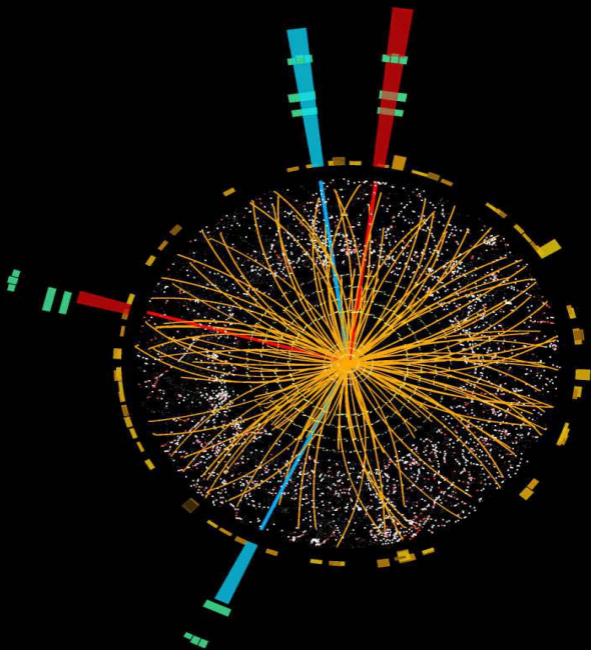


# L'ANTIMATERIA

Dividere l'Indivisibile

Vol. 2





DIVIDERE  
L'INDIVISIBILE



Nel corso del XX secolo, uno dei principali obiettivi della fisica fu l'identificazione delle particelle subatomiche e la formulazione di una teoria in grado di spiegare le loro caratteristiche, nella speranza di chiarire le proprietà della materia e dell'energia. Ben presto ci si accorse che questo sforzo doveva fare i conti con qualcosa di completamente inatteso: l'Antimateria.

# SMONTARE L'ATOMO

I pattern dell'universo sono molto simili a quelli presenti nel mondo subatomico: mentre nel cosmo i pianeti, le stelle e le galassie orbitano attorno a un centro di gravità, nel mondo nanometrico gli elettroni orbitano in modo molto simile attorno a un nucleo, con la differenza che, in questo caso, la forza coinvolta è quella elettrica. Nel

corso del XX secolo, si dimostrò che questi campi erano in intima relazione tra loro e che era possibile spiegare l'immensità del cosmo a partire dalla fisica delle particelle. La tendenza a mettere in relazione le strutture del macrocosmo con quelle del microcosmo si riconosce già nelle civiltà più antiche, che si chiedevano quali fossero le leggi che governano la Terra, il Sole e l'universo, in che cosa consistesse il cosmo e da cosa fosse formata la materia.

I primi a concepire l'idea di un'unità indivisibile della materia, cui fu dato il nome di atomo, furono i filosofi greci Leucippo e Democrito, a metà del V secolo a.C. Poco dopo, Platone

propose una dottrina che affermava l'esistenza di quattro particelle formate da diversi poliedri regolari, ognuna delle quali rappresentava uno dei quattro elementi della natura: il fuoco, l'aria, l'acqua e la terra.

Questa linea di pensiero, conosciuta come atomismo, non trovò continuità nel corso dei secoli, fino a quando nel 1662 il fisico inglese Robert Boyle recuperò il concetto di atomo per descrivere la quantità più piccola di materia e lo utilizzò per spiegare il fenomeno di compressione dei gas, dal momento che tale fenomeno implicava l'esistenza di spazi vuoti tra le componenti dei gas stessi.



La teoria atomista si dimostrò in accordo e adattabile ai risultati sperimentali e, nel XX secolo, la fisica delle particelle e la matematica che la descriveva si evolsero in strettissima relazione. Negli anni '30, venne ipotizzata per la prima volta l'esistenza teorica di una particella prima della sua identificazione sperimentale: si trattava del positrone, l'antiparticella dell'elettrone. Attraverso la combinazione di teoria e pratica, di esperimenti fisici e di equazioni matematiche si è giunti alla formulazione di un modello in grado di spiegare in modo unificato tutte le interazioni conosciute della natura, fatta eccezione

per la gravità. Questo modello, chiamato modello standard non solo prevede l'esistenza dell'antimateria, ma la contempla anche quale elemento essenziale e indispensabile affinché possa esistere la materia ordinaria che conosciamo e di cui siamo costituiti.

La base della teoria atomica attuale fu definita nel 1808 dal chimico britannico John Dalton, il quale ipotizzò che gli atomi fossero sfere indivisibili e inalterabili da qualsiasi processo chimico. Anche se questa concezione è stata smentita, alcune delle idee di Dalton sono diventate fondamenti della chimica moderna come, per esempio, l'affermazione che gli atomi con caratteristiche identiche corrispondono a

uno stesso elemento.

