

Le interazioni fondamentali nucleari

LA LEZIONE

I leptoni

Le due interazioni fondamentali con raggio d'azione infinito sono la forza gravitazionale e la forza elettromagnetica. La prima regola la struttura del nostro sistema solare e dell'intero universo; la seconda determina i legami atomici e quelli molecolari.

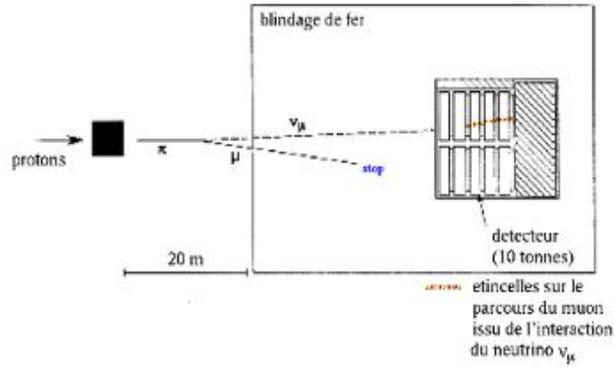
Su raggi di azione nucleari intervengono altre due interazioni tipiche dei fenomeni microscopici: la forza forte che permette la formazione dei nuclei degli elementi e quella debole, responsabile dell'instabilità di molte particelle. Il raggio di azione limitato e altre sue proprietà impediscono di avere strutture tenute insieme da legami deboli, come invece accade con le altre interazioni. Anche se un elettrone, una delle particelle con interazione debole, e un positrone formano, grazie alla forza elettrica, un atomo esotico.

Le particelle elementari non interagenti fortemente caratterizzate da forze nucleari deboli sono state chiamate leptoni (particelle leggere). Nome che nasceva dalla piccola massa dei primi elementi dell'insieme. I leptoni sono suddivisi in coppie. Così accanto all'elettrone carico vi è un secondo membro della famiglia neutro che rappresenta una delle più fuggevoli particelle elementari: il neutrino elettronico.

Lo studio del decadimento beta portò Wolfgang Pauli, già nel 1930, a ipotizzare l'esistenza di una radiazione neutra molto penetrante (ancora prima della scoperta del neutrone) per spiegare l'anomalia dello spettro continuo dell'energia degli elettroni emessi nel fenomeno radioattivo. La validità del principio di conservazione dell'energia implicava una particella non rilevabile elettricamente e quasi non interagente con la materia ordinaria. Fu Enrico Fermi che nel 1933 pose le basi della fisica delle interazioni deboli con la sua teoria dei decadimenti beta. Il neutrino ν_e , come lo aveva chiamato Edoardo Amaldi per distinguerlo dal neutrone, o meglio la sua antiparticella veniva prodotta in una reazione in cui un neutrone si trasformava in un protone con l'emissione della coppia elettrone e antineutrino. Elettroni e antineutrini, non presenti nel nucleo, erano dunque creati in analogia all'emissione dei fotoni di un atomo o di un nucleo eccitato.

Solo nel 1956 Frederick Reines e Clyde Cowan individuarono sperimentalmente, utilizzando un reattore nucleare, gli antineutrini elettronici. La scoperta nei raggi cosmici di un elettrone pesante: il muone, condusse a una seconda famiglia di leptoni composta da μ e ν_μ (il neutrino muonico).

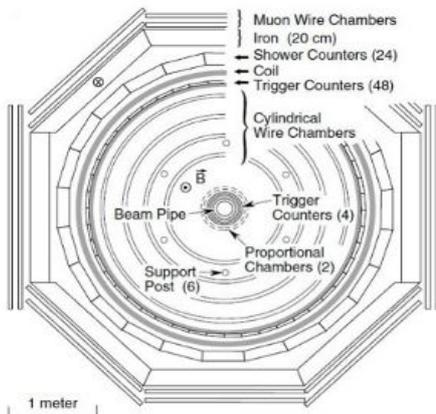
Nel 1962 Jack Steinberger, Melvin Schwartz e Leon Max Lederman a Brookhaven con un acceleratore di protoni a 15 GeV lanciato contro un bersaglio di berillio produssero pioni che a loro volta decadevano in muoni, neutrini muonici e antineutrini muonici. La determinazione della particella avvenne separando gli altri prodotti della reazione con una barriera di 13 metri di acciaio. In centinaia di ore di rilevazione solo pochi eventi furono individuati nella camera a scintille. Nel 1988 ai tre autori fu assegnato il premio Nobel per la fisica.



