

Particelle Elementari

Marco Panareo

Università degli Studi di Lecce
Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Dalla scoperta dell'atomo a quella dei quark la Fisica del XX secolo è stata caratterizzata da una continua ricerca dell'identità dei costituenti ultimi della materia. In questa relazione saranno tracciati i passi principali di questo sviluppo illustrando infine lo stato attuale delle nostre conoscenze.

L'esistenza di costituenti ultimi della materia fu postulata originariamente da Democrito di Abdera (460 a.c.) che raccolse le argomentazioni di Leucippo di Mileto (metà del V sec.). Queste entità furono chiamate *ατομος* che significa indivisibile. Democrito arrivò a distinguere le proprietà inerenti alla materia da quelle derivanti dai nostri sensi, fornendo, per altro, una spiegazione di queste ultime in termini di configurazioni atomiche. Successivamente tali dottrine vennero sostituite da quelle aristoteliche che ritenevano la materia infinitamente divisibile. Queste teorie ebbero il sopravvento a seguito dell'elezione dell'aristotelismo a dottrina filosofica della religione cristiana ad opera di Tommaso d'Aquino.

Alle soglie dell'epoca moderna si osservarono vari tentativi di opporre a tale visione l'originaria teoria atomistica, ad esempio nel 1647 Pierre Gassendi descrisse l'universo come costituito da particelle indivisibili muovendosi in spazi vuoti; ciò consentiva la definizione di modelli meccanici alternativi a quelli aristotelici. Tali approcci descrittivi restarono naturalmente delle mere speculazioni filosofiche alla luce dell'impossibilità di essere suffragati da verifiche sperimentali.

Sulla base della constatazione che nelle reazioni chimiche sussistono delle leggi di proporzionalità definite fra le quantità degli elementi interagenti, all'inizio del XIX secolo J. Dalton recuperò l'idea atomica. L'atomo di Dalton, come quello di Democrito, era ritenuto indivisibile. Tale idea venne a cadere nel 1887 quando le esperienze di J.J. Thomson misero in luce l'esistenza della prima particella subatomica: l'*elettrone*.

All'interno di un tubo a vuoto (fig. 1), il fascio di elettroni originato da un catodo veniva collimato da un sistema di fenditure e, dopo aver attraversato lo spazio compreso tra due placche d'alluminio, raggiungeva l'estremità del tubo, dove produceva una macchiolina fosforescente. Applicando una differenza di potenziale tra le placche era inoltre possibile provocare la deflessione del fascio; tale deflessione poteva essere misurata attraverso l'osservazione dello spostamento della macchia fosforescente sullo schermo.

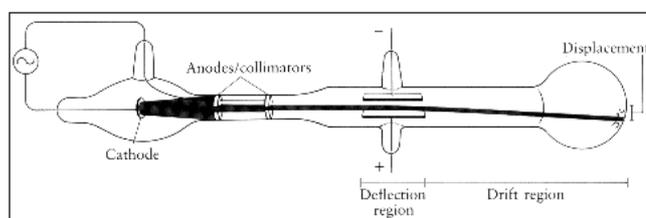


fig. 1. – Il dispositivo di Thomson per la misura del rapporto carica/massa dell'elettrone.

L'elettrone è una particella la cui massa è circa 1836 volte inferiore di quella dell'atomo di idrogeno e possiede una carica elettrica negativa il cui valore assoluto è pari a 1.6×10^{-19} C. Ulteriori ricerche provarono che questa particella è comune a tutti gli atomi, e che può essere emessa da metalli incandescenti e da alcuni elementi radioattivi. La scoperta dell'elettrone mise in crisi il concetto di indivisibilità dell'atomo ed aprì la strada alla ricerca di ulteriori strutture all'interno dell'atomo. Sorgeva tuttavia un problema: come facevano gli elettroni, dotati di carica elettrica, a costituire l'atomo se questo, in condizioni normali risulta neutro?

Il primo tentativo di dare una risposta a tale quesito fu fatto dallo stesso Thomson che propose un modello atomico (fig. 2) in cui, per ogni atomo in condizioni normali, un certo numero di elettroni vagava all'interno di una sfera omogenea di carica positiva, la cui carica complessiva era tale da equilibrare quella degli elettroni. In tale modello gli elettroni erano liberi di oscillare attorno alle proprie posizioni di equilibrio emettendo onde elettromagnetiche. Calcolando le frequenze di queste oscillazioni e confrontandole con quelle rivelate dalla spettroscopia atomica, Thomson stimò che il raggio atomico doveva essere di 10^{-10} m circa, in accordo con le indicazioni provenienti dalla teoria cinetica dei gas.

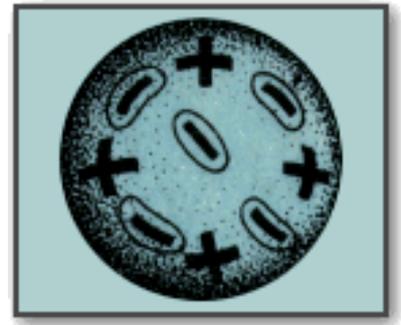


fig. 2. – Il modello atomico di Thomson.

Thomson, inoltre era dell'idea che a causa dell'omogeneità della distribuzione della carica positiva, tale atomo non avrebbe dovuto determinare deviazioni significative nella traiettoria di eventuali particelle cariche passanti attraverso di esso.

La scoperta della radioattività nel 1896 da parte di H. Becquerel mise in luce delle nuove ed inconsuete proprietà della materia. Tra le altre cose si scoprì che talune sostanze erano in grado di emettere una radiazione debolmente penetrante denominata radiazione α . Successivamente si constatò la natura corpuscolare di tale radiazione e si valutò che la carica di tali particelle è doppia di quella dell'elettrone, mentre la massa è circa quattro volte maggiore di quella dell'atomo di idrogeno.

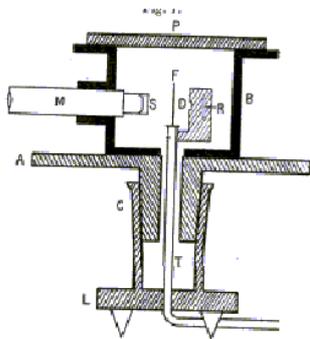


fig. 3. – L'apparato di Rutherford per lo studio della deflessione delle particelle α .