Più tardi, alcuni scienziati, come i britannici William Prout e Norman Lockyer, affermarono che gli atomi erano formati da particelle più piccole, una teoria che non trovò grande credito fino a quando, nel 1897, Joseph John Thomson osservò che i raggi catodici (in seguito si scoprì che erano costituiti da elettroni accelerati da un campo elettrico) potevano viaggiare nell'aria per distanze molto maggiori rispetto a quelle che si sarebbero potute prevedere se essi fossero stati costituiti da particelle di dimensioni simili quella di un atomo. I calcoli effettuati da Thomson mostrarono che in base alla relazione tra

la massa e l'energia di tali particelle, queste dovevano essere 1000 volte più piccole dell'atomo di idrogeno e dimostrò che tale risultato non variava in funzione dell'elemento utilizzato per produrre i raggi catodici. In questo modo, Thomson scoprì che tutti gli atomi contenevano particelle molto più piccole con carica elettrica negativa: aveva scoperto gli elettroni, dividendo ciò che fino ad allora era considerato indivisibile. Nel 1904 propose un nuovo modello atomico che, pur continuando a contemplare l'atomo come un'entità elettricamente neutra, incorporava gli elettroni: l'atomo veniva così descritto come una sfera di materia carica positivamente con gli elettroni immersi

al suo interno.

Lo scienziato giapponese Hantaro Nagaoka rifiutò il modello di Thomson, avanzando come argomentazione il fatto che le cariche elettriche non possono penetrarsi tra loro. Propose quindi un nuovo modello atomico in cui gli elettroni orbitavano attorno alla positiva, come gli anelli di Saturno orbitano attorno al pianeta. A causa della mancanza di prove sperimentali, le sue teorie non ebbero grande impatto durante la sua epoca. La situazione cambiò tra il 1908 e il 1911, quando il fisico neozelandese Ernest Rutherford ideò un esperimento per determinare la distribuzione degli elettroni all'interno

dell'atomo. A tal fine, Rutherford bombardò una lamina molto sottile di oro con particelle alfa (nuclei di elio formati da due protoni e due elettroni), ipotizzando che, se il modello di Thomson fosse stato corretto, tali particelle avrebbero attraversato la lamina senza difficoltà, salvo una piccola frazione che avrebbe dovuto mostrare una leggera dispersione dovuta all'interazione elettrica.

Il risultato sperimentale fu una sorpresa, in quanto si osservò che la maggior parte delle particelle attraversava la lamina come se non esistesse alcuna interazione, poche venivano deviate leggermente e altre ancora subivano una deviazione della

traiettoria di oltre  $90^\circ$ , invertendo persino la direzione di moto. Queste osservazioni non si adattavano assolutamente al modello di Thomson, quindi Rutherford propose un nuovo modello in cui l'atomo era costituito da un nucleo, dove si concentrava la carica positiva, circondato da una nube di elettroni con carica negativa nella quale gran parte dello spazio era vuota.

Questo nuovo modello, pur spiegando perfettamente i risultati degli esperimenti di Rutherford, aveva alcuni punti deboli. In base alle conoscenze scientifiche dell'epoca, un elettrone che orbitava attorno al nucleo avrebbe dovuto perdere energia sotto forma di

radiazione elettromagnetica. Di conseguenza, gli elettroni sarebbero dovuti cadere sul nucleo che avrebbe perso la sua carica positiva trasformandosi in una particella elettricamente neutra. Dal momento che le cariche positive e negative non si respingono tra loro, in una frazione di secondo la materia sarebbe collassata senza conservare né forma né dimensione: per esempio, tutta la massa di una casa alla fine avrebbe occupato un volume inferiore a quello di un granello di sabbia. A questa difficoltà teorica di primo ordine, si aggiungevano risultati sperimentali che non concordavano completamente con il modello di Rutherford.



Nel corso del XIX secolo era stato osservato che i gas presentano uno spettro luminoso unico e particolare, cioè assorbono determinate lunghezze d'onda della luce unicamente in funzione della loro composizione chimica.

Analizzando lo spettro dell'atomo di idrogeno, nel 1913 il fisico danese Niels Bohr propose che l'esistenza di tale spettro fosse dovuta al fatto che gli elettroni non possono orbitare liberamente attorno al nucleo, ma possono farlo solo lungo orbite caratterizzate da determinati livelli di energia permessi. Secondo il modello di Bohr, l'energia necessaria affinché l'elettrone si trovi in un'orbita

determinata aumenta via via che ci si allontana dal nucleo. In questo modo, per spostarsi di livello, un elettrone deve assorbire o emettere energia, a seconda che si sposti, rispettivamente, in un'orbita più lontana o più vicina al nucleo. Le linee che si osservano negli spettri di un determinato elemento sarebbero definite dall'energia luminosa necessaria affinché un elettrone salti da un livello di energia all'altro.

Il modello atomico di Bohr, che rifinì quelli proposti da Dalton, Thomson e Rutherford, risulta impossibile nell'ambito della fisica classica, in base alla quale i livelli energetici possono assumere qualsiasi valore si desideri. Tuttavia, all'inizio

del XX secolo, cominciava ad affermarsi la meccanica quantistica, una branca della fisica che contempla il fatto che l'energia non è una grandezza continua, ma una grandezza quantificabile secondo determinati valori possibili.