[fig.1](#) Melvin Schwartz, accanto alla camera a scintille nel 1962 ; [fig.2](#) Schema dell'apparato sperimentale del 1962 a Brookhaven: un fascio di protoni lanciato contro un bersaglio di berillio produce pioni che decadono, la schermatura d'acciaio impedisce ai muoni di raggiungere il rivelatore che registra l'interazione con i neutrini muonici

Come spiegava Lederman stesso: "Fino all'esperienza condotta alla Columbia University, l'unico neutrino conosciuto era quello nato dal decadimento beta, che produce anche un elettrone. Ma la maggior parte dei neutrini che superavano l'immenso filtro d'acciaio nascevano dal decadimento del pione ed erano accompagnati da muoni, e non da elettroni. Vennero pertanto chiamati neutrini muonici. Per formulare la differenza tra i due tipi di neutrini, venne suggerita una loro diversità di sapore, i neutrini risultanti dal decadimento beta fanno di elettrone, e quelli nuovi di muone. Avrete capito che la parola 'sapore' non era stata proposta con la massima serietà, eppure il concetto di sapore divenne cruciale nella creazione del modello standard." (L. M. Lederman, Dal quark al cosmo, p. 98).

Un terzo leptone carico pesante tau, di vita media $2,9 \cdot 10^{-13}$ secondi e massa superiore a quella del protone, fruttò il premio Nobel a Martin Perl e Frederick Reines (citato anche per la scoperta del neutrino elettronico) che studiavano indipendentemente le reazioni degli anelli di accumulazione negli anni Settanta. Il neutrino tauonico corrispondente fu osservato per la prima volta solo nel 2000 al FermiLab. Oggi si ritiene che i neutrini abbiano una piccola massa, ancora non valutata in modo soddisfacente. Le principali caratteristiche dei leptoni sono riassunte in fig.4.



	sapore	massa (GeV/c ²)	carica elettrica
ν_e	neutrino e	$< 7 \times 10^{-9}$	0
e^-	elettrone	.000511	-1
ν_μ	neutrino μ	$< .0003$	0
μ^-	muone	0.106	-1
ν_τ	neutrino τ	$< .03$	0
τ^-	tau	1.7771	-1

La carica elettrica è misurata rispetto alla carica del protone.

[fig.3](#) Schema del rivelatore utilizzato per le ricerche sul leptone tau; [fig.4](#) Tavola dei leptoni

Le particelle elementari con interazione debole, insieme ai quark hanno spin $\hbar/2$. Tra i leptoni carichi solo la più leggera è stabile. La fisica del neutrino negli ultimi anni è stata esplorata con grandi esperimenti in cui le particelle neutre sono prodotte negli acceleratori, focalizzate e rilevate a centinaia di chilometri di distanza in laboratori con barriere gigantesche per i neutrini provenienti dai raggi cosmici costituite ad esempio dalla roccia di una montagna. I tre tipi di neutrino mostrano oscillazioni tra le diverse forme. Idea avanzata da Bruno Pontecorvo già nel 1957 sulla base di considerazioni teoriche. Il più giovane dei ragazzi di Via Panisperna, prima di emigrare in Unione Sovietica, aveva inoltre indicato e discusso con Fermi negli anni Cinquanta un metodo per l'osservazione sperimentale dei neutrini: una sostanza contenente cloro radioattivo sotto l'azione dei neutrini era trasformata in argon con l'emissione di elettroni.

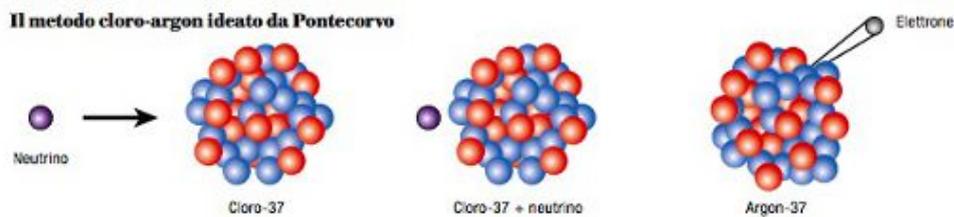


fig.5 Schema della reazione ipotizzata da Bruno Pontecorvo che fu utilizzata nelle ricerche sulla determinazione dei neutrini solari

L'esperimento non fu realizzato dal fisico italiano, ma una variante della vasca di Pontecorvo permise al chimico Raymond Davis Jr. di porre le basi per lo studio dei neutrini solari negli anni Sessanta. Nel 2002 fu assegnato il Nobel per le ricerche sui neutrini a Davis e a Masatoshi Koshiba. Il fisico giapponese negli anni Ottanta realizzò il laboratorio sotterraneo (nella miniera di zinco di Kamioka) Kamiokande costituito da un enorme serbatoio di acqua e rivelatori ottici, individuando neutrini provenienti dall'esplosione di una supernova. Negli anni Novanta il Super-Kamiokande contribuì alla determinazione delle oscillazioni dei neutrini.

