

BIBLIOTECA SCIENTIFICA

62

DELLO STESSO AUTORE:

Il bosone di Higgs
Origini

Jim Baggott

MASSA

L'ORIGINE DELLA MATERIA
DALL'ATOMO DEI GRECI ALLA MECCANICA QUANTISTICA

Traduzione di Franco Ligabue



ADELPHI EDIZIONI

TITOLO ORIGINALE:

Mass
The Quest to Understand Matter
from Greek Atoms to Quantum Fields

© 2017 JIM BAGGOTT

Mass was originally published in English in 2017. This translation is published by arrangement with Oxford University Press. Adelphi Edizioni is solely responsible for this translation from the original work and Oxford University Press shall have no liability for any errors, omissions or inaccuracies or ambiguities in such translation or for any losses caused by reliance thereon

© 2019 ADELPHI EDIZIONI S.P.A. MILANO

Massa è uscito originariamente in inglese nel 2017. Questa traduzione è pubblicata in accordo con Oxford University Press. Adelphi Edizioni è la sola responsabile della traduzione dell'opera originale e Oxford University Press declina ogni responsabilità per eventuali errori, omissioni, inesattezze o ambiguità in essa contenuti e per ogni perdita che ne derivasse

WWW.ADELPHI.IT

ISBN 978-88-459-3422-3

Anno

2022 2021 2020 2019

Edizione

1 2 3 4 5 6 7 8

INDICE

<i>Elenco delle illustrazioni</i>	9
-----------------------------------	---

MASSA

Prefazione	13
------------	----

PARTE PRIMA ATOMI E VUOTO

1. La cittadella tranquilla	21
2. Le cose in sé	30
3. L'impressione di una forza	40
4. Il chimico scettico	49

PARTE SECONDA MASSA E ENERGIA

5. Una conclusione molto interessante	61
6. Incommensurabile	75
7. Il tessuto	84
8. Immersi nell'oscurità	96

PARTE TERZA
ONDA E PARTICELLA

9. Un atto disperato	111
10. L'equazione d'onda	122
11. L'unico mistero	135
12. La massa nuda e la massa vestita	146

PARTE QUARTA
CAMPI E FORZE

13. Le simmetrie della natura	161
14. La particella maledetta	172
15. Il Modello Standard	182
16. Massa senza massa	195

Epilogo	205
---------	-----

<i>Note</i>	211
<i>Glossario</i>	241
<i>Bibliografia scelta</i>	263
<i>Indice analitico</i>	273

ELENCO DELLE ILLUSTRAZIONI

1. La Grecia e l'Asia Minore	23
2. Interferenza a doppia fenditura	64
3. L'esperimento di Michelson-Morley. Fonte: (a) Albert Abraham Michelson, interferometro di Michelson, illustrazione prospettica, 1881. Di pubblico dominio	66
4. Il fattore di Lorentz γ	67
5. Dilatazione del tempo a bordo di un treno in movimento	70
6. Gli angoli interni di un triangolo tracciato sulla superficie di una sfera	86
7. Un corpo di massa-energia elevata, come la Terra, curva lo spazio-tempo che lo circonda	87
8. Le onde gravitazionali rilevate dall'osservatorio LIGO. Fonte: Adattato dalla figura 1 di B.P. Abbott <i>et al.</i> (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), <i>Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger</i> , «Physical Review Letters», 116 (11 febbraio 2016), p. 061102	94
9. Mappa delle variazioni di temperatura nella radiazione di fondo ottenuta dai dati raccolti dal satellite Planck. Fonte: EUROPEAN SPACE AGENCY, the Planck Collaboration/SCIENCE PHOTO LIBRARY	102
10. Esempi di figure dovute a onde stazionarie	120

10 *Elenco delle illustrazioni*

11. Orbitali atomici dell'elettrone nell'atomo di idrogeno	126
12. La meccanica quantistica e il modello « planetario » di Rutherford-Bohr dell'atomo	128
13. Le orientazioni dello spin dell'elettrone	132
14. Il nastro di Möbius	133
15. Figura di interferenza degli elettroni in un apparato a due fenditure. Fonte: Riproduzione per gentile concessione di A. Tonomura	138
16. Rappresentazione dell'interazione fra due elettroni come descritta dall'elettrodinamica quantistica	149
17. Diagrammi di Feynman che rappresentano l'interazione di un elettrone con un fotone proveniente da un magnete. Fonte: Adattato da Richard P. Feynman, <i>QED: The Strange Theory of Light and Matter</i> , Penguin, London, 1985, pp. 115, 117 [<i>QED. La strana teoria della luce e della materia</i> , trad. it. di F. Nicodemi, Adelphi, Milano, 1989, pp. 145, 148]	154
18. Trasformazioni di simmetria continue <i>vs.</i> discrete	164
19. Proprietà simmetriche dell'acqua liquida e del ghiaccio	174
20. Il campo di Higgs e l'« origine » della massa	177
21. I comportamenti contrastanti delle forze elettromagnetiche e di colore	188
22. Il Modello Standard della fisica delle particelle. Fonte: adattata da Standard Model of Elementary Particles, PBS NOVA (1), Fermilab, Office of Science, United States Department of Energy, Particle Data Group/CC-BY-SA-3.0	191
23. L'origine della massa di un cubetto di ghiaccio	197

MASSA

*Per Mike.
Probabilmente è colpa tua...*

PREFAZIONE

È da sempre il sogno dei filosofi, ridurre la materia a particelle fondamentali di un solo tipo.