Per spiegare la differenza tra questi due modelli, è possibile ricorrere a una similitudine: se si vogliono appendere delle mensole a una parete in un mondo governato dalla fisica classica, queste possono essere collocate a qualsiasi altezza rispetto al pavimento; al contrario, se le leggi della fisica fossero quelle della meccanica quantistica, esisterebbero solo alcune

altezze permesse, per esempio 1 m, 1,5 m, 1,75 m e 2 m. Nel quadro della meccanica quantistica, ipotizzando che si collochi una mensola a ogni altezza permessa, si potrebbero riporre dei libri su ciascuna di esse in modo tale che, quanto più elevata è l'altezza alla quale si trova la mensola, tanto maggiore sarà l'energia potenziale del libro. Inoltre, se un libro viene spostato da una mensola a un'altra posta più in basso, la sua energia diminuirà, come accade per l'energia degli elettroni al diminuire dei livelli energetici.

Il modello di Bohr dovette essere modificato, in quanto non era in grado di spiegare gli spettri di altri elementi più pesanti dell'idrogeno; in ogni caso, per

sviluppare il nuovo modello atomico, si continuò a utilizzare la meccanica quantistica: fu conservata che gli elettroni possiedono determinati livelli di energia permessi e si aggiunse il concetto che ogni livello energetico può essere occupato da un numero limitato di elettroni; in questo modo, i livelli di energia vengono riempiti progressivamente, a partire da quello con minore energia, determinando le caratteristiche di ciascun elemento. Una delle osservazioni sperimentali che dovevano essere incluse nel nuovo modello era l'esistenza dello spin dell'elettrone le cui prime evidenze furono osservate dai fisici tedeschi Otto

Stern e Walther Gerlach in un esperimento realizzato nel 1922.

Grazie a tutti questi risultati, l'atomo smise di essere considerato l'unità minima della materia: non era indivisibile, ma era costituito da elettroni che orbitavano attorno a un nucleo dotato di carica positiva. Ma restava ancora molto da scoprire, e da dividere. In seguito alla scoperta degli elettroni, portatori della minima quantità di carica negativa conosciuta fino a quel momento, alla quale si attribuisce convenzionalmente il valore  $-1$ , divenne concepibile la possibile esistenza di particelle portatrici di una carica positiva, con un valore di  $+1$ , un'idea che disgregava il nucleo atomico, ancora

considerato come un corpo unico. Nel 1917, Rutherford dimostrò che i nuclei di idrogeno possono combinarsi formando altri nuclei: questa osservazione fu identificata con la scoperta del protone, in quanto il nucleo di idrogeno era costituito da un solo protone. Nel 1932, il britannico James Chadwick scoprì il neutrone, con il quale si riuscì a spiegare l'eccesso di massa concentrata nel nucleo atomico.

Alla fine del XIX secolo e all'inizio del XX, le scoperte precedenti e altre teorie sviluppate in altri campi della fisica misero in evidenza l'incapacità della fisica classica di spiegare tutte le interazioni della natura.

Le leggi di Newton riuscivano a spiegare le interazioni su scala umana, ma si dimostrò che non erano applicabili al mondo subatomico o ai sistemi con velocità prossime a quella della luce. I più grandi fisici e matematici dell'epoca dovettero quindi sviluppare nuove branche della fisica, come la meccanica quantistica e la relatività, per definire le interazioni in queste particolari condizioni, segnando così l'inizio di una nuova era nel progresso della scienza.



# GLI OSPITI INATTESI

Le nuove teorie della fisica, che dall'inizio del XX secolo riuscirono a spiegare risultati sperimentali prima inspiegabili, avevano anche alcuni punti deboli. La relatività e la meccanica quantistica erano state definite in maniera indipendente, in modo tale che i sistemi quantistici non potevano essere

spiegati da un punto di vista relativistico. Viceversa, i fenomeni relativistici non si adattavano alle condizioni della meccanica quantistica. Tuttavia, queste distinzioni non si applicano ai fenomeni naturali, che invece incorporano caratteristiche di entrambe le teorie: le particelle subatomiche, per esempio, si muovono a una velocità prossima a quella della luce e, di conseguenza, possono essere considerate in un quadro relativistico.

Nel 1928, Paul Dirac propose un'equazione per descrivere il comportamento dell'elettrone, che era perfettamente compatibile sia con la meccanica quantistica sia con la relatività ristretta. L'equazione di Dirac

risolse tutti gli interrogativi sul comportamento degli elettroni, ma aprì nuove questioni da dirimere. La più importante era legata al fatto che l'equazione di Dirac accettava infinite soluzioni di energia negativa, e ciò implicava l'assenza di un limite inferiore di energia per l'elettrone. In altre parole un elettrone poteva cadere in un pozzo senza fondo, producendo una quantità infinita di energia, senza riceverne alcuna.

