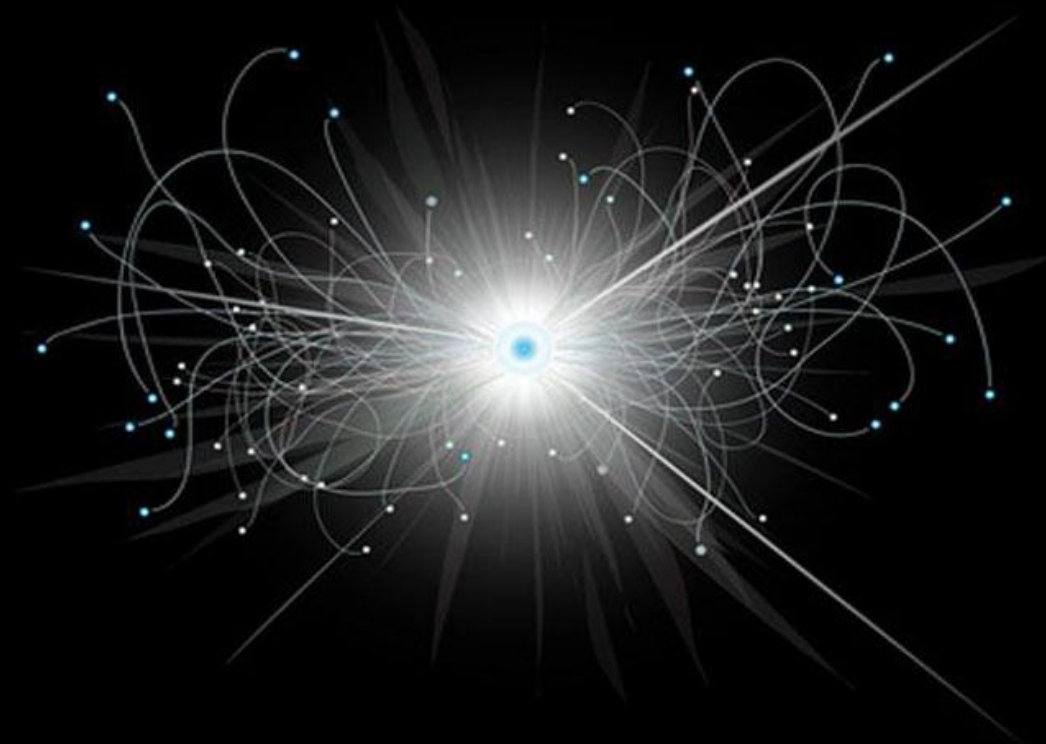


Gi Buzz'



Le particelle dell'atomo

Dall'elettrone alla teoria dei quark

LE PARTICELLE DELL'ATOMO

Sappiamo che il fondatore della *Teoria atomica* è Democrito,¹ egli immaginò la materia come un insieme di particelle dotate di massa, eterne e incompressibili, così piccole da essere indivisibili, capaci di formare combinazioni variabili per numero, forma e dimensioni. Già si disegnava l'idea della *conservazione di una sostanza eterna*, della *discontinuità della materia* e dell'*esistenza del vuoto*. Il poeta romano Lucrezio raffinerà questi pensieri in splendidi esametri, aggiungerà la nozione di un *movimento incessante e casuale di questi corpuscoli*, di un turbinare incoerente che chiamerà *clinamen*. Empedocle ed Epicuro difesero la teoria del discontinuo, e così Pitagora, il quale pensava che *la luce fosse costituita da particelle emesse dai corpi luminosi*: primo passo verso la *Teoria dell'emissione*.

Ma non bisogna considerare queste idee come geniali intuizioni, perché l'ipotesi della materia discontinua era soltanto una congettura non sostenuta da alcuna esperienza, valida cioè quanto poteva esserlo la *Teoria del continuo*, sviluppata nello stesso periodo da Eraclito e dagli Eleatici. L'unica differenza tra le due teorie è il fatto che la prima ebbe la fortuna di riuscire.

Per mancanza di prove, l'idea del continuo dominò nei secoli successivi, nell'oscuro Medioevo come nel brillante Rinascimento, l'ipotesi del discontinuo tornò infatti ad affacciarsi soltanto molto più avanti, con i primi studi sui *movimenti browniani* (R. Brown, 1827), ma fu ancora necessario attendere i lavori di Wiener, Delsaux e Carbonelle per giungere, dal 1863 al 1895, alla teoria molecolare che considera i gas e i fluidi apparentemente a riposo come sede di movimenti incessanti dei corpuscoli che li compongono.

Infine si giunse all'ipotesi di Avogadro (*masse gassose che, alla stessa temperatura e alla stessa pressione, occupano volumi uguali contengono lo stesso numero di molecole*) e alla misura del *Numero di Avogadro*², eseguita da van der Waals nel 1875.

L'ELETTRONE



Solo dopo la scoperta dell'elettricità la storia cominciò a precipitare a ritmo incalzante. Durante gli studi sulle scariche elettriche, che venivano prodotte entro ampole di vetro nelle quali era stato fatto un vuoto approssimativo (*tubi di Crookes*), nel 1880 furono per la prima volta messi in evidenza i *raggi catodici*. Questi raggi, di natura ancora sconosciuta detti appunto *catodici*, generavano una luminescenza sullo schermo posto all'estremità del *tubo di Crookes* e producevano anche effetti elettrici in quanto erano in grado di scaricare degli elettroscopi. Sir William Crookes scoprì che i raggi catodici potevano essere deflessi con un magnete e dunque non si trattava di raggi luminosi ma di particelle cariche elettricamente che Crookes chiamò *quarto stato della materia* per sottolineare che si trattava di una realtà completamente nuova.

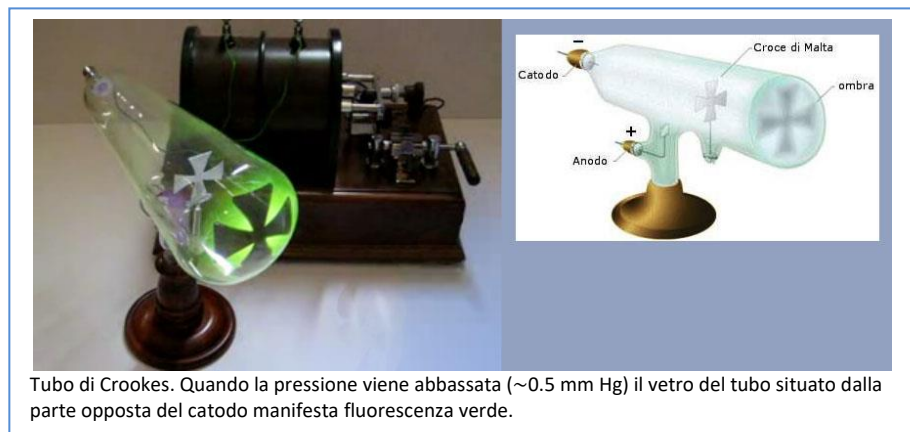
Gli studi sulla natura dei raggi catodici condussero Crookes alle seguenti conclusioni:

1. Essi sono corpuscoli di materia in quanto capaci di mettere in movimento un mulinetto a palette interposto sul loro cammino.

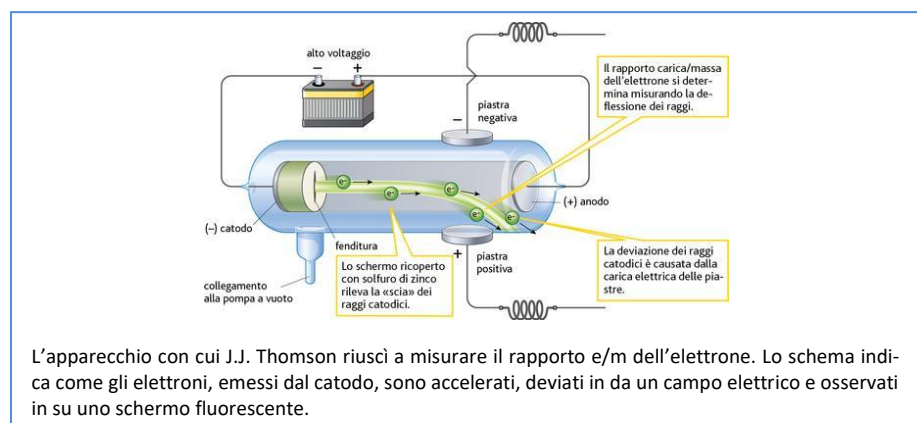
¹ Δημόκριτος, *Dēmókritos*, giudice del popolo

² Una mole di una qualsiasi sostanza chimica contiene $6,02 \times 10^{23}$ molecole. Questo valore è il *Numero di Avogadro* e si indica con la lettera *N*

2. Essi posseggono una notevole velocità, variabile con il potenziale applicato agli elettrodi, in quanto capaci di rendere incandescente un ostacolo metallico fisso, quando questo interrompe la loro traiettoria (vedi croce di Malta).
3. La loro traiettoria viene interrotta dalla parete del tubo di vetro che si trova di fronte al catodo, e pertanto essi hanno uno scarso potere penetrante.
4. Essi sono corpuscoli di materia carichi di elettricità negativa, in quanto un pennello di raggi catodici viene deviato nella sua traiettoria, sia da un campo magnetico applicato dall'esterno per mezzo di un magnete, che da un campo elettrico generato da due piastre metalliche introdotte nel tubo, caricate precedentemente l'una di elettricità positiva, l'altra di elettricità negativa. In quest'ultimo caso il pennello risulta deviato verso la piastra positiva mostrando quindi di essere carico di elettricità negativa.

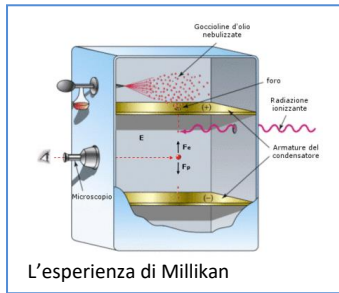


Nel 1895 J. Perrin riuscì a dimostrare che i raggi catodici erano costituiti da particelle elettrizzate in movimento. Il passo successivo fu compiuto da Joseph John Thomson (1856-1940) il quale in un celebre esperimento riuscì a dimostrare che le particelle costituenti i raggi catodici venivano deviate da campi elettrici e da campi magnetici e a misurare il rapporto e/m tra la loro carica e la loro massa. Nasceva così l'*elettrone*, (dal greco *elektron*, ambra; nome dovuto a Stoney), la prima particella elementare, che si suole indicare con il simbolo e^- (o semplicemente con e).



Esperienze simili erano già state tentate, ma senza successo: il vuoto nelle ampolle di vetro, infatti, non era abbastanza spinto.

L'esperienza di Millikan del 1910 permise di misurare la carica elettrica dell'elettrone studiando l'equilibrio di goccioline d'olio elettrizzate, sospese tra i piatti di un condensatore.



Esperienza: Inizialmente il campo elettrico non viene acceso. Scegliamo un riferimento verticale orientato verso il basso. Quando la gocciolina d'olio inizia a cadere è sottoposta a 3 forze:

- la *forza peso*, diretta verso il basso, $F_p = m g$
- la *forza di Archimede*, diretta verso l'alto, $F_a = m' g$
- la *forza di attrito viscoso*, o forza di Stokes, diretta secondo la stessa direzione ma in verso opposto rispetto alla velocità, $F_s = 6 \pi \nu R v_g$, in questo caso verso l'alto.

Ricordiamo che: la massa m' che compare nell'espressione della forza di Archimede è la massa corrispondente al volume d'aria spostato dalla gocciolina. La velocità v_g che compare nella forza di attrito viscoso è la velocità di regime: raggiunta tale velocità il moto della gocciolina diventa uniforme, in quanto le forze si bilanciano. v_g viene raggiunta in un tempo di $\approx 40 \mu s$, dunque possiamo considerare le velocità misurate come di regime.