A partire dal 1906 E. Rutherford realizzò una serie di esperienze per lo studio della diffusione di particelle cariche attraverso lamine metalliche. In particolare (fig. 3), un fascio collimato di particelle α era fatto incidere su un sottile foglio d'oro. Le particelle che attraversavano il foglio colpivano uno schermo fluorescente dove potevano essere osservate

mediante un microscopio girevole. Rutherford osservò che, contrariamente a quanto immaginato da Thomson, un grande numero di particelle α anziché oltrepassare la lamina e diffondersi in diverse direzioni dalla parte opposta, venivano respinte da qualcosa e rimbalzavano sul lato di provenienza. Nel marzo del 1911 Rutherford presentò pubblicamente il suo modello atomico (fig. 4): gli atomi sarebbero costituiti da nuclei pesanti in cui è concentrata tutta la carica positiva, capaci perciò di respingere le particelle α , e dagli elettroni, più leggeri, che orbitano attorno al nucleo, come pianeti di un sistema solare. Nel 1912 Rutherford suggerì il nome di *protone* per indicare la particella subatomica che da sola costituisce il nucleo dell'elemento più leggero, l'idrogeno.

L'analogia col sistema solare sarebbe stata perfetta se non fosse che gli elettroni in moto accelerato, essendo particelle cariche, irradiano energia; in un ipotetico moto circolare uniforme attorno al nucleo tali particelle sarebbero quindi soggetti ad un'accelerazione rivolta verso il nucleo, tale da determinare una traiettoria a spirale che li porterebbe in breve a collassare sul nucleo. L'evidente stabilità della materia è un palese indizio che le cose vanno diversamente, tuttavia per comprendere come risolvere questo problema fu necessario applicare allo studio della materia le nuove idee di una teoria allora nascente: la *meccanica quantistica*.

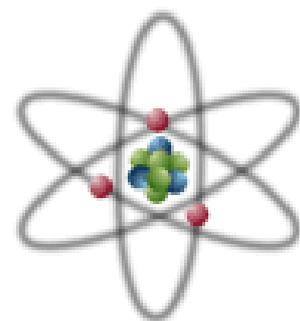


fig. 4. – Il modello atomico di Rutherford.

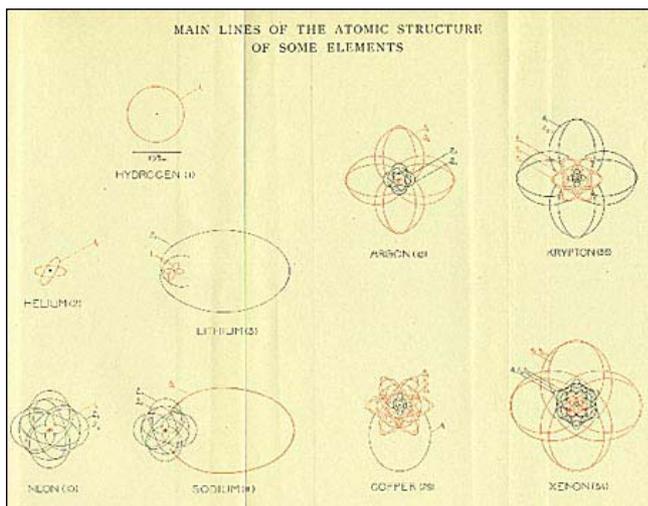


fig. 5. - Atomi a molti elettroni secondo il modello di Bohr-Sommerfeld.

spiegare l'effetto fotoelettrico, il fenomeno secondo cui quando della radiazione elettromagnetica di opportuna lunghezza d'onda incide su una superficie metallica, questa emette elettroni. Einstein coniò il termine di *fone* per indicare il quanto del campo elettromagnetico. L'aspetto granulare del campo elettromagnetico fu confermato nel 1923 da A.H. Compton, il quale verificò che i *raggi X* negli urti con gli elettroni si comportano come corpuscoli materiali per quanto riguarda il trasferimento di energia e di quantità di moto.

Nel 1885, J.J. Balmer aveva studiato le frequenze delle righe spettrali dell'idrogeno, scoprendo una relazione che forniva con grandissima precisione queste frequenze. Quando nel 1913 apprese, per la prima volta, l'esistenza di questa relazione, N. Bohr formulò una teoria dell'atomo che superava i problemi del modello proposto da Rutherford. Per spiegare lo spettro dell'idrogeno, Bohr immaginò che gli elettroni atomici dovessero seguire delle regole assolutamente nuove: Gli elettroni possono ruotare intorno al nucleo solo in corrispondenza di particolari orbite; inoltre il passaggio di un elettrone da un'orbita permessa ad un'altra avviene attraverso l'emissione o l'assorbimento di energia in quantità proporzionale alla costante di Planck. Pur essendo in contraddizione con la fisica classica, la teoria di Bohr, formulata per un atomo circondato da un solo elettrone, si dimostrava sorprendentemente efficace nel riprodurre i dati sperimentali. Tuttavia la teoria di Bohr, sebbene raffinata grazie al contributo di A. Sommerfeld che introdusse nel modello le orbite ellittiche (fig. 5) ed applicò ad esso la relatività einsteiniana, restava palesemente inadeguata nella descrizione di atomi con più elettroni.

Nel 1927 L. de Broglie avanzò l'ipotesi che le idee di Planck e Einstein potessero essere estese anche ai corpi materiali. Cioè, ammettendo che i processi ondulatori presentino caratteristiche corpuscolari, si può supporre che i corpuscoli presentino aspetti ondulatori. Secondo de Broglie ad una particella di quantità di moto p doveva essere associata un'onda di lunghezza d'onda pari al rapporto h/p , dove h è la costante di Planck. Questa rivoluzionaria ipotesi riusciva a fornire una semplice spiegazione delle regole indicate da Bohr.

A partire da tale considerazione, tra il 1925 e il 1926 W. Heisenberg e E. Schrödinger giunsero, indipendentemente, e seguendo linee di pensiero completamente diverse, a formulare due modelli teorici, la *meccanica delle matrici* e la *meccanica ondulatoria* che segnano la nascita di una nuova teoria di cui esse rappresentano due versioni, formalmente differenti ma essenzialmente equivalenti. Un importante risultato della teoria quantistica dovuto a Heisenberg è il *principio di indeterminazione* il quale esclude la possibilità di misurare con assoluta precisione alcune coppie di grandezze. Una di queste coppie è costituita dall'energia e dal tempo: una misura temporale molto precisa implica una grossa indeterminazione nella misura dell'energia e viceversa. Pertanto il

Nel 1900, Max Planck lavorando al problema di come la radiazione emessa da un oggetto è legata alla sua temperatura, ricavò una formula che era in ottimo accordo con i dati sperimentali; la formula però aveva senso solo se si accettava che l'energia di una molecola oscillante fosse quantizzata, cioè che potesse assumere solo determinati valori. L'energia avrebbe dovuto essere proporzionale alla frequenza di oscillazione, e risultava propagarsi in pacchetti, multipli del prodotto della frequenza per una certa costante. Questa costante divenne nota come costante di Planck, o h , ed ha il valore di $6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$. Nel 1905 questa idea venne raccolta e utilizzata da A. Einstein per

principio di indeterminazione consente il verificarsi di una violazione della conservazione dell'energia purché questa si manifesti in un tempo sufficientemente breve.