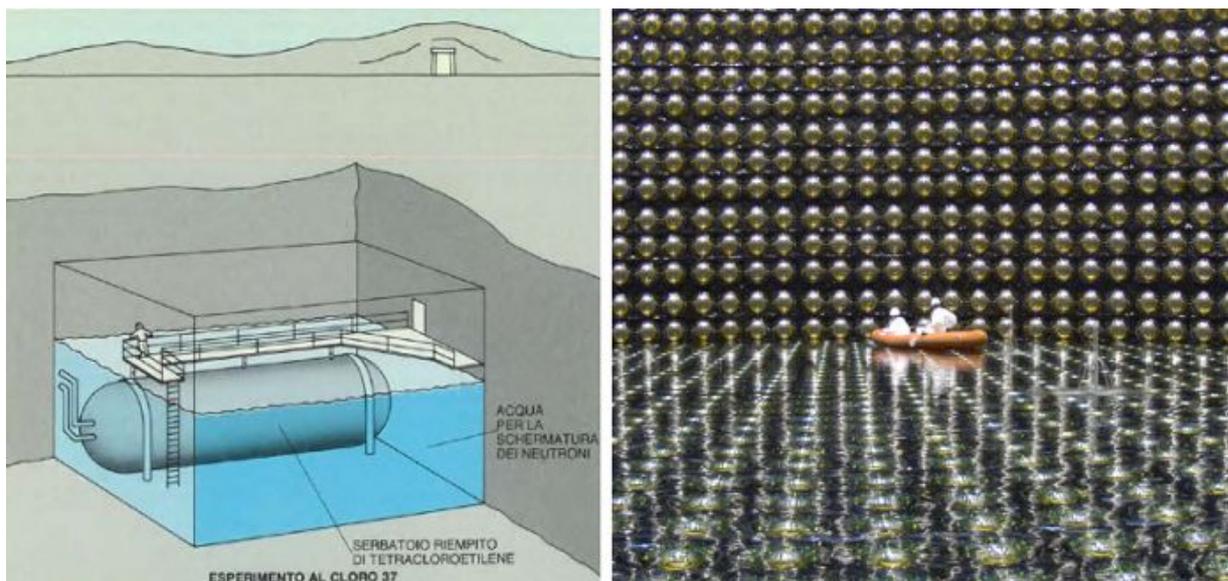
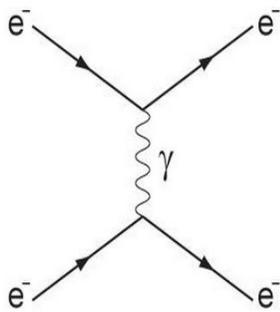


fig.6 Il rivelatore realizzato da Raymond Davies Jr. dei neutrini solari negli anni Sessanta. Il serbatoio, contenente 378.000 litri di tetracloroetilene, schermato con acqua, fu posto nel 1968 in una miniera;

fig.7 Una fase della manutenzione del rivelatore di neutrini giapponese Superkamiokande

Le particelle mediatrici delle interazioni deboli

La fisica ha progressivamente abbandonato l'idea newtoniana di forza e azione (istantanea) a distanza, introducendo il concetto di campo in elettromagnetismo e relatività e recentemente quello delle particelle mediatrici delle forze nel modello standard.

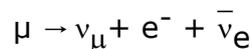


Così l'interazione tra due particelle cariche come gli elettroni in un processo di diffusione (scattering) viene oggi descritto attraverso una particella mediatrice della forza elettrica: un fotone γ , avente massa nulla, che le particelle materiali si scambiano secondo un processo descritto da un diagramma introdotto per la prima volta da Richard Feynman in elettrodinamica quantistica.

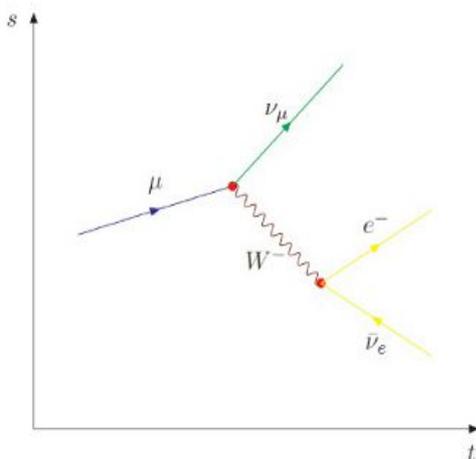
fig.8 L'interazione tra due elettroni secondo il diagramma di Feynman

Il fotone γ , emesso e assorbito durante l'interazione, ha una vita media brevissima, inferiore o uguale all'incertezza della durata dell'interazione determinata attraverso la relazione di indeterminazione $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$.

