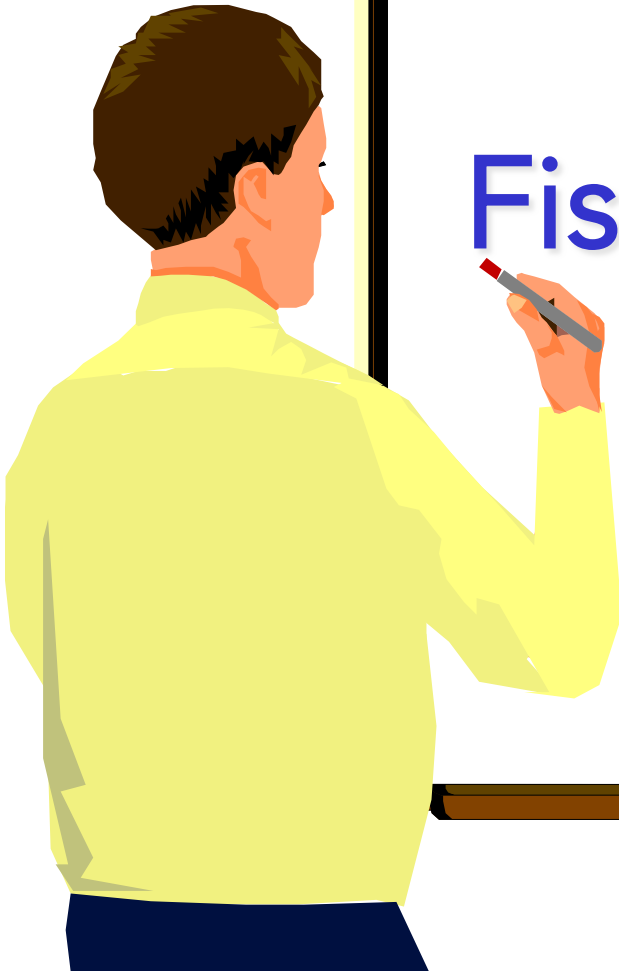


FISICA

Fisica delle particelle elementari

*Autore: **prof. Pappalardo Vincenzo***

*docente di **Matematica e Fisica***

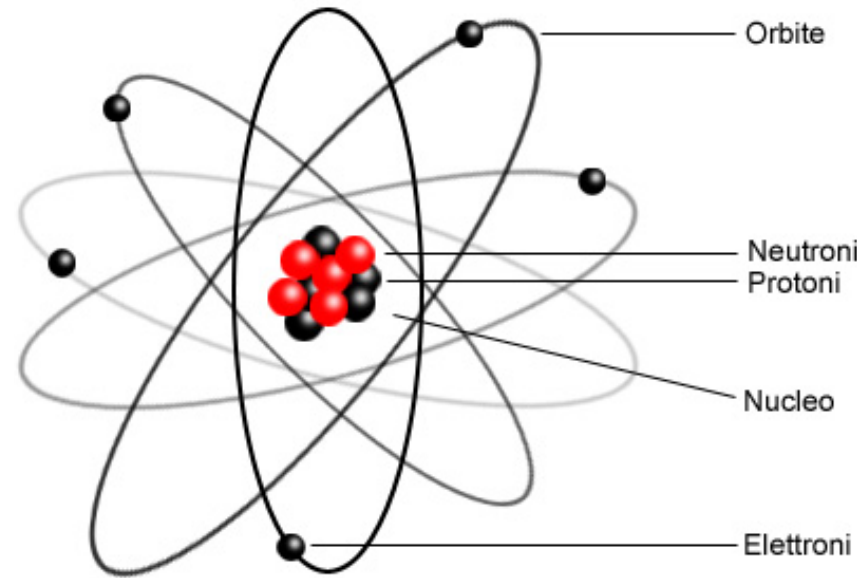


INTRODUZIONE

La ricerca degli enti fondamentali e indivisibili della materia è iniziata nel V secolo a.C. (Democrito) e continua ancora oggi nei laboratori di tutto il mondo.

Ogni volta che, nel corso degli anni, una microscopica entità materiale veniva considerata corrispondente all'atomo di Democrito, nuove scoperte e nuove teorie mostravano che l'oggetto ritenuto elementare in realtà era formato da qualche cosa ancora più fondamentale e ancora più semplice.

Alla fine del XIX secolo si riteneva l'atomo come mattone fondamentale e indistruttibile della materia. Poi si è scoperto che aveva una sua struttura interna di cui facevano parte l'elettrone, il protone e il neutrone.



Negli anni Trenta del XX secolo tutta la materia conosciuta poteva essere descritta mediante quattro particelle considerate elementari e a simmetria sferica: il protone, l'elettrone, il neutrone e il fotone.

Questo schema, estremamente semplice e attraente, cominciò lentamente a mutare con l'introduzione dello spin, che fece perdere la perfetta simmetria geometrica dei corpuscoli, con la teoria della relatività, che fornì la possibilità teorica di creare una particella dalle altre, a condizione di disporre di sufficiente energia, e con le antiparticelle di Dirac.

Ma le scoperte sempre più numerose di altri tipi di particelle, dopo la fine della seconda guerra mondiale, cominciarono a mostrare che anche questi presunti costituenti ultimi degli atomi avessero una loro struttura interna.

Negli ultimi decenni, gli esperimenti di diffusione ad alta energia ci hanno rivelato nel modo più straordinario la natura dinamica e continuamente mutevole del mondo delle particelle; la materia si è dimostrata capace di trasformazione totale. Tutte le particelle possono essere trasformate in altre particelle, possono essere create dall'energia e possono scomparire in energia.

Tutto ciò ha portato a considerare l'elementarità delle particelle come un concetto in continua evoluzione, legato ai limiti delle nostre conoscenze. E non solo, concetti classici come particella elementare, sostanza materiale o oggetto isolato, hanno perso il loro significato.

Non abbiamo ancora trovato fino a oggi una teoria completa per descrivere questo mondo delle particelle subatomiche, ma disponiamo di diversi modelli teorici (come il [Modello Standard](#) in cui la fisica quantistica si fonde con la relatività ristretta) che ne rappresentano piuttosto bene alcuni aspetti.

Nessuno di questi modelli è privo di difficoltà matematiche e contraddizioni. Ma tutti mostrano che le proprietà di una particella possono essere capite solo in rapporto alla sua attività, alla sua interazione con l'ambiente circostante, e che perciò la particella non può essere vista come un'entità isolata, ma va intesa come una parte integrata del tutto.

LA NUOVA CONCEZIONE DELLE PARTICELLE

La scoperta che la massa non è altro che una forma di energia (equivalenza massa-energia) ha costretto gli scienziati, ed i filosofi della scienza, a modificare in modo sostanziale il concetto di particella.



Nella fisica moderna, la massa non è più associata a una sostanza materiale, e quindi le particelle non sono più viste come costituite da un qualche materiale fondamentale, bensì **sono considerate come pacchetti di energia**.

Ma poiché l'energia è associata ad attività e a processi, è implicito che la natura delle particelle subatomiche sia intrinsecamente dinamica.

Per comprendere meglio questo punto, dobbiamo ricordare che queste particelle possono essere concepite solo in termini relativistici, cioè nel contesto di una struttura nella quale spazio e tempo sono fusi in un continuo quadridimensionale.

Le particelle, pertanto, non devono essere rappresentate come oggetti tridimensionali statici, come gli oggetti della vita quotidiana, ma piuttosto come entità dinamiche quadridimensionali nello spaziotempo.

Il loro aspetto spaziale le fa apparire come oggetti con una certa massa, il loro aspetto temporale come processi ai quali prende parte l'energia equivalente della loro massa.

Queste figure dinamiche, o pacchetti di energia, formano le strutture stabili di tipo nucleare, atomico e molecolare che costituiscono la materia e le conferiscono il suo ben noto aspetto solido, macroscopico. Ciò porta a credere che essa sia costituita da qualche sostanza materiale.

Se a livello macroscopico questa nozione di sostanza è un'approssimazione utile, a livello atomico essa non ha più senso.

Quando osserviamo le particelle che costituiscono la materia, non vediamo mai nessuna sostanza, ma solo forme dinamiche che si trasformano incessantemente l'una nell'altra, in una continua danza di energia.

La meccanica quantistica ha permesso di capire che queste particelle non sono granelli isolati di materia, ma distribuzioni di probabilità. La teoria della relatività le ha rese “vive” rivelandone il carattere intrinsecamente dinamico e facendo vedere che l'attività della materia è la vera essenza del suo essere.

Le particelle del mondo subatomico non sono attive solo nel senso che si muovono con estrema velocità ma nel senso che esse stesse sono processi. L'esistenza della materia e la sua attività non possono essere separate: esse sono soltanto aspetti differenti della stessa realtà spaziotemporali.

In definitiva:

le particelle sono enti dinamici e vanno studiate in termini di energia, attività e processi.

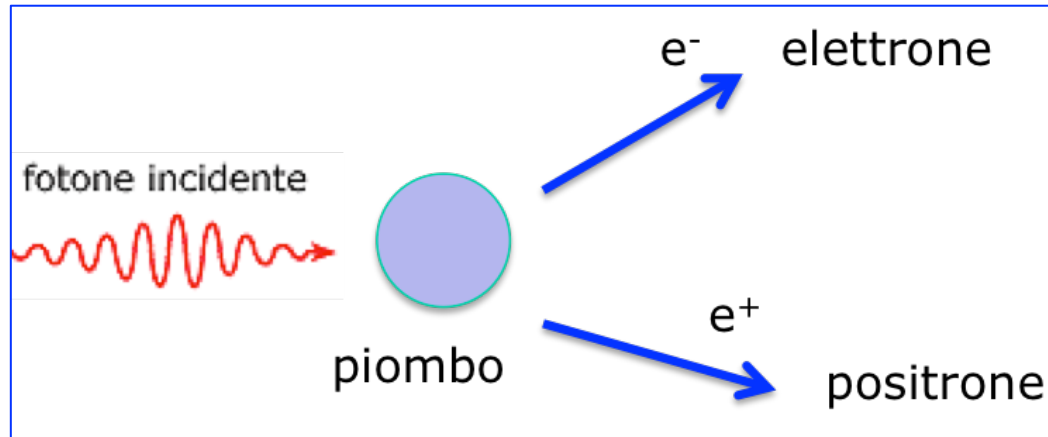
Questo nuovo modo di concepire le particelle ci consente di vedere il problema della divisibilità della materia sotto una nuova luce.

Prima della fisica relativistica delle particelle, i costituenti della materia erano sempre stati considerati come unità elementari indistruttibili e immutabili in senso democriteo, e la domanda fondamentale che ci si poneva era se fosse stato possibile continuare a dividere la materia e giungere alle minime unità indivisibili.

Adesso, considerando le particelle in termini di energia e processi, quando si urtano e si frantumano in più parti, i prodotti della reazione non sono più piccoli delle particelle originarie.

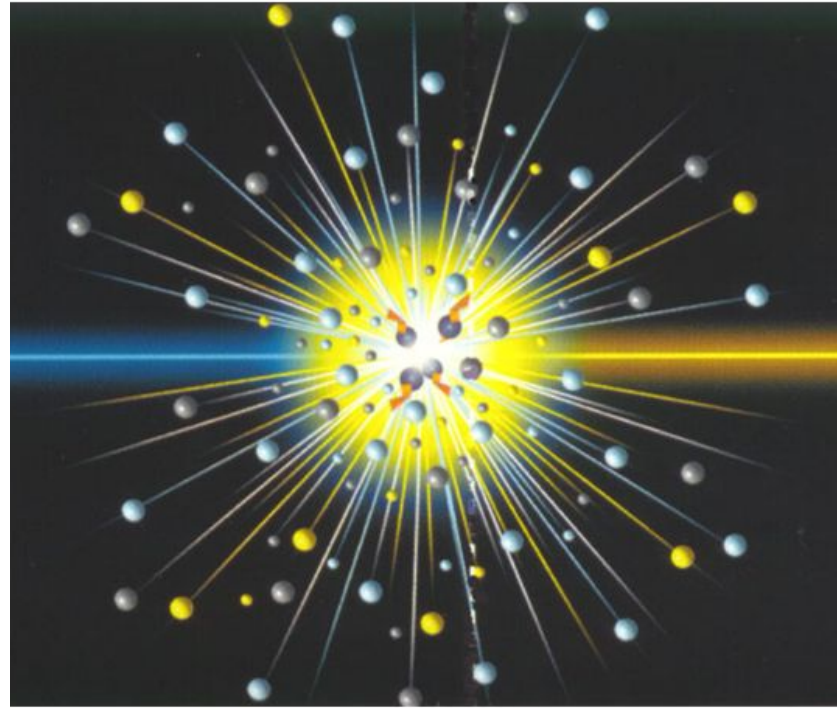
Sono ancora particelle dello stesso tipo ma prodotte a spese dell'energia di moto (energia cinetica) coinvolta nel processo d'urto.

Quindi, se vogliamo dividere ulteriormente le particelle subatomiche dobbiamo farle interagire tra loro in processi d'urto ad alta energia, e le particelle ottenute non sono più piccole di quelle originarie ma sono state create a spese dell'energia coinvolta nel processo, secondo la famosa equazione di Einstein $E=mc^2$ sull'equivalenza tra massa ed energia.



