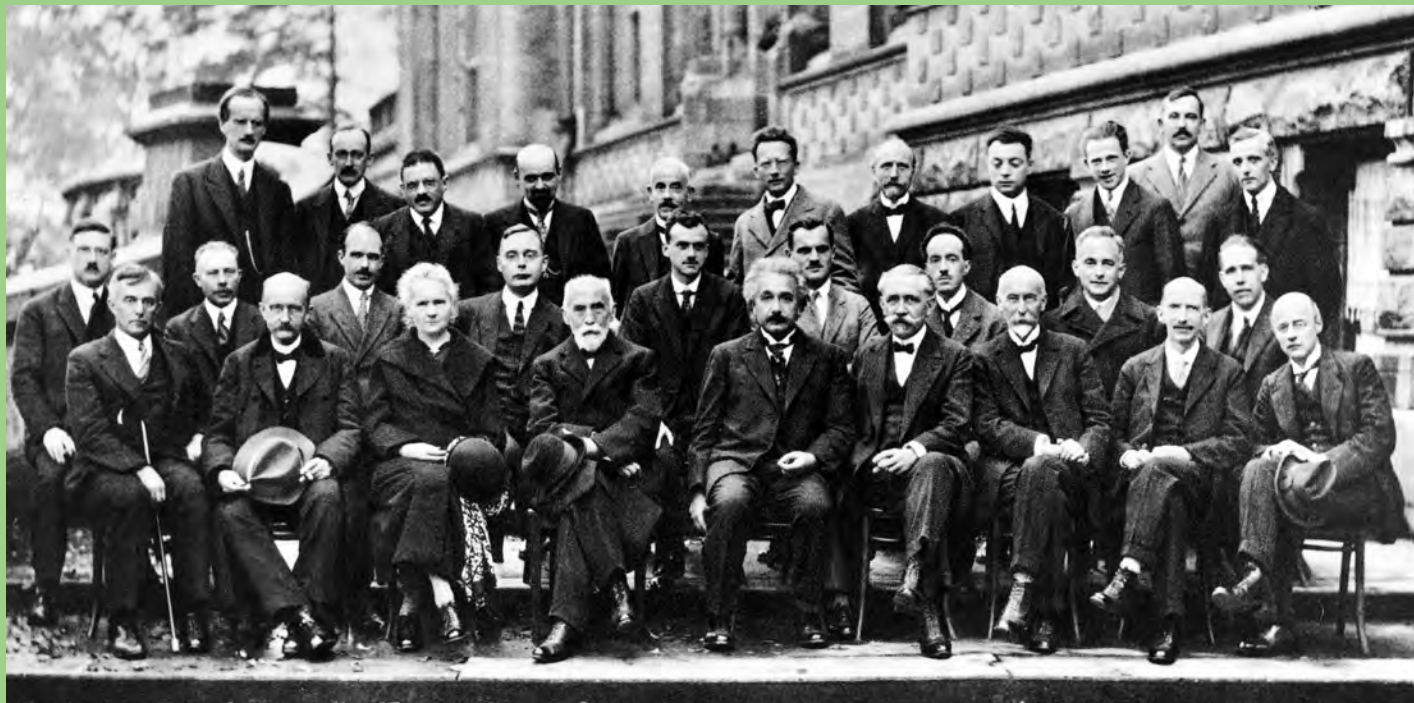


Eppur funziona

L'inspiegabile successo del modello standard

di Michele Redi

a.
Alla conferenza internazionale di Solvay del 1927 Niels Bohr, uno dei padri fondatori della meccanica quantistica, durante un acceso dibattito sulla natura controversa di questa teoria suggerì ad Albert Einstein di smetterla "di dire a Dio cosa deve fare". Nella foto, i partecipanti alla conferenza, tra cui moltissimi premi Nobel, come Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, Marie Curie, Wolfgang Pauli e Max Planck.

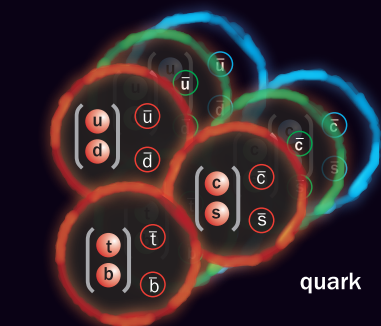


La teoria della relatività generale di Einstein fu scoperta basandosi su considerazioni puramente teoriche e può essere derivata da semplici assiomi. Attraverso esperimenti concettuali, cosiddetti "*Gedankenexperimente*", Einstein fu in grado di dedurre la teoria da principi primi traducendoli in concetti geometrici intuitivi. Le predizioni furono rapidamente confermate dagli esperimenti, ma la teoria era così convincente ed elegante che Einstein non ebbe dubbi che fosse corretta fin da subito. Disse: "Mi dispiacerebbe per Dio se la teoria non fosse corretta". Ed ebbe ragione. Lo sviluppo della meccanica quantistica, invece, fu da subito molto più accidentato. All'inizio del '900 iniziarono a emergere alcuni dati sperimentali che non potevano essere spiegati con la fisica classica. Questa piccola crepa nelle equazioni classiche di Newton e Maxwell diventò presto una voragine incolmabile e la necessità di una rivoluzione teorica fu chiara a molti, portando lentamente alla formulazione della meccanica quantistica che conosciamo. Il paradigma quantistico tuttavia era così lontano dalla fisica conosciuta e dal nostro intuito, che persino Einstein non fu mai convinto della correttezza della teoria. Anche a distanza di quasi 100 anni non esiste una