L'estensione della teoria dei campi alle interazioni deboli fu iniziata negli anni Sessanta da Sheldon Lee Glashow e perfezionata da Abdus Salam e Steven Weinberg. Nella teoria della forza elettrodebole le particelle mediatrici delle forze, oltre il fotone, sono tre diverse particelle di grande massa (inversamente proporzionale al raggio d'azione della forza debole), indicate con i simboli W^+ , W^- e Z . Il decadimento del muone in un neutrino muonico, in un elettrone e un antineutrino elettronico, secondo la reazione:



è allora interpretato con un passaggio intermedio in cui il muone decade in un neutrino (muonico) e nella particella W^- . Questa a sua volta si trasforma in un elettrone e un antineutrino elettronico.



Nel diagramma di Feynman che descrive tale decadimento l'asse orizzontale è il tempo e l'asse verticale lo spazio. La particella entrante è il muone, mentre quelle uscenti sono il neutrino e W^- . I leptoni sono rappresentati con linee rette con una piccola freccia che coincide per le particelle con il verso del tempo ed è opposto a quest'ultimo per le antiparticelle. I mediatori delle interazioni deboli (W e Z) ed elettromagnetiche (γ) sono rappresentati con linee ondulate.

fig.9 Decadimento del muone

Conseguentemente il decadimento beta diviene allora non la trasformazione di un neutrone in un protone, un elettrone e un antineutrino, ma quella di un quark down in un quark up e una particella W^- secondo il diagramma della figura 10.

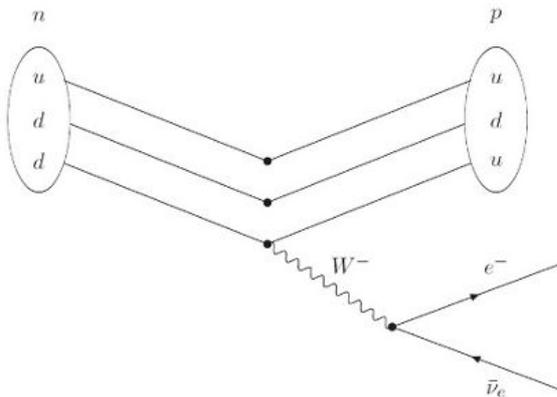
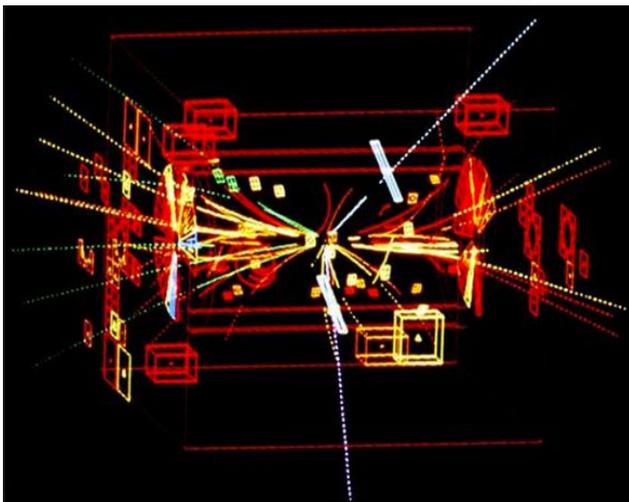


fig.10 Interpretazione moderna del decadimento beta



Ai tre teorici dell'interazione elettrodebole fu assegnato il premio Nobel per la fisica nel 1979. Cinque anni dopo toccò a Carlo Rubbia e Simon van der Meer che svilupparono i metodi per la rilevazione delle nuove mediatrici di forze scoperte nel 1983 al CERN di Ginevra con un anello di collisione protoni antiprotoni.

fig.11 La prima registrazione di un evento che confermava l'esistenza del bosone Z al Cern di

Ginevra nel 1983

Le particelle cariche W e quella neutra Z sono bosoni perché avendo spin zero appartengono alla statistica di Bose-Einstein e hanno massa di circa 90 e 100 volte quella del protone. La loro verifica sperimentale necessitò quindi di nuovi acceleratori di grandissima energia. La famiglia delle particelle leggere e delle quattro mediatrici della forza elettrodebole rappresenta oggi la metà del modello standard.

I quark

La costruzione di anelli di collisione particella-antiparticella, iniziò negli anni Sessanta. Nelle nuove macchine due fasci di elettroni e positroni (in seguito protoni e antiprotoni) furono accelerati e fatti interagire. Dal prototipo di Bruno Toushek del primo anello di accumulazione AdA ai giganteschi anelli della più grande e potente macchina acceleratrice del CERN di Ginevra si passa dalla prima organizzazione teorica delle particelle elementari alla conferma del bosone di Higgs.