Questo risultato era in contraddizione non solo con i dati sperimentali, in base ai quali era possibile identificare uno stato di energia minima dell'elettrone, ma anche

con le leggi di conservazione dell'energia. Dirac trovò una spiegazione a questo fenomeno: giustificò le infinite soluzioni negative della sua equazione affermando che in ogni punto dell'universo esistono una quantità infinita di massa e una quantità infinita di energia, che tuttavia non sono rilevabili in quanto sono tutte occupate da elettroni. Questa infinità di stati fu battezzata con il nome di mare di Dirac. Tuttavia, Dirac si rese conto che se si forniva un'energia sufficiente, un elettrone poteva abbandonare la sua posizione, lasciando un "buco" con carica di valore assoluto identico alla carica dell'elettrone, ma di segno positivo. Inoltre, gli elettroni vicini

potevano andare a occupare questo spazio lasciato vuoto, determinando un cambiamento nella posizione del buco. In questo modo, il buco in movimento poteva essere perfettamente assimilato a una particella con la stessa carica dell'elettrone, ma di segno opposto. A quel tempo era già stato scoperto il protone, una particella con caratteristiche simili a quella ipotizzata da Dirac. Tuttavia, Dirac si accorse che nel suo mare di elettroni si doveva tenere conto anche della massa delle particelle che occupavano i buchi: se un elettrone abbandonava la sua posizione, questa poteva essere occupata solo da una particella che aveva esattamente la

stessa massa dell'elettrone e non da una particella di massa 2000 volte maggiore, come è il caso del protone. Dirac non ebbe altra scelta che ipotizzare, con molta diffidenza, l'esistenza di una particella con la stessa massa dell'elettrone ma con carica positiva, cui attualmente si dà il nome di positrone.

Era la prima volta che veniva prevista in maniera teorica l'esistenza di una particella, senza una precedente evidenza sperimentale. Il positrone fu osservato per la prima volta nel 1932 dal fisico statunitense Carl David Anderson, che lo identificò in base alla traccia che lasciava in una camera a nebbia con la quale lo scienziato tentava di identificare le particelle provenienti

dai raggi cosmici. In questi dispositivi, quando una particella passa attraverso il vapore acqueo che riempie la camera, determina la condensazione del vapore che si raccoglie in minuscole goccioline lungo la traiettoria della particella, la cui traccia può essere fotografata. Se, inoltre, si applica un campo magnetico, la traiettoria delle particelle viene deviata e, dal momento che ogni particella cambia la propria traiettoria in maniera caratteristica, ciò consente di risalire alla natura della particella.

Nel suo esperimento, Anderson utilizzò come riferimento le traiettorie di alcune particelle già conosciute, ottenute attraverso disintegrazioni radioattive, in

modo da poterne confrontare le proprietà con quelle delle particelle dei raggi cosmici che colpiscono la Terra e poter così identificare queste ultime. Mentre lavorava presso il California Institute of Technology (Caltech), Anderson osservò l'esistenza di una particella che seguiva esattamente la stessa traiettoria di un elettrone, ma in direzione opposta. L'ipotesi più plausibile sembrava essere quella di un elettrone che viaggiava in direzione contraria, ovvero dal suolo verso il cielo. Per dimostrarlo, Anderson decise di utilizzare una lastra di piombo spessa 6 mm, collocata con orientamento orizzontale a metà altezza della camera. In questo modo le particelle,



nell'attraversare la lastra, perdono velocità e la curvatura delle loro traiettorie aumenta. Ciò consente di stabilire se una particella proviene dal cielo, nel qual caso avrà una velocità maggiore e una curvatura minore nella metà superiore della camera, o se al contrario proviene dal suolo. I risultati di questo esperimento modificato dimostrarono che tutte le particelle provenivano dal cielo, perciò la particella identificata non era un elettrone che viaggiava in direzione contraria, bensì il primo positrone a essere rivelato.

Nel tempo si vide come l'equazione di Dirac fosse in grado di

descrivere non solo il comportamento dell'elettrone, ma anche quello delle altre particelle subatomiche. Risultò evidente che l'esistenza di una specifica antiparticella non era prerogativa dell'elettrone, ma un'esigenza matematica generalizzabile a tutte le particelle. L'insieme di queste antiparticelle forma ciò che oggi è noto come antimateria.

# RUOTARE LO SPAZIO E IL TEMPO, RUOTARE LA MATERIA E L'ANTIMATERIA

La teoria del mare di Dirac si adatta abbastanza bene alle osservazioni sperimentali sull'antimateria. Si può ritenere che, quando un elettrone va a

riempire uno dei buchi di questo mare, si libera una quantità di energia determinata dall'equazione relativistica  $E = mc^2$ . Se così fosse, l'elettrone e il rispettivo buco (il positrone) scomparirebbero (ovvero si annichilirebbero) e si osserverebbe soltanto l'energia liberata, che equivale a  $2mc^2$ , dal momento che bisogna tenere conto sia della massa dell'elettrone sia di quella del positrone.

Di tutte le teorie sulla natura dell'antimateria, la più audace fu sicuramente quella elaborata da John Archibald Wheeler, un assistente professore della Princeton University. Lo scienziato statunitense giustificò il

fatto che tutti gli elettroni avessero esattamente e stesse caratteristiche, affermando che essi rappresentano un medesimo e unico elettrone. Wheeler si rese conto che, dal punto di vista matematico, non esisteva alcuna differenza tra un positrone e un elettrone che viaggia indietro nel tempo. Di conseguenza, gli oggetti dell'universo potrebbero essere formati dallo stesso elettrone, che viaggerebbe avanti e indietro nel tempo, mantenendo sempre le stesse proprietà.