In particolare, se ΔE è l'entità della violazione e Δt l'intervallo in cui si manifesta, allora il prodotto $\Delta E \cdot \Delta t$ deve sempre essere maggiore della costante di Planck.

Una formulazione della meccanica quantistica in maniera coerente con la teoria della relatività, proposta nel 1905 da A. Einstein, risulta ancora incompleta. Tuttavia nel 1928 P.A.M. Dirac espone una teoria relativistica dell'elettrone che prevedeva l'esistenza di particelle del tutto identiche agli elettroni, ma di carica elettrica opposta: i *positroni*.

Prima dell'avvento degli acceleratori di particelle, la ricerca sperimentale nell'ambito della fisica delle particelle veniva essenzialmente svolta studiando la radiazione di origine cosmica attraverso le tracce lasciate nelle camere a nebbia (fig. 6) e, successivamente, nelle emulsioni fotografiche. Nel 1932 C. Anderson studiando la radiazione cosmica con una camera a nebbia ottenne la fotografia di un elettrone che penetrava in una lastra di piombo e che si arrestava nella camera (fig. 7). La direzione del moto era inequivocabile perché l'elettrone attraversando la lastra perde quantità di moto e la sua curvatura aumenta. Perciò deve andare dal basso verso l'alto. Tuttavia, data la direzione del campo magnetico la carica doveva essere positiva e inoltre non poteva trattarsi di un protone poiché attraversava la lastra. Pur non conoscendo la teoria di Dirac nel 1933 Anderson pubblicò un breve ma convincente articolo dal titolo "The Positive Electron" che confermava l'esistenza

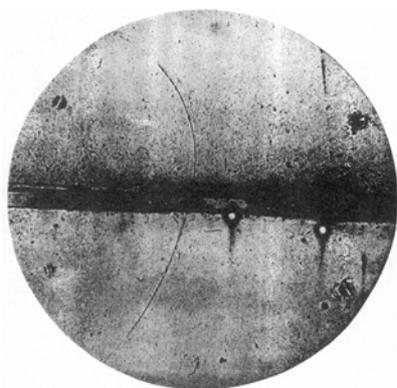


fig. 7. – Traccia di un positrone.

dell'antimateria. Nel seguito furono osservati numerosi esempi in cui un fotone si annichilava producendo una coppia $e^+ e^-$.

Lo sviluppo della meccanica quantistica consentì un livello di comprensione dei fenomeni atomici e molecolari estremamente elevato; tuttavia mancava, ed in parte manca ancora, una equivalente comprensione della fisica del nucleo. Nel 1932, I. Curie e J. Joliot avevano scoperto che irradiando con particelle α il berillio questo emetteva una radiazione molto penetrante che risultava in grado di generare protoni, attraversando strutture materiali contenenti idrogeno, come la paraffina. Erroneamente essi interpretarono tale radiazione come se fosse costituita da fotoni γ . Riesaminando le misure dei Curie, J. Chadwick nello stesso anno mostrò che i dati raccolti erano interpretabili solamente pensando che le particelle α , colpendo il berillio, riuscissero ad espellere particelle con una massa pressoché uguale a quella del protone ma prive di carica elettrica. A tali particelle fu assegnato il nome di *neutroni*.

Per alcuni anni i fisici si erano affidati a modelli apparentemente naturali, in quanto basati sull'ipotesi che il nucleo avesse due soli costituenti, il protone e l'elettrone. Tuttavia l'esistenza di elettroni nel nucleo, pur consentendo di spiegare l'emissione di elettroni da zone profonde dell'atomo, il cosiddetto decadimento β , faceva sorgere molteplici problemi di carattere



fig. 6. – Camera a nebbia.

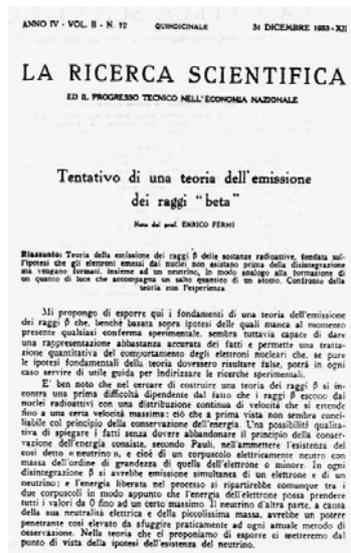


fig. 8. – Articolo di Fermi sul decadimento β .

fondamentale. La scoperta del neutrone suggeriva la possibilità che il nucleo fosse composto esclusivamente da protoni e neutroni; tale modello però non giustificava l'espulsione di elettroni dal nucleo. Inoltre nel decadimento β apparentemente si violava il bilancio energetico tra gli stati di partenza e quelli finali.

Nel 1930 W. Pauli fece l'ipotesi che gli elettroni fossero accompagnati da particelle neutre le quali ristabilivano tutti i bilanci ma erano inosservabili. A queste particelle fu attribuito il nome *neutrini* e il processo responsabile del decadimento β si scrisse nella maniera seguente: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, dove n indica il neutrone, p il protone, e^- l'elettrone e $\bar{\nu}_e$ il neutrino. In seguito si scoprì che la particella emessa nel decadimento del neutrone è, in realtà, un antineutrino, l'antiparticella associata al neutrino. Nel 1933 E. Fermi, raccogliendo l'idea di Pauli formulava una primitiva teoria per la descrizione del decadimento β , (fig. 9). Il sommario dell'articolo pubblicato da Fermi era quanto mai esplicito: *“Teoria dell'emissione dei raggi β delle sostanze radioattive, fondata sull'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione ma vengano formati, insieme ad un neutrino, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico in un atomo. Confronto della teoria con l'esperienza.”* Secondo Fermi l'interazione tra le particelle era di tipo puntuale (fig. 9), ovvero, a differenza del caso elettrico in cui le cariche interagiscono attraverso un campo, in questo caso le particelle interagivano in un solo punto senza che vi fosse un campo che mediasse l'interazione. Sebbene rudimentale, la teoria di Fermi consentì di stabilire la vita media del decadimento β , la forma dello spettro di energia dell'elettrone emesso ed altre caratteristiche del processo. In effetti questa teoria aprì un nuovo campo della fisica delle particelle elementari che ora prende il nome di fisica delle interazioni deboli.

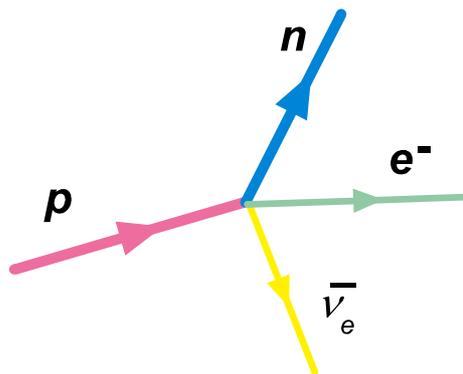


fig. 9. – Il decadimento β secondo la teoria di Fermi.