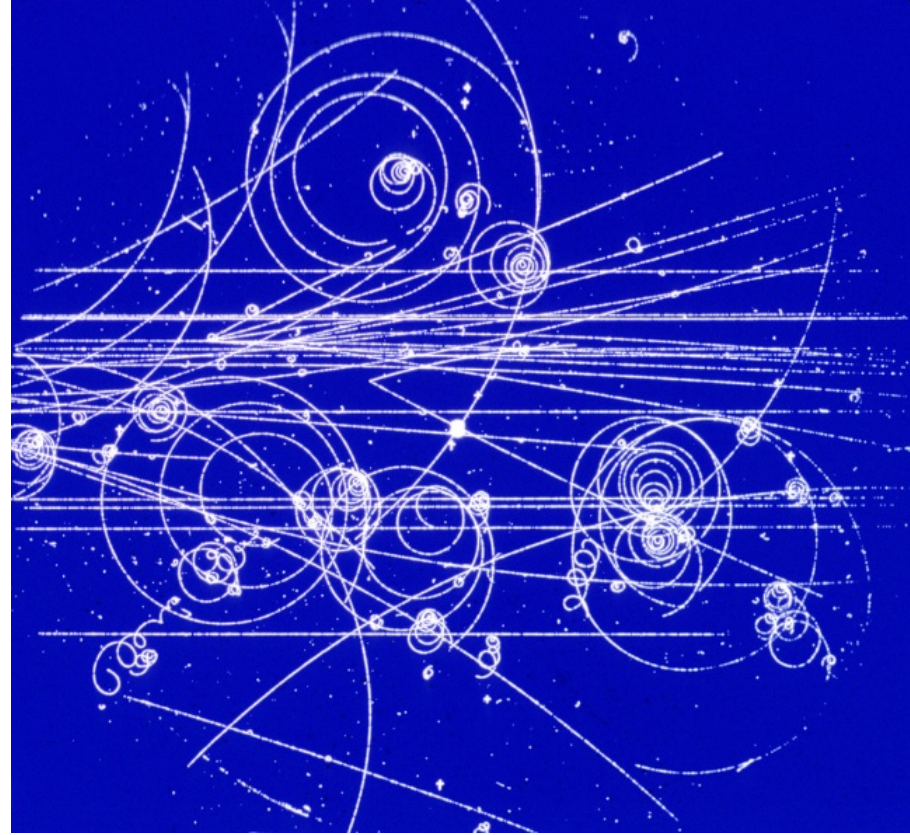
- Un fotone con energia superiore a 1 MeV colpisce un nucleo di piombo.
- Sparisce il fotone e viene creata una coppia di particelle elettrone-positrone.

Oggi, noi conosciamo più di duecento particelle, la maggior parte delle quali vengono create artificialmente in processi d'urto e vivono solo per un intervallo di tempo estremamente breve, dopo il quale si disintegrano nuovamente in protoni, neutroni ed elettroni.



È quindi del tutto evidente che queste particelle dalla vita così breve rappresentano soltanto forme transitorie di processi dinamici.

Nonostante la loro vita estremamente breve, non solo è possibile rivelare l'esistenza di queste particelle e misurarne le proprietà, ma addirittura si può fare in modo che lascino delle tracce, prodotte nelle cosiddette camere a bolle, che possono essere fotografate.



Le più importanti domande che ci poniamo nei confronti di queste forme, o particelle, sono le seguenti. Quali sono i loro caratteri distintivi? Sono composte e, se lo sono, da che cosa sono composte? In quale modo interagiscono l'una con l'altra, cioè quali sono le forze che agiscono tra loro? Infine, se le particelle stesse sono processi, di quali tipi di processi si tratta? Siamo diventati consapevoli che nella fisica delle particelle tutte queste domande sono inscindibilmente connesse.

La comprensione delle particelle elementari, delle loro proprietà e delle loro interazioni è lo scopo principale della moderna fisica fondamentale.

LA SCOPERTA DEL POSITONE: INIZIO DELLA FISICA DELLE PARTICELLE

Nel suo famoso articolo, pubblicato nel 1930, Dirac formulò una nuova equazione che fondeva meccanica quantistica e relatività per descrivere il comportamento degli elettroni.

Pur essendo veramente geniale come concezione, l'equazione di Dirac portò, immediatamente, ad una seria complicazione, perché ammetteva la possibilità matematica dell'esistenza di due mondi, una simmetria tra il nostro mondo, fatto di **materia**, ed uno strano mondo, fatto di **antimateria**.

Questa simmetria tra materia e antimateria doveva implicare che per ogni particella doveva esistere un'antiparticella con massa uguale e carica opposta.

Studiando i raggi cosmici, flusso di particelle molto energetiche provenienti dallo spazio, nel 1932 il fisico statunitense Anderson scoprì la presenza di una particella della stessa massa dell'elettrone, ma carica di segno opposto.

Era stato scoperto il **positone**, l'antiparticella dell'elettrone (una particella con la stessa massa dell'elettrone ma di segno positivo).

Lo schema valido fino agli inizi degli Trenta del XX secolo, secondo il quale la materia conosciuta poteva essere descritta mediante quattro particelle considerate elementari (protone, elettrone, neutrone e fotone), cominciava a mostrare delle crepe. Era iniziata l'era della fisica delle particelle elementari.

Negli anni seguenti sono state poi osservate sperimentalmente le antiparticelle del protone (1955, per merito di **Segrè**, 1905-1989, Premio Nobel e **Chamberlain**, 1920–2006, Premio Nobel), e del neutrone (1956, per merito dei ricercatori del Bevatron di Berkeley)

Nel 1936 lo stesso Anderson identificò, sempre nella radiazione cosmica, il “fratello maggiore” dell'elettrone, ossia una particella con massa circa 200 volte maggiore di quella dell'elettrone e stessa carica. La carica fu chiamata **muone** (indicata con il simbolo μ^-).

I raggi cosmici si dimostrarono fonte di grandi scoperte perché nel 1947 **Occhialini** (1907-1933), **Lattes** (1924-2005) e **Powell** scoprirono in essi la presenza di una particella, il **pione** (o mesone π), di massa quasi sette volte inferiore a quella del protone.

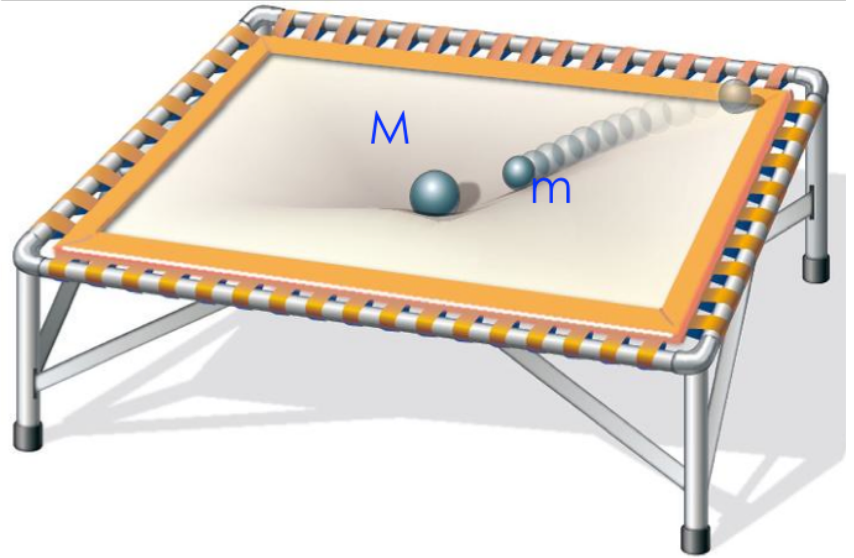
Dobbiamo aspettare il 1975 affinché si scoprisse una particella, il **tauone**, con le stesse caratteristiche generali dell'elettrone e del muone, ma con massa molto maggiore (circa 3500 volte quella dell'elettrone).

La costruzione dei grandi acceleratori, sfruttando l'equivalenza massa-energia, ha incrementato notevolmente l'insieme delle particelle conosciute. Dalla collisione ad altissima energia fra corpuscoli si possono ottenere, nel rispetto di alcune leggi di conservazione, altri corpuscoli.

E non solo, per ogni tipo di particella vi è un corpuscolo, l'antiparticella, identico per quanto riguarda la massa e la vita media, ma opposto per quanto riguarda alcune proprietà come per esempio la carica elettrica. L'accoppiamento simmetrico particella-antiparticella è stato sistematicamente verificato in tutti gli esperimenti ad alta energia.

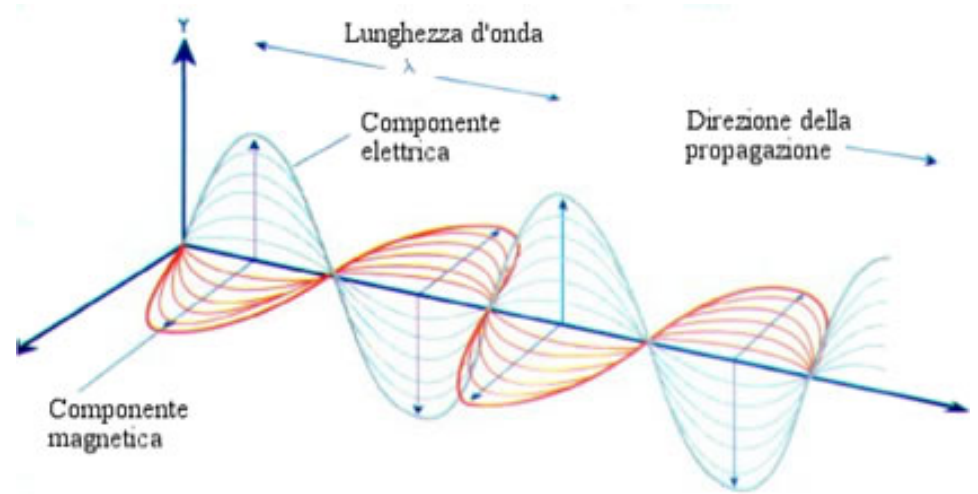
LE INTERAZIONI FONDAMENTALI TRA LE PARTICELLE

Nella concezione classica, sia il campo gravitazionale che il campo elettromagnetico, sono considerati come regioni di spazio modificate dalla presenza di una massa o di una carica e in cui si sentono gli effetti della forza gravitazionale o elettromagnetica.



Una massa M modifica lo spazio che la circonda. Lo spazio modificato è in grado di esercitare una forza su un altro corpo m che si trova in un suo punto.

L'effetto si propaga come onde nello spazio, alla velocità della luce.



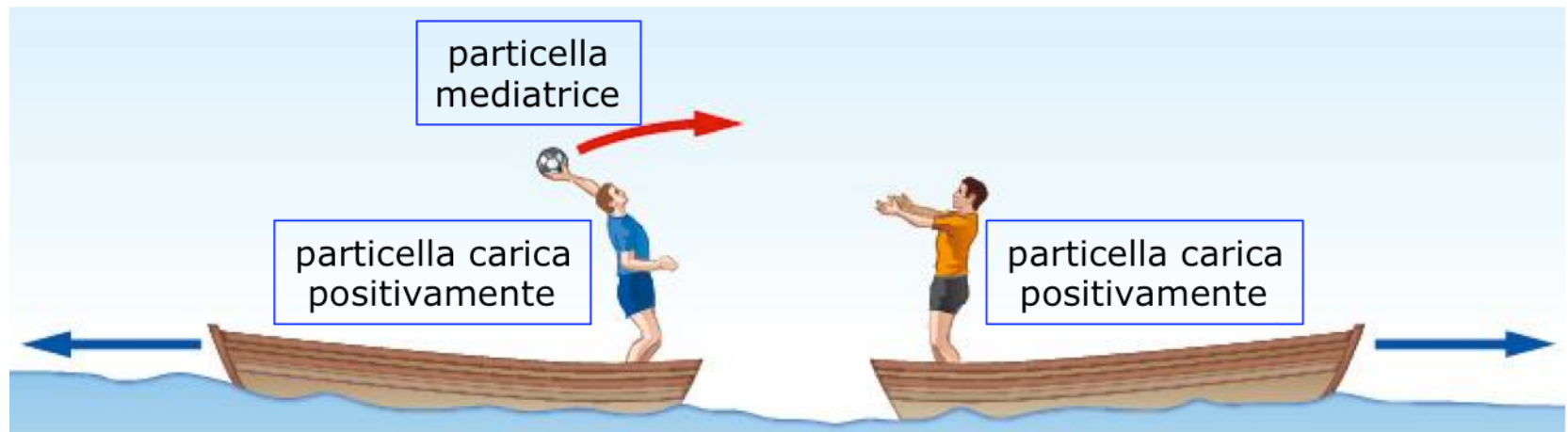
Ma la teoria della relatività e la meccanica quantistica hanno modificato drasticamente non solo la nostra concezione delle particelle, ma anche la nostra rappresentazione delle forze che agiscono tra di esse.

Per cui, negli anni Quaranta del XX secolo, è stata portata a compimento la **teoria relativistica dei campi quantizzati** (**QED, l'elettrodinamica quantistica**).

Una teoria che, coniugando relatività ristretta e meccanica quantistica, descrive le interazioni tra le particelle subatomiche.

In una descrizione relativistica delle interazioni, la forza tra particelle è rappresentata come scambio di una particella mediatrice della forza, chiamata **quanto mediatore** o *bosone vettore*.

In realtà le particelle mediatrici della forza non sono delle vere e proprie particelle, bensì sono particelle virtuali per via della loro brevissima esistenza, che non è possibile rilevare con nessun strumento di misura.



Lo scambio del pallone (quanto mediatore) causa l'allontanamento delle barche (particelle cariche), producendo lo stesso effetto di una forza repulsiva.

In termini di fisica classica, diremmo che i protoni esercitano l'uno sull'altro una forza repulsiva. Secondo la teoria dei campi essi semplicemente interagiscono mediante lo scambio di fotoni (le particelle mediatrici della forza elettromagnetica), e la forza non è altro che l'effetto macroscopico collettivo di questi ripetuti scambi di fotoni.

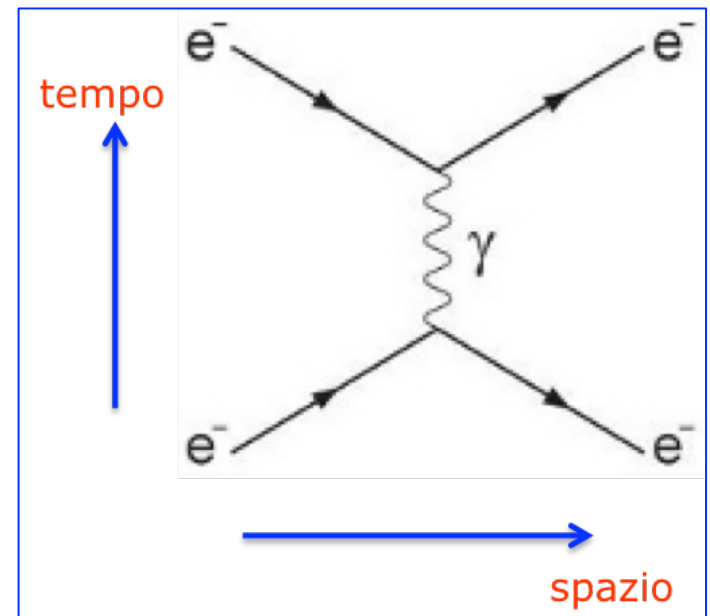
Il concetto di forza perciò non ha più alcuna utilità nella fisica subatomica: è un concetto classico che noi associamo all'idea newtoniana di forza che agisce a distanza. Nel mondo subatomico non ci sono forze di questo tipo, ma solo interazioni tra particelle, mediate attraverso campi, cioè, attraverso altre particelle.