Quando Wheeler espose la sua idea a Richard Feynman, questi individuò immediatamente il problema: se questa teoria fosse stata corretta, sarebbe dovuto esistere esattamente lo

stesso numero di elettroni e di positroni, in quanto la particella avrebbe dovuto invertire la direzione in cui viaggiava avanti e indietro nel tempo esattamente lo stesso numero di volte. Tuttavia, in natura non si trova la stessa quantità di positroni e di elettroni e ciò invalidò la teoria.

Feynman, dal canto suo, affrontò la meccanica quantistica sotto una prospettiva completamente nuova, come era solito fare quando qualche dettaglio finiva per non quadrare. Per arrivare a comprendere le interazioni tra le particelle, iniziando dagli elettroni, ideò dei diagrammi, noti oggi come diagrammi di Feynman, che descrivono

il moto delle particelle nello spazio e nel tempo, nonché le loro trasformazioni.

I diagrammi di Feynman, che oggi si utilizzano per descrivere le interazioni tra tutti i tipi di particelle, furono applicati la prima volta per rappresentare i fenomeni propri degli elettroni. Il caso più semplice è quello di un elettrone ( $e^-$ ) che viaggia in linea retta tra due punti dello spazio, dal momento che basta tracciare una linea retta tra le posizioni iniziale e finale e indicare con una freccia la direzione del movimento nel tempo, ovvero se l'elettrone si muove in avanti o indietro nel tempo. In base alle leggi di

conservazione della fisica, senza la comparsa di un'altra particella l'elettrone viaggerebbe indefinitamente in linea retta, dal momento che non potrebbe cambiare spontaneamente direzione. Per variare la sua traiettoria, deve emettere un fotone ( $\gamma$ ).

Feynman pensò che la sua idea avesse valore nell'ambito della meccanica quantistica. Tuttavia, come aveva già descritto Dirac con la sua equazione, il moto di un elettrone doveva avere significato anche nel quadro della teoria della relatività ristretta, in base alla quale deve esistere una simmetria spazio-temporale. Ciò implica che, se i diagrammi venissero ruotati di  $90^\circ$ , dovrebbero ancora



descrivere il comportamento reale delle particelle. Quando si ruota il diagramma che rappresenta il caso di un elettrone la cui traiettoria cambia direzione, si ottiene un fotone che spontaneamente crea due elettroni, di cui uno viaggia in avanti nel tempo e l'altro indietro. Come è stato accennato in precedenza, un elettrone che viaggia indietro nel tempo equivale a un positrone ( $e^+$ ) che viaggia in avanti. Da ciò si deduce che il fotone si trasforma in un elettrone e in un positrone che viaggiano secondo il normale flusso del tempo. Infine, se si ruota nuovamente il diagramma, al posto della creazione di una coppia di particelle, si ottiene la rappresentazione

dell'annichilazione tra una particella e la rispettiva antiparticella: quando un elettrone e un positrone coincidono nello spazio e nel tempo, essi scompaiono lasciando al loro posto energia pura.

Quando Feynman presentò i suoi diagrammi, questi non ebbero un grande impatto sulla matematica che li spiegava. Tuttavia, la loro capacità di adattarsi ai casi sperimentali fece sì che venissero accolti con grande favore dai fisici che studiavano le proprietà delle particelle subatomiche. Grazie ai diagrammi di Feynman è possibile spiegare la creazione spontanea di coppie particella-antiparticella, sia nel quadro della meccanica quantistica sia in quello della relatività ristretta.



# UNO PIÙ UNO FA TRE?

I diagrammi di Feynman mostrano come, a partire da energia pura sia possibile creare coppie particella-antiparticella, come mostravano anche le soluzioni dell'equazione di Dirac secondo le quali se si sparano degli elettroni contro una barriera elettrica, nel fascio che viene riflesso sarà

presente un numero di elettroni doppio rispetto a quello presente nel fascio originale. Inizialmente questa osservazione sembrava inverosimile: era come se si fosse scoperto improvvisamente che una delle soluzioni delle equazioni di Newton prevedesse che per ogni pallone da calcio lanciato contro un muro ne ritornassero indietro due. Fortunatamente per gli sportivi, le leggi della meccanica quantistica e quelle della fisica classica sono molto diverse tra loro e ciò che è possibile per gli elettroni è impossibile per i palloni.

La risposta a questo enigma si ottiene osservando il fenomeno in direzione opposta, considerato che nella barriera si creano coppie elettrone-

positrone: come risultato degli urti, per ogni elettrone incidente si ottengono lo stesso elettrone più un elettrone nuovo e un positrone.

Dove inizialmente si aveva una sola particella, improvvisamente ne compaiono tre. I due elettroni vengono respinti e tornano verso l'origine del fascio, mentre i positroni si muovono in direzione opposta.

La realizzazione di questo esperimento è estremamente difficile. In quanto non è facile ottenere una barriera elettrica: se si cerca di crearla interponendo una lamina di metallo, la maggior parte degli elettroni del fascio vi passa attraverso, come aveva già

dimostrato Rutherford. Il modo migliore per creare una barriera elettrica consiste nell'utilizzare una barriera di particelle cariche, in particolare di elettroni. Eseguendo l'esperimento in queste condizioni, è possibile osservare come si creino elettroni e positroni, secondo quanto previsto dalla teoria quantistica.