Misurando le velocità di caduta è possibile ricavare il raggio R della gocciolina d'olio.

$$v_g = \frac{2}{9} R^2 g \frac{\rho_{olio} - \rho_{aria}}{\nu}$$

Dopo aver determinato secondo questo metodo il raggio delle goccioline si accende il campo elettrico. La gocciolina ionizzata per effetto del campo risale verso l'alto. Riscriviamo le equazioni del moto tenendo presente che ora agisce la forza verso l'alto e che la forza di Stokes, poiché ora la velocità è verso l'alto, agisce verso il basso.

In realtà Millikan non ottenne misure dirette della velocità ma misurò i tempi di caduta, per cui:

$$6 \pi \nu R L \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_e} \right)$$

L'ulteriore, importantissima, scoperta di Millikan fu che i valori di tali cariche erano tutti multipli interi di una quantità costante, , che egli riuscì a misurare. Ottenne che il valore di questa carica elettrica fu: Questo valore venne quindi assunto come quello di carica elementare ovvero la carica del singolo elettrone.

Rispetto al valore oggi accertato il risultato di Millikan fu sottostimato. Questo è dovuto ad un errore nella stima del coefficiente di viscosità dell'aria.

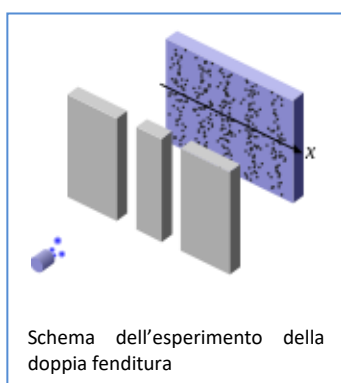
LA RADIOATTIVITÀ, I FOTONI

Una sera del 1896, Henri Becquerel (1852-1908), figlio e nipote di scienziati, lasciò alcune lastre fotografiche in fondo a un cassetto: questa dimenticanza segnò la nascita dell'era atomica. Nonostante l'oscurità e il foglio metallico che le ricopriva, le lastre si annerirono; chiunque le avrebbe buttate via ma Becquerel, meravigliato dallo strano fenomeno, cercò di trovarne le cause e finì per scoprire nel cassetto la presenza di sali di uranio che lui stesso vi aveva riposto alcuni giorni prima. Becquerel riuscì a risolvere il problema supponendo che dall'uranio dovevano essersi sprigionati raggi molto penetranti che erano riusciti a impressionare le lastre fotografiche dopo aver attraversato il foglio metallico di protezione.



Dopo la scoperta di Becquerel parecchi ricercatori si dedicarono allo studio di questi raggi penetranti per cercare di scoprirne la natura e l'origine. Nel 1899 Giesel e Meyer riuscirono a dimostrare che tra questi raggi alcuni erano elettricamente carichi; l'anno successivo lo stesso Becquerel, Marie Sklodowska Curie (1867-1934) e Villard scoprirono che erano presenti anche dei raggi neutri. Una terza radiazione di tipo corpuscolare e con carica doppia di quella dei raggi di Giesel e Meyer fu messa in evidenza da Rutherford che la indicò con la lettera α , attribuendo la lettera β alla radiazione scoperta da Giesel e Meyer e la lettera γ a quella scoperta da Becquerel-Curie-Villard. Identificando la radiazione α come una particella, Rutherford nel 1903 arrivò alla conclusione, con Soddy, che la radioattività è il segno della disintegrazione del nucleo. Nel 1911 propose perciò un modello atomico in cui Z elettroni ruotano attorno a un nucleo che deve possedere una carica elettrica Ze affinché l'insieme sia elettricamente neutro. Ma cosa poteva essere questo nucleo? Da questa domanda nacque l'*ipotesi del protone*.

In seguito si scoprì che la particella alfa era un nucleo di elio composto da due protoni e da due neutroni, che il raggio beta era un elettrone e che il gamma era un quanto di radiazione elettromagnetica, il *fotone*, una specie di "grano di luce", e questa scoperta fu difficile perché si scontrava con molti pregiudizi. Da molto tempo si era capaci di ottenere frange di interferenza con la luce, cioè l'alternarsi di zone d'ombra e di luce che si possono osservare anche tra due dita accostate. Il fenomeno luminoso doveva quindi essere costituito da un'onda sinusoidale che si propaga nello spazio come le increspature delle onde sul mare, e nel 1868 Maxwell ne definì il movimento con le più belle equazioni della fisica, considerando le vibrazioni luminose come un caso particolare di onde elettromagnetiche dalle quali si distinguono solo per la frequenza di oscillazione più elevata e quindi per la lunghezza d'onda più breve. Trovò anche teoricamente che la velocità di propagazione doveva essere identica per tutte, e definì così la più importante delle costanti fisiche, c , la velocità della luce nel vuoto ($3 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$). Fu però necessario attendere il 1890 perché Herz dimostrasse l'esistenza di onde radioelettriche non luminose. Supponendo allora che i corpi sembrassero caldi in virtù dell'emissione di queste radiazioni in tutta la gamma delle frequenze possibili, visibili o invisibili, si tentò di applicare la teoria maxwelliana ma si giunse allo strano paradosso che tutto avrebbe dovuto essere ghiacciato. Le più belle formule, sviluppate da Rayleigh e Jeans, non erano mai confermate dall'esperienza!



L'*esperimento della doppia fenditura* è una variante dell'esperimento di Young che permette di dimostrare la *dualità onda-particella* della materia.

Richard Feynman era solito ripetere che questo esperimento rappresenta la chiave per la comprensione della *meccanica quantistica*, oltre a essere il fondamento della formulazione dell'*integrale sui cammini* da lui introdotta.

L'esperimento viene condotto sullo schema classico di Young, nel quale, tra una sorgente di luce e una lastra fotografica, si dispone una barriera opaca con due fenditure parallele di larghezza opportuna.

Nell'esperimento della doppia fenditura si adottano però lastre rilevatrici moderne, molto più sensibili di quelle disponibili nell'Ottocento, e una sorgente estremamente debole di luce o elettroni, fino all'emissione di un unico fotone o elettrone per volta. Si verifica in tal modo che, in entrambi i casi, la lastra non viene impressionata in maniera continua, ma che si formano inizialmente singoli punti luminosi indicativi di un comportamento corpuscolare. Essi risultano dapprima diradati e dall'apparente distribuzione caotica, ma, aumentando man mano di numero, vanno a formare le frange di interferenza tipiche del comportamento ondulatorio. Analogo risultato si ottiene anche utilizzando particelle di maggiori dimensioni, come neutroni e mole-

cole pesanti. Ciò dimostra inequivocabilmente l'esistenza del *dualismo onda-corpuscolo*, sia della materia che della *radiazione elettromagnetica*.



Esperimento della doppia fenditura effettuato con elettroni.
Le immagini sono prese dopo l'invio di 10 (a), 200 (b), 6000 (c), 40000 (d), 140000 (e) elettroni.

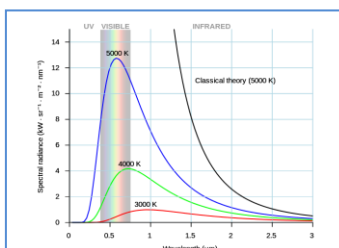
Un altro aspetto essenziale dell'esperimento delle due fenditure è la mancanza di conoscenza di quale fenditura la particella abbia effettivamente attraversato: l'osservazione della figura di interferenza è garantita infatti nel solo caso in cui non si aggiungano all'esperimento apparati di misura atti a determinarlo. Se si interviene in tal modo, con un esperimento di tipo *which-way* (quale via), il risultato finale è la scomparsa della figura di interferenza, ossia del comportamento ondulatorio, a favore di quello corpuscolare. Questo effetto ha motivato Niels Bohr ad introdurre il *principio di complementarità*, secondo il quale i due aspetti, corpuscolare e ondulatorio, non possono essere osservati contemporaneamente in quanto si escludono a vicenda, ovvero il tipo di esperimento determina il successivo comportamento delle particelle in esso coinvolte.

La particolarità degli esperimenti di interferenza come quelli sin qui discussi ha motivato diverse interpretazioni dei risultati. Si tratta di risultati *controintuitivi*, in cui i concetti classici di onda e particella sembrano in qualche modo combinarsi per fornire qualcosa che sfugge al senso comune. La conseguenza di ciò è che si sono sviluppate *interpretazioni della meccanica quantistica* diverse dalla classica *interpretazione di Copenhagen*, che cercano di dare un'interpretazione dei fenomeni osservati che si adatti anche agli schemi di comprensione più usuali. Da un punto di vista strettamente sperimentale non è possibile decidere quale sia l'interpretazione corretta, ma coesistono tutte, ognuna con i suoi pro e contro.

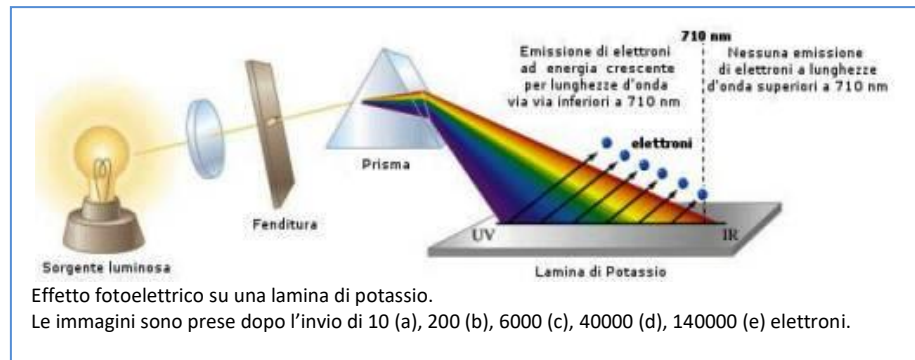
Fu nel 1900 che Max Planck (1858-1947) ebbe infine la grande idea che l'emissione di queste onde non fosse continua, ma che avvenisse a sprazzi, per una piccola quantità che chiamò *quanto*. L'energia E portata da un tale quanto di radiazione elettromagnetica emesso dalla vibrazione degli elettroni del *corpo nero* era direttamente legata alla frequenza dell'onda portante dalla formula fondamentale $E = h\nu$ nella quale ν è la frequenza ed h è una costante molto piccola divenuta la chiave di volta di tutta la meccanica quantistica con il nome di *costante di Planck* ($h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{secondo}$; spesso viene utilizzata la *costante di Planck ridotta* indicata con \hbar (si legge *h tagliato*), $\hbar = h/2\pi = 6,582 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{secondo}$).

Ma fu necessario aspettare ancora cinque anni perché Albert Einstein (1879-1955) nel 1905 riprendesse i lavori di Planck e precisasse che il flusso della radiazione luminosa non è altro che la somma dei corpuscoli il cui numero determina l'intensità. Einstein studiò l'*effetto fotoelettrico*, ipotizzato da Herz e misurato da Lenard nel 1900.

In questo esperimento, un fascio di luce ultravioletta proveniente da una lampada incide su un metallo (o un gas) e ne strappa degli elettroni che possono essere estratti mediante un potenziale elettrico positivo che li attira. Contando questi elettroni ci si accorse che all'aumentare dell'intensità della lampada non aumentava la loro energia ma soltanto il loro numero: ciò confermava che ogni elettrone era espulso dall'urto di un singolo corpuscolo, da una specie di grano di luce che fu chiamato *fotone*.



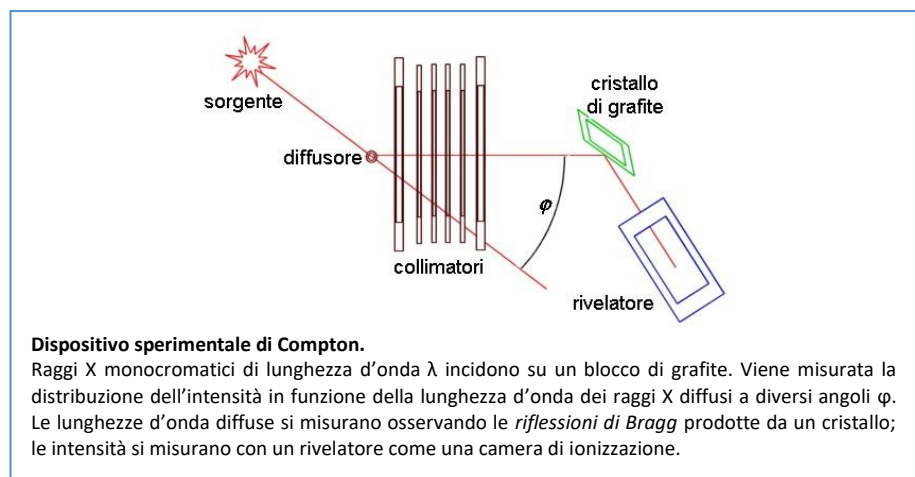
L'andamento delle curve di Planck per il corpo nero. In ascissa la lunghezza d'onda, in ordinata l'intensità della radiazione.