Il concetto di **particella mediatrice della forza** è una conseguenza del carattere quadridimensionale dello spaziotempo del mondo subatomico, e permette di collegare le forze tra i costituenti della materia alle proprietà di altri costituenti della materia, e quindi **unifica** i due concetti, **forza e materia**, che erano sembrati così fondamentalmente diversi fin dai tempi degli atomisti greci.

Oggi gli esperimenti mostrano che forza e materia hanno la loro comune origine nelle configurazioni dinamiche che chiamiamo particelle. Il fatto che le particelle interagiscano attraverso forze che si manifestano come scambio di altre particelle è una ragione ulteriore per cui il mondo subatomico non può essere scomposto in parti costituenti.

Le forze fondamentali in natura sono quattro: gravitazionale, elettromagnetica, nucleare forte, nucleare debole. La teoria dei campi prevede che ognuna di queste interazioni è mediata da una specifica particella mediatrice caratterizzata da un raggio d'azione inversamente proporzionale alla massa della particella stessa.

Questa nuova concezione della forza può sembrare difficile da capire, ma diventa molto più chiara quando il processo di scambio è rappresentato in un diagramma spazio-tempo (diagramma di Feynman).



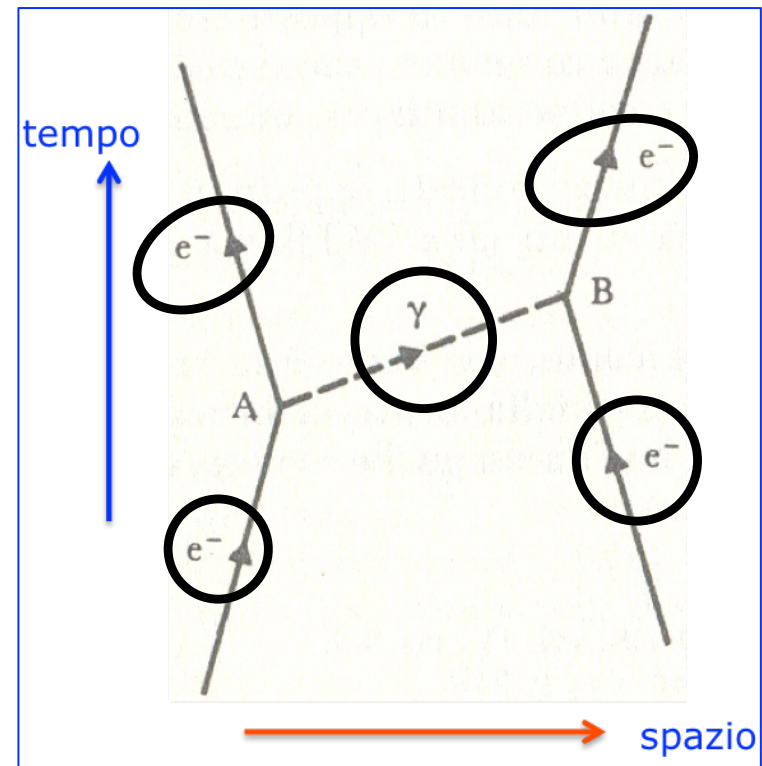
Un processo simile può essere concepito solo in una teoria relativistica nella quale le particelle non sono viste come oggetti indistruttibili, ma piuttosto come figure dinamiche che coinvolgono una certa quantità di energia, che può essere ridistribuita quando si formano nuove figure.

È importante rendersi conto che a ciascun diagramma di Feynman è associato a una espressione matematica che permette di calcolare la probabilità che si verifichi il corrispondente processo. Quindi questi processi, seguendo le leggi della meccanica quantistica, sono tendenze, ovvero probabilità, piuttosto che realtà effettive.

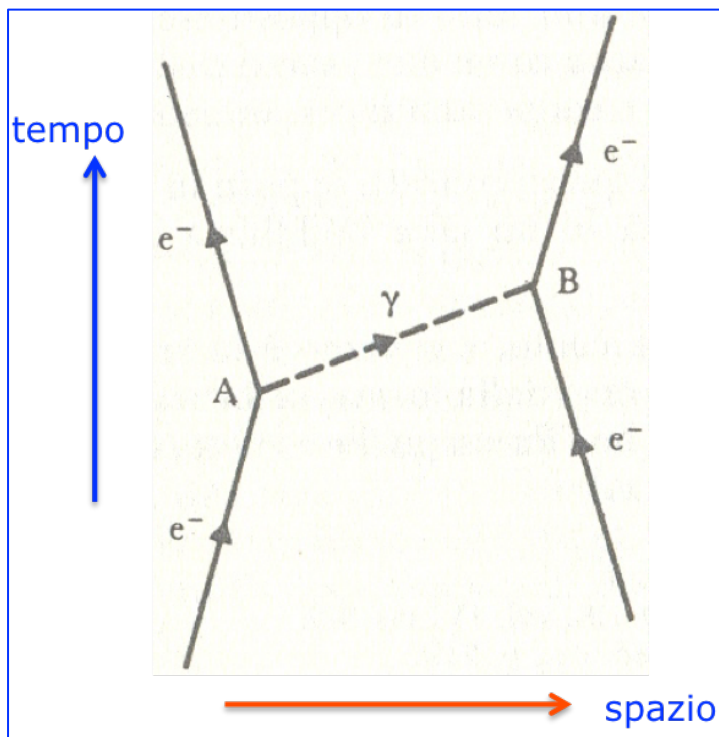
Interazione elettromagnetica

L'interazione elettromagnetica è responsabile dell'interazione tra particelle cariche.

I quanti mediatori dell'interazione elettromagnetica sono i fotoni, che, avendo massa nulla, hanno un raggio d'azione infinito.



Nel diagramma sono rappresentati due elettroni che si avvicinano tra loro; uno di essi emette il fotone γ nel punto A, l'altro lo assorbe nel punto B.



Dopo avere emesso il fotone, il primo elettrone modifica la sua direzione e la sua velocità e così pure fa il secondo elettrone quando assorbe il fotone. Il tutto avviene senza entrare in contatto.

Infine, i due elettroni si allontanano rapidamente, essendosi respinti l'un l'altro attraverso lo scambio del fotone. L'interazione completa tra gli elettroni comporterà una serie di scambi di fotoni, e come effetto finale gli elettroni sembreranno deviare l'un l'altro lungo curve continue.

La durata temporale dell'interazione elettromagnetica fra i due elettroni dipende dall'energia del fotone virtuale scambiato. Nel mondo subatomico l'emissione del fotone da parte di un elettrone isolato può avvenire come conseguenza del principio di indeterminazione di Heisenberg nella forma:

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar$$

Per esempio, per un fotone γ ($\Delta E = 1 \text{ MeV} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$) si ha:

$$\underline{\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E} = \frac{1,055 \cdot 10^{-34}}{1,6 \cdot 10^{-13}} = \underline{6,6 \cdot 10^{-22} \text{ s}}}$$

Da un punto di vista classico il fenomeno non dovrebbe avvenire perché in corrispondenza di A (emissione del fotone) e B (assorbimento del fotone) sarebbero violati i principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

Invece, da un punto di vista quantistico il fenomeno avviene, purché il fotone virtuale esista solo per il brevissimo tempo Δt .

In sostanza, l'energia presa in prestito dal fotone virtuale affinché possa mediare il processo di interazione deve essere restituita dopo un tempo pari a Δt , dopodiché viene riassorbito dall'altro elettrone.

Quindi, l'emissione del fotone comporta una violazione del principio di conservazione dell'energia per breve tempo, ma il principio viene rispettato nel processo complessivo di interazione tra i due elettroni.

In definitiva, e questo vale per tutte e quattro le interazioni fondamentali, il principio d'indeterminazione permette la non conservazione dell'energia per un intervallo di tempo:

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E}$$

L'emissione o il riassorbimento della particella mediatrice di energia ΔE all'interno di un intervallo di tempo che soddisfa questa condizione, in principio non è misurabile. Nessuno di questi processi da solo può rappresentare un fenomeno fisico osservabile

Interazione nucleare forte

L'interazione nucleare forte agisce all'interno dei nuclei atomici e tiene assieme protoni e neutroni.

Se la teoria dei campi prevede che tutte le interazioni debbano avvenire attraverso lo scambio di particelle, allora il fisico giapponese **Yukawa** (1907–1981; Premio Nobel), in analogia con la forza elettromagnetica, nel 1935 intuì che anche la forza nucleare forte dovesse essere trasmessa da un quanto mediatore.

In base a considerazioni teoriche, questa nuova particella avrebbe dovuto avere una massa intermedia fra quella dell'elettrone e quella del protone.

Infatti, applicando ancora una volta il principio di indeterminazione tra il tempo e l'energia e sapendo dai dati sperimentali che il raggio di azione delle forze nucleari era dell'ordine del fermi ($1\text{fm}=10^{-15}\text{ m}$), Yukawa stimò l'ordine di grandezza della massa del bosone continuamente emesso e riassorbito dai nucleoni nel nucleo.

Se il range del bosone scambiato deve essere 1-2 fm, ponendo:

$$R = c\Delta t \quad \Delta E = mc^2$$

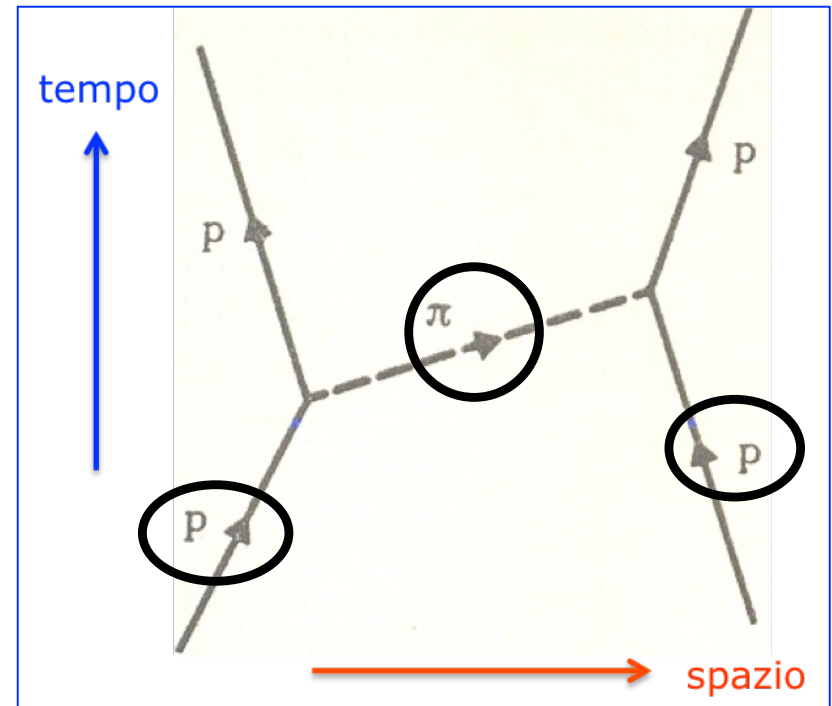
per rispettare il principio di Heisenberg dovremo avere:

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \Rightarrow Mc^2 \frac{R}{c} \approx \hbar \Rightarrow Mc^2 \approx \frac{\hbar c}{R} = 100 \div 200 \text{ MeV}$$

Effettivamente la massa del bosone di Yukawa è intermedia tra quella dell'elettrone e quella del protone, per cui venne chiamato **mesone** (dal greco "che sta nel mezzo").

Una decina d'anni dopo la previsione di Yukawa, le particelle ritenute responsabili della trasmissione della forza nucleare forte furono sperimentalmente scoperte nella radiazione cosmica: si trattava dei *mesoni* π , detti anche *pioni*, i quali presentavano un marcato accoppiamento con i nucleoni.

In realtà, si ritiene che i mediatori delle interazioni forti siano delle particelle chiamate gluoni (dall'inglese *glue*, "colla").



La durata dell'interazione forte è dell'ordine di 10^{-23} s.

Interazione nucleare debole

L'interazione nucleare debole è responsabile di tutta una serie di processi: decadimento beta, disintegrazione di molte particelle instabili, e perfino dell'interazione dei neutrini (particelle di massa molto vicina a zero) con la materia.

Dopo i brillanti successi nello studio delle prime due forze fondamentali, apparve subito logico estendere anche all'interazione debole l'ipotesi delle particelle mediatrici.

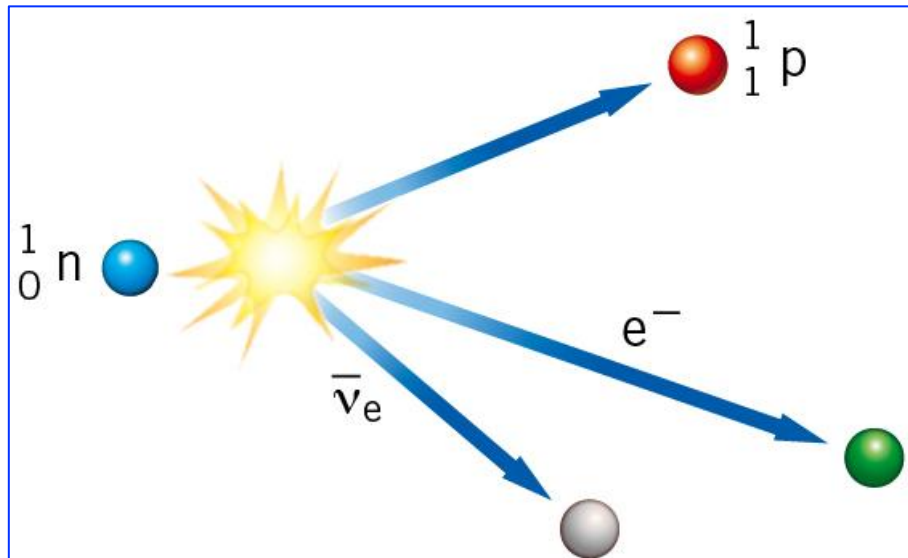
Essendo il raggio di questa interazione ancora più piccolo (dell'ordine di 10^{-18} m) di quello dell'interazione nucleare forte, la massa dei quanti mediatori doveva essere molto grande.

