

Capitolo 1

Introduzione

Nel corso del XIX secolo i progressi della chimica e gli sviluppi della teoria dell'elettricità e del magnetismo avevano consolidato l'idea che la materia fosse costituita da atomi, tenuti insieme da forze di natura elettrica. Avogadro per primo aveva interpretato le leggi della chimica (la legge dei volumi e la legge delle proporzioni definite) in termini di numero di molecole e di massa delle singole molecole, identificando il ruolo delle molecole elementari, ossia degli atomi. Faraday, stabilendo che la massa dissociata per elettrolisi di una mole di sostanza era proporzionale alla carica elettrica raccolta dall'elettrodo divisa per il numero di valenza degli ioni, aveva ipotizzato l'esistenza di una carica elettrica fondamentale (quella che oggi sappiamo essere la carica e dell'elettrone e del protone) tale che la carica di una mole era sempre multipla di $N_A \cdot e$ dove N_A è il numero di Avogadro.

Tuttavia il concetto di atomo come lo conosciamo oggi, ossia un oggetto composto da un nucleo pesante carico positivamente, circondato da elettroni carichi negativamente, nasce a cavallo tra l'Ottocento e il Novecento, grazie alle scoperte fondamentali dell'elettrone (Thomson 1897) e del nucleo (Rutherford 1908). Negli stessi anni emerge il concetto di fotone: Röntgen scopre i raggi X (1895), Einstein (1905) interpreta l'effetto fotoelettrico come manifestazione della natura particellare della luce. Nasce quindi l'idea che la struttura della materia a livello subatomico sia costituita da particelle elementari. Nello stesso periodo, le scoperte della radioattività (Bequerel 1896, P. e M. Curie 1898) e dei suoi prodotti, i raggi α , β e γ (che oggi sappiamo essere rispettivamente nuclei di elio, elettroni e fotoni) cominciano a far luce sulle proprietà dei nuclei atomici, che risultano essere composti anch'essi di entità più elementari, il protone (identificato da Rutherford negli stessi anni)

e il neutrone (scoperto da Chadwick nel 1932). Questo insieme di particelle elementari è completato dall'ipotesi dell'esistenza del neutrino, formulata da Pauli nel 1930 per giustificare alcune proprietà altrimenti incomprensibili dei decadimenti β (per la osservazione sperimentale dei neutrini bisognerà attendere gli esperimenti di Reines e Cowan negli anni '50) e ancora oggi possiamo considerare questi cinque componenti come i costituenti di tutta la materia ordinaria che possiamo osservare intorno a noi.

Di questi componenti, quattro (l'elettrone, il neutrino, il protone ed il neutrone) sono dei fermioni, ossia particelle a spin semintero che nel linguaggio odierno rappresentano i campi di materia ed uno solo, il fotone, è un bosone, ossia ha spin intero e costituisce un campo di forza, il quanto della forza elettromagnetica. Gli altri campi di forze che oggi conosciamo, i bosoni intermedi W e Z , mediatori delle interazioni deboli (responsabili dei decadimenti β) e i gluoni, mediatori delle interazioni forti (responsabili dei legami nucleari), differiscono in maniera essenziale dal fotone per il fatto che le relative interazioni sono a corta distanza o *range*. Benché anche questi campi di forza siano ingredienti essenziali della nostra interpretazione del mondo microscopico (il cosiddetto Modello Standard delle particelle elementari), i loro effetti possono manifestarsi quindi solo osservando gli stati della materia con altissima risoluzione (come vedremo, per il principio di indeterminazione questo richiede interazioni ad alta energia tra le particelle), mentre riveliamo direttamente i fotoni con i nostri sensi attraverso l'osservazione di qualunque fenomeno luminoso. Così la teoria di Fermi, che interpreta elegantemente tutte le interazioni deboli di bassa energia (e quindi, per esempio, tutti i decadimenti β radioattivi), è basata sull'interazione puntiforme diretta di quattro fermioni, senza necessità di ulteriori particelle mediatrici.

Le interazioni nucleari forti devono però dar conto dell'attrazione (e della repulsione) tra i componenti del nucleo e non possono quindi essere puntiformi. Questo conduce all'ipotesi che le interazioni forti possano essere mediate da particelle pesanti (caratteristica che assicura un corto range alle interazioni), formulata da Yukawa (1935). La ricerca dei mediatori (i cosiddetti mesotroni) di Yukawa si intreccia con la scoperta del muone come componente della radiazione cosmica che raggiunge la superficie terrestre ("raggi cosmici"). Il muone, come ricorda il suo nome, viene inizialmente interpretato come la particella di Yukawa. L'esperimento di Conversi, Pancini e Piccioni (1945) chiarisce l'errore (la particella di Yukawa, il pione, viene poi scoperto da Lattes, Muirhead, Occhialini e Powell nel 1947) e al tempo stesso apre la prima finestra sulle repliche delle particelle elementari: il muone ri-

sulta infatti a tutti gli effetti un elettrone pesante. Nel frattempo, la scoperta dell'elettrone positivo (il positrone, Anderson 1932) e dell'antiprotone (Segré 1955) dimostrano il significato fisico delle soluzioni ad energia negativa della teoria di Dirac.