Il modello secondo cui il nucleo era costituito da protoni e neutroni (*nucleoni*) presenta l'evidente difetto di essere instabile dal punto di vista elettrostatico. Infatti poiché due cariche elettriche uguali si respingono con una forza inversamente proporzionale al quadrato della distanza, secondo l'elettromagnetismo classico il nucleo dovrebbe esplodere sotto l'azione della forza repulsiva originata dai protoni. Ne segue che i protoni e i neutroni all'interno del nucleo devono interagire anche tramite un nuovo tipo di forza in grado di annullare la repulsione elettrostatica.

Prima della nascita della teoria quantistica l'interazione a distanza tra due particelle veniva descritta in termini di un potenziale o di un campo dovuto ad una particella che agisce su di un'altra. Con l'avvento della meccanica quantistica tale visione venne modificata. L'interazione tra le particelle si esplica attraverso lo scambio degli specifici quanti associati al tipo particolare di interazione. Ad esempio, nel caso elettrico i quanti sono i fotoni e la variazione di quantità di moto delle cariche che emettono o assorbono fotoni è responsabile della forza.

Sullo schema dell'interazione elettromagnetica ed ispirandosi alla teoria di Fermi, nel 1935 H. Yukawa propose una teoria in cui descriveva un campo di forza in grado di tenere insieme i protoni e i neutroni all'interno del

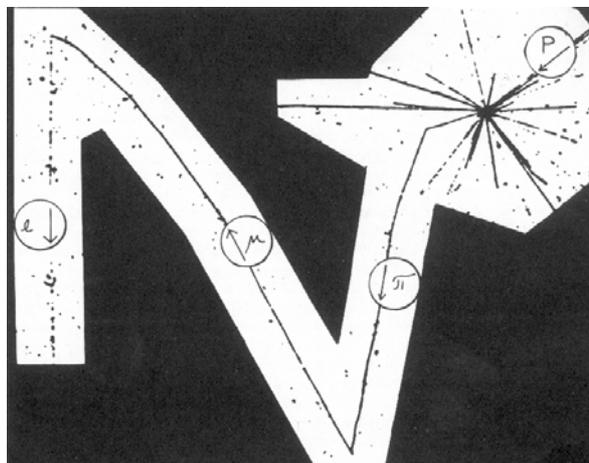


fig. 10. – Produzione e successivo decadimento di un pione carico.

nucleo. Questa teoria rappresentava il punto di partenza per lo studio delle *interazioni forti*. Facendo uso del principio di indeterminazione, Yukawa stimò che la massa del quanto dell'interazione nucleare doveva risultare circa 270 volte superiore a quella dell'elettrone. Poiché tale valore risultava intermedio tra la massa del protone e quella dell'elettrone, Yukawa denominò questa ipotetica particella *mesone*.

A partire dal 1937 si cominciarono ad osservare, nella radiazione cosmica, delle particelle di carica positiva o negativa e di massa intermedia tra l'elettrone ed il protone. A tali particelle fu attribuito il nome provvisorio di *mesotroni*. In un celebre esperimento svolto durante la guerra da M. Conversi, E. Pancini e O. Piccioni, si verificò che i mesotroni positivi si comportano in maniera differente da quelli negativi quando sono arrestati nella materia: quelli positivi decadono come se fossero liberi, quelli negativi invece sono attratti dai nuclei e reagiscono con essi nel caso di

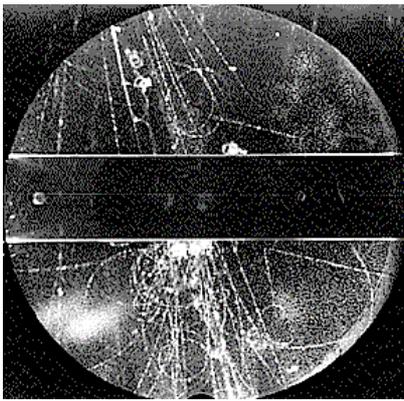


fig. 11. – Decadimento di una particella Λ .

elementi pesanti, mentre decadono, quasi come se liberi, nel caso di elementi leggeri come il carbonio. Tali comportamenti erano in palese contrasto con la natura ipotizzata per i mesoni. Infatti essi dovrebbero reagire violentemente sia con gli elementi leggeri che con quelli pesanti essendo soggetti alle intense forze specificatamente nucleari. Più gruppi di ricerca supposero pertanto che i mesotroni osservati fossero un prodotto di decadimento dei mesoni postulati da Yukawa e che nessuno aveva ancora visto. Solo nel 1947 utilizzando la neonata tecnica delle emulsioni fotografiche, C.M.G. Lattes, G. Occhialini e O. Piccioni osservarono nelle lastre fotografiche esposte sul Pic du Midi la particella postulata da Yukawa. Oggi i mesotroni si chiamano *muoni* e le particelle di Yukawa mesoni π o *pioni*; le reazioni del decadimento del pione, e del muone indicato con μ sono: $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$ e $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu$, (fig. 10).

L'unità di misura dell'energia comunemente adoperata nell'ambito della fisica atomica e nucleare è l'*elettronvolt*, definito come l'energia acquisita da una carica pari a quella dell'elettrone, accelerata fra due punti tra i quali esiste una differenza di potenziale di 1 V; in particolare 1 eV è pari a 1.6×10^{-19} J. Sfruttando la relazione di Einstein che esprime l'equivalenza tra massa ed energia, $E = mc^2$, espressa nella forma $m = E/c^2$, risulta che è possibile esprimere la massa in eV/c^2 , dove c rappresenta la velocità della luce. In particolare 1 eV/c^2 è pari a 1.8×10^{-36} kg. Ad esempio, un elettrone ha massa a riposo di 9.1×10^{-31} kg, così in eV la sua massa è pari a $551 \text{ MeV}/c^2$. Si osservi che a dispetto di quanto possa sembrare le energie in gioco nell'ambito della fisica delle particelle sono minime rispetto all'esperienza quotidiana: per creare un protone occorre condensare l'energia di circa 1 GeV/c^2 , un decimo dell'energia di un battito d'ali di una farfalla. Tuttavia le dimensioni spaziali in cui occorre condensare tali energie sono al di fuori della portata della comune intuizione, ossia un milionesimo di milionesimo di metro. Così concentrata l'energia di battito d'ala equivale ad una temperatura di molti miliardi di gradi.