Creare in laboratorio queste massicce particelle, chiamate **bosoni W^+ e W^-** (da *weak interaction*), significava realizzare esperimenti con elevate energie in gioco. Nel 1983, grazie a uno degli acceleratori di particelle del CERN, il Superprotosincrotrone, un gruppo di ricercatori diretto dal fisico italiano **Rubbia** (1934; Premio Nobel), è riuscito finalmente a individuare i mediatori dell'interazione debole.

Anzi, ne è stato individuato anche un terzo, il **bosone Z^0** , elettricamente neutro, che ha rappresentato la prova sperimentale che l'interazione elettromagnetica e quella debole, nonostante le loro profonde differenze, in realtà rappresentano manifestazioni diverse di un'unica interazione chiamata **elettrodebole**.

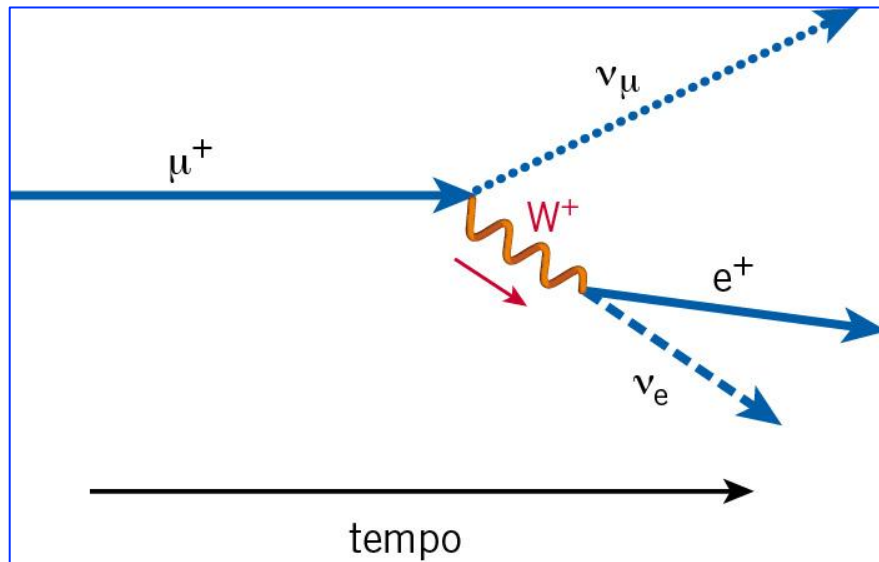
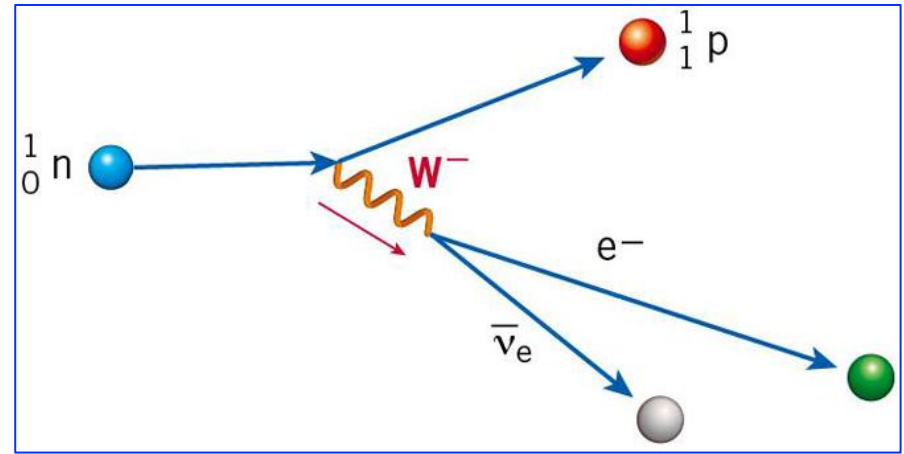
La teoria elettrodebole è stata elaborata negli anni sessanta del XX secolo dai premi nobel **Sheldon** (1932), **Weinberg** (1933) e **Salam** (1926-1996), e prevedeva appunto l'esistenza dei quanti mediatori W^+ , W^- , Z^0 .

Grazie a queste particelle mediatrici, la descrizione di alcuni processi diventa chiara.



Nel decadimento beta di un neutrone che si trasforma in protone, l'emissione della coppia elettrone-antineutrino è causata dall'interazione debole mediata dalla particella di campo W^- .

Questa particella virtuale (W^-) deve avere carica negativa perché, dopo una brevissima esistenza, si trasforma in un elettrone (negativo) e un antineutrino.



Il bosone W^+ , invece, produce il decadimento del muone e del tauone. In figura è rappresentata la dinamica del processo nel caso del muone positivo.

Poiché le particelle mediatrici W e Z sono particolarmente massive (circa 80 e 90 GeV/c²), la vita media di questi bosoni è di circa 3×10^{-24} s. Questo aspetto limita considerevolmente il raggio d'azione dell'interazione debole (che è dell'ordine di 10^{-18} m).

La debole intensità dell'interazione debole fa sì che i decadimenti in cui è coinvolta siano più lenti di quelli elettromagnetici o di quelli relativi all'interazione forte.

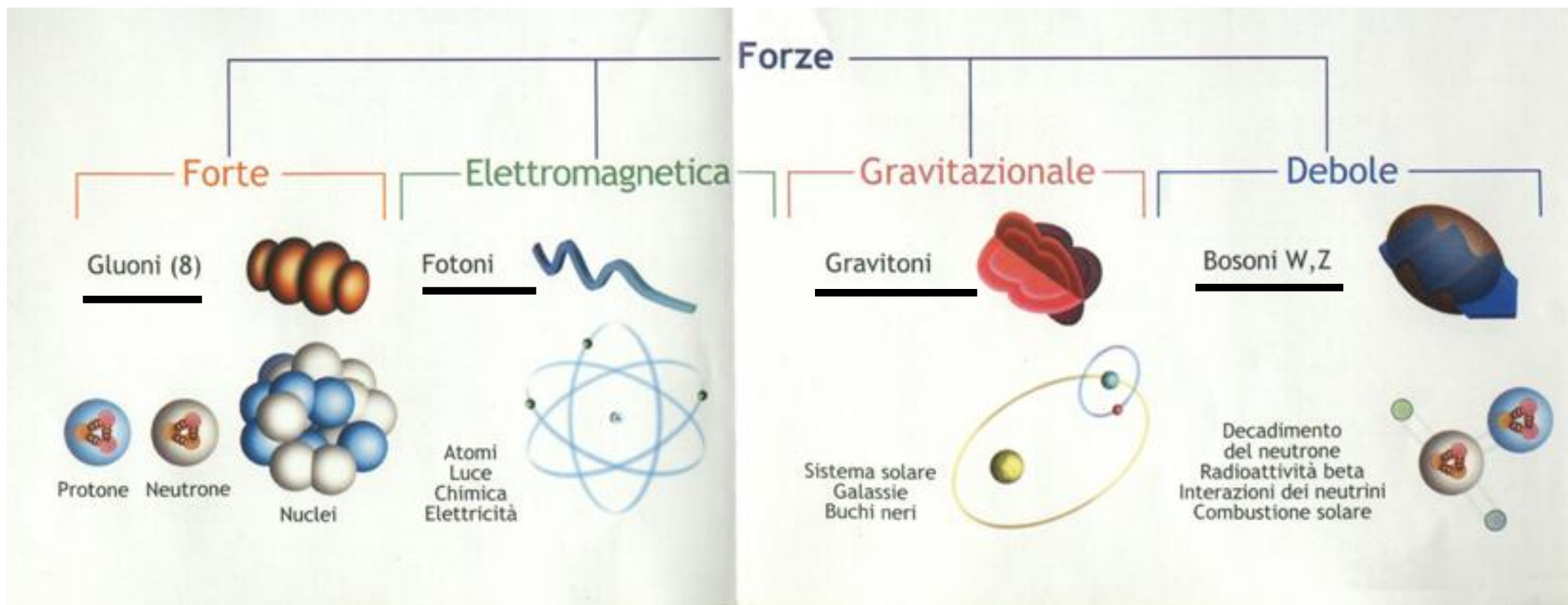
Ad esempio, un pione neutro in un processo di decadimento elettromagnetico decade in due fotoni in 10^{-16} s, mentre un pione carico subisce un decadimento debole in 10^{-8} s.

Interazione gravitazionale

Come logica conclusione **l'interazione gravitazionale** dovrebbe essere trasmessa, per giustificare il suo raggio d'azione infinito, da un quanto di massa nulla, chiamato **gravitone**.

In analogia con il fotone, questa ipotetica particella sarebbe un *luxone*, cioè un oggetto che viaggia sempre alla velocità della luce. Purtroppo, il mediatore delle azioni gravitazionali non è stato finora rivelato. A causa del carattere della forza, di gran lunga la più debole fra quelle note e trascurabile in tutti i processi subatomici, i gravitoni, se esistono, faranno certamente "disperare" i ricercatori ancora per molti anni.

riepilogo



FORZA	RAGGIO D'AZIONE (m)	INTENSITA RELATIVA	BOSONI VETTORI	MASSA A RIPOSO (GeV/c ²)	SPIN	CARICA ELETTRICA
Forte	10 ⁻¹⁵ m	1	gluoni	0	1	0
Debole	10 ⁻¹⁸ m	10 ⁻⁶	W ⁺ , W ⁻ , Z ⁰	80,80,91	1	+1, -1, 0
Elettromagnetica	infinito	10 ⁻²	fotone	0	1	0
Gravitazionale	infinito	10 ⁻³⁸	gravitone	0	2	0

CLASSIFICAZIONE DELLE PARTICELLE

Abbandonata l'idea di considerare le particelle in senso classico, ossia assimilabili ad oggetti che occupano uno spazio, oggi vengono definite attraverso determinate grandezze fisiche che le caratterizzano, come la massa, la carica elettrica, lo spin, la vita media, e altre proprietà che introdurremo in seguito.

Esistono particelle stabili (come il fotone), ossia che non decadono in particelle più leggere e per le quali la vita media è praticamente infinita, e instabili (quasi tutte le particelle note con vite medie più o meno brevi) che invece si disintegrano in particelle meno massive.

La stabilità del fotone è dovuta al fatto che ha una massa a riposo m_0 nulla. Infatti, per la conservazione massa-energia, una particella può decadere solo in particelle di massa più piccola. Ma se la particella originaria ha massa nulla, da essa non possono scaturire particelle più leggere.

Però, massa a riposo nulla non significa energia nulla per il fotone o per tutte le particelle a massa nulla. Le particelle prive di massa possiedono energia e si muovono tutte alla velocità della luce.

Di fronte alla miriade di particelle note, e di quelle ancora da scoprire, i fisici hanno cercato di suddividerle in base alle forze fondamentali con cui interagiscono tra di loro.

La classificazione adottata è la seguente:

- **leptoni**, interagenti attraverso la **forza nucleare debole** e comprendenti l'elettrone, il muone, il tau, i tre tipi di neutrini (elettronico, muonico e tauonico) e le corrispondenti antiparticelle. Hanno spin semintero e appartengono, pertanto, alla famiglia dei fermioni. I leptoni carichi più pesanti (muone, tauone e le loro antiparticelle) decadono in quelli più leggeri. Al contrario, gli elettroni (ma anche i neutrini) non hanno la massa sufficiente per decadere in particelle più leggere e rappresentano, pertanto, le componenti stabili di tutti gli atomi dell'universo.

- **adroni**, interagenti attraverso l'interazione nucleare forte e suddivisi nel sottogruppo dei **mesoni**, aventi spin zero o intero, e in quello dei **barioni**, di spin semintero. Gli adroni sono costituiti a loro volta da altre particelle chiamata **quark**.
- **bosoni intermedi**, comprendono il fotone e le particelle mediatrici dell'interazione debole.

Mentre i leptoni possono interagire anche con gli adroni attraverso l'interazione debole, gli adroni possono interagire solo tra di loro attraverso l'interazione forte.

Ovviamente tutte le particelle cariche, siano esse leptoni, adroni o bosoni intermedi, possono interagire attraverso l'interazione elettromagnetica.

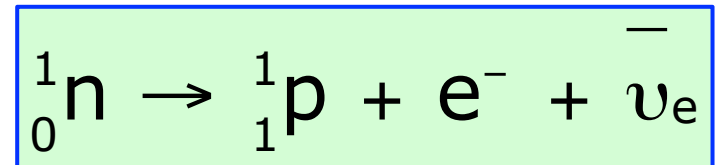
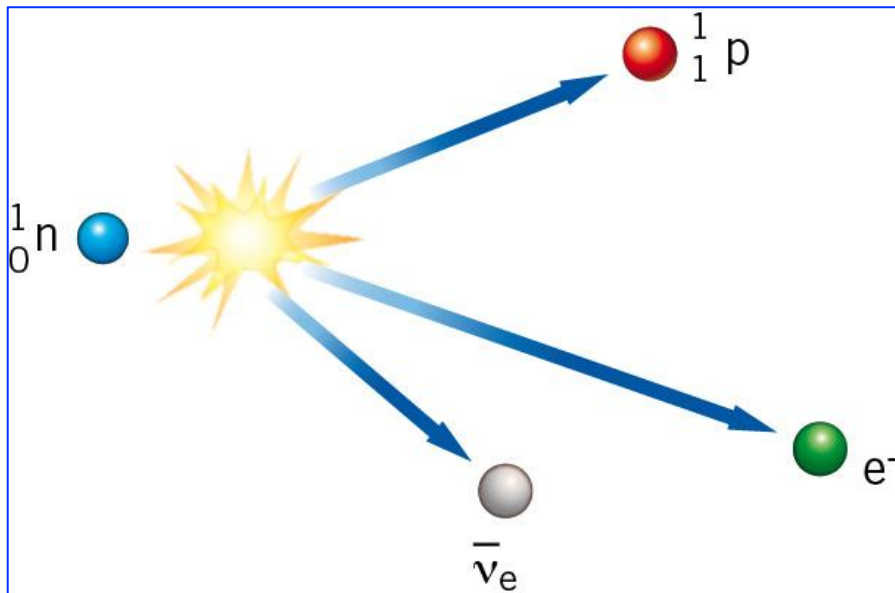
IL NEUTRINO: LA PARTICELLA PIU DIFFUSA DELL'UNIVERSO

Per le sue proprietà ancora misteriose, ed essendo la particella più diffusa nell'universo, il neutrino merita qualche attenzione in più.