Intanto, la spettroscopia delle particelle ad interazione forte (gli adroni) si arricchiva di sempre nuove componenti, che si andavano ad aggiungere a protoni, neutroni e pioni. Negli anni sessanta, Gell-Mann e Zweig suggerirono che una classificazione di questi adroni, che si raccoglievano in gruppi con molteplici regolarità nelle loro proprietà, poteva essere facilmente ottenuta ipotizzando che gli adroni fossero costituiti mettendo insieme in vari modi dei semplici “mattoni” elementari, detti quark. Nello stesso periodo, esperimenti di diffusione di elettroni su protoni e neutroni (in perfetta analogia con le pionieristiche osservazioni di Rutherford) mettevano in luce come la distribuzione di materia degli adroni doveva essere effettivamente essere concentrata intorno a componenti praticamente puntiformi (i partoni) che venivano così ad essere considerati la prova sperimentale dell'esistenza dei quark. Le interazioni forti devono allora essere reinterpretate a questo nuovo livello di componenti. Questo è realizzato nella teoria della cromodinamica quantistica, che introduce i gluoni come mediatori fondamentali dell'interazione forte.

L'estrapolazione della teoria di Fermi delle interazioni deboli ad altissime energie porterebbe a divergenze incompatibili con i principi primi sulla somma delle probabilità degli stati finali accessibili. Questo problema è risolto negli anni sessanta introducendo anche per queste interazioni dei mediatori pesanti, i bosoni intermedi, scoperti poi negli anni ottanta da Rubbia.

Il panorama delle particelle “elementari” che abbiamo davanti oggi comprende dunque quattro campi di materia fermionici, replicati in più famiglie, la prima delle quali è costituita dall'elettrone, dal suo neutrino, dal quark “up” e dal quark “down”, e tre gruppi di mediatori, il fotone per l'interazione elettromagnetica, i gluoni per l'interazione forte e i bosoni intermedi per l'interazione debole. La quarta interazione che conosciamo, l'interazione gravitazionale che domina il mondo macroscopico, è del tutto trascurabile a livello delle particelle elementari e non sarà quindi trattata in questo corso.

1.1 Particelle elementari

Ci si può domandare quale sia il criterio col quale si stabilisce che una particella osservata sia un oggetto elementare o meno: se un oggetto è privo di struttura interna, si deve comportare a tutti gli effetti come un punto materiale, nel senso che questo non può assorbire energia esterna trasformandola in energia interna. Tutta l'energia trasferita dall'esterno si deve ritrovare come energia cinetica del punto materiale. Se il sistema ha gradi di libertà interni, parte dell'energia trasferita può eccitare questi gradi di libertà, per cui l'energia cinetica associata al moto del baricentro del sistema non dà conto di tutta l'energia trasferita. E' quello che succede in meccanica classica quando una sferetta ferma riceve un impulso che la mette anche in rotazione: se si osserva solo il moto del baricentro, l'urto appare inelastico, non perché si sia dissipata energia, ma solo perché parte di questa è associata ad una rotazione interna che non viene osservata.

Nel mondo microscopico però valgono le leggi della meccanica quantistica, per cui l'energia dei gradi di libertà interni di una particella non è continua, ma può assumere solo una serie discreta di valori, E_0, E_1, E_2, \dots . Quindi per mettere in luce l'esistenza di gradi di libertà interni, ossia per determinare la natura composita della particella, si dovrà trasferire una energia almeno pari alla soglia $E_s = E_1 - E_0$. Finché la particella viene sondata con energie inferiori a E_s , si comporta a tutti gli effetti come elementare. Questo è il motivo per cui lo studio della struttura interna delle particelle richiede energie sempre più elevate, per cui spesso la fisica delle particelle è anche chiamata *fisica delle alte energie*. Una conseguenza inevitabile di tutto ciò è anche che il carattere "elementare" di una particella non può mai essere "dimostrato sperimentalmente" ossia non si può mai considerare definitivo: quello che si può affermare è che, fino ad una certa scala di energia, la particella in esame si comporta come una particella elementare. Notiamo anche che, in base a queste considerazioni, è possibile stabilire che una particella *non* è elementare anche senza essere in grado di osservare i suoi componenti, semplicemente sulla base della sua capacità di assorbire energia per eccitazione dei modi interni.