Utilizzando le emulsioni, nei raggi cosmici oltre ai pioni e muoni comparvero un insieme di particelle chiamate collettivamente *iperioni*, più pesanti dei nucleoni e che tra i prodotti di decadimento contenevano i nucleoni: $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ (1115), $\Sigma^- \rightarrow p + \pi^0$ (1189), $\Xi^+ \rightarrow \Lambda + \pi^-$ (1321), (in parentesi è indicata la massa espressa in MeV/c^2 ; si osservi che il protone ha una massa di $938 \text{ MeV}/c^2$). La particella Λ (fig. 11) presentava un grave paradosso, la sua produzione risultava relativamente abbondante sebbene decadesse con una vita media molto lunga. Ciò contraddice i principi generali della meccanica statistica, se il processo di produzione e quello di decadimento sono uno l'inverso dell'altro. La ragione di questo curioso comportamento fu intuuta da A. Pais nel 1952 e verificata da Y. Nambu, K. Nishijima, Yamaguchi e Fowler. La produzione dei Λ non è l'inverso del suo decadimento; essa avviene secondo la reazione: $\pi^+ + n \rightarrow \Lambda + K^+$, dove K^+ è una particella ora nota col nome di *kaone*. Per spiegare questo strano fenomeno, M. Gell-Mann e

Nishijima nel 1955 postularono indipendentemente l'esistenza di una nuova proprietà di carattere generale delle particelle, alla quale, in mancanza di meglio, attribuirono il nome di *stranezza*. Attribuendo alle particelle gli opportuni valori di questa grandezza e postulando che la somma totale delle stranezze delle singole particelle resti invariata durante le reazioni dovute alla classe di interazioni forti è possibile costruire uno schema in accordo con gli esperimenti.

Un principio generale della fisica afferma che se si svolge un esperimento di fisica e lo si osserva o direttamente o servendosi di uno specchio perfetto, non c'è modo di rendersi conto di quale sia la visione diretta e quale l'immagine speculare. Questa proprietà prende il nome di *principio di conservazione della parità*. Nel 1955 si cominciarono ad osservare delle particelle, allora denominate τ e θ , ora K^\pm , con caratteristiche confrontabili entro gli errori sperimentali ma che apparentemente decadevano in modo diverso. In particolare: $\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ e $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$. Si può provare che la parità dell'insieme di due pioni è diversa da quella di tre pioni, così la conservazione della parità impedisce che una stessa particella possa decadere talvolta emettendo due pioni e talvolta tre. Nel 1956 T. D. Lee e C.N. Yang fecero notare che non esisteva alcuna prova diretta che l'interazione debole, quella descritta da Fermi e che spiegava il decadimento β , conservasse la parità, così proposero una serie di esperimenti per verificare la loro ipotesi. Subito dopo la pubblicazione del lavoro di Lee e Yang un gruppo di fisici coordinati da C.S. Wu e altri due gruppi indipendenti dimostrarono che la conservazione della parità non valeva per le interazioni deboli.

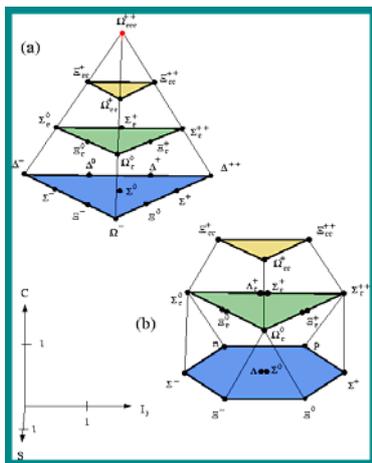


fig. 13. – Multipletti adronici.

Prima degli anni '50 la fisica delle particelle aveva progredito essenzialmente attraverso lo studio della radiazione di origine cosmica. A partire da tale data la tecnologia degli acceleratori di particelle era giunta ad un livello sufficiente da garantire la generazione di fasci stabili di caratteristiche definite e di energie sempre maggiori (fig. 12). Come conseguenza di ciò nel decennio compreso tra gli anni '50 e '60 si ebbe un tumultuoso proliferare di particelle. In particolare nel 1955 un gruppo guidato da E. Segrè scoprì l'antiprotone, confermando in maniera definitiva l'esistenza dell'antimateria. La situazione era, in qualche senso, analoga a quella della chimica precedente alla compilazione della tavola periodica; ad un giovane ricercatore che chiese allora a Fermi informazioni sul nome di una nuova particella appena scoperta, questi rispose: "Young man, if I could remember the names of all these particles, I would have been a botanist".

Un approccio alla comprensione della varietà di particelle fu l'identificazione della eventuale presenza di simmetrie. Tale strada era già stata indicata nel 1932 da Heisenberg per giustificare



fig. 12. – L'acceleratore Cosmotron, il primo ad accelerare protoni ad un'energia superiore a $1 \text{ GeV}/c^2$ (Brookhaven National Laboratory, USA).

Un principio generale della fisica afferma che se si svolge un esperimento di fisica e lo si osserva o direttamente o servendosi di uno specchio perfetto, non c'è modo di rendersi conto di quale sia la visione diretta e quale l'immagine speculare. Questa proprietà prende il nome di *principio di conservazione della parità*. Nel 1955 si cominciarono ad osservare delle particelle, allora denominate τ e θ , ora K^\pm , con caratteristiche confrontabili entro gli errori sperimentali ma che apparentemente decadevano in modo diverso. In particolare: $\theta^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$ e $\tau^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^-$. Si può provare che la parità dell'insieme di due pioni è diversa da quella di tre pioni, così la conservazione della parità impedisce che una stessa particella possa decadere talvolta emettendo due pioni e talvolta tre. Nel 1956 T. D. Lee e C.N. Yang fecero notare che non esisteva alcuna prova diretta che l'interazione debole, quella descritta da Fermi e che spiegava il decadimento β , conservasse la parità, così proposero una serie di esperimenti per verificare la loro ipotesi. Subito dopo la pubblicazione del lavoro di Lee e Yang un gruppo di fisici coordinati da C.S. Wu e altri due gruppi indipendenti dimostrarono che la conservazione della parità non valeva per le interazioni deboli.

Prima degli anni '50 la fisica delle particelle aveva progredito essenzialmente attraverso lo studio della radiazione di origine cosmica. A partire da tale data la tecnologia degli acceleratori di

particelle era giunta ad un livello sufficiente da garantire la generazione di fasci stabili di caratteristiche definite e di energie sempre maggiori (fig. 12). Come conseguenza di ciò nel decennio compreso tra gli anni '50 e '60 si ebbe un tumultuoso proliferare di particelle. In particolare nel 1955 un gruppo guidato da E. Segrè scoprì l'antiprotone, confermando in maniera definitiva l'esistenza dell'antimateria. La situazione era, in qualche senso, analoga a quella della chimica precedente alla compilazione della tavola periodica; ad un giovane ricercatore che chiese allora a Fermi informazioni sul nome di una nuova particella appena scoperta, questi rispose: "Young man, if I could remember the names of all these particles, I would have been a botanist".