Il neutrino è una particella elementare di massa piccolissima e carica elettrica nulla. Appartiene al gruppo dei leptoni e alla famiglia dei fermioni. Dopo esserne stato considerato per lungo tempo privo, alcuni esperimenti hanno mostrato che ha una massa da 100000 a 1 milione di volte inferiore a quella dell'elettrone, con valore più probabile intorno a $0,05 \text{ eV}/c^2$.

I neutrini interagiscono solo con la forza nucleare debole e la forza gravitazionale, non risentendo né dell'interazione nucleare forte né dell'interazione elettromagnetica.

L'esistenza del neutrino venne postulata nel 1930 da Pauli per spiegare lo spettro continuo del decadimento beta.



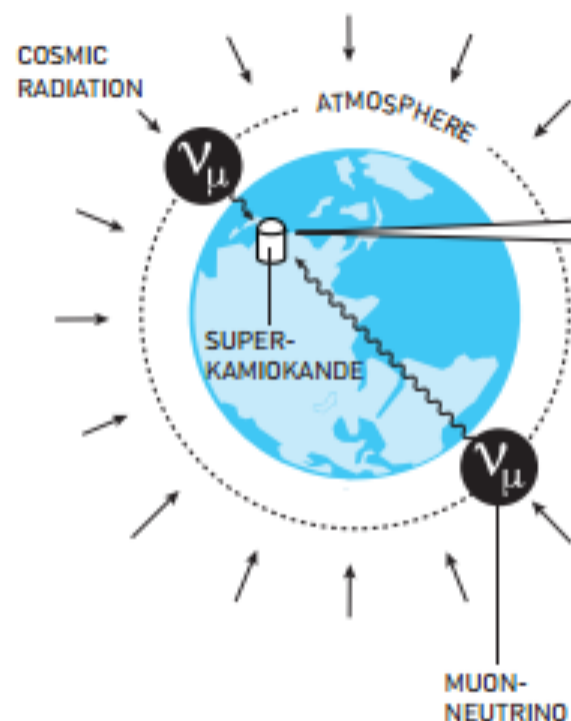
Pauli si rese conto che nel decadimento beta non veniva soddisfatto il principio di conservazione dell'energia, per cui ipotizzò che tra i prodotti del processo doveva esserci, oltre al protone e all'elettrone, anche un'altra particella priva di carica e di massa praticamente nulla.

Il nome di neutrino, per il fatto che avesse una massa piccolissima e carica nulla, gli fu dato da Fermi. La reale esistenza del neutrino venne verificata solo nel 1956 dai fisici **Cowan** (1909-1974) e **Reines** (1918-1998, Premio Nobel). È giusto ricordare che anche in nome di Cowan fu assegnato il Nobel a Reines nel 1995.

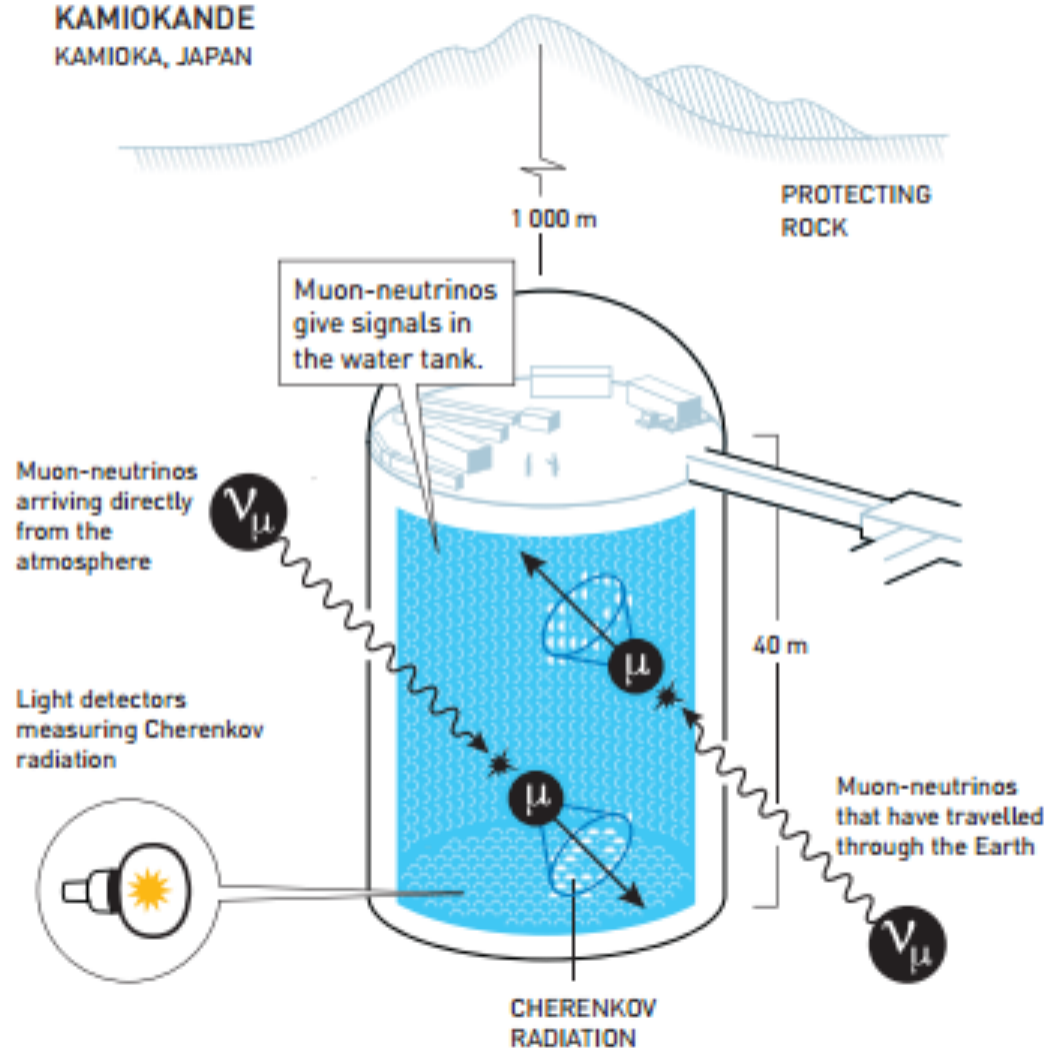
Poiché il neutrino interagisce debolmente, quando si muove attraverso la materia la sua probabilità di interazione è molto bassa. Occorrerebbe un ipotetico muro in piombo spesso un anno luce per bloccare la metà dei neutrini che lo attraversano.

I rivelatori di neutrini, pertanto, devono essere costruiti sotto terra, per essere schermati dalla radiazione cosmica che produrrebbe falsi segnali, e devono contenere centinaia di tonnellate di materiale scintillatore per aumentare la probabilità che essi interagiscano con la materia.

NEUTRINOS FROM COSMIC RADIATION



SUPER-KAMIOKANDE KAMIOKA, JAPAN

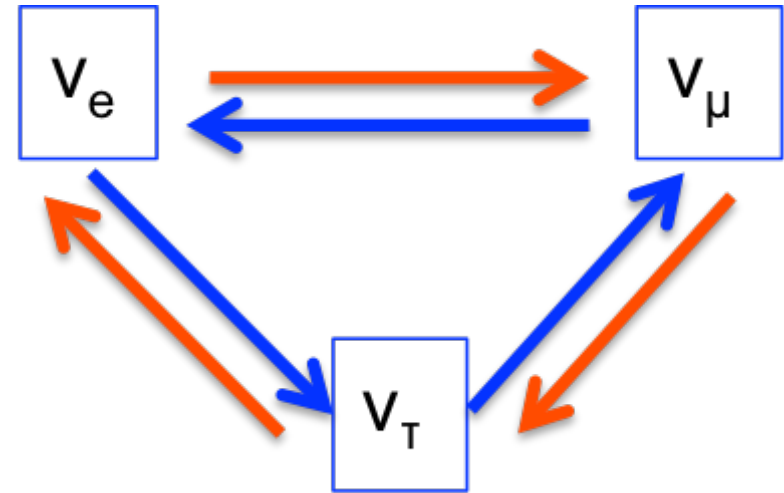


Oltre al neutrino elettronico (associato all'elettrone), esiste il neutrino muonico (associato al muone) e il neutrino tauonico (associato al tauone).

I leptoni si raggruppano in tre famiglie, ciascuna delle quali è formata da un leptone carico e da un leptone neutro. Abbiamo quindi la famiglia dell'elettrone, del muone e del tauone.

Leptoni	Carica elettrica → 0 Spin → $\frac{1}{2}$ $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ ν_e neutrino elettronico	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ ν_μ neutrino muonico	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ ν_τ neutrino tauonico ← Massa
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elettrone	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muone	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tauone

Da diversi esperimenti è emersa l'evidenza di un effetto quantistico, noto come **oscillazione neutrinica**, che fa mutare la particella da una "famiglia" ad un'altra, suggerendo che questa particella possieda una massa, così come già teorizzato dal fisico italiano **Pontecorvo** (1913-1993) nel 1969.



Infatti, il calcolo delle proporzioni tra i neutrini muonici, elettronici tauonici, assieme ai loro antineutrini, hanno mostrato una notevole differenza fra valori teorici e sperimentali.

Per esempio, sulla Terra si sono registrati solo $1/3$ dei neutrini elettronici, previsti dalla teoria, emessi dalle reazioni nucleari del Sole.

Il difetto dei neutrini solari, essendo troppo grande per essere attribuito ad errori sperimentali, è dovuto, quindi, all'oscillazione neutrinica: durante il loro viaggio dal Sole alla Terra, alcuni neutrini elettronici si trasformano in muonici e tauonici.

In varie parti del mondo (CERN di Ginevra, Laboratori del Gran Sasso in Italia, i rivelatori del Super-Kamiokande in Giappone, ecc.) sono in atto (o si sono compiuti) esperimenti per determinare la massa dei neutrini.

Ritenendo valida la teoria dell'oscillazione neutrinica, tali esperimenti rappresentano una prova, seppur indiretta, che i neutrini hanno una massa. Si stima che abbia un valore di $0,5 \text{ eV}/c^2$, piccolissima, ma non zero. Si pensi che l'elettrone è un milione di volte più "pesante".

LEGGI DI CONSERVAZIONE NELLA FISICA DELLE PARTICELLE

Conosciamo già alcuni importanti principi di conservazione (massa-energia, quantità di moto, momento angolare) grazie ai quali siamo riusciti ad ottenere importanti informazioni anche nel mondo delle particelle. Adesso vogliamo vedere se esistono altre grandezze fisiche che mantengono immutati nel tempo i loro valori.

La maggior parte delle particelle, specie quelle scoperte negli ultimi decenni, è instabile. Infatti decadono per successivi stadi finché non si perviene alle componenti stabili dell'universo.

E come la massa, la carica e lo spin, anche la vita media è una caratteristica peculiare delle particelle instabili e delle corrispondenti antiparticelle.

Tutte le particelle instabili tendono a trasformarsi in protoni o in elettroni (con il neutrino associato), e lo fanno attraverso due canali: il **canale barionico** (la via che conduce al protone poiché è percorsa dai barioni) e il **canale leptonic** (la via che porta all'elettrone essendo seguita dai leptoni).

Sulla base delle teorie più accreditate, da un barione può nascere solo un barione e da un leptone solo una generazione leptonica.

Dunque, è logico pensare che, durante i processi di decadimento verso le particelle stabili, oltre alle tradizionali grandezze che si conservano nella fisica classica (massa-energia, quantità di moto e momento angolare), qualche altro parametro debba rimanere costante.

Per disciplinare i due canali di scorrimento, dapprima Weyl e **Stuckelberg** (1905-1984) e successivamente Wigner, introdussero, intorno agli anni Trenta del XX secolo, due nuovi numeri quantici: quello relativo ai barioni, chiamato *numero barionico B* , e quello relativo ai leptoni, chiamato *numero leptonico L* .

Questi parametri possono assumere solo valori interi:

$B=+1$ per i barioni $B=-1$ per gli antibarioni

$B=0$ per tutte le altre particelle

$L=+1$ per i leptoni $L=-1$ per gli antileptoni

$L=0$ per le altre particelle.

La legge di conservazione associata a questi numeri postula che:

**PRINCIPIO CONSERVAZIONE NUMERO
BARIONICO E LEPTONICO**

In ogni processo fisico la somma dei numeri barionici e la somma dei numeri leptonici devono sempre conservarsi.

Ad esempio, nel decadimento beta:

$$\begin{array}{l} n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e \\ L : 0 = 0 + 1 - 1 \end{array}$$

Sperimentalmente si dimostra che il numero leptonico si conserva separatamente per ogni famiglia di leptoni, per cui si definiscono tre numeri leptonici: L_e , L_μ , L_τ .

La conservazione del numero barionico consente di giustificare soprattutto la stabilità del protone. Infatti, consideriamo il seguente ipotetico processo di decadimento del protone:

$$p \rightarrow e^{+} + \gamma$$

Questo processo di decadimento non infrange nessuna legge di conservazione, eppure non avviene mai (per fortuna, altrimenti tutti i protoni dell'universo si trasformerebbero gradualmente in positoni, con conseguenze disastrose).