derivazione della teoria analoga alla relatività generale. Persino i principi primi non risultano chiari e vengono dibattuti. Ma la giustificazione fondamentale della teoria rimane il fatto che spiega tutti i fenomeni di cui siamo a conoscenza. A livello microscopico la meccanica quantistica regola le interazioni tra le particelle elementari. La comprensione del mondo delle particelle elementari è stata anch'essa una strada tortuosa, piena di ipotesi e tentativi spesso errati. In origine soltanto l'elettrone e il protone erano conosciuti come costituenti fondamentali della materia e non esisteva nessuna ragione evidente di estendere la teoria. Successivamente, neutroni, positroni, muoni e neutrini furono scoperti. Poi arrivarono gli anni '60 e le particelle diventarono così numerose e con le proprietà più disparate che persino il concetto di elementare sembrò perdere di significato. Questo fu un periodo di grande eccitazione e confusione, dove nuove scoperte avvenivano quotidianamente, ma senza che i risultati potessero essere spiegati da una teoria convincente. Fu successivamente compreso che molte di queste particelle erano in realtà composte da oggetti più semplici e simmetrici, i quark, ma che interagivano attraverso una nuova forza, l'interazione forte.

Da 1 a 118

Per descrivere tutte le particelle note in Natura e le loro interazioni, i fisici utilizzano il linguaggio della teoria quantistica dei campi. Il campo più semplice è il *campo scalare*, utilizzato per descrivere le particelle con spin uguale a zero. Nel modello standard ne abbiamo solo uno, il bosone di Higgs. Poi ci sono i bosoni vettori, ossia le particelle con spin 1. Tra questi, una distinzione utile è fra quelli che non hanno massa, come il fotone e gli otto gluoni, e quelli che invece hanno massa non nulla, come i bosoni W^+ , W^- e Z^0 . Nei primi, le configurazioni possibili per lo spin sono solo due, mentre sono tre per i bosoni con massa. Così, per esempio, il fotone ha due stati (o gradi di libertà) di spin, mentre lo Z^0 ne ha tre, e così deve essere per i rispettivi campi. Per finire, i “fermioni” (quark e leptoni) hanno spin $\frac{1}{2}$. Per quelli a massa nulla, come è il caso del neutrino nella versione più semplice del modello standard, è possibile un solo stato di spin (o di “chiralità”), per cui contando anche la rispettiva antiparticella (che ha chiralità opposta), a ogni campo di neutrino sono associati due gradi di libertà. Per i fermioni con massa invece, come elettrone, muone, tau e tutti i quark, sono possibili entrambi gli stati di chiralità,



quark

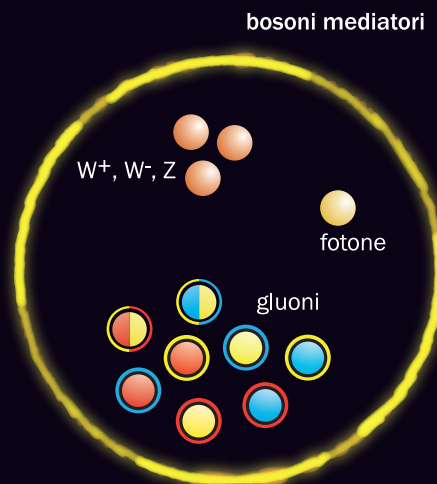


leptoni

e quindi, contando anche l'antifermione corrispondente, a ognuno di questi campi dobbiamo associare quattro gradi di libertà. Mettendo tutto insieme, e non dimenticando che i fermioni del modello standard appaiono in tre famiglie distinte, dette anche



bosone di Higgs



bosoni mediatori

“generazioni” (vd. fig. 1), e che ogni quark appare in tre colori, otteniamo un totale di 58 “campi” elementari, a cui corrispondono 118 gradi di libertà. [Massimo Pietroni]