Il fotone, quanto di energia elettromagnetica, fu considerato dapprima come il “grano di luce”, fu poi identificato con il raggio γ scoperto da Becquerel-Curie-Villard e quindi con il raggio X, radiazione molto penetrante e fortemente ionizzante che era stata messa in evidenza da W. Röntgen nel 1895 bombardando una placca (*anticatodo*) con i raggi catodici prodotti da un tubo di Crookes.³

Così grazie ai lavori di Maxwell, di Planck e di Einstein, si cominciava a pensare che la luce, per quanto fosse un'onda capace di dare luogo all'interferenza, si comportasse anche come un corpuscolo e, nonostante questo profondo mistero, nessuno poteva negare che il fotone gamma fosse una particella che trasportava un'onda. La prova definitiva si ebbe nel 1925 con l'effetto Compton, fenomeno che si manifesta quando un fotone interagisce con un elettrone, cedendogli energia e deviando dalla sua traiettoria originale.

Compton inviò un fascio monocromatico di raggi X di lunghezza d'onda λ (0,0709nm) su un blocco di grafite e misurò, per vari angoli di diffusione, l'intensità dei raggi X in funzione della lunghezza d'onda. Per quanto il fascio incidente abbia una sola lunghezza d'onda λ , i raggi X diffusi hanno picchi d'intensità a due lunghezze d'onda; uno di essi corrisponde alla lunghezza d'onda incidente, l'altro alla lunghezza d'onda λ' che è superiore alla precedente della quantità $\Delta\lambda$. Questo $\Delta\lambda$, chiamato *spostamento Compton*, varia col variare dell'angolo a cui sono osservati i raggi X diffusi.



³ Ancora oggi, nonostante sia chiaro che la natura del fotone è unica, resta nel linguaggio la distinzione tra i vari *tipi di fotone*, distinzione che dipende dalla loro origine e dalla loro energia; in ordine di energia crescente, fotoni propriamente detti sono i quanti di luce visibili, *raggi X* sono i quanti di radiazione elettromagnetica invisibili e di elevato potere penetrante, raggi γ sono i quanti di radiazione elettromagnetica invisibili molto penetranti emessi dai corpi radioattivi: sono prodotti negli acceleratori e nei buchi neri e sono presenti nella radiazione cosmica.

Cioè, quello che vide Compton fu che, oltre all'emissione di fotoni della stessa λ , vi erano anche raggi X di lunghezza d'onda maggiore (in media di 0,0731nm), e quindi di frequenza minore (meno energetici). Inoltre l'aumento assoluto della lunghezza d'onda della radiazione diffusa, per un qualsiasi angolo di diffusione, era indipendente dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente. La diffusione di onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda maggiore rispetto a quella iniziale non è spiegabile con la *Teoria classica dell'elettromagnetismo*. Per spiegare questo effetto, Compton riprese, quindi, la *Teoria quantistica della luce di Einstein*, pensando ai fotoni come a particelle che, seppur prive di massa, sono dotate di una certa quantità di moto. Quindi i fotoni incidenti, urtando contro gli elettroni presenti negli atomi del bersaglio, cedono loro parte della propria energia. Dal punto di vista matematico, quindi, si impostano le equazioni di un urto tra un fotone, inteso come particella dotata di energia e di quantità di moto, e un elettrone. Detti φ e θ gli angoli di cui la direzione del fotone e quella dell'elettrone sono deflesse rispetto alla direzione della radiazione incidente e dette ν_0 e ν le frequenze iniziale e finale del fotone, si imposta un sistema di equazioni che tenga conto della conservazione della quantità di moto e della conservazione dell'energia:

$$h\nu_0 + m_0c^2 = h\nu + mc^2$$

dove h la costante di Planck, c la velocità della luce, m_0 la massa a riposo dell'elettrone ed m è la massa relativistica dell'elettrone. Risolvendo un sistema di equazioni, che qui non sono citate per semplicità di ragionamento, si ottiene una formula che mette in relazione la differenza fra la lunghezza d'onda () iniziale e finale del fotone, con l'angolo di scattering φ , per cui:

$$\Delta \lambda = \lambda - \lambda_0 = \lambda_c(1 - \cos\varphi)$$

La differenza $\Delta\lambda$ tra la lunghezza d'onda del fotone dopo l'urto λ e quella del fotone incidente λ_0 , è detto *Spostamento Compton*, e indica di quanto cambia la lunghezza d'onda del fotone diffuso, rispetto a quella del fotone incidente, in seguito all'interazione con la particella. Lo spostamento è tanto maggiore quanto è più ampio l'angolo di diffusione φ , mentre: $\lambda_c = h/m_0c$ è la *lunghezza d'onda Compton*; il suo valore approssimato, nel caso che la particella m_0 sia un elettrone, è $2,43 \cdot 10^{-12}m$.

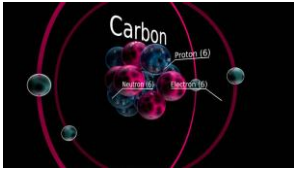
Come si può osservare facilmente, sostituendo $\lambda_c = c/\nu_c$, la lunghezza d'onda Compton di una particella è equivalente alla lunghezza d'onda di un fotone la cui energia è la stessa della massa a riposo della particella, infatti $h\nu_c = m_0c^2$. È stato grazie all'interpretazione di questo esperimento che ha avuto inizio il dibattito sulla *dualità onda-particella*.

Così lo *spostamento Compton* $\Delta\lambda$ dipende solo dall'angolo di diffusione φ e non dalla lunghezza d'onda iniziale λ . Quest'ultima equazione prevede, entro gli errori, gli spostamenti Compton osservati sperimentalmente. Si noti dall'equazione che $\Delta\lambda$ varia da zero (per $\varphi=0$, che corrisponde ad una *collisione di striscio*) a $2h/m_0c$ (per $\varphi = 180^\circ$, che corrisponde ad una *collisione frontale* ove il fotone incidente rimbalza all'indietro).

Rimane da spiegare la presenza del picco per il quale la lunghezza d'onda non varia nella diffusione. Si può spiegare questo picco come risultante da una collisione fra fotoni ed elettroni legati a ioni del blocco su cui avviene la diffusione. Nelle collisioni gli elettroni legati si comportano come quelli liberi, con la differenza che la loro massa efficace è molto maggiore. Ciò è dovuto al fatto che nella collisione rincula tutto il complesso ionico. La massa efficace M per un diffusore di carbonio è circa uguale alla massa di un nucleo di carbonio. Dato che questo nucleo contiene 6 protoni e 6 neutroni,

avremo approssimativamente $M = 12 \cdot 1840m_0 = 22.000 m_0$. Se sostituiamo m_0 ad M nell'ultima equazione scritta, vediamo che lo spostamento Compton per collisioni con elettroni strettamente legati è estremamente piccolo, tanto da non potersi misurare.

IL NEUTRONE



Atomo del Carbonio 12, contenente 6 protoni, 6 neutroni e 6 elettroni

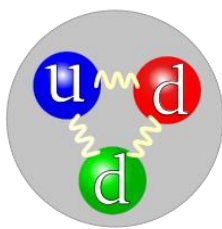
Fino agli inizi del XIX secolo si pensava che l'atomo fosse il costituente elementare della materia, il quale avrebbe dovuto essere indivisibile per definizione. La scoperta del fatto che ha una sua struttura interna, è cioè composto di particelle più semplici dette particelle subatomiche, diede vita alla *teoria atomica*, e quindi alla fisica delle particelle.

Il *neutrone* fu intuito da Rutherford dopo il suo esperimento, poiché il rapporto carica/massa non soddisfaceva le deviazioni subite dalle particelle α , cosicché ipotizzò la presenza di particelle neutre. La sua scoperta si deve al fisico inglese Chadwick (Nobel 1935), il quale fornì una nuova interpretazione degli esperimenti effettuati da Bothe e Becker (1930) e dai coniugi francesi Joliot-Curie (1932), bombardando bersagli di boro e di berillio con le particelle α (nuclei di elio) emesse dal radio. Bothe e Becker e Joliot-Curie pensavano che il bombardamento con particelle α determinasse l'emissione di fotoni γ di alta energia da parte dei nuclei di Boro e Berillio; invece le prove teorico-sperimentali prodotte da Chadwick, evidenziarono l'esistenza del neutrone nei nuclei atomici, che anteriormente al 1932 si riteneva fossero costituiti da protoni ed elettroni. Il neutrone è privo di carica elettrica ed ha una massa circa uguale a quella del protone. Appartiene alla famiglia degli *adroni* ed è soggetto pertanto sia alle interazioni forti che a quelle deboli. Esso inoltre, pur essendo privo di carica elettrica, è dotato di un momento magnetico mediante il quale può interagire con un campo elettromagnetico. Il neutrone ed il protone vengono entrambi definiti nucleoni, in quanto costituiscono i nuclei atomici. La sua massa fu calcolata di $1,6749 \cdot 10^{-24} g$

Enrico Fermi ed i suoi allievi Emilio Segrè, Franco Rasetti, Edoardo Amaldi, Ettore Majorana ed Oscar D'Agostino nel 1934 diedero inizio presso l'Istituto di Fisica dell'Università di Roma ad una serie di celebri esperienze finalizzate allo studio della radioattività artificiale indotta dal bombardamento dei nuclei atomici con neutroni. Nello stesso anno i coniugi Joliot-Curie avevano scoperto la radioattività artificiale bombardando l'alluminio con le particelle α emesse dal polonio, ottenendo nuclei radioattivi che emettevano *positroni* invece di elettroni, come avviene per gli elementi radioattivi naturali. Fermi ebbe l'idea di utilizzare i neutroni al posto delle particelle α , considerando che i neutroni, essendo privi di carica elettrica, non subiscono la repulsione da parte dei nuclei atomici carichi positivamente, e possono pertanto indurre con notevole efficacia le reazioni che rendono radioattivi i nuclei atomici. Le esperienze condotte su una sessantina di elementi chimici evidenziarono la possibilità di indurre molto agevolmente la radioattività, bombardando i nuclei atomici con neutroni lenti, cioè neutroni rallentati interponendo tra la sorgente ed il bersaglio spessori di sostanze idrogenate (acqua, paraffina). Le esperienze della Scuola di Fermi furono di fondamentale importanza per la scoperta della fissione (scissione) nucleare dell'uranio e la realizzazione della *pila atomica* (reattore nucleare) presso l'Università di Chicago (dicembre 1942).

La proprietà per eccellenza dei neutroni, che li differenzia dalle altre particelle, è la sua carica elettrica nulla, in quanto risulta composto da due quark down e un quark up:

$$q_n = 2q_d + q_u = 2 \times (-1/3)e + (2/3)e = 0$$



Il neutrone alla luce delle ultime scoperte, è un *Adrone* composto da 3 *Quark*. Uno è un *quark-up* con carica $+2/3$ e due sono *quark-down* con carica $-1/3$ (la carica totale è zero). La *Carica di colore* (Blu, Rosso, Verde) è un'altra proprietà dei quark.

