^{15} GeV!

E' infine nata una teoria, che unifica tutte e quattro le interazioni, detta "supergravità". E' una teoria ancora in gestazione e per ora giudicata alquanto esotica. Un suo punto di debolezza è l'incapacità di suggerire tests sperimentali che possano convalidarla o falsificarla.



Si osservi che i quanti delle interazioni (γ , W^\pm , Z^0 , gluoni, gravitone) non andrebbero considerate particelle da aggiungere ai 6 leptoni e ai 6×3 quarks. La loro esistenza conseguirebbe dalla invarianza di gauge, tanto che sono detti "bosoni di gauge".

15 - GLI OTTETTI FONDAMENTALI

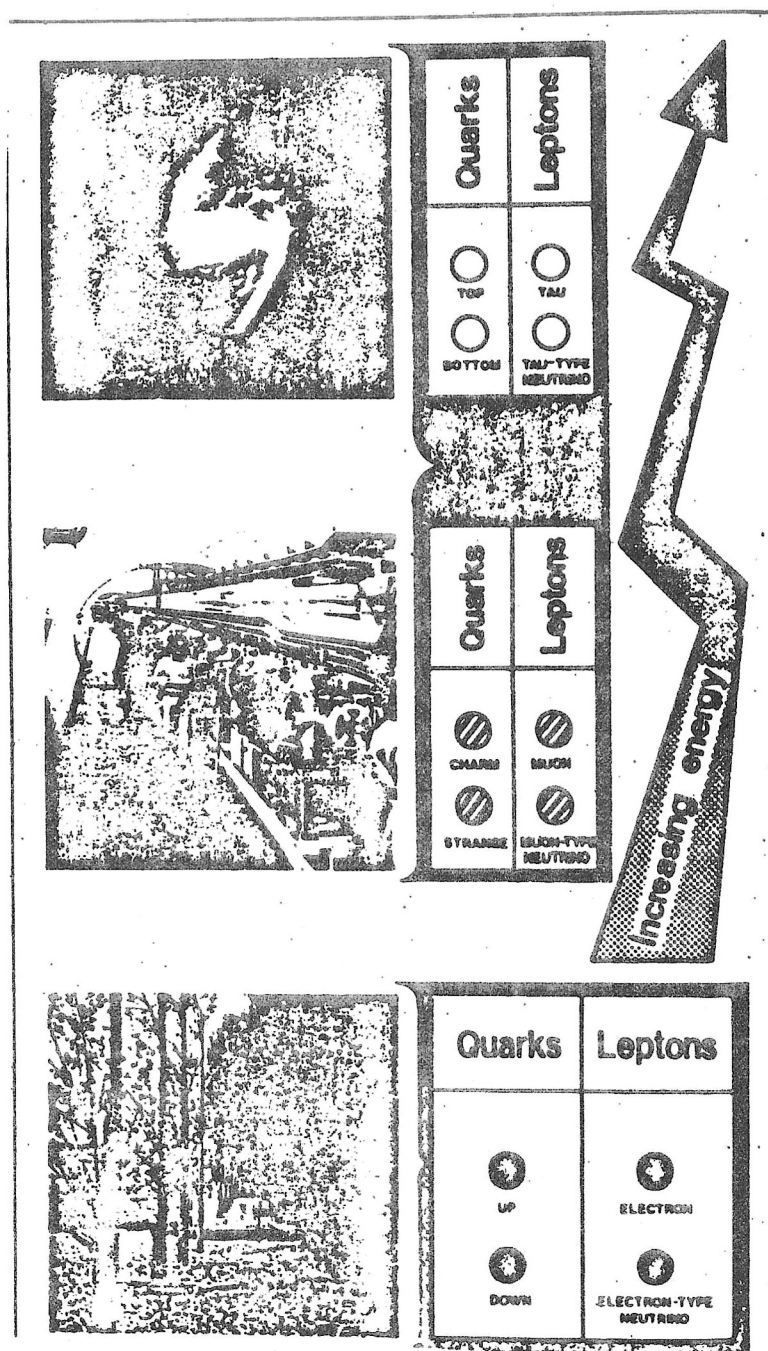
Un raggruppamento particolarmente elegante di quarks e leptoni, è il seguente