Un approccio alla comprensione della varietà di particelle fu l'identificazione della eventuale presenza di simmetrie. Tale strada era già stata indicata nel 1932 da Heisenberg per giustificare

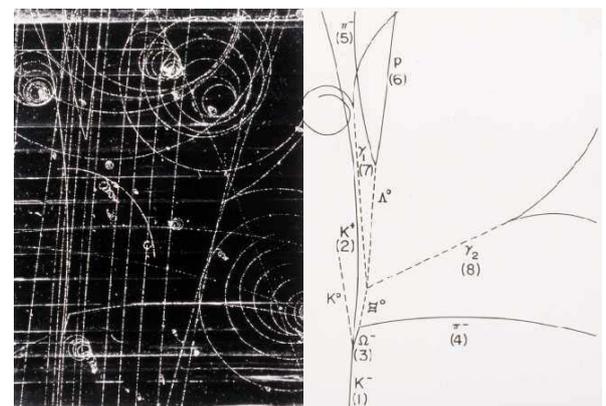


fig. 14. – Fotografia e schema del decadimento di una particella Ω^- .

alcune analogie esistenti tra il protone e il nucleone. Secondo Heisemberg tali particelle potevano essere riguardate come due stati di una stessa particella, il nucleone. A tale simmetria fu attribuito il nome di *spin isotopico*. Un'estensione della simmetria dello spin isotopico fu identificata nel 1962 da Gell-Mann e Y. Ne'eman. Secondo questo schema i nucleoni, assieme ad altre sei particelle erano classificabili in un otetto. Un secondo otetto era composto dai tre mesoni π , dai K e da una particella appena scoperta, η . L'identificazione di tali raggruppamenti di *adroni* (fig. 13), ovvero delle particelle sensibili all'interazione forte, permetteva di stabilire delle relazioni tra le masse insieme ad altre proprietà. Un problema era costituito da un gruppo di dieci particelle, un decupletto che tuttavia risultava incompleto per la mancanza di un termine. Della corrispondente particella fu possibile prevedere sia la massa che le caratteristiche di decadimento. La scoperta nel 1964 della particella mancante, denominata Ω^- , con le caratteristiche e la massa previste, segnò il successo del modello proposto (fig. 14). Secondo lo schema indicato da Gell-Mann e Ne'eman gli adroni potevano essere organizzati in ottetti o in decupletti, tuttavia essi si accorsero in seguito che era possibile costruire tutti questi multipletti a partire da tripletti.

Questa è l'idea base del modello a *quark*: gli adroni sono composti da oggetti più semplici. Nel 1964 Gell-Mann e G. Zweig ipotizzarono che gli adroni fossero particelle composte, formate ciascuna da una diversa combinazione di un piccolo numero di costituenti fondamentali, denominati quark. Tra le altre caratteristiche i quark posseggono carica elettrica pari ad una frazione esatta della carica dell'elettrone, in particolare il protone ed il neutrone sono costituiti di tre quark di due soli tipi: u , di carica pari a $+2/3$ e d , di carica pari a $-1/3$. Così allo stato attuale delle nostre conoscenze l'atomo è costituito da due soli tipi di particelle elementari, gli elettroni ed i quark (fig. 15). Sul finire degli anni '60 J.I. Friedman, H.W. Kendall, R.E. Taylor effettuando una serie di esperimenti presso l'acceleratore SLAC (Stanford, California) analoghi a quello di Rutherford che portò alla scoperta del nucleo atomico confermarono l'ipotesi dei quark. Negli esperimenti, elettroni di alta energia venivano sparati contro protoni e neutroni, la distribuzione energetica e angolare degli elettroni diffusi indicava che alcuni di essi urtavano contro oggetti puntiformi elettricamente carichi, contenuti all'interno dei protoni e dei neutroni.

La ricerca di evidenze sperimentali del modello a quark ha caratterizzato tutta la fisica delle particelle dell'ultimo trentennio del ventesimo secolo. Attualmente il modello a quark degli adroni è inserito all'interno di una teoria generale che prende il nome di *modello standard* (fig. 16). Gli elementi che costituiscono questo modello sono divisi in due classi: Le particelle materiali e i mediatori delle interazioni. Tra le particelle materiali esiste un'ulteriore distinzione tra quelle che sono influenzate dall'interazione forte, i quark e quelle che non lo sono, i *leptoni*.

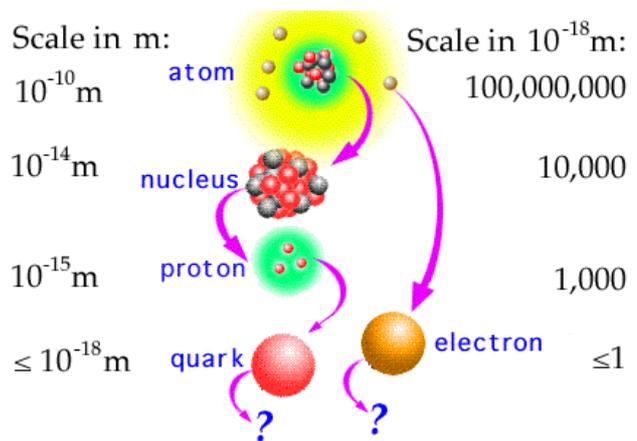


fig. 15. – Gerarchia dei componenti della materia e ordini di grandezza.

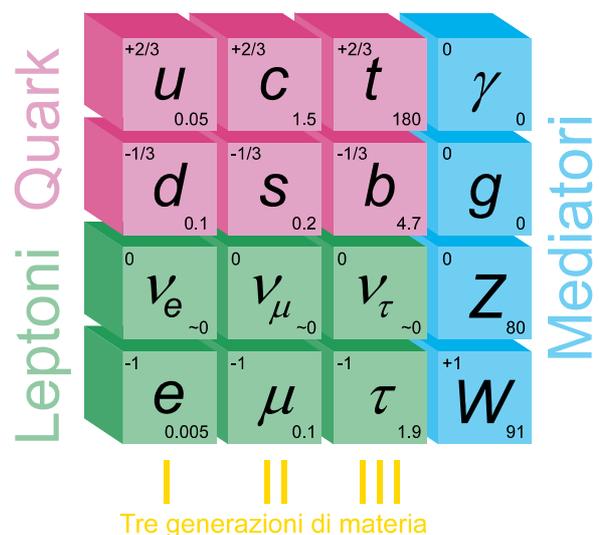


fig. 16. – Il modello standard. Per ogni particella sono indicate la carica (in alto a sinistra, in multipli del valore assoluto della carica dell'elettrone) e la massa (in basso a destra in GeV/c^2).