La carica elettrica nulla è alla base della loro alta capacità di penetrazione e della difficoltà di manipolazione. Inoltre sono assenti delle sorgenti naturali importanti, ulteriore motivo del ritardo della scoperta del neutrone rispetto alle altre due particelle che compongono l'atomo. Le particelle cariche (come i protoni, gli elettroni e le particelle alfa) perdono energia nell'attraversare la materia, principalmente a causa delle forze elettromagnetiche che ionizzano gli atomi con cui tali particelle interagiscono. Il neutrone risente debolmente di queste forze in quanto ha carica elettrica nulla. Tuttavia il neutrone è soggetto all'azione della *forza nucleare forte*, caratterizzata da un corto raggio d'azione, efficace soltanto nelle vicinanze di un nucleo. Per cui il neutrone si comporta in modo simile ad una sfera solida (probabilmente quanto di più lontano esista dal neutrone sotto moltissimi altri aspetti) che impatta altri corpi solidi (i nuclei del mezzo). Un neutrone libero prosegue il suo tragitto indisturbato fino a quando non urta *frontalmente* con un nucleo.

A causa della ridotta sezione trasversale dei nuclei rispetto allo spazio che li separa gli uni dagli altri, queste collisioni avvengono molto raramente e i neutroni percorrono grandi distanze prima di collidere. Distanze ancora maggiori vengono percorse prima di essere assorbiti da un nucleo, tanto maggiori quanto maggiore è la velocità del neutrone: la dose assorbita da un materiale irraggiato con neutroni è tanto maggiore e tanto più concentrata in superficie quanto più bassa è la loro velocità:

- i *neutroni veloci* da fissione (10 keV-10 MeV) depositano energia principalmente attraverso l'urto elastico con più nuclei leggeri in successione, con cammini liberi medi di trasporto che vanno dal centimetro alla decina di centimetri in acqua e tessuti biologici. La dose assorbita è dovuta alle ionizzazioni causate dal rinculo di nuclei leggeri secondari.
- i *neutroni di risonanza* (1 keV-1 MeV) depositano energia principalmente per assorbimento quando la loro energia corrisponde ad una frequenza di risonanza di un nucleo vicino.
- i *neutroni lenti* (energia < 0,5 eV) hanno bassa lunghezza di trasporto, da qualche frazione di millimetro al centimetro, e grande sezione d'urto di assorbimento: anche in questo caso l'assorbimento è il principale tipo di interazione.

La loro massa a riposo maggiore di quella di altri tipi di radiazione li rende più pericolosi per i tessuti biologici una volta che abbiano interagito e può dare esito nei tessuti biologici e nei materiali ordinari a rilascio secondario di raggi gamma per cattura radiativa (ad esempio con l'idrogeno risulta in un deutone e in un fotone da 2,2 MeV), a *trasmutazione* e talora a *spallazione* (per esempio l'attivazione dell'azoto-14 in carbonio-14 con rilascio di un protone o la spallazione del piombo sfruttata nei sistemi guidati da acceleratore) causando trasmutazione e per i transuranici *fertilizzazione*. Si noti però che questo fattore non tiene però conto della precedente proprietà di penetranza, quindi la pericolosità relativa di un fascio veloce rispetto ad uno termico è in realtà sovrastimata da questo fattore.

La rivelazione indiretta dei neutroni si basa sulla trasmissione del moto ad atomi leggeri del mezzo che avviene nelle collisioni elastiche: un nucleo molto pesante acquisisce per urto elastico una piccola frazione della quantità di moto; invece un protone (che ha una massa approssimativamente pari a quella del neutrone) viene proiettato in avanti con una frazione significativa della velocità originaria del neutrone, che a sua volta rallenta. Dato che i nuclei messi in moto mediante queste collisioni sono carichi, producono ionizzazione e possono essere facilmente rilevati sperimentalmente.

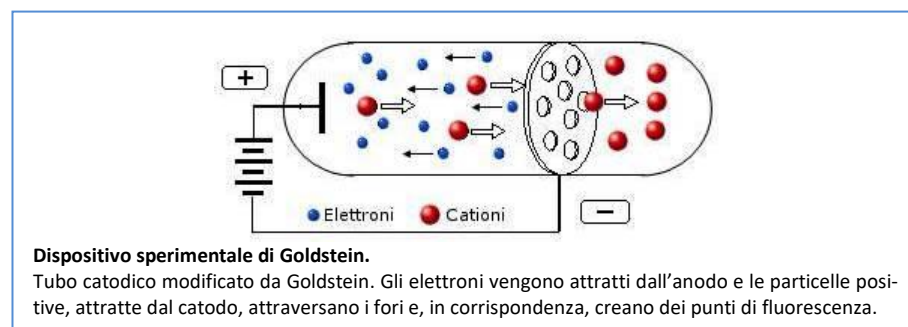
Le particelle cariche possono essere accelerate, decelerate e deflesse dal campo elettrostatico, che però non ha praticamente effetto sui neutroni, rendendoli manovrabili solo con campo magnetico dato il loro momento di dipolo magnetico piuttosto alto rispetto al momento di quantità di moto intrinseco. Il segno negativo di tale momento magnetico simula la rotazione di cariche negative in senso antiorario intorno alla direzione dello spin. L'unico mezzo per controllare i neutroni liberi è quello di porre dei nuclei sulla loro traiettoria, in modo che i neutroni vengano rallentati, deflessi o assorbiti nella collisione. Questi sono i principali effetti regolatori nei reattori e nelle armi nucleari.

Un fascio pulsato e collimato di neutroni liberi decade passando fra due spettrometri a lente magnetica sistemati in modo da raccogliere l'uno i protoni l'altro gli elettroni. Per quanto riguarda il neutrone legato agli altri nucleoni nel nucleo, la *teoria della grande unificazione* prevede una vita media dell'ordine di 10^{31} anni (più di miliardi di miliardi di miliardi di volte l'età attuale dell'universo di circa 10^{10} anni), simile a quella del protone.

L'esistenza di pacchetti stabili di quattro neutroni, o *tetraneutroni*, è stata ipotizzata da un gruppo guidato da Francisco-Miguel Marqués del CNRS *Laboratory for Nuclear Physics*, basandosi sulla disintegrazione di nuclei di berillio-14. La teoria corrente suppone che questi pacchetti non dovrebbero essere stabili e quindi non dovrebbero esistere.

IL PROTONE

La scoperta del protone è dovuta a Ernest Rutherford, nel 1919 anche se esperimenti precedenti, fra cui quelli condotti dai fisici Eugene Goldstein e Wilhelm Wien, avevano già messo in luce l'esistenza, nei *raggi canale*, di particelle con carica positiva. Goldstein (1886) adottò, nei suoi esperimenti, il *tubo di Crookes*, che, utilizzato in precedenza, aveva permesso la scoperta degli elettroni; egli, però, lo modificò introducendo un catodo forato e lavorò sulle scariche elettriche applicate a gas rarefatti. Applicando una tensione elevata ai due elettrodi, notò che la parete di vetro dietro al catodo, diveniva fluorescente in corrispondenza dei fori (*raggi canale*). Il loro studio, compresa l'analisi della deflessione causata da un campo magnetico, indicava che essi erano composti di particelle con carica positiva e il rapporto massa/carica era variabile per i diversi gas impiegati. Il rapporto più piccolo si aveva quando utilizzava l'idrogeno per il quale calcolò una massa di $1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$.



Il nucleo del più comune isotopo dell'idrogeno (il *prozio*) è costituito esclusivamente da un protone. I nuclei degli altri atomi sono composti da neutroni e protoni tenuti insieme dalla forza forte, che contrasta efficacemente la repulsione coulombiana e consente alle particelle neutre di restare legate a quelle cariche. Il numero di protoni nel nucleo, detto *numero atomico*, de-

termina le proprietà chimiche dell'atomo assieme al numero di elettroni e la natura stessa dell'elemento.

In chimica e biochimica il termine viene usato quasi sempre impropriamente per riferirsi allo ione dell'idrogeno in soluzione acquosa (*idrogenione*), mentre in realtà il protone libero in soluzione acquosa non esiste ed esiste invece il composto covalente catione *idrossonio* o semplicemente *ossonio* H_3O^+ .

In quanto formato da *quark* il protone appartiene alla famiglia degli *adroni* e in particolare al gruppo dei *barioni*. Avendo *spin* semi-intero è un *fermione*. Può esistere libero o legato in un nucleo atomico.

Il valore della carica elettrica è uguale a quello dell'elettrone, ma di segno opposto ($1,602 \cdot 10^{-19}C$). La massa a riposo è pari a $1,6726231 \cdot 10^{-27}kg$ ($9,3828 \cdot 10^2 MeV/c^2$), quasi uguale a quella del neutrone e circa 1836 volte superiore a quella dell'elettrone. È interessante notare che gran parte della massa del protone (come di quella del neutrone) è determinata dall'energia del *campo gluonico* che tiene uniti i quark, piuttosto che dalla loro massa propria.

La proprietà per eccellenza dei protoni, che li differenzia dalle altre particelle, è la sua carica elettrica $+1$, in quanto risulta composto da due *quark up* e un *quark down*:

$$q_p = 2q_u + q_d = 2 \times (2/3)e + (-1/3)e = +1$$

Il momento magnetico del protone in unità di magnetone nucleare è pari a $+2,793\mu N$: è stato possibile spiegare il valore anomalo del momento magnetico del protone solo grazie al *modello a quark costituenti* introdotto negli anni sessanta.

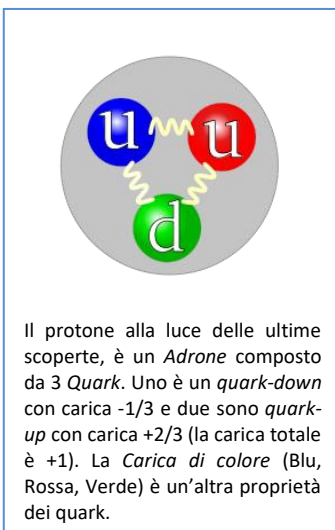
Viene anche definito un raggio classico del protone:

$$r_p = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{m_p c^2}$$

pari a $1,535 \cdot 10^{-18}m$, il quale però non ha un significato fisico ben definito. Dato che il protone non è una particella fondamentale e non possiede quindi una dimensione fisica perfettamente fissata. La sua superficie è determinata da forze che non terminano bruscamente ed è quindi in qualche modo sfumata. Il protone ha un diametro di circa 1,6-1,7fm. Per avere un'idea della sua dimensione basti pensare che il puntino di una *i* potrebbe contenerne circa 500 miliardi.

In base agli attuali esperimenti di fisica particellare il protone è una particella stabile, il che significa che non decade in altre particelle e quindi, entro i limiti sperimentali, la sua vita è eterna. Questo fatto è riassunto dalla *conservazione del numero barionico* nei processi fra particelle elementari. Infatti il barione più leggero è proprio il protone e, se il numero barionico deve essere conservato, esso non può decadere in nessun'altra particella più leggera.

Tuttavia rimane aperta la possibilità che, in tempi molto più grandi di quelli finora osservati, il protone possa decadere in altre particelle. Diversi *modelli teorici di grande unificazione* (GUT) propongono infatti processi di non conservazione del numero barionico, tra cui proprio il decadimento del protone. Studiando questo eventuale fenomeno sarebbe possibile indagare una regione energetica attualmente irraggiungibile (circa $10^{15}GeV$) e scoprire l'esistenza o meno di una unica forza fondamentale. Per questo motivo nel mondo sono attivi diversi esperimenti che hanno come obiettivo quello di misurare la vita media del protone. Tale evento però, se esiste, è estremamente difficile da osservarsi in quanto richiede apparati molto grandi e complessi per raccogliere un numero sufficientemente grande di protoni ed avere



una probabilità non trascurabile di rilevare un decadimento. Attualmente esistono solo dei limiti sperimentali per i diversi canali di decadimento, tutti molto maggiori dell'età dell'universo.

Ad esempio, uno dei canali di decadimento maggiormente studiato è il seguente:

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

con un limite inferiore per la vita media parziale pari a $1,6 \cdot 10^{33}$ anni.

LE PARTICELLE SUB-ATOMICHE

Dopo le scoperte iniziali di *elettrone*, *protone* e *neutrone*, il numero e la tipologia delle particelle elementari scoperte crebbero in modo continuo portando, nel 2006, all'introduzione del cosiddetto *Modello standard*, che descrive tutte le particelle elementari ad oggi note e tre delle *quattro forze fondamentali* note, ossia le interazioni *forti*, quelle *elettromagnetiche* e quelle *deboli*.