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \text{ rosso} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \text{ verde} \quad \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \text{ blu}$$

$$\begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix} \text{ rosso} \quad \begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix} \text{ verde} \quad \begin{pmatrix} s \\ c \end{pmatrix} \text{ blu}$$

$$\begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix} \text{ rosso} \quad \begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix} \text{ verde} \quad \begin{pmatrix} b \\ t \end{pmatrix} \text{ blu}$$

Si tratta di tre "ottetti" comprendenti ognuno sia leptoni che quarks, posti in ordine crescente di massa (sulle masse dei quarks si hanno solo indicazioni indirette). Questo raggruppamento in ottetti suggerisce un interessante schema qualitativo di larga massa: la materia "fredda" quale quella presente sul nostro pianeta è governata dal primo ottetto, la materia "calda", quale quella realizzabile nei laboratori di fisica delle alte energia, dal secondo e infine la materia "supercalda" delle stelle di neutroni e dei buchi neri dal terzo. Esisteranno altri ottetti?



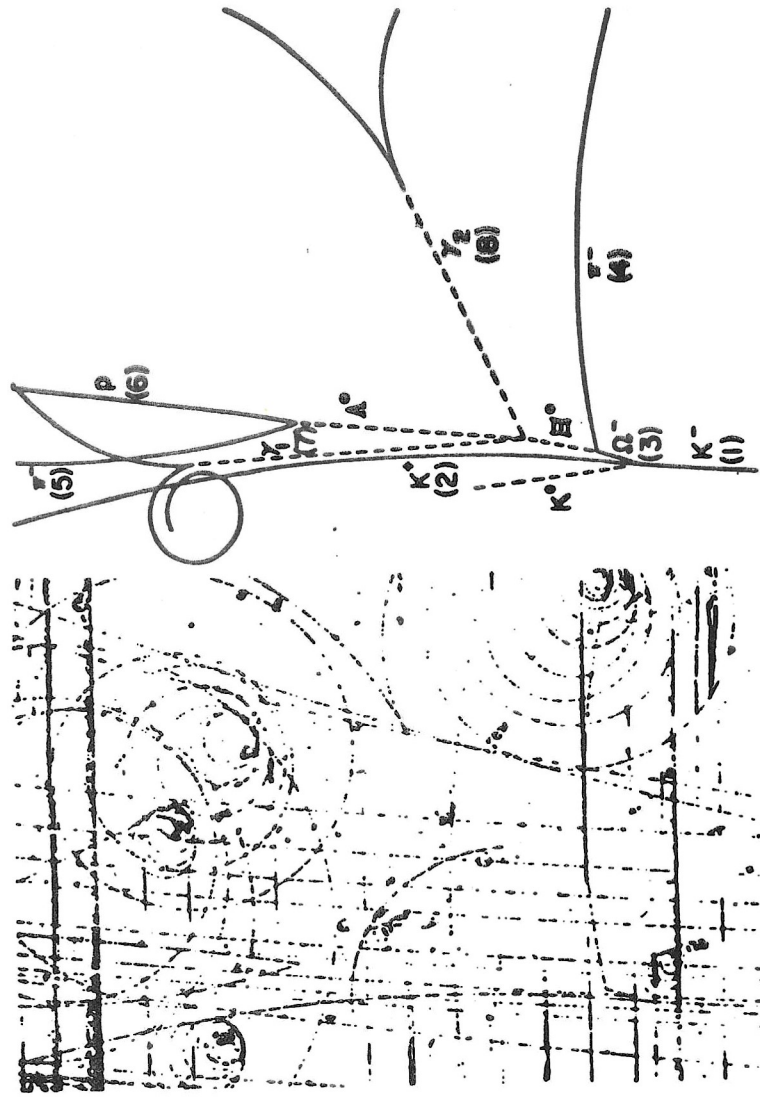


FIG. 2. Photograph and line diagram of event showing decay of Ω^- .

Ω-