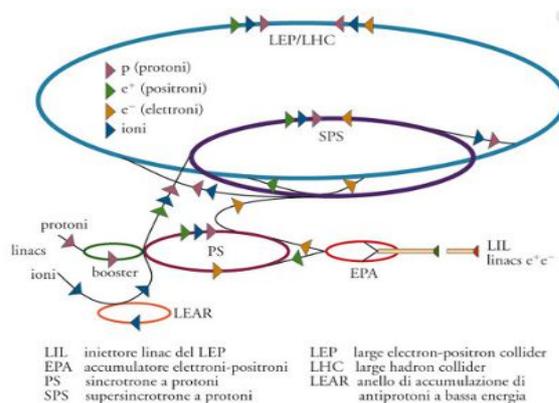
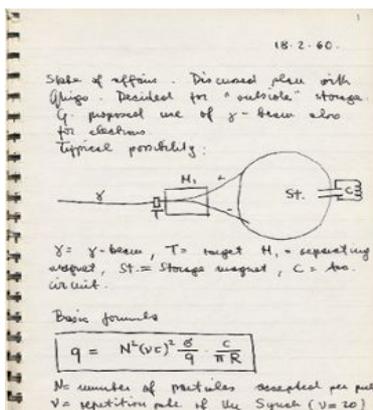
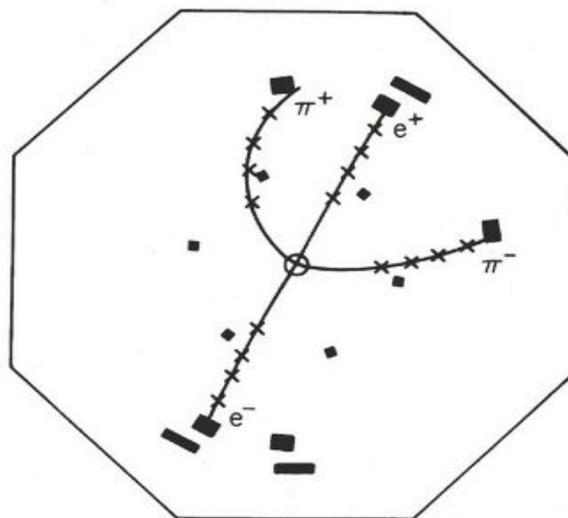
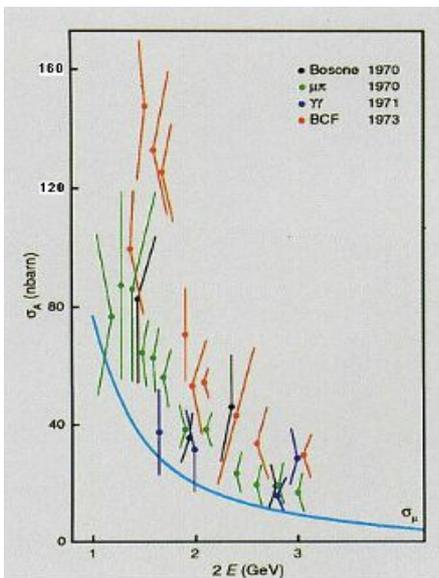


fig.12 La prima pagina del quaderno di appunti di Bruno Toushek del 1960 sull'anello di accumulazione AdA; fig.13 Schema del sistema di acceleratori e collider del CERN

A cavallo tra gli anni Sessanta e Settanta la comunità scientifica iniziò a percepire lo strano comportamento della forza nucleare forte. Sulla base dei dati sperimentali dello *Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)*, R. Feynman aveva confermato la struttura interna del protone e degli altri adroni parlando dei costituenti interni come di *partoni* (e non di quark come aveva fatto Gell-Mann). I partoni, secondo il Nobel, dovevano avere delle proprietà peculiari: avvicinati, tramite l'urto con elettroni, si comportavano come se fossero particelle libere. L'interazione forte, responsabile del confinamento dei costituenti gli adroni, diminuiva la sua intensità con la distanza. La spiegazione della *libertà asintotica*, rilevata in esperimenti ad alte energie, per le particelle con interazione forte divenne un problema teorico impellente. Oggi, per dare una vaga idea del problema, ci si affida all'immagine di due oggetti legati da un elastico ideale: se si prova a separare i costituenti del sistema si ottiene una resistenza sempre più grande, mentre, per piccole distanze di separazione, gli oggetti si possono considerare liberi.