Va notato che il termine *particella*, pur essendo entrato nell'uso comune, non è del tutto adeguato, in quanto la *meccanica quantistica* ha eliminato la distinzione tra particelle e onde che aveva caratterizzato la fisica del XIX secolo. Nel seguito si intendono come particelle delle entità dotate sia di aspetti corpuscolari che di aspetti ondulatori, tra loro indissolubilmente legati.

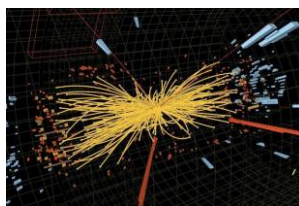
Nel 1897 Lord Kelvin scriveva che «l'elettricità è un liquido continuo omogeneo». Queste considerazioni divennero superflue quando, nello stesso anno, Joseph John Thomson eseguì il suo celebre esperimento con cui determinò il rapporto e/m tra la carica elettrica e la massa dei raggi catodici.

Nel 1911 Ernest Rutherford, bombardando una sottile lamina di metallo con radiazioni alfa, portò prove sperimentali per dimostrare che quasi tutta la massa degli atomi è contenuta in un minuscolo nucleo atomico con un diametro di 10^5 volte inferiore all'atomo stesso. La regione esterna è quindi occupata dagli elettroni di Thomson tutti uguali fra loro, ma i nuclei atomici differiscono fra loro sia per massa che per carica elettrica.

Il nucleo più leggero, quello dell'idrogeno, ha una singola carica elettrica positiva, e tutti gli altri nuclei hanno cariche positive che sono multipli interi di quella dell'idrogeno. Fu supposto, quindi, che il nucleo fosse composto da quelle particelle, qualunque fossero, di cui il nucleo dell'idrogeno aveva un esemplare. Fu battezzata da Rutherford *protone*, simbolo p , dal greco *proton*, forma neutra di *protos*, primo.

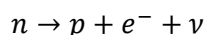
Però era chiaro che i nuclei con più protoni si sarebbero disintegrati a causa della *forza di repulsione elettrostatica*, quindi affinché fossero stabili era necessaria o una particella stabilizzatrice o una forza diversa da quella elettrica, di intensità tale da contrastare la repulsione. In effetti entrambe le ipotesi sono vere.

Nel 1932 Irène Joliot-Curie, figlia di Pierre e Marie Curie, insieme al marito Frédéric Joliot avevano scoperto che il berillio, in seguito al bombardamento con particelle provenienti da una sorgente di polonio, emette delle particelle elettricamente neutre molto penetranti. Essi provarono che queste particelle possono espellere protoni da materiale contenente idrogeno. Sembrò naturale supporre che le particelle neutre fossero fotoni ma sarebbero occorsi fotoni ad energia troppo alta (50MeV) per provocare un fenomeno del genere. Allora l'esperimento fu ripreso da James Chadwick che dimostrò che quelle particelle non erano prive di massa, come il fotone, ma avevano all'incirca la massa del protone. Questa particella, poi chiamata *neutrone* (n), era stata ipotizzata già nel 1920 da Rutherford.



Emissione di particelle nel Campo di Higgs

A questo punto, si giunse alla conclusione che il nucleo atomico è, in realtà, costituito da *protoni* separati da un numero all'incirca uguale di *neutroni*. Successivamente si scoprì che il neutrone ha una massa maggiore, anche se di poco, a quella del protone. Per questo motivo esso è instabile, cioè tende a decadere in altre particelle più stabili. Nel caso del neutrone abbiamo il *decadimento β* , noto fin dal 1900, che porta il neutrone a decadere in un protone ed in un elettrone. Tuttavia gli esperimenti di disintegrazione β mostrano che per assicurare la *conservazione dell'energia* era necessario un nuovo tipo di particella neutra per pareggiare l'energia totale nel sistema prima e dopo il decadimento. Questa particella fu chiamata *neutrino* (simbolo ν). Il processo di decadimento β venne considerato:



Negli anni 1932-33 fu scoperta un'altra nuova particella: il *positrone*. Questa scoperta fu resa possibile dall'uso di un apparecchio estremamente ingegnoso, chiamato *camera a nebbia*, ideato da Charles Thomson Rees Wilson. L'esistenza del positrone era già stata predetta teoricamente durante gli anni 1930-31. La predizione era basata sull'elegante teoria dell'elettrone formulata da Paul Adrien Maurice Dirac, che aveva applicato i metodi della meccanica quantistica per stabilire le *equazioni d'onda* in un campo elettrico. Le soluzioni di queste equazioni davano due stati elettronici con energia cinetica rispettivamente positiva e negativa.

Secondo la teoria si dovevano verificare transizioni fra i due stati. Poiché non si osservavano, Dirac dedusse che tutti gli stati di energia negativa (*mare di Dirac*) dovevano essere occupati, ma qualora si verificasse una lacuna (cioè uno stato di energia risulta libero) essa avrebbe dovuto corrispondere a una particella osservabile con massa e *spin* uguali a quelli dell'elettrone e con carica opposta. Tale lacuna era il positrone. Questa particella, scoperta da Carl David Anderson, è quindi *l'antiparticella dell'elettrone*.

Nel corso del graduale rivelarsi delle proprietà di una particella più di una volta le convenzioni sono cambiate. Quella a tutt'oggi accettata per il neutrino è diversa da quella adottata per la prima volta da Fermi. Infatti oggi si ritiene che sia *l'antineutrino (elettronico)* ($\bar{\nu}_e$) la particella neutra emessa dalla disintegrazione β del neutrone:



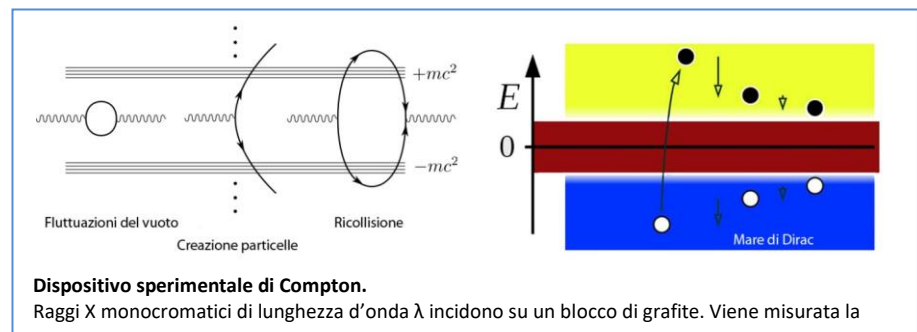
L'*equazione di Dirac* descrive le particelle mediante uno *spinore* composto da quattro funzioni d'onda (*spinore di Dirac*), naturale estensione dello spinore a due componenti non relativistico. È stata un passo fondamentale verso una teoria unificata dei principi della meccanica quantistica e della relatività ristretta, permettendo di definire una *densità di probabilità* sempre consistente. Inoltre ha consentito di spiegare la struttura fine dello spettro dell'atomo di idrogeno e il *fattore giromagnetico* dell'elettrone.

Anche l'equazione di Dirac ammette soluzioni ad energia negativa. Dirac ipotizzò l'esistenza di un *mare infinito di particelle* che occupano tali stati ad energia negativa. Dopo lo sviluppo della *Teoria quantistica dei campi* gli stati ad energia negativa furono identificati con le *antiparticelle*, con l'introduzione di un nuovo numero quantico (che vale +1 per le particelle e -1 per le antiparticelle), in modo da risolvere alcuni paradossi originati dall'ipotesi del *mare di Dirac*.

Il Mare di Dirac è un modello teorico del vuoto visto come un mare infinito di particelle di energia negativa.

Fu ipotizzato da Dirac nel 1930 per risolvere il problema posto dagli stati quantistici a energia negativa, non limitata inferiormente, previsti dalla sua equazione per elettroni relativistici. Infatti, siccome l'equazione non possiede un limite inferiore all'energia degli stati soluzione dell'equazione, non è possibile identificare uno stato di minima energia o stato fondamentale del sistema. Pertanto non è possibile trovare il sistema in uno stato stabile. Per risolvere questo paradosso, pensando allo stato fondamentale del sistema, il vuoto, Dirac introdusse il concetto di un mare costituito di particelle tale da occupare tutti gli stati a energia negativa e lasciare liberi solo gli stati a energia positiva.

Il *positrone*, la controparte in *antimateria* dell'elettrone, fu originariamente concepito come una lacuna nel mare di Dirac (uno stato a energia negativa lasciato libero) prima della sua scoperta sperimentale che avvenne nel 1932. La spiegazione matematica, sinteticamente, è questa: consideriamo l'equazione relativistica che lega l'energia, la massa e il momento $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$. Nel caso speciale di particelle a riposo (cioè $p = 0$) l'equazione si riduce a $E^2 = m^2c^4$, che è anche usualmente riportata come



$E = mc^2$. Ma questa costituisce una semplificazione poiché è possibile anche per l'energia la soluzione a energia negativa, cosicché la corretta equazione che lega l'energia e la massa risultante dell'equazione di Dirac è $E = \pm mc^2$ con due possibili soluzioni, una a energia positiva e una a energia negativa, (l'energia negativa essendo interpretata come *antimateria*). Allorché anche il momento rientra in gioco, le soluzioni divengono infinite, e quelle a energia negativa non sono limitate inferiormente

$$E = \pm\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} \xrightarrow{\text{ovvero}} E = \pm|c|\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}$$

Pertanto incorriamo nel problema che non è possibile identificare un limite inferiore, ovvero uno stato di energia minima che possiamo interpretare come lo stato fondamentale del sistema. L'interpretazione di questo risultato richiede che tutti gli stati a energia negativa siano occupati e che dunque lo stato fondamentale, ovvero il vuoto, sia costituito da un mare di particelle che occupano tutti gli stati a energia negativa.

Il passo successivo per lo studio del nucleo e delle sue particelle a questo punto si bloccò sulle difficoltà di definire la natura delle forze che tengono unito il nucleo.

Si cominciò a superare questo ostacolo nel 1935 con una proposta di Hideki Yukawa secondo il quale in un nucleo i protoni ed i neutroni sono tenuti insieme da un campo, allo stesso modo con cui in un atomo il nucleo e l'elettrone sono legati insieme tramite il *campo elettromagnetico*. Egli, inoltre, sottolineò che le piccole dimensioni del nucleo implicano che il raggio di azione delle forze nucleari sia piccolo. Ora, per i principi della *relatività ristretta*, la quantità di moto media del campo è dell'ordine della velocità della

luce moltiplicata per la massa del quanto associato al campo. Dalle dimensioni dei nuclei Yukawa così concluse che questa massa è all'incirca 200 volte la massa dell'elettrone. Più tardi egli stesso osservò: «Poiché un quanto con massa così grande non è mai stato osservato sperimentalmente, sembra che la suddetta teoria sia errata».

Egli non sapeva, però, che Anderson e Seth Neddermeyer stavano effettuando estese ricerche sulla capacità delle particelle cariche dei *raggi cosmici* di attraversare la materia. I due, nonostante le difficoltà dovute all'esplorazione di un campo così nuovo, perseverarono nelle ricerche e, negli anni 1934-36, pervennero alla conclusione che nei raggi cosmici erano presenti nuovi tipi di particelle, cariche alcune positivamente, altre negativamente, di massa intermedia tra l'elettrone ed i *nucleoni* e si pensò che fossero proprio le particelle di Yukawa. Furono chiamate *mesoni*.

Una raccolta di valori sperimentali della massa dei mesoni in unità me , massa dell'elettrone, pubblicata nel 1945 concludeva che il valore medio era di $172me$, ma le deviazioni da questo valore medio erano molto grandi.

Un esperimento, pubblicato nel 1947, di Marcello Conversi, Ettore Pancini e Oreste Piccioni sullo studio delle interazioni tra i mesoni dei raggi cosmici ed i nuclei atomici mostrò che questa interazione era estremamente debole. Fu allora sottolineato da Fermi, Edward Teller e Victor Frederick Weisskopf che c'era qualcosa che non andava affatto poiché queste particelle, che interagiscono così poco con i nuclei, potevano essere intermediarie solo di forze 10^{13} volte più deboli delle intensissime forze nucleari. Per questo motivo si concluse che quelle particelle non fossero quelle predette da Yukawa, e queste ultime non si riuscivano ad osservare a causa della loro breve vita che non permetteva di impressionare gli strumenti allora a disposizione.