Questo metodo rappresenta ancora oggi il modo più efficace per creare positroni. Il processo che si utilizza negli acceleratori di particelle per creare antiparticelle si basa proprio su questo principio scientifico: si fanno scontrare frontalmente due fasci di particelle (non necessariamente costituiti da elettroni) ad alta velocità. L'energia dell'urto può portare alla

creazione di diversi tipi di particelle, in funzione delle particelle iniziali: le particelle risultanti non sono le stesse se i fasci iniziali sono costituiti da protoni o da elettroni. Gli esperimenti realizzati negli acceleratori di particelle hanno permesso di confermare l'esistenza di particelle in precedenza previste solo a livello teorico, nonché di completare il modello standard grazie alla scoperta di particelle inattese.

Nel corso del XX secolo, il mondo della ricerca sulle particelle era paragonabile a una festa alla quale partecipavano sempre più persone, alcune delle quali erano invitate e confermate, mentre altre si presentavano



senza invito né preavviso. Poco dopo la scoperta del positrone, si scoprì altra particella fondamentale che costituisce l'atomo, il neutrone. Già prima del 1930, si sapeva che l'atomo è costituito da elettroni che orbitano attorno a un nucleo formato da protoni, nel quale si concentra la maggior parte della sua massa. Inoltre, si conosceva il numero di elettroni presenti in ogni tipo di atomo e si sapeva che, essendo l'atomo elettricamente neutro, doveva contenere la stessa quantità di protoni. Tuttavia, in nessuno degli atomi la quantità prevista di protoni era sufficiente a giustificare la massa complessiva del nucleo. Di conseguenza, si supposeva che nel nucleo dovessero essere presenti anche

degli elettroni per compensare l'eccesso di carica positiva derivante dai presunti protoni in soprannumero. Tale teoria, però, non si adattava al modello atomico che stava emergendo.

Nel 1930 si scoprì l'esistenza di una particella neutra (priva di carica elettrica) che forma parte dei nuclei atomici. Due anni dopo il fisico inglese James Chadwick cercò di determinare la massa di questa particella neutra, già nota come neutrone. Attraverso una serie di esperimenti, rilevò che la massa della particella era di 939,57 MeV, un valore molto vicino a quello misurato in seguito utilizzando procedimenti più precisi, pari a 939,565560 MeV.

Con la scoperta del neutrone, il modello atomico fu praticamente spiegato: l'atomo era formato da un nucleo di protoni e neutroni circondato da elettroni orbitanti lungo determinati livelli energetici permessi. I fisici pensavano che rimanesse un unico interrogativo da risolvere: perché i protoni non si respingono, disintegrando il nucleo? Ciò che non si aspettavano era che la risposta a questo enigma non rappresentasse la fine, bensì l'inizio dell'attuale teoria della fisica delle particelle. Per spiegare la coesione del nucleo, era necessaria l'esistenza di una forza tra i protoni più grande della forza elettrica. Oggi si sa che la forza

responsabile di questa coesione è una delle forze fondamentali della natura: la cosiddetta forza nucleare forte. Il fisico giapponese Hideki Yukawa ipotizzò che i protoni e i neutroni si mantenessero uniti grazie al costante scambio reciproco di una particella, che chiamò pione (T). Per adattarsi alle leggi di conservazione dello spin, della massa e della carica, la nuova particella doveva avere caratteristiche specifiche, che lo stesso Yukawa cercò di mettere in luce. Per cominciare, si rese conto che dovevano esistere due particelle con tali proprietà, una dotata di carica positiva, per trasferire la carica dei protoni ai neutroni e trasformarli nell'altra particella, e una dotata di carica

negativa per realizzare il processo opposto.

Nel 1935 Yukawa ipotizzò che si dovesse cercare tra i raggi cosmici una particella la cui carica poteva essere positiva o negativa, ma di valore uguale a quella dell'elettrone, con spin 0, una massa intermedia tra quella del protone e quella dell'elettrone e una vita media di  $7 \times 10^{-24}$  secondi.

Nel 1937 Anderson, lo scopritore del positrone, identificò una nuova particella nei raggi cosmici, la cui massa era pari a circa 200 volte quella dell'elettrone. Si ipotizzò erroneamente che tale particella corrispondesse al pione di Yukawa: per definizione, i

pioni interagiscono con la materia in maniera estremamente rapida, in quanto sono le particelle che mediano le interazioni nucleari forti. Di conseguenza, è molto difficile che riescano ad attraversare tutta l'atmosfera senza interagire con altre particelle incontrate lungo il loro cammino. I fisici italiani Marcello Conversi e Oreste Piccioni si proposero di dimostrare che la particella scoperta da Anderson doveva essere una particella diversa, che non era stata prevista, e nel 1944 constatarono che il suo tempo di vita, pari approssimativamente a  $2 \times 10^{-6}$  secondi, era di molti ordini di grandezza superiore a quello del pione. A questa

nuova particella inattesa, il cui ruolo nell'ambito del modello standard non era chiaro a nessuno, fu dato il nome di muone ( $\mu$ ), descritto a volte come un elettrone pesante.