Attualmente si ritiene che tutti gli adroni siano costituiti da sei tipi (*flavor*) di quark o antiquark. Sebbene queste particelle abbiano carica frazionaria, gli adroni hanno carica intera poiché i quark formano combinazioni in cui la somma delle cariche è un intero. Ad esempio, i mesoni sono formati da un quark e da un antiquark, le cui cariche possono dare somma -1 , 0 , $+1$; i protoni e i neutroni sono formati rispettivamente da due quark u e da un quark d , con carica totale $+1$ e da un quark u e due quark d con carica totale nulla.

Analogamente ai quark, si osservano sei tipi di leptoni. Alla luce delle attuali conoscenze la massa di tre di essi, i neutrini, è nulla. Gli altri tre leptoni, l'elettrone, il muone e il *tau* hanno le stesse caratteristiche e si distinguono solo per la massa.

Per interazione si intende un processo che determina il decadimento di una particella o, più generalmente la sensibilità di una particella alla presenza di un'altra particella. In natura si osservano quattro tipi di interazioni: L'interazione gravitazionale, l'interazione elettromagnetica, l'interazione debole e l'interazione forte.

L'interazione gravitazionale è responsabile della forza tra oggetti per effetto della loro energia. La sua formalizzazione fu sviluppata da I. Newton nella seconda metà del diciassettesimo secolo; nel 1916 A. Einstein propose una nuova teoria relativistica che sostituiva la vecchia teoria di Newton; nel seguito provò, senza successo, ad unificare la gravitazione con l'elettromagnetismo. Sulla scala delle particelle elementari l'influenza della gravità è trascurabile e attualmente non esiste una teoria soddisfacente che integra questa forza nello schema della teoria quantistica dei campi.

L'interazione elettromagnetica è responsabile della formazione dei campi elettrici e magnetici intorno alle cariche elettriche e alle correnti elettriche. Lo studio di questa interazione si è sviluppato essenzialmente nel corso del diciannovesimo secolo; nel 1864 J.C. Maxwell attraverso un insieme di equazioni formulò una descrizione matematica dei fenomeni elettromagnetici allora noti. Nel 1947 R. Feynman e J. Schwinger completarono una teoria quantistica dell'elettromagnetismo, conosciuta come *elettrodinamica quantistica (QED)* che ha fatto da modello per tutte le teorie successive. In particolare R. Feynman introdusse un efficace metodo grafico per la visualizzazione dei processi di interazione. La *QED* risolse un'antica questione relativa alla natura della carica elettrica: Essa va intesa come una misura della capacità di emettere e assorbire fotoni. I fotoni emessi nell'interazione tra due corpi carichi violano il principio di conservazione dell'energia e per questo sono detti *virtuali*, tuttavia, alla luce del principio di indeterminazione, questa violazione è possibile.

Un'ulteriore conseguenza del principio di indeterminazione è che il raggio di azione di una forza è inversamente proporzionale alla massa della particella che la trasmette. La teoria di Fermi del decadimento β , postulando un'interazione puntuale, presentava il difetto di richiedere una particella di massa infinita per la trasmissione dell'interazione debole. Successive ricerche rivelarono che tale interazione si esplica su una distanza non nulla e inferiore a $10^{-14} m$; ciò indica che i corrispondenti mediatori devono avere una massa diversa da zero. Negli anni '60 S.L. Glashow, S. Weinberg e A. Salam proposero una teoria che evidenziava come l'interazione debole e quella elettromagnetica fossero differenti manifestazioni di uno stesso fenomeno. Questa teoria indicava l'esistenza di tre mediatori, W^+ , W^- e Z^0 , e ne stimava le masse. Alla luce di questo modello, il decadimento β è visto come la trasformazione di un quark d del neutrone in un quark u attraverso l'emissione di una particella W^- (fig. 16, 17, 18).

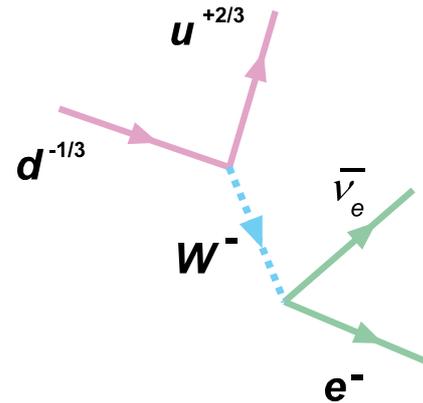


fig. 16. – Il decadimento β secondo il modello a quark.

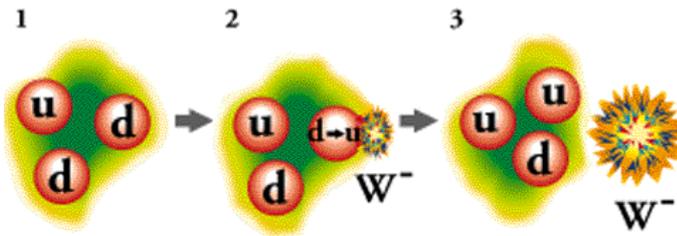


fig. 17. – Un quark d del neutrone (1) decade in un quark u emettendo una particella W^- (2); il nuovo quark u resta legato agli altri (3).

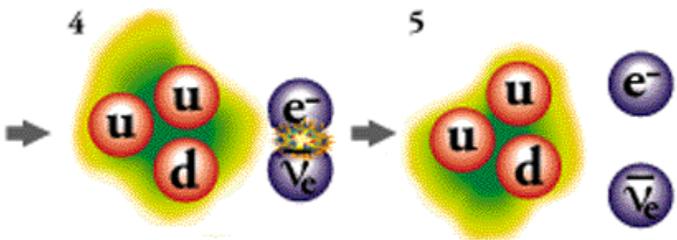


fig. 18. – Una coppia elettrone-antineutrino emerge dal decadimento di W^- (4) ed infine le tre particelle si separano definitivamente (5).

Nel 1983 C. Rubbia e S. van der Meer presso il CERN di Ginevra rivelarono le particelle W^\pm e Z^0 nei prodotti dell'interazione tra elettroni e positroni, confermando i valori indicati per le corrispondenti masse (fig. 19).

Nel 1964 P. Higgs propose un meccanismo, detto *rottura spontanea della simmetria*, che giustificava come, nell'ambito dell'unificazione tra forza debole e elettromagnetica, le particelle W^\pm e Z^0 fossero dotate di massa mentre il fotone ne fosse privo. A tale scopo introdusse una nuova particella, H , ora nota col nome di *bosone di Higgs*; secondo questa teoria la massa di una particella è una misura dell'intensità dell'accoppiamento con H . Nell'estate del 2000, nella fase terminale di funzionamento dell'acceleratore LEP del CERN sono state osservate le prime probabili evidenze dell'esistenza del bosone di Higgs.