Con l'avvento di nuove tecnologie però queste osservazioni furono possibili. La nuova tecnica che permise queste osservazioni, l'emulsione fotografica, fu sviluppata da F. Powell e dal suo gruppo. Dall'esame delle lastre di questi sensibilissimi strumenti si riuscirono a scoprire due differenti tipi di mesone: π e μ . Il loro decadimento era:

$$\begin{aligned}\pi &\rightarrow \mu^+ + \nu \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}\end{aligned}$$

I mesoni carichi negativamente si disintegrano, si scoprì, in modo analogo ai positivi. Da studi particolareggiati si ottennero anche le masse dei mesoni π e μ (successivamente battezzati rispettivamente *pione* e *muone*) che sono rispettivamente 273 e 207 volte la massa dell'elettrone.

La scoperta dell'esistenza di due tipi di mesoni risolse la situazione. Il *pione* è identificato con il mesone di Yukawa e, poiché si provò che interagisce fortemente con i nuclei, serve da intermediario per le forze nucleari, mentre il suo discendente, il *muone*, è il mesone dei raggi cosmici osservato da Conversi, Pancini e Piccioni, che non interagisce fortemente con i nuclei.

La situazione esistente nel 1947 costituiva uno schema non troppo complicato. I neutroni (n), i protoni (p), gli elettroni (e^-) ed i fotoni erano oggetti familiari. Il mesone π aveva la sua ragione d'essere quale intermediario attraverso cui le forze nucleari vengono trasmesse. Le sole particelle elementari inattese erano i mesoni μ ed i neutrini (ν).

Questo stato di cose relativamente semplici non durò tuttavia a lungo. In effetti, proprio nel 1947, a Manchester, George Rochester e Clifford Charles Butler ricavarono, da un grande numero di fotografie in *camera a nebbia* di particelle di sciami penetranti di raggi cosmici, tracce dovute ai prodotti carichi della disintegrazione di una particella neutra di massa uguale a circa

1000 m_e , valore diverso da quello delle masse di tutte le particelle fino ad allora conosciute.

Due anni più tardi, nel 1949, usando la nuova tecnica della emulsione fotografica, Powell ed i suoi collaboratori ottennero la fotografia di una particella di un raggio cosmico. Essi interpretarono il processo come dovuto ad una *particella K'* che si disintegra in tre mesoni. Sia lo schema di disintegrazione che la massa della particella primaria *K* non si adattavano ad alcuna delle particelle conosciute a quel tempo. Powell ed il suo gruppo chiamarono questa nuova particella mesone τ , ma successivamente venne a coincidere con *K'*. Insieme a τ (*tauone*) vennero identificate, in quel periodo, un gran numero di altre particelle.

Poiché tali particelle giungevano inattese, si diede loro il nome collettivo di *Particelle Strane*. Esse sono generate in collisioni in cui sono in gioco energie di più di un miliardo di eV .

Fino agli anni 1948-53 l'unica sorgente disponibile di energie così elevate erano i raggi cosmici. Pertanto furono avviate molte ricerche per studiare l'esistenza delle nuove *Particelle Strane* nei raggi cosmici. Ma i raggi cosmici non sono una sorgente controllabile di particelle di elevata energia; inoltre la frequenza con cui si incontrano particelle cosmiche di elevata energia in strumenti di dimensioni normali è molto piccola.

Fortunatamente, grazie al rapido sviluppo della tecnologia per costruire macchine capaci di accelerare particelle ad alta energia (*acceleratori di particelle*), diventò possibile in questo periodo costruire macchine nel dominio di un miliardo di eV . Quando nel 1953 la prima di tali macchine, chiamata *cosmotrone*, cominciò a funzionare al Brookhaven National Laboratory di Long Island, diventò possibile avere particelle strane prodotte a comando in laboratorio.

La *Teoria dei quark* venne avanzata nel 1964 dai fisici statunitensi Murray Gell-Mann e George Zweig, che ipotizzarono di poter spiegare le proprietà degli *adroni* considerandoli composti da quark elementari.

Il nome "*quark*", scelto da Murray Gell-Mann, è un termine privo di significato di un passo del romanzo *Finnegans Wake* di James Joyce, che egli stava leggendo al tempo degli studi:

Three quarks for Muster Mark!

Sure he has not got much of a bark

And sure any he has it's all beside the mark.

Ulteriori dettagli a questo riguardo vengono dati da Gell-Mann nel suo libro *The Quark and the Jaguar, Adventures in the Simple and the Complex* (Il Quark ed il Giaguaro, avventure nel semplice e nel complesso).

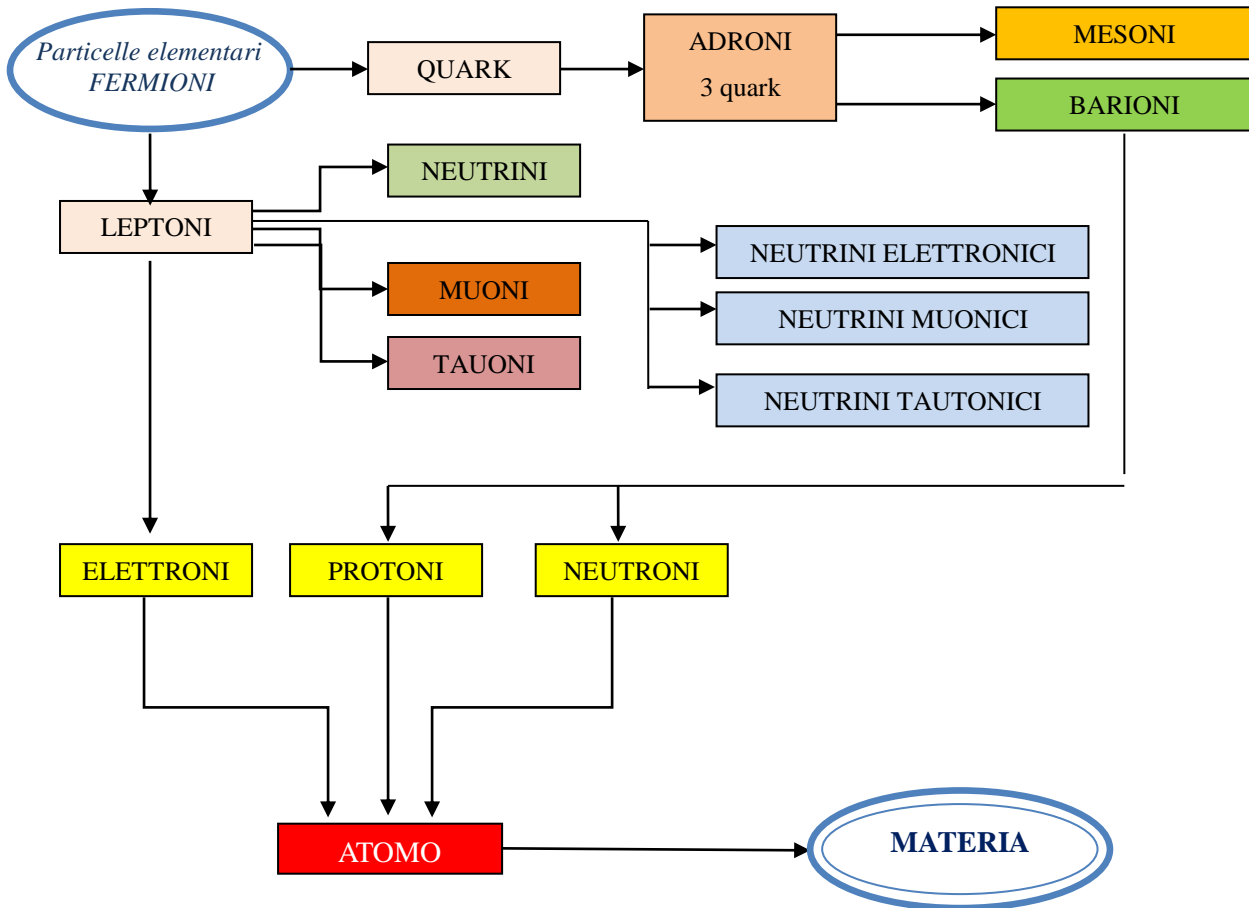
Nel 1965 Moo-Young Han e Yoichiro Nambu, per risolvere un problema teorico legati all'ipotesi dei quark, l'apparente violazione del *principio di esclusione di Pauli*, proposero che essi possedessero una proprietà, o grado di libertà, aggiuntivo, in seguito chiamato *carica di colore*. Sempre in base a considerazioni teoriche, essi ipotizzarono che i quark interagissero per via di un ottetto di *bosoni di gauge: i gluoni*.

Poiché la ricerca di quark liberi era costantemente fallita, si pensò che essi fossero solo un espediente matematico ad hoc. Richard Feynman però asserì che esperimenti ad alta energia mostravano che i quark erano reali: egli li chiamò *partoni*, in quanto "parte" degli *adroni*.

I quark sono *fermioni*, i quali sono raggruppati in tre generazioni, ognuna composta da due *leptoni* e due quark (più le loro antiparticelle dette *anti-quark*). In totale si originano in questo modo sei tipi o *sapori di quark*: la prima generazione è composta dai *quark up* e *down*; la seconda include il *quark charm* e il *quark strange*; della terza fanno parte il *quark top* e il *quark bottom*.

Le ricerche di una quarta generazione di fermioni sono tutte fallite, e secondo alcuni autori non ci sono più di tre generazioni.

Le particelle delle generazioni superiori hanno in genere massa più elevata, ma minore stabilità, il che le fa decadere in particelle di generazione inferiore attraverso l'interazione debole. Solo i quark di prima generazione (up e down) esistono spontaneamente in natura. I quark più pesanti si possono originare solo in collisioni ad alta energia, che si verificano in natura nei raggi cosmici o che vengono riprodotte artificialmente negli acceleratori di particelle e decadono rapidamente. Si ritiene che fossero presenti durante i primi istanti dopo il *Big Bang*, quando l'universo si trovava in una fase estremamente calda e densa.



Dopo queste dissertazioni sulle particelle, cerchiamo di mettere un po' d'ordine sui termini scientifici. La materia che ci circonda è costituita da questo "mare" di particelle conosciute:

Secondo il *Modello Standard* la materia è costituita da particelle dette *fermioni* che interagiscono fra loro grazie alle interazioni fondamentali mediate da altre particelle elementari dette *bosoni* (3 quark). I fermioni sono raggruppati in tre generazioni, ognuna composta da due *leptoni* e due *quark* (più le loro antiparticelle dette *antileptoni* e *antiquark*). In totale si originano in questo modo sei tipi di quark, differenziati da quello che viene chiamato il loro *sapore*: la prima generazione è composta dai quark e dai leptoni di massa minore e contiene il *quark up* e *quark down*; la seconda include il *quark charm* e il *quark strange*; della terza fanno parte il *quark top* e il *quark bottom* (le ricerche di una quarta generazione di fermioni sono tutte fallite, e secondo alcuni autori non ci sono più di tre generazioni).

I quark up e down si combinano tra loro in gruppi di tre quark per formare i *barioni* che comprendono i protoni e neutroni, e in gruppi di due per formare i *mesoni* (2 quark e 1 antiquark). Il protone è formato da due quark up e un down con carica totale di +1. Un neutrone, invece, è formato da due *quark down* e un *quark up*, che danno carica totale pari a zero.

I barioni insieme ai mesoni sono classificati nella famiglia degli *adroni*. Si ritiene che i quark non esistano da soli ma solo in gruppi di due o tre; tutte le ricerche di quark singoli, fin dal 1977 hanno avuto esito negativo.

Il *quark up* (*u*) è un quark di prima generazione con una carica elettrica positiva di $+2/3e$.

Il *quark down* (*d*) è un quark di prima generazione con una carica elettrica negativa di $-1/3e$.