Durante gli anni '40 e '50 si fecero enormi progressi nelle tecniche di rivelazione delle particelle, tanto da rendere la seconda metà del secolo piena di sorprese. Nel 1947 si scoprì una particella con spin 0 e con una massa approssimativamente 270 volte maggiore di quella dell'elettrone. Inoltre, si osservò che la quantità di particelle identificate diminuiva progressivamente quanto più i rivelatori si trovavano vicini al livello del mare, dove non se ne rivelava alcuna, e che la

loro interazione con i nuclei atomici provocava l'emissione di varie particelle. Grazie a queste prove, gli scienziati poterono affermare che il comportamento della particella era governato da interazioni nucleari forti e osarono annunciare, questa volta senza errore, che era stato finalmente trovato il pione previsto da Yukawa.

Nell'ambito della fisica delle particelle, l'interazione nucleare forte, che mantiene uniti i protoni e i neutroni all'interno del nucleo, viene descritta come il risultato dello scambio di pioni tra i nucleoni. Ciò spiega perché fosse necessario ridefinire i protoni e i neutroni come una stessa particella, il



nucleone, che può trovarsi in due stati differenti. A tal fine, venne proposta una nuova proprietà intrinseca che doveva essere posseduta da tutte le particelle l'isospin: i nucleoni hanno un isospin che, in funzione del loro stato, acquista uno di tre possibili valori:  $-1$ ,  $0$  o  $+1$ . I nucleoni potrebbero cambiare il proprio isospin assorbendo o emettendo un pione. Questa teoria prevedeva, inoltre, l'esistenza di un terzo nucleone.

Anche se la teoria del pione di Yukawa fu accolta inizialmente con molta riluttanza dalla comunità scientifica, venne sempre più riconosciuta via via che si scoprivano nuove particelle che si adattavano perfettamente a essa. L'identificazione

del muone e del pione nelle camere a nebbia aveva aperto solo di poco la porta al mondo delle particelle: nel 1955 erano state già scoperte molte altre particelle nelle fotografie ottenute dai raggi cosmici, alle quali si aggiungevano quelle create e rivelate negli acceleratori di particelle

# DIVIDERE ANCHE I FRAMMENTI

Con l'aumentare delle voci aggiunte al catalogo delle particelle, si complicava sempre di più lo sviluppo di una teoria in grado di includerle tutte. Negli anni '60, la necessità di trovare un criterio di classificazione per raggruppare particelle con proprietà simili era uno dei principali obiettivi della fisica subatomica. Non era un

compito facile, in quanto i sistemi di classificazione proposti differivano molto a seconda dei criteri in base ai quali venivano formulati. Come risultato, si arrivò alla convivenza di varie classificazioni eterogenee.

La prima classificazione distingue tra leptoni, muoni e barioni, in funzione della massa della particella. I leptoni segnano il limite inferiore, con masse da 0 a 2000 volte minori rispetto a quella del protone, come nel caso dell'elettrone. Subito dopo si trovano i muoni che, pur avendo una massa maggiore rispetto ai leptoni, non raggiungono quella del protone. I più pesanti sono i barioni, che comprendono il protone e tutte le particelle più

pesanti.

Una seconda classificazione tiene conto del valore dello spin di ciascuna particella, che può essere frazionario o intero: protoni, neutroni ed elettroni hanno spin frazionario di  $1/2$  e vengono classificati come fermioni; al contrario, i muoni (un tipo di particelle comprendente anche i pioni) e il fotone hanno spin intero, rispettivamente pari a 0 e 1, e rientrano nella categoria dei bosoni. Questa classificazione permise di evidenziare che tutte le particelle che formano la materia sono costituite da fermioni, mentre le particelle portatrici di forza sono costituite da bosoni: il fotone è la particella responsabile della

forza elettrica, mentre il pione è la particella che media la forza nucleare.

Questi due criteri di classificazione non permettevano di pervenire a uno schema in base al quale sviluppare un nuovo modello teorico unificato. Per questo motivo, si decise di elaborare una nuova classificazione, basata sulle modalità di interazione nucleare delle particelle. Nei risultati sperimentali si poté osservare che esistevano particelle che partecipavano soltanto a interazioni intense, altre che partecipavano solo a interazioni di minore intensità e alcune che partecipavano a entrambi i tipi di interazioni. A partire da questi risultati, si arrivò alla distinzione tra interazioni

nucleari forti e interazioni nucleari deboli.

Tuttavia, il modo di interagire di alcune particelle si rivelò un completo mistero per la comunità scientifica, in quanto tali particelle non sembravano seguire alcuno schema né alcuna logica basata sulle loro caratteristiche. Per risolvere questo problema, il fisico teorico Murray Gell-Mann ideò una nuova classificazione delle particelle basata su una caratteristica da lui stesso proposta, la stranezza, in funzione della quale le particelle vengono suddivise in strane e normali. La sua teoria non finiva qui: se la stranezza doveva essere considerata una vera proprietà delle

particelle, doveva essere possibile assegnare un valore specifico per ciascuna particella, come avviene per la massa, la carica elettrica, lo spin e l'isospin. Di conseguenza fu sviluppato un criterio, abbastanza complesso, per assegnare dei valori alla stranezza: se una particella è normale, come il protone, la sua stranezza è pari a 0; al contrario, se una particella strana decade in una particella normale la sua stranezza è -1, mentre se decade in un'antiparticella normale la sua stranezza assume il valore +1.

