

Elementari, Watson!

I mattoni fondamentali della natura

di Giulia Zanderighi

Il modello standard è la teoria che attualmente descrive con notevole successo le interazioni tra particelle elementari. Rappresenta un esempio straordinario della capacità umana di comprendere e prevedere le interazioni fondamentali tra i costituenti elementari della materia. L'elenco impressionante di particelle, predette dal modello standard e successivamente scoperte, include il quark charm, i neutrini tau, i bosoni vettori pesanti (W e Z), il quark top e, ultimo ma non meno importante, il bosone di Higgs.

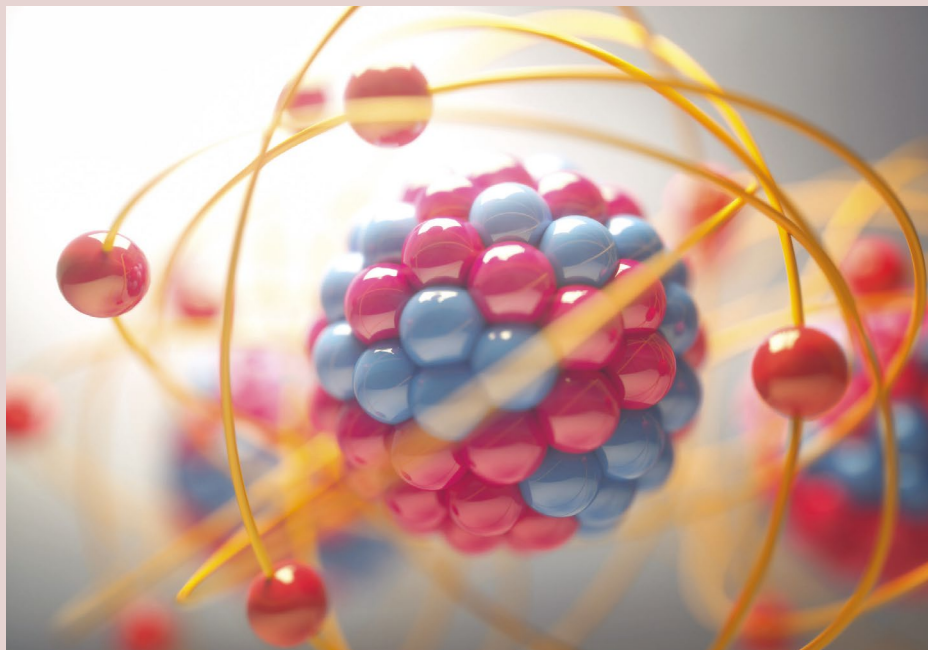
Nel modello standard (vd. fig. b), le particelle elementari costituenti la materia sono i cosiddetti "fermioni", organizzati in tre "generazioni" (o "famiglie") di quark e leptoni. I "bosoni" invece sono particelle che trasmettono le forze fondamentali: i fotoni trasmettono l'interazione elettromagnetica, i bosoni pesanti (W e Z) le interazioni deboli e i gluoni le interazioni forti. Infine, il bosone di Higgs, giocando un ruolo cruciale nella generazione della massa di tutte le particelle, trasmette un'interazione a breve raggio, chiamata "interazione di Yukawa", diversa dalle altre, in quanto dipende dalla massa delle particelle con cui interagisce.

Protoni e neutroni, costituenti i nuclei atomici, contengono due quark up, di carica elettrica $2/3$, e un quark down, di carica

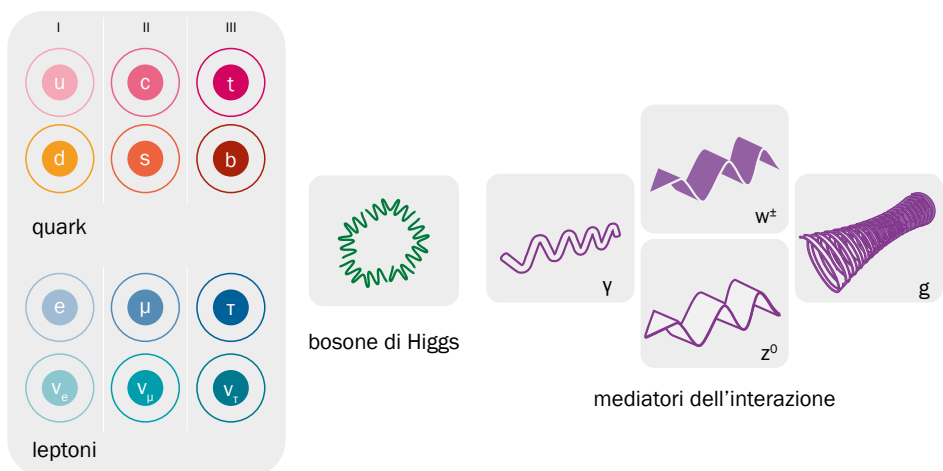
$-1/3$, nel caso del protone, o due quark down e un quark up, nel caso del neutrone. Protoni e neutroni sono detti "barioni", particelle composte da tre quark. In generale, i quark non possono essere osservati "liberi", ma si trovano sempre confinati in "mesoni" (composti da un quark e un antiquark) o, appunto, barioni. Questa proprietà dei quark, nota come "confinamento", è legata alle caratteristiche intrinseche delle interazioni forti a basse energie (vd. p. 19, ndr).