Il *quark charm* (*c*) è un quark di seconda generazione con una carica di $+2/3e$.

Il *quark strange* (*s*) è un quark di seconda generazione con una carica di $-1/3e$ e una stranezza di -1 .

Il *quark top* (*t*) è un quark di terza generazione di tipo up con una carica di $+2/3e$.

Il *quark bottom* (*b*) è un quark di terza generazione con una carica pari a $-1/3e$.

Il *protone* è un barione formato da due quark up e uno down. Carica +1

Il *neutrone* è un barione formato da due quark down e uno up. Carica 0

L'*interazione debole* (chiamata anche per ragioni storiche *forza debole* o *forza nucleare debole*) può avvenire tra *leptoni* e *quark* (*interazioni semileptoniche*), tra soli leptoni (*interazioni leptoniche*) o tra soli quark (*interazioni non leptoniche*), grazie allo scambio di *bosoni vettori* molto massivi detti W^\pm e Z^0 . Poiché tutti i leptoni sono interessati dagli effetti dell'interazione debole, essa è la sola forza che negli esperimenti di laboratorio interviene sui neutrini, per i quali la gravità è trascurabile.

I bosoni W e Z sono i *bosoni di gauge* della interazione debole. Esistono due tipi di bosone W , uno con carica elettrica +1 e l'altro con carica -1 (in unità di carica elettrica elementare), e sono l'uno l'*antiparticella* dell'altro. Il bosone Z o (Z^0) è neutro. Il fatto che i bosoni W e Z siano molto massivi fu uno dei principali ostacoli allo sviluppo della *teoria elettrodebole*. Essa infatti è una *teoria di gauge* $SU(2) \otimes U(1)$ ma nelle teorie di gauge i bosoni sono senza massa, come accade per il *fotone* nell'elettrodinamica quantistica, descritta da una teoria di gauge $U(1)$. Il modo in cui si genera una massa senza rinunciare alla *simmetria di gauge* della teoria è detto *rottura spontanea di simmetria* e la più accreditata spiegazione di questo processo è il *meccanismo di Higgs*. Tale meccanismo prevede l'esistenza di un'ulteriore particella, il *bosone di Higgs*.

I *gluoni* sono i *bosoni di gauge* della *interazione forte*. Essendo responsabili dell'attrazione fra i quark negli *adroni*, come ad esempio i *protoni* e i *neutroni*, garantiscono la stabilità del nucleo atomico.

Il *fotone* o quanto di luce è il pacchetto elementare di energia che costituisce la radiazione elettromagnetica. Secondo il *modello standard* è una particella elementare mediatore e quindi responsabile dell'*interazione elettromagnetica*. Avendo *spin* intero, il fotone è un *bosone*.

Nel *modello standard* il *muone* (dalla lettera greca μ usata per rappresentarlo) è una particella fondamentale con carica elettrica negativa e *spin* 1/2 (*fermione*). La maggior parte dei muoni che raggiungono la Terra è prodotta dai *raggi cosmici*: questi ultimi, quando penetrano negli strati superiori dell'atmosfera, generano *pioni* (o *mesoni* π), che a loro volta decadono in *muoni* e *neutrini*.

La particella *tau* (o *tauone*, indicata con τ) è una particella elementare con carica negativa e ad essa è associata un'antiparticella ed un neutrino. Un *neutrino tauonico* viene creato quando un tauone decade in un leptone più leggero, (muone od elettrone). Fatta eccezione per la sua massa più grande e per la sua instabilità, il tauone è identico all'elettrone.

In base alla *cromodinamica quantistica* (QCD), i quark possiedono un'altra proprietà chiamata *carica di colore* (che non ha niente a che vedere con i colori reali), che, invece di due tipi differenti (+ e -) come la carica elettrica, è di tre tipi: *rosso*, *verde* e *blu* (6 se contiamo le anticariche). Attualmente tutte le particelle conosciute hanno *colore neutro*. I barioni sono quindi composti da un *quark rosso*, uno *verde* e uno *blu*, mentre i mesoni sono composti da un quark e da un antiquark del corrispondente *anticolore*.

I colori dei quark non sono statici, ma vengono scambiati (sempre mantenendo risultato neutro) dai gluoni, particelle anch'esse dotate di carica di colore e responsabili della propagazione dell'interazione forte. È proprio l'interazione forte che tiene insieme i quark, a formare mesoni e barioni; un effetto secondario di questa forza è quello di tenere neutroni e protoni uniti nel nucleo atomico.

A causa dell'estrema intensità della forza nucleare forte, i quark non si trovano mai liberi. Sono sempre legati in barioni e mesoni. Quando si cerca di separare i quark (come avviene negli acceleratori di particelle), la forza nucleare forte aumenta all'aumentare della distanza tra i quark. A un certo punto diventa più favorevole, da un punto di vista energetico, creare altri due quark per cancellare la forza crescente, ed è così che due nuovi quark (un quark e un antiquark) spuntano dal nulla. Questo processo viene detto *adronizzazione* o frammentazione, ed è uno dei processi attualmente meno compresi della fisica delle particelle. Come risultato della frammentazione, quando i quark vengono prodotti negli acceleratori, invece di vedere l'individuale quark nei rilevatori, gli scienziati vedono getti di molte particelle *color-neutre* (mesoni e barioni) impacchettate assieme.

SCHEMA GENERALE DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

Le particelle elementari sono distinte a partire dallo *spin*:

Bosoni: particelle con spin intero.

Fermioni: particelle con spin semi-intero.

I fermioni obbediscono al *principio di esclusione di Pauli*: due fermioni identici non possono occupare simultaneamente lo stesso stato quantico., i bosoni, che seguono la statistica di Bose-Einstein, sono invece liberi di affollare lo stesso stato quantico. Di seguito si elencano le particelle elementari in base a tale suddivisione:

Fermioni, divisi in due classi più le rispettive antiparticelle. *Leptoni*, fermioni soggetti all'*interazione debole* suddivise in tre famiglie, ad ognuna delle quali è associato un particolare *neutrino*.

Essi sono:

Nome	Carica elettrica	Massa (GeV)
<i>Elettrone</i>	-1	0,000511
<i>Neutrino elettronico</i>	0	~0
<i>Muone</i>	-1	0,1056
<i>Neutrino muonico</i>	0	~0
<i>Tauone</i>	-1	1,777
<i>Neutrino Tau</i>	0	~0

Quark, fermioni soggetti all'*interazione forte*.

Essi sono:

Nome	Carica	Massa stimata (MeV)
<i>Quark up (u)</i>	+2/3	da 1,5 a 4 1
<i>Quark down (d)</i>	-1/3	da 4 a 8 1
<i>Quark strange / Sideways (s)</i>	-1/3	da 80 a 130
<i>Quark charm / Centre (c)</i>	+2/3	da 1.150 a 1.350
<i>Quark bottom / Beauty (b)</i>	-1/3	da 4.100 a 4.400
<i>Quark top / Truth (t)</i>	+2/3	174.300 ± 5.100

Antileptoni (Stessa suddivisione dei leptoni)

Antiquark (Stessa suddivisione dei quark)

Bosoni di gauge, bosoni mediatori responsabili delle interazioni fondamentali.

Essi sono:

Nome	Simbolo	Antiparticella	Carica	Spin	Massa (GeV/c ²)	Interazione
Fotone	γ	sé stesso	0	1	0	elettromagnetica
Bosone W	W^\pm	W^\pm	± 1	1	80.4	nucleare debole
Bosone Z	Z^0	sé stesso	0	1	91.2	nucleare debole
Gluone	g	sé stesso	0	1	0	nucleare forte
Bosone di Higgs	H^0	sé stesso?	0	0	> 112	nessuna
Gravitone	G	sé stesso	0	2	0	gravitazionale

TAVOLA DEI FERMIONI FONDAMENTALI

Prima generazione

Fermione (sinistrorso)	Simbolo	Carica elettrica	Isospin debole	Ipercarica	Carica di colore*	Massa**
Elettrone	e^-	-1	-1/2	-1/2	1	511 keV
Positrone	e^+	+1	0	+1	1	511 keV
Neutrino elettronico	ν_e	0	+1/2	-1/2	1	< 2 eV
Quark up	u	+2/3	+1/2	+1/6	3	~ 3 MeV ***
Antiquark up	\bar{u}	-2/3	0	-2/3	$\bar{3}$	~ 3 MeV ***
Quark down	d	-1/3	-1/2	+1/6	3	~ 6 MeV ***
Antiquark down	\bar{d}	+1/3	0	+1/3	$\bar{3}$	~ 6 MeV ***

Seconda generazione

Fermione (sinistrorso)	Simbolo	Carica elettrica	Isospin debole	Ipercarica	Carica di colore *	Massa **
Muone	μ^-	-1	-1/2	-1/2	1	106 MeV
Antimuone	μ^+	+1	0	+1	1	106 MeV
Neutrino muonico	ν_μ	0	+1/2	-1/2	1	< 2 eV
Quark charm	c	+2/3	+1/2	+1/6	3	~ 1.3 GeV
Antiquark charm	\bar{c}	-2/3	0	-2/3	$\bar{3}$	~ 1.3 GeV
Quark strange	s	-1/3	-1/2	+1/6	3	~ 100 MeV
Antiquark strange	\bar{s}	+1/3	0	+1/3	$\bar{3}$	~ 100 MeV

Terza generazione

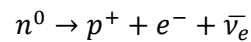
Fermione (sinistrorso)	Simbolo	Carica elettrica	Isospin debole	Ipercarica	Carica di colore *	Massa **
Tauone(o tau)	τ^-	-1	-1/2	-1/2	1	1.78 GeV
Anti-tau	τ^+	+1	0	+1	1	1.78 GeV
Neutrino Tauonico	ν_τ	0	+1/2	-1/2	1	< 2 eV
Quark top	t	+2/3	+1/2	+1/6	3	173 GeV
antiquark top	\bar{t}	-2/3	0	-2/3	$\bar{3}$	173 GeV
Quark bottom	b	-1/3	-1/2	+1/6	3	~ 4.2 GeV
antiquark bottom	\bar{b}	+1/3	0	+1/3	$\bar{3}$	~ 4.2 GeV

Fermioni	Quark · Leptone
Quark	Up · Down · Strange · Charm · Bottom · Top · Tetraquark · Pentaquark
Leptoni	Elettrone · Muone · Tauone · Neutrini
Bosoni di Gauge	Fotoni · Bosoni W e Z · Gluone
Ultimi rilevamenti	Bosone di Higgs · Gravitone

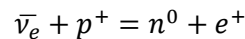
IL NEUTRINO

L'esistenza del *neutrino* venne postulata nel 1930 da Wolfgang Pauli per spiegare lo spettro continuo del decadimento beta. Il nome fu coniato da Edoardo Amaldi durante una conversazione con Enrico Fermi all'Istituto di fisica di via Panisperna a Roma, come diminutivo scherzoso della parola *neutrone*. Il termine fu poi adottato da Fermi in una conferenza a Parigi nel luglio 1932 e alla *conferenza Solvay* del 1933, dove fu utilizzato anche da Wolfgang Pauli, e da lì si diffuse nella comunità scientifica internazionale. Fu studiato da Enrico Fermi nel 1934 ma scoperto solo 22 anni dopo, nel 1956, dai fisici Clyde Cowan e Fred Reines nel corso di un esperimento eseguito al reattore a fissione di Savannah River, che mostrò reazioni indotte proprio da neutrini liberi.

L'interesse di porre tutto l'apparato presso questo tipo di reattore è che esso è una fonte molto importante di antineutrini: durante la fissione nucleare si sviluppano molti neutroni, i quali decadono emettendo antineutrini.



L'apparato sperimentale era costituito da un bidone di 200 litri d'acqua mescolata a cloruro di cadmio, in modo da poter sfruttare la reazione inversa del decadimento del neutrone:



con creazione di un neutrone e di un positrone.

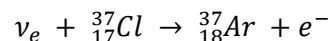
Data la scarsa sezione d'urto del processo è chiaro che serve una grande quantità di protoni (cioè di acqua) per avere un segnale utile. Il positrone si annichila con un elettrone presente nell'apparato, dando luogo a due fotoni di energia totale pari alle masse delle particelle; il neutrone prodotto viene moderato dall'acqua e assorbito dal cadmio, il quale, dopo l'assorbimento, si trova in uno stato eccitato ed emette, quindi, un fotone.