Oggi molte cose sono diventate chiare, almeno in apparenza. La teoria del modello standard descrive tutte le forze conosciute in natura e spiega in particolare il funzionamento dell'universo a distanze microscopiche. Contiene 58 “campi” elementari per un totale di 118 gradi di libertà per le particelle elementari, che differiscono per massa, spin e interazioni (vd. approfondimento). La teoria è completamente determinata da 18 parametri che descrivono le masse e le interazioni delle particelle e da qui, in linea di principio, tutti i fenomeni fisici conosciuti possono essere derivati. L'ultimo tassello mancante, il famigerato bosone di Higgs, è stato finalmente scoperto nel 2012 dagli esperimenti del Cern a Ginevra. Questa scoperta ha un particolare significato, perché il bosone di Higgs è l'architrave necessario per la consistenza dell'intera teoria. Altre teorie richiedono modifiche del modello standard a energie attualmente inaccessibili, ma che si sono verificate durante il Big Bang e che un giorno potrebbero essere verificate sperimentalmente. Il bosone di Higgs è invece l'unica particella che consente al modello standard di essere una teoria completa, valida essenzialmente a qualunque scala di energie, senza ulteriori particelle. I successi sperimentali del modello standard, ottenuti negli ultimi 40 anni, sono strabilianti. Descrive in maniera unificata le interazioni elettromagnetiche e deboli. Descrive le interazioni tra nucleoni (che si pensava fossero mediate da un'altra

particella denominata “bosone di Yukawa”, storicamente associata al pione) come residuo dell'interazione forte che tiene insieme i quark dentro il protone e il neutrone. È una teoria consistente dal punto di vista matematico. Tuttavia è imperfetta.

Ci sono due categorie di problemi. Il primo, oggettivo, è che il modello standard non descrive alcune proprietà del nostro universo conosciute da osservazioni indirette. Tra queste forse la più eclatante è la mancanza della materia oscura, necessaria per spiegare il moto delle galassie (le particelle del modello standard possono spiegare solo circa il 25% della materia nell'universo) e molte altre osservazioni cosmologiche. Il secondo problema è di tipo estetico: proprietà sospette dal punto di vista teorico che però non sono incompatibili con le osservazioni o con la consistenza matematica della teoria. A questo riguardo, uno degli aspetti più insoddisfacenti del modello standard è l'impossibilità di determinare i parametri fondamentali della teoria. Il modello standard è eccellente per descrivere quello che conosciamo, ma non spiega mai il perché. Non sappiamo, per esempio, perché l'elettrone è duemila volte più leggero del protone o perché il protone è appena più leggero del neutrone. È lecito aspettarsi che una teoria più completa, in cui queste proprietà sono derivate da principi più semplici, esista. O almeno questo è quello che ci ha insegnato la storia della fisica fino ad oggi.

Un discorso a parte merita il bosone di Higgs. Come già detto, la consistenza matematica della teoria si basa sull'esistenza del bosone di Higgs scoperto recentemente al Cern dagli esperimenti Atlas e Cms. Questa particella è diversa da tutte le altre del modello standard per una proprietà nota come "spin", associata alla sua rotazione: è l'unica particella elementare di spin 0. Le altre particelle elementari hanno spin 1 (il fotone, i gluoni, i bosoni W e Z) oppure spin 1/2 (i quark e i leptoni). In generale, particelle di spin 0 sono difficili da giustificare dal punto di vista teorico, perché sono tipicamente molto pesanti, a meno che non siano composte (come per esempio il bosone di Yukawa). Se così fosse per il bosone di Higgs, il modello standard sarebbe incompleto e forse nuove particelle esisterebbero in natura. Ma da quanto abbiamo visto finora il bosone di Higgs si comporta come una particella elementare senza ulteriore struttura. Sotto vari punti di vista il modello standard è una teoria "sbagliata". I padri di questa teoria, contrariamente a

Einstein per la relatività generale, non la trovarono né elegante né convincente. A priori, non esisteva una ragione per preferire il modello standard ad altre teorie. Quasi tutti pensavano che fosse un'approssimazione di una teoria più completa, che sarebbe stata presto scoperta. Questo ha prodotto un'enorme attività di studio di possibili estensioni del modello standard, come ad esempio la supersimmetria (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 13, ndr), che cercano di risolvere gli annosi problemi del modello standard. Tuttavia, anno dopo anno, esperimento dopo esperimento, il modello standard è sempre stato confermato, fino al coronamento con la scoperta del bosone di Higgs. Al momento non esiste nessuna indicazione certa su dove la fisica oltre il modello standard potrebbe comparire. Ma l'universo del modello standard è incompleto e incomprensibile. La tensione tra l'inspiegabile successo del modello standard e i suoi limiti teorici è uno dei puzzle più appassionanti della fisica contemporanea. È uno dei pochi casi dove una teoria funziona meglio

di quanto sia lecito attendersi. La motivazione principale degli esperimenti attuali è scoprire cosa c'è oltre. Il futuro ci svelerà se il modello standard verrà smentito e sostituito da una teoria migliore o continuerà a governare le forze fondamentali della natura.

Biografia

Michele Redi è un ricercatore dell'Infn a Firenze. Ha ricevuto il dottorato alla Johns Hopkins University a Baltimora nel 2004 e ha lavorato presso la New York University e il Cern. La sua attività di ricerca è incentrata sulla fisica oltre il modello standard.

Link sul web

<https://sites.google.com/site/redi76/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.22.9

b.

L'esperimento Cms al Cern, che assieme all'esperimento Atlas ha scoperto il bosone di Higgs nel 2012.