Pertanto, l'"impossibilità" del processo viene spiegata con il fatto che in esso non si conserva il numero barionico:

$$\begin{array}{l} p \rightarrow e^+ + \gamma \\ +1 \neq 0 + 0 \end{array}$$

Infine, per quanto riguarda il significato fisico del numero leptonico e barionico, è difficile trovare un'affinità con altre grandezze fisiche che si conservano, come la carica elettrica o l'energia.

Diciamo che le leggi di conservazione del numero leptonico e barionico sono dei concetti che si rivelano utili per rendere ragione del fatto che molti tipi di decadimento o reazioni tra particelle, anche se non sono vietati, semplicemente non si sono mai verificati. In sostanza, sono degli strumenti di contabilità per contraddistinguere i processi finora osservati da quelli mancanti.

Oltre a massa, carica, spin, numero leptonico e barionico, le particelle possiedono altre proprietà intrinseche.

Con la scoperta di nuove particelle, soprattutto dal 1947 al 1953, i fisici si sono accorti che alcune di queste, come il kaone (K) e la sigma (Σ), con massa maggiore dei nucleoni e quasi tutte individuate nella radiazione cosmica e successivamente prodotte mediante le grandi macchine acceleratrici, si comportano in modo anomalo rispetto ai tradizionali nucleoni, elettroni, pioni, ecc.

In particolare, esse compaiono sempre a coppie. Ad esempio, quando un fascio di pioni ad alta energia interagisce in una camera a bolle con un protone, si osserva molto spesso la relazione:

$$\pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+$$

mentre la seguente, pur non infrangendo alcuna legge di conservazione, non si verifica mai:

$$\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + \Sigma^+$$

Per spiegare questo comportamento alquanto sorprendente, diremmo strano, fu avanzata da **Gell-Mann (1929; Premio Nobel)** e **Nishijima (1926-2009)** l'ipotesi che queste particelle, etichettate come "strane", possiedano una nuova proprietà, un ulteriore numero quantico, chiamato **stranezza S**, che ubbidisce a una nuova legge di conservazione:

PRINCIPIO DI CONSERVAZIONE DELLA STRANEZZA

La stranezza si conserva nelle interazioni in cui interviene la forza forte.

Protone, neutrone e pioni hanno $S=0$ (non sono strani), mentre K^+ ha $S=+1$ e Σ^+ ha $S=-1$.

Pertanto il processo precedente è ammesso in quanto si conserva la stranezza:

$$\begin{array}{l} \pi^+ + p \rightarrow K^+ + \Sigma^+ \\ 0 + 0 = +1 -1 \end{array}$$

Mentre l'altro non può avvenire perché non soddisfa il principio di conservazione della stranezza:

$$\begin{array}{l} \pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + \Sigma^+ \\ 0 + 0 \neq 0 -1 \end{array}$$

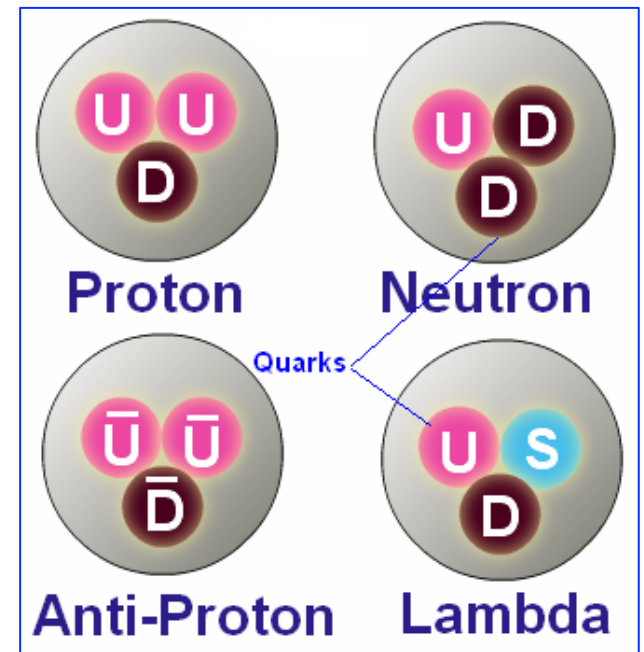
La **stranezza**, e la sua conservazione, non è un artificio concettuale per spiegare certi processi anomali, ma piuttosto deve essere considerata come una **proprietà intrinseca delle particelle** (che possono averla oppure no), al pari dello spin o della carica elettrica.

E come tutti i principi di conservazione, anche quello della stranezza limiti i processi possibili. Fino ad oggi non è stato osservato nessun processo di interazione forte in cui la conservazione della stranezza sia stata violata.

Per mettere in evidenza la sua importanza, vediamo come questo nuovo numero quantico ci guida nella scoperta di importanti regolarità nelle proprietà delle particelle subatomiche.

Le scoperte sempre più numerose di nuove particelle, portò alla necessità di considerare come unità fondamentali della materia un numero molto piccolo di particelle, per cui nel 1964, Gell-Mann e, indipendentemente, **Zweig** (1937), proposero un modello teorico molto suggestivo.

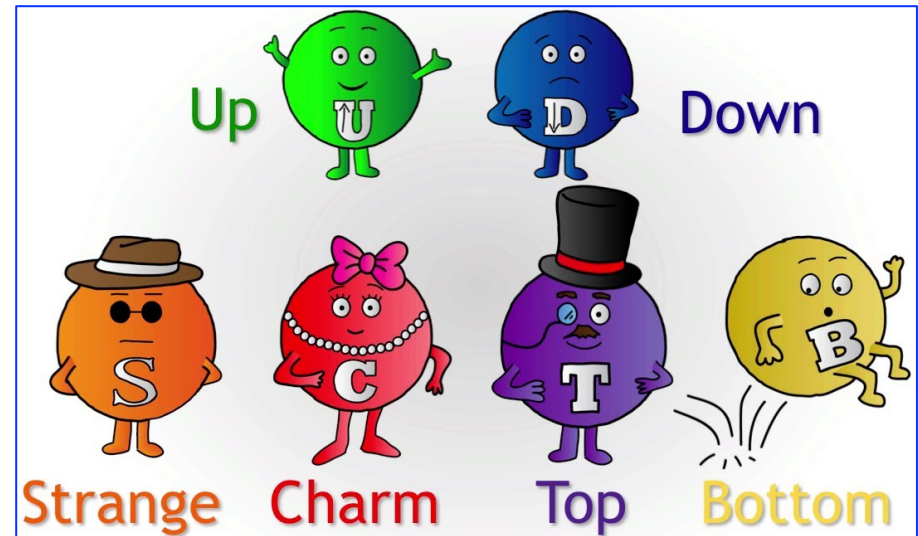
Lo schema concettuale proposto prevede che **ogni adrone** (praticamente la maggior parte delle particelle conosciute), è formato dalla combinazione di tre unità di materia chiamate **quark** e indicate con i simboli u (*up*), d (*down*), s (*strange*).



Il modello con soli tre quark fu messo in crisi dalla scoperta del mesone J/Ψ : questa particella infatti non poteva essere formata dall'iniziale terzetto di quark, in quanto tutte le possibili combinazioni corrispondevano ad altri adroni già noti.

Per trovare un posto alla nuova particella fu ampliato il modello, aggiungendo un quarto quark, chiamato *charm* (fascino) e indicato con la lettera *c*. Per far quadrare i conti della teoria, ci sarebbero voluti tuttavia altri due quark, battezzati con i nomi di *bottom* (basso) o anche *beauty* (bellezza) e *top* (alto) e indicati rispettivamente con i simboli *b* e *t*.

Dopo la scoperta della particella Y, la cui struttura indica chiaramente l'esistenza del quinto quark *b*, restava da trovare il sesto e più sfuggente membro della famiglia dei quark.



La caccia, condotta per lungo tempo, si è conclusa nel 1994 con la scoperta del *top*, caratterizzato da una massa oltre 160 volte più grande di quella del protone. I sei quark non sono stati osservati mai isolatamente.

Naturalmente, insieme alle sei versioni di quark, chiamate anche *sapori*, ci sono le sei versioni di antiquark.

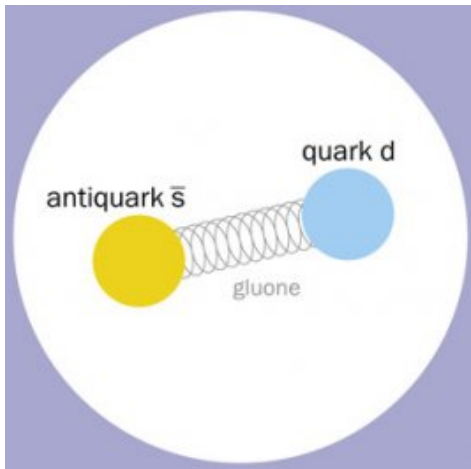
Considerando i leptoni come particelle elementari, gli adroni, avendo una struttura interna formata da quark, si originano secondo la seguente regola:

COMPOSIZIONE A QUARK DEGLI ADRONI

Ogni barione (antibarione) rappresenta uno stato legato formato dalla combinazione di tre quark (antiquark); ogni mesone rappresenta uno stato legato formato dalla combinazione di un quark e di un antiquark.

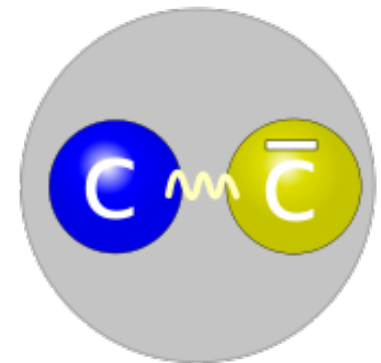
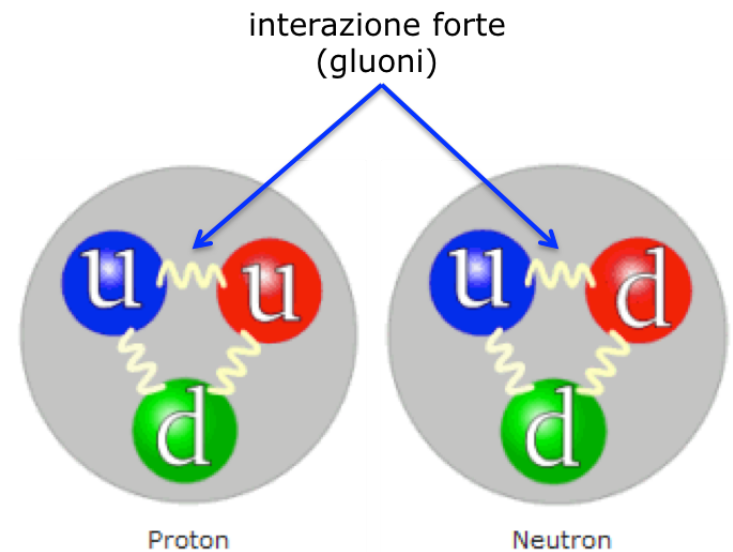
Combinando i quarks secondo questa regola si ottiene sempre una particella nota, e ogni particella, senza nessuna eccezione, è individuata da una diversa combinazione.

I due **quark** più leggeri (*u* e *d*) formano le strutture interne di **protoni** e **neutroni**, i mattoni della materia ordinaria.



Il **quark s** si trova solo nelle particelle con stranezza diversa da zero (come il **mesone K^0**).

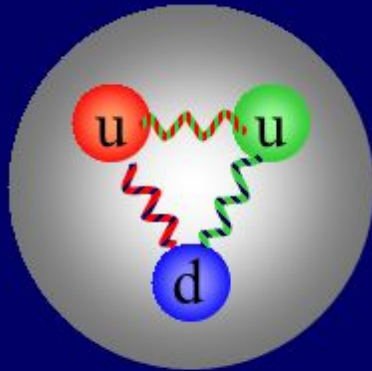
I tre quark più pesanti (*c*, *b*, *t*) si trovano in altre particelle instabili (come la particella J/ψ che è un mesone chiamato charmonio).



Una delle più peculiari proprietà dei quark è la loro **carica elettrica frazionaria** (rispetto al quanto elementare di carica e preso come elemento unitario di riferimento) derivante dal fatto che la carica elettrica di ciascuna particella adronica (barioni o mesoni) è data dalla somma algebrica delle cariche dei quark costituenti.