Il segnale ricercato, quindi, è composto da due fotoni di energia uguale (0,511 MeV), seguiti da un fotone di energia molto maggiore a breve distanza di tempo.

L'alto flusso disponibile permetteva di avere due rivelazioni all'ora ed il fondo calcolato per questo esperimento era molto minore di questo valore.

Esistono diversi tipi di rivelatori di neutrini. Ogni tipo consiste di grosse quantità di materiale (necessarie a causa dell'elevata penetratività dei neutrini) posto in cave sotterranee che hanno lo scopo di schermare la radiazione cosmica.

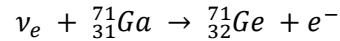
I rivelatori al cloro consistono di serbatoi riempiti di tetracloruro di carbonio (CCl₄). In questi rivelatori un neutrino converte un atomo di cloro in uno di argon secondo la reazione



Il fluido viene periodicamente purgato con dell'elio che rimuove l'argon. La quantità di atomi di argon prodotta viene misurata tramite l'attività radioattiva del gas estratto (l'isotopo 37 dell'argon decade in cloro con un'emivita di 35 giorni). Lo svantaggio di questi rivelatori consiste nel fatto che non è possibile determinare la direzione del neutrino incidente, né la sua energia: l'unica informazione è il flusso medio, per di più su periodi dell'ordine del mese. Fu il rivelatore al cloro di Homestake, Dakota del Sud, contenente 520 tonnellate di CCl₄, che rilevò per primo il deficit di neutrini provenienti dal

sole e portò al *problema dei neutrini solari*. Questo tipo di rivelatore è sensibile solo ai neutrini elettronici ν_e . L'energia di soglia della reazione utilizzata in questi rivelatori (la minima energia che il neutrino incidente deve possedere per essere rivelato) è pari a 814 keV.

I rivelatori al gallio sono simili a quelli al cloro dal punto di vista del funzionamento, ma più sensibili ai neutrini a bassa energia. Si basano sulla reazione



Anche in questo caso non si ottengono informazioni sulla direzione del neutrino. Tra questi rivelatori vale la pena di citare quelli utilizzati nell'esperimento GALLEX, poi diventato GNO, realizzato in Italia nei *Laboratori Nazionali del Gran Sasso* dell'INFN, situati nel traforo del Gran Sasso d'Italia.

I rivelatori ad acqua pura come il *Super-Kamiokande* contengono una grande massa d'acqua, circondata da rivelatori di luce detti *tubi fotomoltiplicatori*. In questi rivelatori, il neutrino trasferisce parte della sua energia ad un elettrone, che in seguito all'urto si muove più velocemente di quanto faccia la luce in acqua (ma in ogni caso non più velocemente della luce nel vuoto). Questo genera una emissione ottica (in luce visibile), conosciuta come radiazione Čerenkov che può essere rivelata dai tubi fotomoltiplicatori. Questo rivelatore ha il vantaggio che il neutrino viene registrato in tempo reale ed è possibile raccogliere informazioni sulla sua traiettoria, andando a costruire una vera e propria mappa del cielo visto in neutrini. Fu questo tipo di rivelatore che registrò il flusso di neutrini provenienti dalla *Supernova 1987a*. Questo rivelatore è sensibile a tutti i tipi di neutrino, anche se con sezioni d'urto diverse (maggiori di un fattore 6 per i neutrini elettronici rispetto agli altri). Uno svantaggio di questa tipologia di rivelatori consiste nell'elevata soglia (circa 5 MeV) in energia, dovuta all'impossibilità di rivelare l'emissione da elettroni colpiti da neutrini d'energia troppo bassa.

I rivelatori ad acqua pesante usano tre tipi di reazione per rivelare i neutrini. La prima è la stessa dei rivelatori ad acqua pura. La seconda implica la collisione del neutrino con un atomo di deuterio, con il conseguente rilascio di un elettrone. Nella terza il neutrino spezza in due l'atomo di deuterio. I risultati di queste reazioni vengono rivelati dai *tubi fotomoltiplicatori*. Questo tipo di rivelatore opera al *Sudbury Neutrino Observatory* ed è in grado di rivelare tutti e tre i tipi di neutrino.

L'esperimento OPERA invece si prefigge lo scopo di osservare direttamente il fenomeno di oscillazione (Neutrino Appearance) di neutrini di tipo muonico ν_μ in neutrini di tipo tauonico ν_τ . I neutrini muonici vengono prodotti dal progetto CNGS presso il CERN di Ginevra (Svizzera) ed inviati verso il sito dell'esperimento OPERA ai *Laboratori Nazionali del Gran Sasso*. L'esperimento è composto da due supermoduli formati da un bersaglio e da uno spettrometro magnetico. Il bersaglio è composto da piani di scintillatori plastici, tra i quali sono inseriti dei mattoncini formati da pile di fogli di piombo (1mm di spessore) e lastre di emulsione fotografica (grani del diametro di 1 micron). Quando un neutrino di tipo tau interagisce con un mattoncino del bersaglio, la particella tau prodotta viaggia per un breve tragitto nel bersaglio stesso (una frazione di millimetro, tipicamente) e successivamente decade in particelle più leggere, per esempio un muone ed una coppia di neutrini. L'analisi al microscopio delle tracce lasciate sulle emulsioni fotografiche dalle particelle cariche permette di ricostruire i vertici (primario e secondario) dell'evento. La massa di OPERA è di circa 1250 tonnellate. In cinque anni di presa dati, OPERA prevede di misurare un piccolo numero di

tali eventi (circa 10-20, in funzione della differenza di massa tra i due tipi di neutrino) ma con una contaminazione dovuta al fondo estremamente bassa.

A Los Alamos, Stati Uniti, il *Liquid Scintillator Neutrino Detector* (LSND) ha raccolto in sei anni di attività dati che offrono ulteriori prove a favore della teoria dell'oscillazione dei neutrini. In particolare, i dati suggeriscono che gli antineutrini muonici possono oscillare diventando antineutrini elettronici. Presso il *Fermilab* dal 1997 è stato avviato l'esperimento BoONE (acronimo di *Booster Neutrino Experiment*).

Il primo esperimento rivelatore di neutrini è stato effettuato nel settembre 2002, e il primo esperimento per rivelatore di anti-neutrini è stato effettuato nel gennaio 2006.

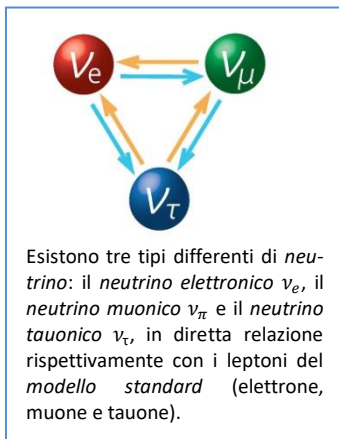
Poiché il neutrino interagisce debolmente, quando si muove attraverso la materia le sue possibilità di interazione sono molto piccole. Occorrerebbe un ipotetico muro in piombo spesso un anno luce per bloccare la metà dei neutrini che lo attraversano. I rivelatori di neutrini di solito contengono centinaia di tonnellate di materiale, costruito in modo tale che pochi atomi al giorno interagiscano con i neutrini entranti. In una supernova collassante, la densità del nucleo diventa abbastanza alta (10^{14} g/cm^3) da intercettare parte dei neutrini prodotti.

Esistono tre tipi differenti di neutrino: il neutrino elettronico ν_e , il neutrino muonico ν_μ e il neutrino tauonico ν_τ , in diretta relazione rispettivamente con i leptoni del *modello standard* (elettrone, muone e tauone). L'esistenza di tre famiglie di neutrini è stata misurata al *Large Electron-Positron Collider*. In particolare, la misura della larghezza di decadimento del *bosone Z* ha stabilito che esistono tre tipologie di neutrino aventi massa minore di 45 GeV e che interagiscano debolmente.

La gran parte dell'energia di una supernova collassante viene irradiata in forma di neutrini, prodotti quando i protoni e gli elettroni del nucleo si combinano a formare neutroni. Questa reazione produce un flusso considerevole di neutrini. La prima prova sperimentale di questo fatto si ebbe nel 1987, quando vennero rilevati i neutrini provenienti dalla *supernova 1987a*.

Nel *Modello Standard* (MS) i neutrini sono ipotizzati esistere privi di massa. Tuttavia, esperimenti recenti suggeriscono che ciò sia falso. Infatti, flussi di neutrini possono oscillare tra i tre *autostati di interazione*, in un fenomeno conosciuto come *oscillazione dei neutrini* (che fornisce una soluzione al *problema dei neutrini solari* e a quello dei *neutrini atmosferici*). Questo, inevitabilmente, induce a modificare il MS, introducendo dei termini nuovi per soddisfare la richiesta che i neutrini siano particelle dotate di massa. Alcuni anni fa si pensava che i neutrini potessero essere ritenuti responsabili per la *materia oscura*, ma con l'attuale conoscenza della loro massa possono contribuire solo per una frazione insignificante. Da diversi esperimenti effettuati da numerose collaborazioni internazionali (tra le quali si possono citare *Super-Kamiokande*, *Sudbury Neutrino Observatory* e *KamLAND*), è emersa l'evidenza del fenomeno noto come *oscillazione di sapore* dei neutrini, un fenomeno che fa mutare la particella da una *famiglia* ad un'altra, suggerendo che questa particella possieda una massa, così come già teorizzato dal fisico Bruno Pontecorvo nel 1969.

I neutrini esistono in tre *sapori* conosciuti, i muonici, gli elettronici e i tauonici, assieme ai loro antineutrini. Per il calcolo delle loro proporzioni si osserva una notevole differenza fra valori teorici e sperimentali; ad esempio sulla Terra si sono registrati solo 1/3 dei neutrini che si pensa possano essere emessi dalle reazioni nucleari del Sole. Come possibile soluzione al *problema dei neutrini solari*, era stato teorizzato che i neutrini mancanti fossero quelli muonici, che si erano trasformati in tauonici, molto più difficili da osservare. Dall'anno 2007 è stato eseguito un esperimento a distanza per pro-



vare questa teoria; il CERN a Ginevra genera neutrini muonici e li spara in direzione del laboratorio INFN del Gran Sasso. Su miliardi di miliardi di neutrini lanciati dal CERN e arrivati ai laboratori dell'INFN dal 2007, nel 2010 è stato osservato dagli scienziati un primo neutrino che ha oscillato da muonico a tau ma il risultato è sufficiente per suggerire fortemente che i neutrini abbiano una massa e che possano oscillare passando da un sapore a un altro. Ulteriori ricerche confermano le oscillazioni di sapore del neutrino.

Nel 2012 l'esperimento OPERA del Gran Sasso ha osservato per la seconda volta una oscillazione di sapore del neutrino muonico in neutrino tauonico. Le oscillazioni osservate da neutrino muonico a neutrino elettronico, al 6 giugno 2012, sono state invece 19.

Oggi possiamo affermare di essere entrati nell'era della "neutrino astronomia", grazie ai *telescopi di neutrini* come *IceCube*, un rivelatore con un volume di 1km^3 posto fra i ghiacci del Polo Sud. *IceCube* ha osservato i primi neutrini extraterrestri e grazie a loro si potrà capire meglio cosa accade in zone remote dell'universo. Difatti i neutrini sono ottimi messaggeri cosmici poiché hanno scarsa probabilità di interagire con l'ambiente circostante e per questo trasportano intatte le informazioni dal posto in cui vengono creati fino a noi sulla Terra.

In *fisica delle particelle* il neutrino è una particella subatomica elementare di massa piccolissima e carica elettrica nulla. Appartiene al gruppo dei *leptoni* e alla famiglia dei *fermioni*. Possiede *elicità* uguale a -1 (*elicità sinistrorsa*). Dopo esserne stato considerato per lungo tempo privo di massa, alcuni esperimenti hanno mostrato che ha una massa da 100.000 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.