Nel 1973, dopo molti contributi di diversi autori, David Gross e Franz Wilczek a Princeton e David Politzer a Harvard posero le basi per la soluzione del rompicapo nell'ambito di una teoria quantistica. Dopo oltre trenta anni, nel 2004, i teorici furono insigniti del premio Nobel per la fisica. Si iniziava a delineare la teoria delle particelle mediatrici delle interazioni forti (chiamata da Gell-Mann *cromodinamica quantistica* per le ragioni che vedremo nel prossimo paragrafo). Negli stessi anni i dati provenienti dai primi anelli di collisione e da altri acceleratori offrivano risultati in parte inattesi. Adone, l'anello elettroni-positroni, di Frascati completato nel 1969, mostrava la produzione di getti multipli di adroni. Negli esperimenti con l'anello di energia maggiore SPEAR, il gruppo americano coordinato da Burton Richter nel 1973-74 raggiunse una risonanza di interazione intorno a 3,1 GeV.

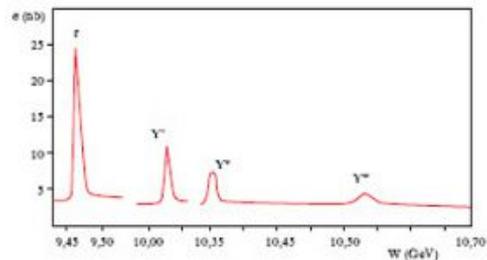


[fig.14](#) Produzione di getti adronici ottenuti a Frascati tra il 1969 e il 1974;
[fig.15](#) Ricostruzione di un decadimento della particella psi nel rivelatore Mark 1 dello SPEAR che produce l'immagine della lettera greca ψ

La forma delle traiettorie delle particelle prodotte nel decadimento della nuova particella nel rivelatore suggerì agli scopritori il nome ψ , psi. Nello stesso periodo a Brookhaven, Samuel Ting aveva battezzato J una particella di energia equivalente ottenuta con esperimenti diversi. La particella J/ψ fu interpretata come la prova dell'esistenza di un quarto quark che si aggiungeva a quelli u , d , s .

Il *quark charm* (simbolo c) di massa prossima a $1,5 \text{ GeV}/c^2$, era stato ipotizzato già agli inizi del 1970, tra gli altri da Luciano Maiani. Il quark non poteva essere evidenziato singolarmente, ma il mesone *charm-anticharm* corrispondeva alla nuova particella. Richter e Ting per i loro contributi ricevettero il premio Nobel nel 1976. La coppia dei quark leggeri *up* e *down* era la prima famiglia di particelle elementari con interazione forte. A essa seguiva una seconda famiglia di quark pesanti: le particelle *strange* e *c charm* (incanto). Il completamento della terza famiglia di quark (corrispondente al leptone *tau* e al suo neutrino) fu confermato con la scoperta nel 1976 al FermiLab del gruppo guidato da L. Lederman del quinto quark, indicato con il simbolo b (inizialmente la lettera stava per *beauty*, bellezza, in seguito fu utilizzata la parola *bottom*).

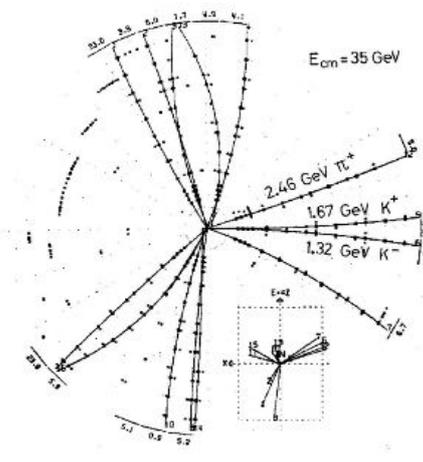
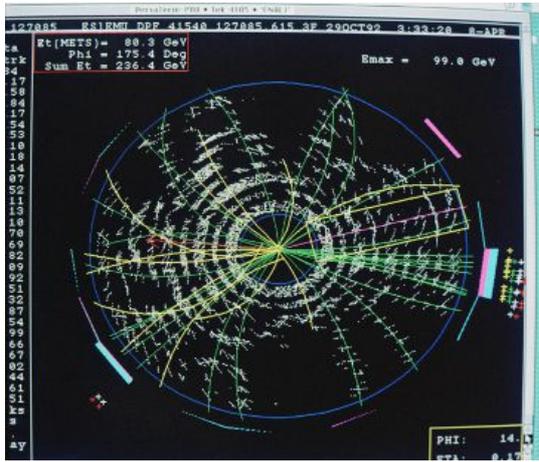
In realtà gli sperimentatori avevano individuato un particolare mesone composto dal quark b e dal suo antiquark capace di generare altre risonanze che permisero lo studio, come accaduto con la particella J/ψ , degli stati eccitati di un sistema semplice unito da interazioni forti chiamato *quarkonio* analogo per molti versi all'atomo di idrogeno nella fisica atomica.