Perseguendo l'obiettivo di trovare degli schemi tra le particelle, Gell-Mann creò dei diagrammi nei quali ogni particella veniva rappresentata in un



sistema di coordinate, con l'isospin sull'asse delle ascisse e la stranezza sull'asse delle ordinate. I risultati di questo processo mostrarono che, effettivamente, le particelle si disponevano seguendo determinati schemi: i mesoni più leggeri, per esempio, formano un esagono regolare con due particelle al centro (A), un pattern identico a quello formato dai barioni più leggeri (B). D'altro canto, esistono particelle che non possono essere disposte a formare un esagono e la cui disposizione segue altre forme geometriche, come un triangolo (C). In quest'ultimo caso, l'impossibilità di riempire tutti gli spazi del triangolo con

le particelle conosciute fino a quel momento portò alla previsione teorica dell'esistenza delle nuove particelle che avrebbero dovuto riempire questi spazi vuoti. Ancora una volta, le previsioni risultarono esatte e le particelle con tali proprietà vennero scoperte successivamente in modo sperimentale.

Nonostante la bellezza dei diagrammi realizzati, non fu grazie a essi che Gell-Mann fece una delle scoperte più importanti del XX secolo: il fisico statunitense si accorse che non esisteva la configurazione più semplice di tutte, ossia un triangolo con una particella in ciascun vertice, e ipotizzò che tali particelle dovessero esistere in quanto la natura tende sempre ai sistemi più

semplici. Di conseguenza, prevede l'esistenza di tre particelle che chiamò quark, più specificamente quark up (su), quark down (giù) e quark strano, rispettivamente con cariche di  $2/3$ ,  $-1/3$ ,  $-1/3$  e isospin di  $1/2$ ,  $-1/2$  e  $0$ .

# LE PARTICELLE FONDAMENTALI DELLE PARTICELLE FONDAMENTALI

Il nuovo modello evidenziò che è impossibile trovare i quark in forma singola o a coppie, ma che essi si

trovano sempre in gruppi di tre. Ogni combinazione possibile di una terna di quark forma un barione specifico. I protoni, per esempio, sono formati da due quark up, con carica  $2/3$ , e un quark down, con carica  $-1/3$ , in modo che la carica totale sia pari a:

$$\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = \frac{3}{3} = 1$$

Al contrario, il neutrone è formato da un quark up e da due quark down, perciò è una particella neutra:

$$\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

Oltre che in gruppi di tre, i quark si trovano anche associati a un antiquark, che non può essere l'antiquark corrispondente poiché in caso contrario, le particelle si annichilerebbero. La particella risultante da questa unione è un mesone. Per esempio, il pione è formato da un quark up e da un antiquark down. Infine, i leptoni, che comprendono gli elettroni e i neutrini, sono particelle fondamentali e non sono formati da quark. Un altro dei grandi successi di questo modello è la spiegazione delle caratteristiche invertite dell'antimateria: gli antimesoni e gli antibarioni sono formati dagli antiquark corrispondenti. Nel caso

dell'antiprotone, formato da due antiquark up e da un antiquark down, è facile dimostrare che il valore assoluto della carica è identico a quello del protone, ma con segno opposto:

$$-\frac{2}{3} - \frac{2}{3} + \frac{1}{3} = -\frac{3}{3} = -1$$

Nel caso dell'antineutrone, in cui la carica totale delle antiparticelle è nulla, il fatto che i due antiquark che lo compongono abbiano carica opposta rispetto ai quark che formano il neutrone spiega l'orientamento in direzione contraria del momento magnetico. Il modello dei quark sembra adeguarsi perfettamente alle proprietà delle

particelle subatomiche, nonché alle loro interazioni. Inoltre, mantenendo lo stesso modello con qualche miglioramento, è stato possibile spiegare i nuovi risultati sperimentali via via conseguiti.

Attualmente, si riconoscono fino a sei tipi di quark con i corrispondenti antiquark, che vengono definiti in base a nuove proprietà, ai quali sono stati assegnati nomi come top e charm. Il modello standard delle particelle fondamentali, iniziato o la conciliazione tra fisica relativistica e meccanica quantistica e attualmente ancora in continua evoluzione, è arrivato a spiegare non solo la fisica delle particelle, ma quasi tutte le interazioni dell'universo. E diventato un quadro



teorico molto efficiente, con previsioni confermate come quella dell'esistenza del bosone di Higgs. Tuttavia, questo modello presenta ancora alcune questioni in sospeso. Una delle più importanti è che, mentre esso può spiegare la forza elettromagnetica, quella nucleare forte e quella nucleare debole, non è ancora in grado di spiegare la forza di gravità, che dipenderebbe da una particella non ancora scoperta sperimentalmente, chiamata gravitone. Pertanto, per completare il modello standard e definire completamente il ruolo dell'antimateria, è imprescindibile tornare indietro alle origini

dell'universo, al Big Bang, quando le quattro forze erano un tutt'uno, ed esaminare come si differenziarono nella loro evoluzione successiva.