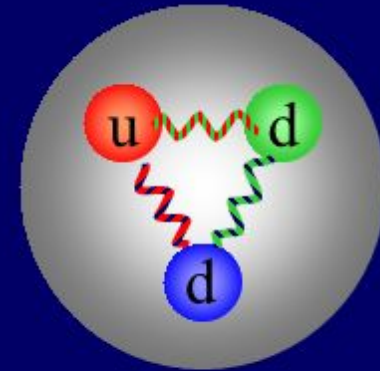
Per esempio, conoscendo la struttura a quark interna del protone (uud) e quella del neutrone (udd), e sapendo che il protone ha carica unitaria e , mentre il neutrone ha carica nulla, per il principio di conservazione della carica, le cariche q_u e q_d da assegnare ai quark u e d , sono:

$$\begin{cases} uud = \text{protone} \rightarrow 2q_u + q_d = 1 \\ udd = \text{neutrone} \rightarrow q_u + 2q_d = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_u = \frac{2}{3} \\ q_d = -\frac{1}{3} \end{cases}$$



Quark up $Q = +2/3$

Quark down $Q = -1/3$

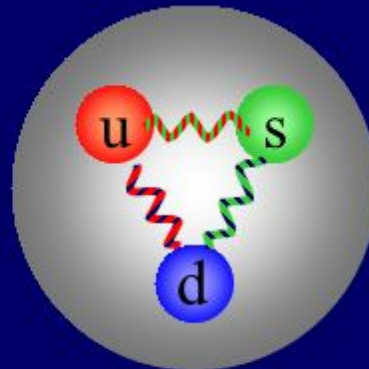


Protone $Q = +2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$

Neutrone $Q = +2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

Particella “strana” Λ

$Q = +2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

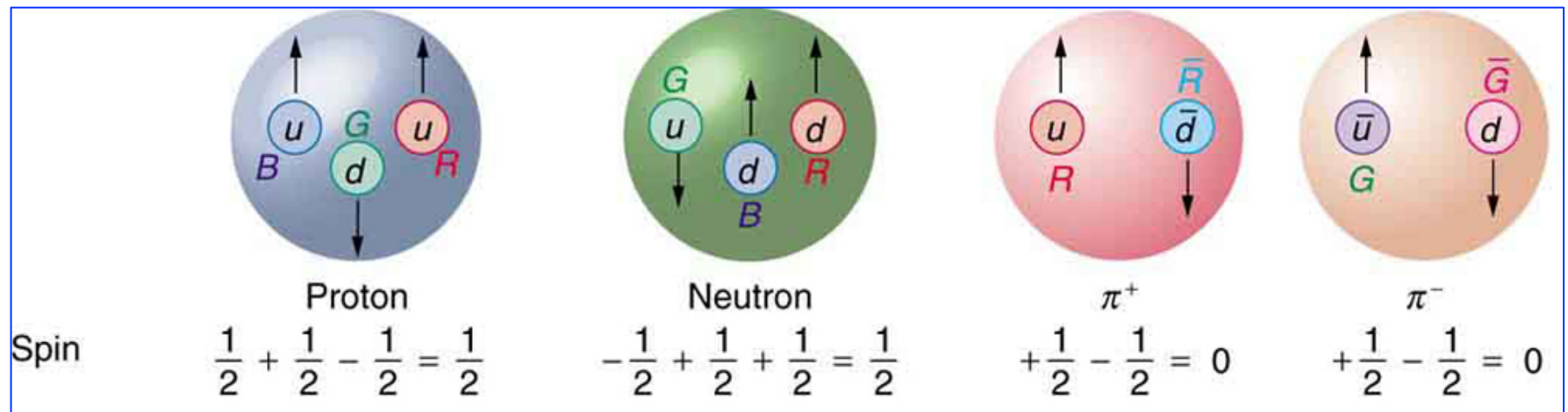


Facendo lo stesso ragionamento, si trovano i valori delle cariche da assegnare agli altri quark (gli antiquark avranno lo stesso valore dei quark corrispondenti ma di segno opposto):

sapore dei quark	simbolo	carica elettrica	massa (Gev)
Up	u	+ 2/3	0,005
Down	d	- 1/3	0,010
Strange	s	- 1/3	0,015
Charm	c	+ 2/3	1,35
Top	t	+ 2/3	172
Beauty	b	- 1/3	4,5

Può sembrare strano trattare particelle con cariche frazionarie, ma nessun principio fisico vieta tale possibilità.

Un aspetto dei quark che ha creato diversi problemi ai fisici teorici è stato lo spin. Per ottenere i corretti momenti angolari degli adroni, ai quark deve essere attribuito uno spin pari a $1/2$.



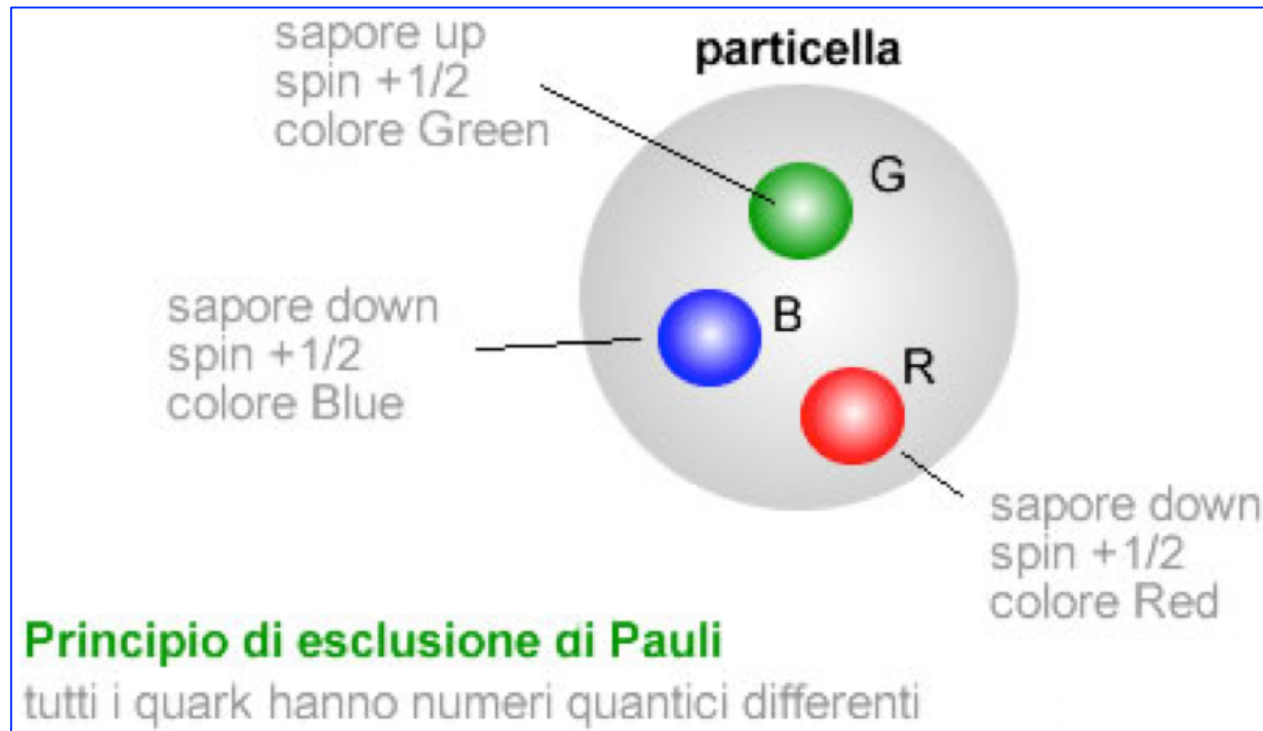
Come tutte le particelle con spin semintero finora conosciute, i quarks devono dunque essere soggetti al principio di esclusione di Pauli.

Ciò implica che in uno stesso stato non possono esistere due quark con gli stessi numeri quantici. Invece, proprio gli oggetti più elementari sembravano non comportarsi come i soliti fermioni (per i quali vale il principio di esclusione di Pauli).



Greenberg (1932) riuscì a risolvere questa apparente incoerenza assegnando ai quark un **numero quantico** supplementare chiamato **colore**.

Con l'aggiunta di questo nuovo attributo, ogni quark di un dato tipo può mostrarsi in tre varietà distinte per il colore (agli antiquark corrispondono i tre anticolori), cioè *B* (*blue*, azzurro), *G* (*green*, verde) e *R* (*red*, rosso) senza mutare o perdere gli altri aspetti. Adesso, il principio di esclusione di Pauli funziona anche per i quarks.



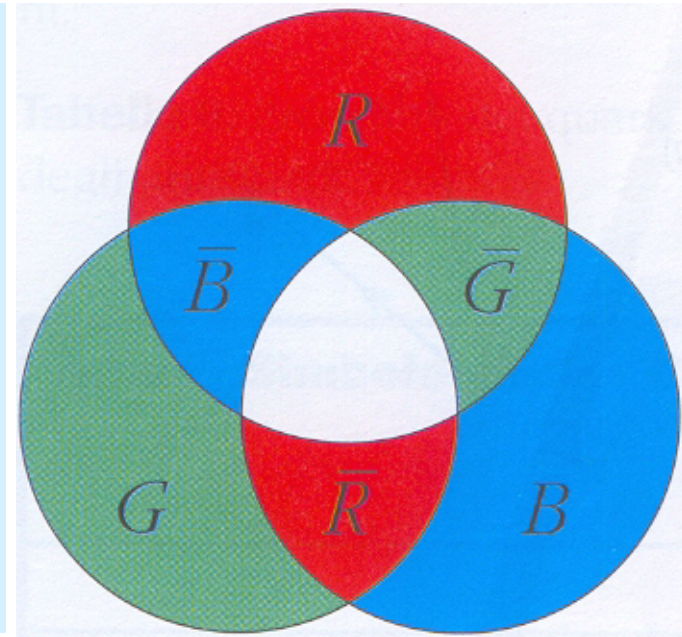
Con questa ipotesi, dunque, quando i quarks si legano per formare una particella non si trovano, anche se sono dello stesso tipo, nello stesso stato quantico, poiché si differenziano per il colore.

Anche se la teoria del colore non implica nessuna nuova particella, lo scotto da pagare per l'etichetta cromatica prevede il triplicarsi del numero dei quark. I membri della famiglia diventano diciotto (con altrettante antiparticelle), le unità fondamentali di materia cominciano nuovamente a crescere e nuove norme condizionano la genesi delle particelle fortemente interagenti.

Per spiegare il meccanismo di formazione degli adroni è necessario, quindi, aggiungere alle regole precedenti la seguente:

COMBINAZIONI DI QUARK "COLORATI"

Ciascuno dei tre quark che compongono un barione deve avere colore diverso; ogni mesone deve essere formato da un quark di un colore e un antiquark del corrispondente anticolore.



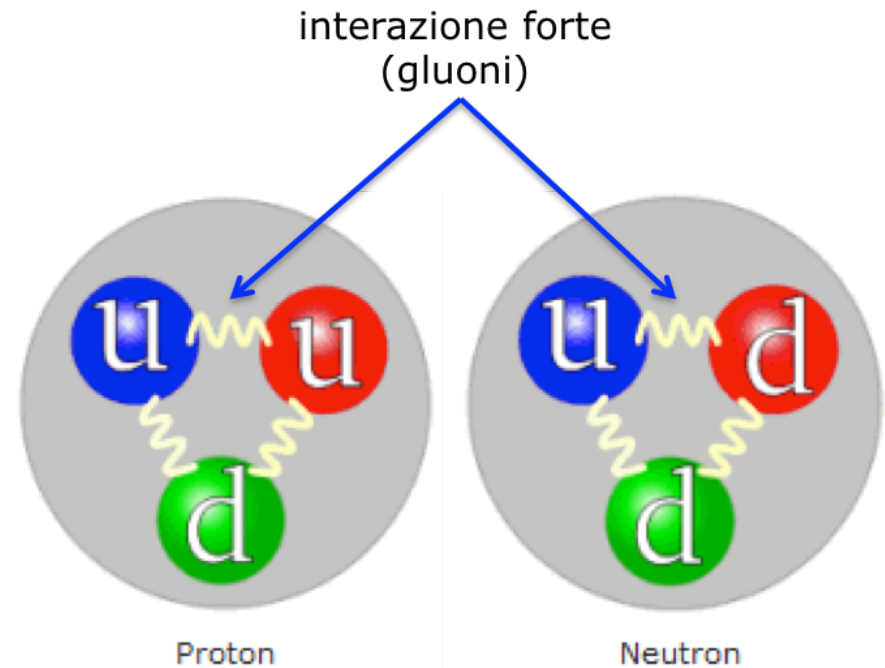
Il colore o l'anticolore sono etichette che non hanno nulla a che vedere con la policromia del nostro mondo. Si tratta solo di far apparire uno stesso oggetto con qualche cosa di diverso.

Con questa regola **ogni adrone** nel suo complesso è **“incolore”**. La sovrapposizione delle tre tinte origina sempre una particella che non mostra alcuna traccia cromatica, nel senso che si presenta con **carica di colore nulla**. Lo stesso avviene sovrapponendo un colore con il suo anticolore.

La teoria del campo di colore, per interpretare le interazioni fra i quark, si chiama **cromodinamica quantistica (QCD)**, ed è stata sviluppata soprattutto negli ultimi trent'anni.

L'interazione fra i diversi tipi di colore, o fra un colore e un anticolore, non è altro che la forza nucleare forte che tiene legati i quark a formare le particelle.

Le particelle mediatrici di questa interazione, come abbiamo già visto in precedenza, sono i gluoni. I gluoni “incollano” fra loro i quark formando oggetti osservabili, privi di carica di colore, come il protone e il neutrone.



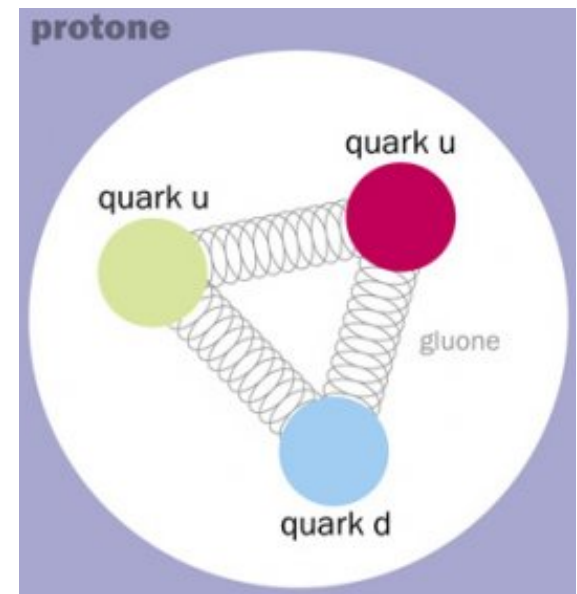
Questa "policromia" introdotta nel modello a quark come un'ipotesi ad hoc per non violare una legge valida senza eccezioni (principio di esclusione di Pauli), ha ormai assunto un ruolo fondamentale nella formazione degli adroni.

Sotto molti aspetti è possibile fare un'analogia fra la carica elettrica e la proprietà cromatica dei quark (chiamata anche **carica di colore**). Infatti, mentre la prima origina la forza elettromagnetica, che tiene insieme l'edificio atomico, la seconda tiene uniti gli elementi fondamentali della materia necessari per costruire gli adroni.

Poiché i quark non sono mai stati osservati allo stato libero, per spiegare questa caratteristica di stare sempre insieme (**confinamento dei quarks**), nel 1973 **Wilczek** (1951; Premio Nobel) sviluppò il concetto di **libertà asintotica**.

L'interazione forte, che permette ai quark di convivere vicini per formare i nucleoni, a differenza delle altre forze fondamentali, come per esempio quella elettromagnetica, aumenta d'intensità quando i quark tendono ad allontanarsi.