[fig.16](#) Leon Lederman nel 1977 al FermiLab; [fig.17](#) Le risonanze di una particella che rappresentano diversi livelli energetici del quarkonio

Le evidenze sperimentali dell'ultimo quark chiamato oggi *top* e indicato con il simbolo t (inizialmente la lettera stava per *truth*) di massa 176 volte quella del protone furono rilevate solo nel 1994 sempre al FermiLab. Il modello standard risultante è rappresentato così da 12 particelle materia (6 leptoni e 6 quark) tutte di spin $\hbar/2$.

Accanto alla particelle materia, il modello standard si affida alle particelle mediatrici delle interazioni. Queste sono nel caso della forza nucleare forte i *gluoni*: una strana colla che impedisce la separazione dei quark, ma che a piccolissime distanze di separazione diviene inefficace.

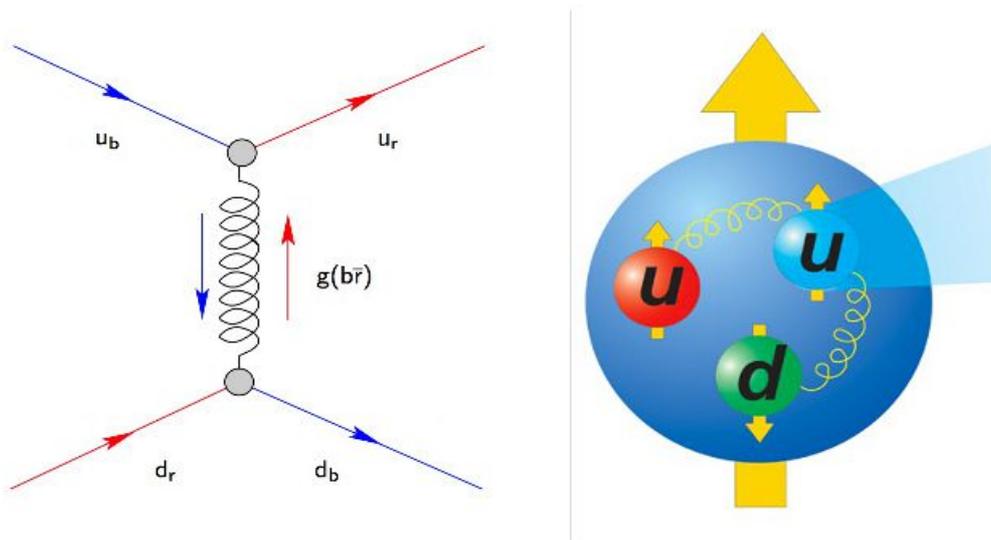


[fig.18](#) Un evento di conferma del quark top al FermiLab; [fig.19](#) Un evento in esperimenti al Positron Electron Tandem Storage Ring Accelerator PETRA del 1980 che avvalorava l'esistenza dei gluoni con i tre getti di adroni prodotti dopo l'annichilazione elettrone-positrone. A livello di prima approssimazione l'annichilazione produce un fotone gamma che a sua volta crea una coppia di quark e antiquark. I getti quindi dovrebbe essere due, ciascuno determinato dal decadimento del quark e dal decadimento dell'antiquark. Ad alte energie può intervenire un gluone che produce il terzo getto

I gluoni

Il modello standard è una teoria coerente delle interazioni forte, debole ed elettromagnetica. La sua fondazione è basata su una generalizzazione dell'elettrodinamica quantistica che unisce i principi della meccanica quantistica, della relatività e simmetrie locali. Se per l'elettromagnetismo i principi di conservazione riguardano la densità di corrente e la carica elettrica, per l'interazione elettrodebole vi sono quattro cariche elettrodeboli (come quattro sono i mediatori del campo) una delle quali è proprio la carica elettrica. Nel caso delle interazioni forti ci sono otto cariche di colore (tra breve vedremo perché si usa tale termine) e otto sono le particelle mediatrici, i gluoni, tutte di massa nulla come il fotone.

Secondo lo schema di Feynman, due quark interagiscono fortemente attraverso un gluone virtuale. L'emissione o l'assorbimento di un gluone non modifica il tipo di quark (o *sapore*), ma può modificarne il colore. Così nella figura 20 un quark up di colore blu dopo lo scambio diventa rosso e il quark down rosso diviene blu.