1.2 Le unità di misura

La fisica nucleare e delle particelle è probabilmente l'unico ramo della scienza e della tecnica che non utilizza il SI di unità di misura. Si dice spesso che in questo campo si utilizzi il sistema di *unità naturali*, ossia quello che pone uguali ad 1 le due costanti fondamentali c ed \hbar , anche se questo è vero solo in parte.

La vera peculiarità della fisica atomica e nucleare è quella di misurare l'energia in elettronVolt, o eV, che è l'energia cinetica acquistata da una particella di carica elementare $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C (come quella del protone, o quella, cambiata di segno, dell'elettrone) che passa attraverso la differenza di potenziale di un Volt, per cui $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19}$ J. Il motivo di questa scelta risiede nel fatto che, a partire dal tubo catodico fino alle più moderne macchine acceleratrici, la tecnica per aumentare l'energia di una particella carica è sempre quella di farla passare attraverso una differenza di potenziale, per cui la misura più diretta della variazione di energia di una particella è solitamente quella in elettronVolt. Un altro fattore importante è costituito dalla circostanza (piuttosto casuale) che l'elettronVolt risulta una scala appropriata per le transizioni atomiche, mentre quelle nucleari coinvolgono energie dell'ordine del MeV.

Ora, poiché in relatività ristretta l'energia di una particella è legata alla massa m ed all'impulso p dalla formula $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$, misurando le masse in eV/c^2 e gli impulsi in eV/c tutte le formule di cinematica relativistica si semplificano, nel senso che le tre quantità si possono sommare semplicemente senza introdurre i fattori c . Si noti che per ottenere questa semplificazione è sufficiente utilizzare queste unità, senza porre necessariamente $c=1$.

Il fattore di conversione si può ricavare nel modo seguente: consideriamo una massa di 1 kg. L'equivalente in energia è dato da

$$E(1 \text{ kg}) = 1 \text{ kg } c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ kg (m/s)}^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ J} \quad (1.1)$$

essendo $1 \text{ J} = 1/(1.6 \cdot 10^{-19}) \text{ eV}$ avremo:

$$1 \text{ kg } c^2 = \frac{9 \cdot 10^{16}}{1.6 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = 5,6 \cdot 10^{35} \text{ eV} \quad (1.2)$$

da cui

$$1 \text{ kg} = 5,6 \cdot 10^{35} \text{ eV}/c^2 \quad (1.3)$$

Così le masse dell'elettrone e del protone, che valgono rispettivamente $9.109 \cdot 10^{-31}$ e $1.673 \cdot 10^{-27}$ kg possono essere espresse come $0.511 \text{ MeV}/c^2$

e $938.3 \text{ MeV}/c^2$, mentre valgono direttamente 0.511 MeV e 938.3 MeV in unità naturali propriamente dette. In queste unità, infatti, c è una costante adimensionale posta uguale ad 1, per cui il tempo e la lunghezza hanno le stesse dimensioni. Porre $\hbar=1$ implica invece considerare adimensionale una azione, che è il prodotto di un'energia per un tempo, il che vuol dire che il tempo, e quindi la lunghezza, hanno le dimensioni dell'inverso dell'energia. Dal valore di

$$\hbar = 1.055 \cdot 10^{-34} \text{ J s} = 6.583 \cdot 10^{-22} \text{ MeV s}$$

si ottiene quindi il valore del secondo in unità naturali:

$$1 \text{ s} = (6.583 \cdot 10^{-22} \text{ MeV})^{-1} = 1.519 \cdot 10^{21} \text{ MeV}^{-1}.$$

Il valore del metro in unità naturali si ottiene invece considerando che il prodotto $\hbar c$ ha le dimensioni di una energia per una lunghezza e vale

$$\hbar c = 6.583 \cdot 10^{-22} \cdot 2.998 \cdot 10^8 \text{ MeV m} = 197.35 \cdot 10^{-15} \text{ MeV m} \simeq 200 \text{ MeV fm}$$

dove è stato introdotto il fermi ($1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$), distanza caratteristica delle interazioni nucleari. Ponendo $\hbar c = 1$ si ottiene

$$1 \text{ m} = 5.068 \cdot 10^{12} \text{ MeV}^{-1} \text{ oppure } 1 \text{ fm} = 5.068 \text{ GeV}^{-1} .$$

Notiamo ancora che, essendo $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 1$ è ragionevole porre anche $\epsilon_0 = \mu_0 = 1$ e di conseguenza considerare anche queste costanti adimensionali. Questo particolare insieme di unità naturali è detto di Heaviside-Lorentz. Poiché la costante di struttura fine

$$\alpha = e^2/(4\pi\epsilon_0\hbar c) = 1/137,$$

essendo adimensionale, ha un valore indipendente dal sistema di unità di misura, nel sistema di Heaviside-Lorentz possiamo scrivere

$$\alpha = e^2/(4\pi) = 1/137,$$

da cui risulta che in questo sistema anche la carica elettrica è una quantità adimensionale.