È come se le particelle fossero collegate fra loro da una molla: l'interazione diventa più intensa quando la distanza aumenta.



IL MODELLO STANDARD

In fisica si è sempre cercato di descrivere i fenomeni, anche apparentemente diversi, all'interno di un quadro unitario. Storicamente, la prima unificazione è dovuta a Maxwell, che mostrò come la forza elettrica e la forza magnetica non fossero altro che manifestazioni differenti di una stessa forza: l'interazione elettromagnetica.

Il **Modello Standard** è la teoria, sviluppata negli sessanta del XX secolo, che descrive i componenti fondamentali della materia (leptoni e quark) e le loro interazioni (elettromagnetica, debole, forte), ed è basato sui due pilastri della fisica del Novecento: la meccanica quantistica e la relatività ristretta.

Il Modello Standard, costruito su queste basi, ha avuto un successo straordinario in virtù delle numerosissime ed importanti conferme sperimentamente delle sue predizioni teoriche. Purtroppo, però, tale modello, non comprende l'interazione gravitazionale nella sua descrizione delle forze fondamentali che governano la natura. In altre parole, il modello standard combina in modo molto efficace meccanica quantistica e relatività ristretta, ma non meccanica quantistica e relatività generale.

Il motivo fisico di questa difficoltà teorica è essenzialmente dovuto al famoso principio di indeterminazione di Heisenberg.

Infatti, la relatività generale è una teoria di campo locale, cioè basata sull'assunzione che si possa misurare il campo gravitazionale in un dato punto dello spazio e del tempo. Ma, come previsto dal principio di Heisenberg, una precisione infinita nella posizione implica una indeterminazione completa nella velocità; ovvero, se misuriamo un campo gravitazionale con molta precisione in un punto, abbiamo di conseguenza una grossa imprecisione sulla sua energia.

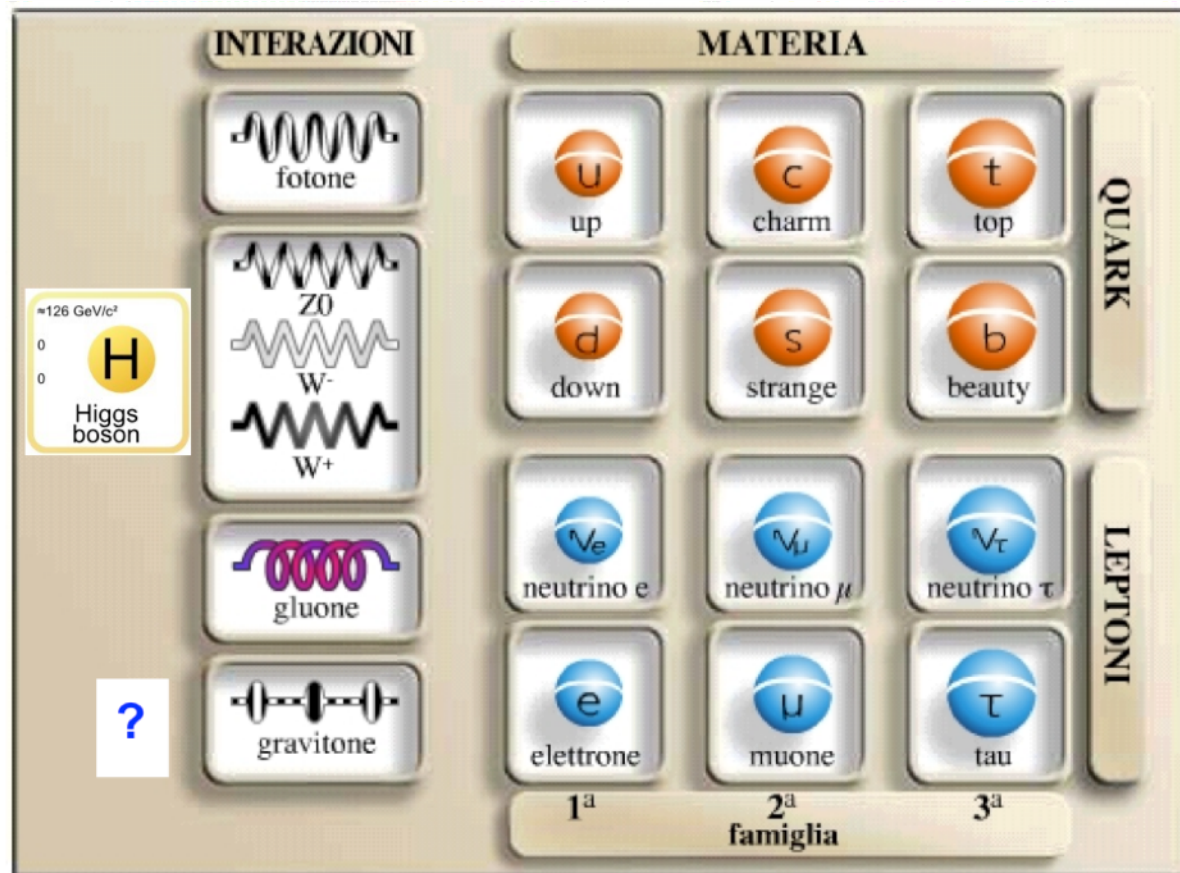
Queste fluttuazioni di energia causano, inevitabilmente, fluttuazioni del campo gravitazionale stesso, dato che è proprio l'energia che agisce da sorgente per il campo gravitazionale.

Pertanto, il modello standard non può essere considerato una teoria completa delle interazioni fondamentali in quanto non comprende la gravità. Inoltre, il modello non prevede neanche l'esistenza della materia oscura e dell'energia oscura che costituiscono quasi tutto, circa il 95%, il contenuto dell'universo.

Nel modello standard, le particelle fondamentali sono raggruppate in due categorie:

- i campi di materia, ossia le particelle costituenti la materia, che risultano essere tutti fermioni (spin $\frac{1}{2}$), ovvero i quark ed i leptoni, disposti in tre famiglie, in base alle loro proprietà di interazione.

□ **particelle mediatrici delle forze (bosoni intermedi)**, che risultano essere tutti bosoni (il fotone per l'interazione elettromagnetica, i due bosoni carichi W^+ e W^- ed il bosone Z per l'interazione debole e i gluoni per l'interazione forte, tutte con spin 0).

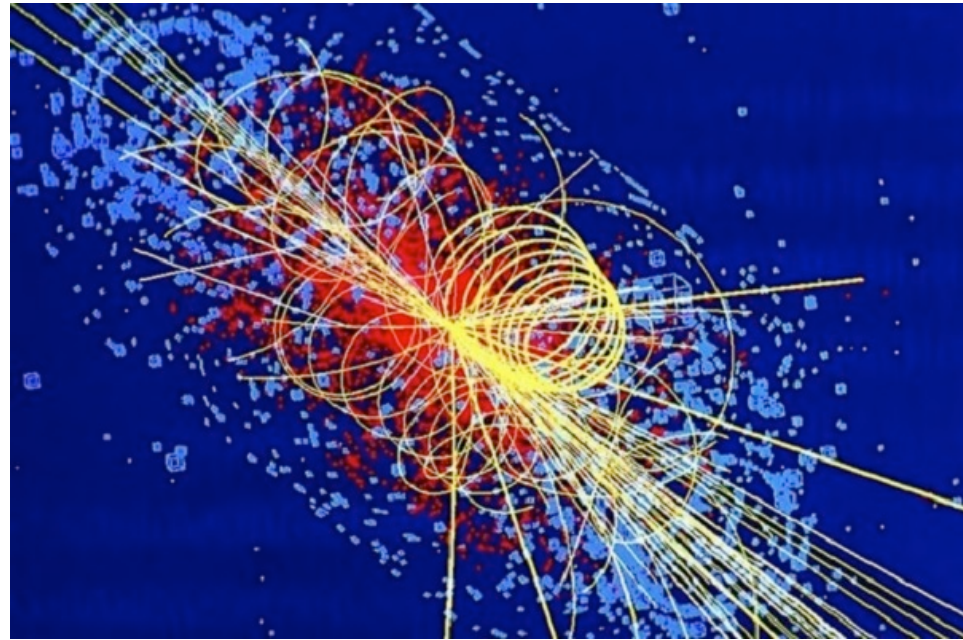


In totale, le particelle elementari contenute nel modello standard sono 60: alle particelle di materia e a quelle di interazione, bisogna aggiungere le corrispondenti antiparticelle e le tre versioni di colore per ogni quark.

Certo, i punti interrogativi non mancano, come l'esclusione dal modello dell'interazione gravitazionale, peraltro già trattata in precedenza.

Un altro interrogativo molto stimolante riguarda l'esistenza di una struttura interna per i leptoni e i quarks. Al momento esistono solo modelli teorici, non suffragati da nessuna evidenza sperimentale, come quello dei [rishoni](#) (che significa “primario” in ebraico), che fa uso di due sole particelle elementari e delle relative antiparticelle.

Nel Modello Standard è anche prevista la presenza del **bosone di Higgs** (spin 0 e carica neutra) responsabile dell'esistenza della massa delle particelle.



Questo bosone (scoperto nel 2012 grazie all'acceleratore di particelle LHC, Large Hadron Collider), che prende il nome dal fisico scozzese **Higgs** (1929, Premio Nobel), il quale per primo ne teorizzò l'esistenza negli anni Sessanta, è sorgente di un campo scalare (il **campo di Higgs**) che pervade lo spazio vuoto rendendo "pesante" la materia.

Come funziona il campo di Higgs

Il campo **permea tutto l'universo**.
Le particelle che lo attraversano
avvertono ognuna
una resistenza diversa.
Questa **resistenza** è quella
che chiamiamo **massa**



La massa non è quindi un parametro fondamentale, ma deriva dall'interazione (meccanismo di Higgs) tra le particelle e la particella di Higgs.

Se la particella di Higgs non esistesse, tutte le particelle avrebbero massa nulla e si muoverebbero alla velocità della luce come i fotoni.

Ma chi genera la massa della particella di Higgs? Un aspetto importante del meccanismo di Higgs e della conseguente generazione della massa è che tutto ciò può avvenire solo se il bosone di Higgs interagisce con se stesso, autogenerando la propria massa, ossia il campo di Higgs è autointeragente.

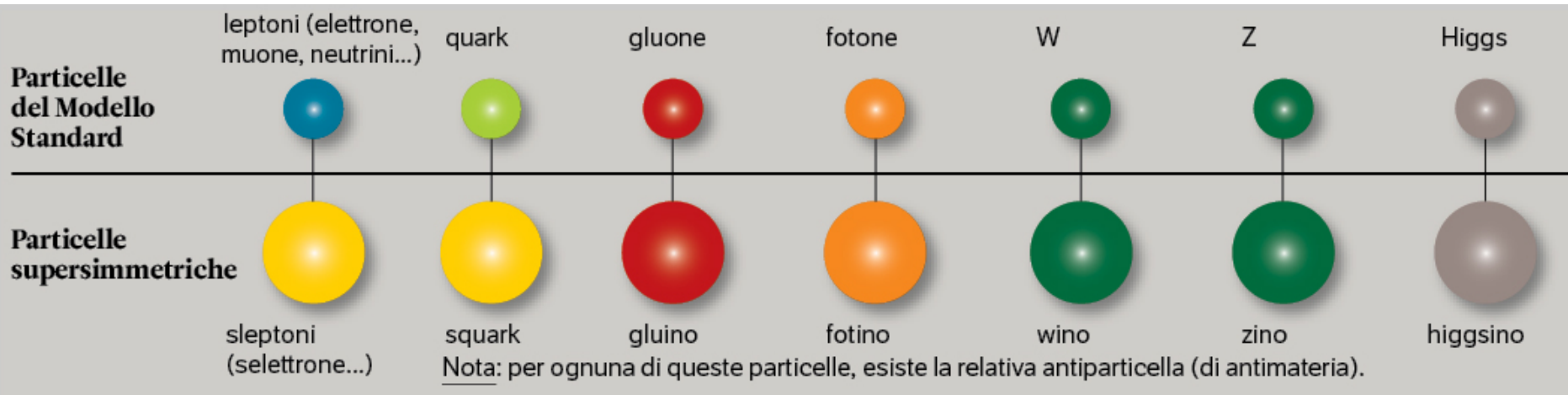
La particella di Higgs è instabile, ossia decade immediatamente in altre particelle, per cui ciò che è stato osservato nel LHC sono stati i prodotti di questo decadimento. La massa del bosone di Higgs è stata stimata intorno a 126 GeV (oltre 120 volte la massa del protone). Comunque i dati relativi alle sue caratteristiche sono ancora incompleti.

LA SUPERSIMMETRIA

Il Modello Standard è un'eccellente descrizione di quello che avviene nel mondo subatomico e ha dimostrato capacità predittive senza precedenti nella storia della scienza. Ma se ci chiediamo perché il Modello Standard abbia le caratteristiche che conosciamo, iniziano a emergere le difficoltà.

Per esempio, se ci chiediamo perché ci sono tre diversi tipi di leptoni, e non un altro numero, o perché l'elettrone ha la massa che ha, il Modello Standard non lo spiega. Dobbiamo quindi studiare la natura a un livello più profondo per scoprire la risposta.

La teoria della **Supersimmetria**, che ipotizza che a ogni particella conosciuta corrisponda una superpartner nascosta, dovrebbe dare le risposte che il Modello Standard non dà, oltre a gettare un po' di luce sulla natura della materia oscura e dell'energia oscura, che costituiscono rispettivamente il 23% e il 72% dell'universo (l'energia e la materia visibili ne costituiscono solo il 5%).



La Supersimmetria, basandosi su ragionamenti simili a quelli di Dirac che mostrò che le simmetrie dello spaziotempo implicano che ogni particella abbia una corrispondente antiparticella, prevede che ci sia un'estensione quantistica dello spaziotempo chiamata superspazio e che le particelle immerse in questo superspazio sarebbero simmetriche a quelle del Modello Standard.

La comunità scientifica si aspetta grosse novità in tal senso dall'acceleratore LHC che, potenziato, comincerà a lavorare intorno ai 14 TeV di energia.