Per la vita quotidiana e la maggior parte dei fenomeni nell'universo, la seconda e terza generazione di quark e leptoni non sono necessarie (essi sono instabili e decadono rapidamente in fermioni della prima generazione), e non comprendiamo il motivo della presenza di tre generazioni nel modello standard anziché quattro o cinque. Tuttavia, almeno tre generazioni sono cruciali per permettere la violazione della simmetria congiunta di carica e di parità (simmetria CP) (vd. p. 33 in *Asimmetrie* n. 16, ndr), confermata con alta precisione da vari esperimenti.

Per i teorici che cercano una teoria più fondamentale del modello standard, quest'ultimo presenta un alto numero di parametri liberi. Nel dettaglio, per descrivere tutte le particelle e le loro interazioni sono necessari 19 parametri: nove



a.
Illustrazione artistica di un atomo.



b. Nel modello standard le particelle che costituiscono la materia sono i fermioni, che si dividono in due categorie: i leptoni e i quark. Entrambi, quark e leptoni, appaiono in tre generazioni (o famiglie): la prima è costituita da fermioni leggeri (elettrone e neutrino elettronico ν_e per i leptoni, e up u e down d per i quark). Le altre due famiglie sono copie più pesanti della prima: il quark charm c e lo strange s e il muone μ e il neutrino muonico ν_μ compongono la seconda generazione e il quark top t e il bottom (o beauty) b e il tau τ e il neutrino tauonico ν_τ la terza. Infine, il modello standard prevede il bosone di Higgs e i mediatori delle interazioni, ovvero il fotone γ dell'interazione elettromagnetica, i bosoni W^\pm e Z^0 dell'interazione debole e i gluoni g dell'interazione forte.

rappresentano le masse dei quark e dei leptoni carichi (nel modello standard, i neutrini sono considerati privi di massa, anche se oggi sappiamo che posseggono una massa molto piccola, il che richiederebbe di aggiungere ulteriori parametri al modello), tre descrivono i decadimenti dei quark di seconda o terza generazione nei quark della generazione più leggera, uno quantifica la violazione di CP nelle interazioni deboli, due descrivono il bosone di Higgs e il suo potenziale, tre indicano la "forza" delle tre interazioni fondamentali, e infine uno parametrizza la violazione di CP nelle interazioni forti. Per quanto ne sappiamo, quest'ultimo è compatibile con zero, anche se attualmente non ne comprendiamo il motivo.

Dal modello standard seguono regole precise, alle quali le particelle devono obbedire. Richard Feynman ha rappresentato queste regole in termini di diagrammi (i cosiddetti "diagrammi di Feynman", vd. anche p. 11, ndr), che illustrano in modo intuitivo quali interazioni elementari sono permesse. A questi diagrammi corrispondono espressioni matematiche che ci consentono di calcolare con grande precisione come le particelle interagiscono, quali particelle possono essere prodotte e con quale probabilità.

Un esempio di successo del modello standard è il momento magnetico anomalo dell'elettrone, misurato con un'accuratezza di una parte su un miliardo, in accordo con le previsioni teoriche. Il laboratorio che testa in modo più sistematico il modello standard è attualmente il Large Hadron Collider (LHC) al CERN. Qui, protoni e antiprotoni vengono accelerati alle energie più elevate mai raggiunte in un laboratorio, permettendo la produzione e lo studio accurato di particelle pesanti come

il bosone di Higgs. Nonostante il numero elevato di misure effettuate, il modello standard si è dimostrato in grado di descrivere tutti i processi osservati a LHC, ad altri collisori e in altri esperimenti senza che siano state osservate deviazioni dalle sue previsioni.

Tuttavia, rimangono numerose domande senza risposta, sia dal punto di vista teorico che sperimentale. Non comprendiamo il motivo delle tre generazioni nel modello standard e le masse delle particelle rimangono parametri da determinare sperimentalmente. Anche se i neutrini nel modello standard sono privi di massa, sappiamo che non è così, ma l'origine della loro massa è ancora ignota. La massa del bosone di Higgs presenta un altro mistero: i calcoli diretti mostrano che la sua massa è molto sensibile alla presenza di scale di energia più alte associabili alla possibile presenza di nuova fisica, mentre invece la sua massa osservata è molto più bassa di queste scale, quindi ci deve essere un motivo per cui questo accade. La presenza di materia oscura (vd. p. 32, ndr), costituita da particelle non presenti nel modello standard, rappresenta uno dei grandi enigmi sperimentali e non è spiegabile con il solo contenuto di materia del modello standard. Inoltre, il modello standard non può spiegare la predominanza che osserviamo della materia sulla sua controparte, l'antimateria (vd. p. 29, ndr). In conclusione, con il modello standard, nonostante il suo successo, il nostro universo è ancora pieno di misteri, e molte domande fondamentali rimangono senza risposta. La ricerca continua nel tentativo di trovare una teoria più fondamentale e di ottenere una comprensione più profonda della struttura dell'universo.

Biografia
Giulia Zanderighi è stata professoressa di fisica presso l'Università di Oxford e ha coperto una posizione di staff al CERN di Ginevra. Dal 2019 ha assunto l'incarico di direttrice presso l'Istituto Max Planck per la Fisica di Monaco e dal 2021 è professoressa ordinaria all'Università Tecnica di Monaco. Il suo lavoro si concentra sulla fenomenologia delle interazioni elementari.