[fig.20](#) Un quark up di colore rosso interagendo con un quark down blu attraverso un gluone g può portare a un quark up blu e un quark down rosso, con uno scambio di colore tra i due quark; [fig.21](#) Struttura

interna del protone e rappresentazione schematica dei gluoni che impediscono la separazione dei quark

Esistono tre colori primari: rosso r , verde v , blu b . La cui combinazione segue regole simili a quelle dell'ottica. Negli antiquark i colori corrispondenti sono: ciano, magenta, giallo. Se, in ottica, nella sintesi additiva dei colori tre luci colorate della stessa intensità danno il bianco, in *cromodinamica quantistica* ogni barione è bianco perché composto di tre quark, ognuno con un diverso colore primario. Anche i mesoni sono bianchi a causa della combinazione di un quark colorato e di un antiquark di colore complementare. Gli adroni (barioni e mesoni), privi di colore, sono quindi stati legati di quark. Le molecole, di carica complessiva neutra, sono tenute insieme dalla forza elettrica esercitata dagli atomi che la compongono. L'interazione tra due quark mediata dai gluoni (anch'essi con proprietà di colore) può scambiare i colori tra quark, ma lascia inalterato il bianco dell'adrone. Facendo interagire particelle non si riesce a liberare una carica colorata, ma è possibile una reazione in cui compaiono ad esempio leptoni e adroni. Il confinamento dei quark e dei gluoni (i costituenti interni sono da alcuni autori chiamati ancor oggi partoni) sono regole di base della cromodinamica. È possibile che la particella risultante abbia massa doppia di quella del singolo quark, ciò avviene con i quark e antiquark dello stesso tipo, come abbiamo ricordato nel precedente paragrafo.

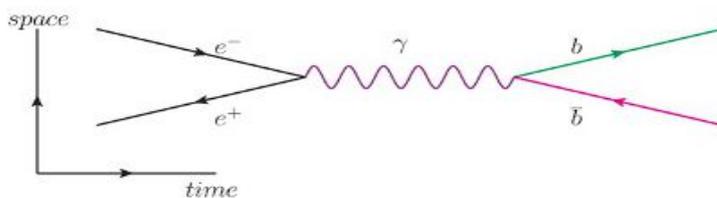


fig.22 Reazione tra elettrone e positrone che produce una coppia di quark

Se si pensa al potenziale V associato alla forza forte tra un quark colorato e il suo antiquark esso si può studiare attraverso gli stati energetici della coppia *quark bottom* e *antiquark bottom* o dal *quark charm* e dall'*antiquark charm* (i valori delle diverse risonanze). Il potenziale è simile, per certi intervalli di distanza r a quello coulombiano tra cariche elettriche: $V=-a/r$, ma a basse energie V è proporzionale a r : $V=\sigma r$.

Per i quark più leggeri non è possibile generalizzare questi risultati. Per continuare le analogie, come la carica neutra complessiva di atomi e molecole lascia la possibilità di avere legami elettrici (fondamentali per la stabilità di tutta la materia) a causa della diversa distribuzione di carica; così il colore, complessivamente neutro, degli adroni non impedisce un'interazione forte tra adroni residuo della forza tra i quark colorati. La carica di colore contraddistingue lo stato del quark e spiega come sia possibile l'esistenza di particelle composte ad esempio da tre quark dello stesso tipo. Per le proprietà di spin i quark obbediscono al principio di esclusione di Pauli e non possono avere gli stessi numeri quantici, allora solo il diverso colore differenzia i quark dello stesso tipo. La particella omega meno, predetta da Gell-Mann, è composta di tre quark strange rispettivamente: rosso, verde e blu. Infine se pensiamo che ogni tipo di quark può essere rappresentato con un diverso colore fondamentale: lo stesso adrone può avere stati equiprobabili con una variazione opportuna dei colori.

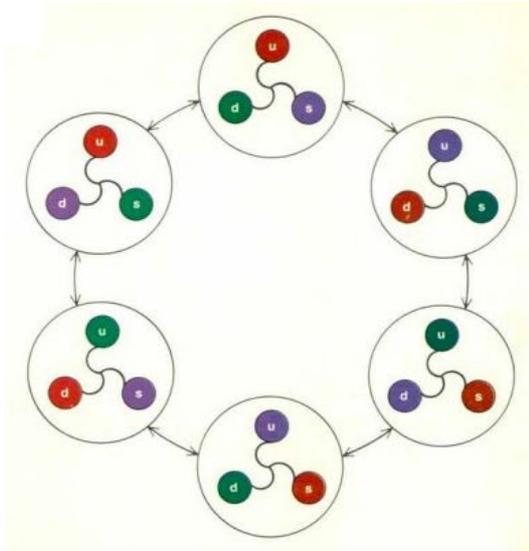


fig.23 La particella lambda è composta di tre quark diversi. Sono così possibili sei stati equiprobabili di colore diversi (le sei permutazioni dei tre colori primari) che portano alla stessa particella bianca

La simmetria associata al colore presenta considerazioni molto più generali che affronteremo in una delle lezioni successive.