L'osservazione che i mesoni π sono particelle composte indicarono che tali particelle non potevano rappresentare i reali mediatori dell'interazione forte. Per spiegare alcune combinazioni osservate di quark, come ad esempio la particella Ω^- , composta da tre quark s , M.Y. Han e Y. Nambu nel 1965 suggerirono che i quark potessero essere contraddistinti da un ulteriore tipo di carica, alla quale fu attribuito il nome di *colore*. L'ipotesi della carica di colore generava due regole per la formazione degli adroni: I barioni devono essere formati da tre quark tutti di diverso colore; i mesoni devono essere formati da un quark e da un antiquark dello stesso colore, ma con uguale presenza dei tre colori. Da tali regole segue che nessun adrone potrà risultare dotato di colore.

Nel 1916 A. Einstein aveva dimostrato che certe proprietà di simmetria dello spazio-tempo determinavano le forze gravitazionali; nel 1961 C.N. Yang e R.L. Mills estendendo tale principio alla fisica delle particelle, scoprirono che da una simmetria tra particelle può derivare l'esistenza di un corrispondente campo di forze. Originariamente si provò ad applicare queste idee agli adroni; tali tentativi risultarono infruttuosi poiché le simmetrie degli adroni sono solo approssimate mentre lo schema di Yang e Mills si applica unicamente a simmetrie esatte. Al contrario, esistendo una simmetria esatta tra i colori dei quark, ne segue l'esistenza di un campo di forze, detto *gluonico*, al quale si attribuisce il legame dei quark negli adroni. Questo campo di forza è ritenuto responsabile delle interazioni forti.

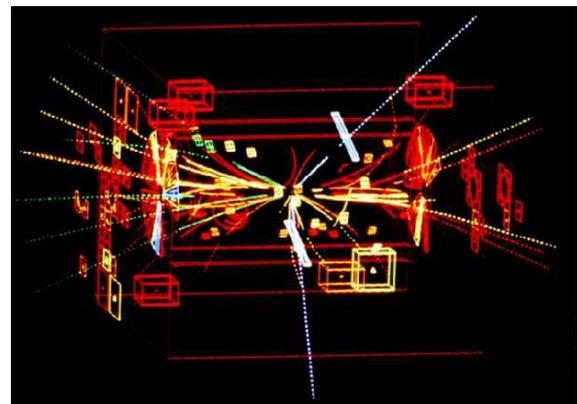


fig. 19. – Immagine al computer della prima osservazione della particella Z^0 .

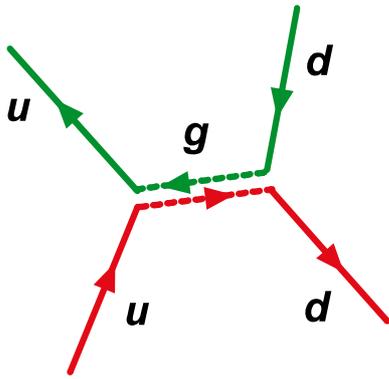


fig. 20. – Interazione di colore tra quark: un quark rosso modifica il suo colore in verde emettendo un gluone rosso-antiverde.

La teoria del colore, detta *cromodinamica quantistica* (*QCD*), postula l'esistenza di 8 particelle prive di massa, dette *gluoni*, che mediano l'interazione forte; come i quark, i gluoni non sono mai stati rivelati isolatamente, tuttavia esistono numerose evidenze sperimentali della loro esistenza. L'interazione tra quark attraverso la forza forte si esplica come uno scambio dei corrispondenti colori attraverso un gluone (fig. 20).

Se uno dei quark di un adrone viene rimosso (fig. 21), le linee di forza del campo gluonico tra i quark si stirano determinando un aumento dell'energia del campo; ad un certo punto diventa energeticamente favorevole la generazione di una nuova coppia di quark-antiquark. Nel processo l'energia è conservata poiché l'energia del campo gluonico risulta convertita nella massa dei nuovi quark. In questo modo le linee di forza di tale campo tornano nella configurazione originaria.

Le interazioni forti degli adroni, come il legame di protoni e neutroni in un nucleo, sono una manifestazione dell'interazione residua tra i quark componenti, come le forze intermolecolari di Van der Waals sono una debole traccia delle forze elettromagnetiche che legano gli elettroni ai nuclei.

Il modello standard comprende tutte le nostre attuali conoscenze in merito ai costituenti ultimi della materia. Con l'ipotesi del colore dobbiamo contare 18 quark, 6 leptoni e 12 mediatori delle interazioni; se comprendiamo anche le corrispondenti antiparticelle arriviamo ad un totale di 60 particelle. Il principale difetto di questo modello è di carattere estetico: richiede un numero eccessivo di componenti e, inoltre, non dà ragione di alcune sue caratteristiche, come, ad esempio, le masse. Quello che si ritiene pertanto auspicabile sarebbe l'identificazione di uno schema più semplice, caratterizzato da una maggiore economia di parametri.

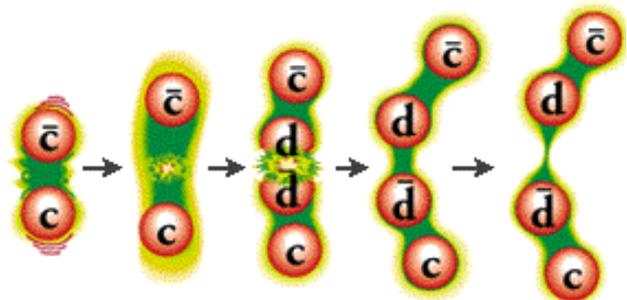


fig. 21. – Decadimento forte di una particella J/ψ in una coppia di mesoni D .

Bibliografia

R.N. Cahn, G. Goldhaber, *The Experimental Foundations of Particle Physics*, Cambridge University Press, New York 1989;

E. Bellone, *Storia della fisica*, UTET, Torino 1990;

G. dalla Lunga, E. Ricci, *Particelle*, L'Astronomia n.213, ottobre 2000;

R. P. Feynman, *QED The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, Princeton 1985.

G. Gamow, *Biografia della fisica*, Mondadori editore, Milano 1998;

S.L.Glashow, *Quark dotati di colore e di sapore*, Le Scienze n.89, gennaio 1976;

F. Halzen, A. D. Martin, *Quarks and Leptons*, John Wiley & Sons, New York 1983;

L. Holliday, *Le prime idee sulle forze interatomiche*, Le Scienze n.54, ottobre 1970;

R. Maiocchi, *Storia della scienza in occidente*, La Nuova Italia editrice, Firenze 1995;

D. H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics*, Addison-Wesley, 1986;

C. Quigg, *Particelle elementari e forze*, Le Scienze n.202, giugno 1985;

E. Segrè, *Personaggi e scoperte della fisica*, Mondadori editore, Milano 1996.