PAUL DIRAC¹

Sembra così semplice.

Seduti da qualche parte, state leggendo questo libro. Che sia su carta o in formato elettronico su un lettore o un *tablet*, poco importa. Qualsiasi oggetto abbiate in mano, possiamo essere ragionevolmente certi che sia fatto di qualche *cosa*: carta, plastica, magari contenente i minuscoli elementi metallici dei circuiti stampati. Qualunque cosa sia, si tratta sempre di ciò che chiamiamo *materia*, o *sostanza materiale*. La sua caratteristica principale è la *consistenza*, l'aver *massa*.

Ma che cos'è, esattamente, la materia? A lezione di scienze, a scuola, impariamo che la materia non è continua, ma discreta. Come già avevano immaginato alcuni filosofi dell'antica Grecia quasi duemilacinquecento anni fa, la materia è fatta di corpuscoli. Se facciamo un po' di ricerche in rete scopriamo che la carta si ottiene pressando le fibre della pasta di legno. La pasta di legno ha una struttura interna fatta di molecole (come la cellulosa), e le molecole sono a loro volta formate da atomi (carbonio, ossigeno, idrogeno). Ci viene quindi spiegato che gli atomi sono per la maggior parte fatti di spazio vuoto, con un minuscolo nucleo centrale di protoni e neutroni attorno a cui orbitano gli elettroni.

Forse sapete anche che protoni e neutroni non sono l'ultima parola sull'argomento. Le particelle ritenute i mattoni fondamentali della materia, o (più probabilmente) la cui struttura interna è tuttora ignota, sono dette dagli scienziati «elementari». Secondo questa definizione i protoni e i neutroni non sono particelle elementari: sono invece composte, formate da quark di vario tipo tenuti insieme da gluoni.

D'accordo, le cose sono più complicate di come potevano sembrare a prima vista. Ma senza dubbio stiamo assistendo al susseguirsi di generazioni di scoperte scientifiche, che di volta in volta scendono a livelli più profondi nella conoscenza della sostanza materiale. Carta, plastica, metallo; molecole; atomi; protoni e neutroni; quark ed elettroni. Scendendo di livello in livello troviamo costituenti sempre più piccoli, e questo certo non è una sorpresa.

Tuttavia è altrettanto indubbio che non possiamo andare avanti così all'infinito. Come un tempo i filosofi greci, anche noi diamo per scontato che prima o poi dovremo imbatterci in qualche cosa di ultimo e indivisibile, nei mattoni fondamentali di cui è fatto tutto l'universo.

E non sembra richiedere un volo di fantasia particolarmente audace supporre che debba esistere solo *un* tipo di costituente fondamentale, qualunque esso sia. Quanto meno quella di un unico oggetto fondamentale sarebbe l'ipotesi più semplice, più pulita. Il resto (la carica elettrica, la carica di colore, il sapore, lo spin, e molti altri attributi) sarebbero solo «accessori».

Nel 1930 il fisico inglese Paul Dirac lo definiva «il sogno dei filosofi». Le cose erano più semplici, allora. Il neutrone non era ancora stato scoperto (fu scoperto nel 1932 da James Chadwick) e, per quanto ne sapevano i fisici all'epoca, la materia era composta solo di due tipi di particelle elementari: il protone, con carica positiva, e l'elettrone, con carica negativa. Per un certo periodo Dirac si convinse di avere scoperto un modo di darne una descrizione unitaria. Il passaggio che ho citato come epigrafe della prefazione continua così: «Ci sono tuttavia ragioni per credere che l'elettrone e il protone non siano indipendenti, ma siano in realtà due manifestazioni di un unico tipo di particella elementare».

Dirac, purtroppo, aveva torto. Ciò in cui si era imbattuto, grazie alle equazioni della sua nuova teoria quantistica dell'elettrone, non era in realtà una relazione fondamentale tra elettrone e protone. Quello che aveva scoperto era l'esistenza di un tipo completamente diverso di materia, in seguito chiamato antimateria. La particella positiva che aveva previsto non era il protone. Era invece l'anti-elettrone (o positrone), che sarebbe stato scoperto negli studi dei raggi cosmici appena un paio d'anni dopo.

Dopo il 1930 le cose cominciarono ad andare sempre peggio, e il sogno divenne una specie di incubo. Invece di due particelle elementari forse imparentate tra loro, i fisici si trovarono di fronte un vero e proprio «zoo» di particelle diverse, molte delle quali caratterizzate da proprietà del tutto assurde. La scienza moderna ha senza

dubbio demolito *tutti* i nostri pregiudizi sull'universo fisico, e in particolare quelli sulla natura della sostanza materiale.

Abbiamo scoperto che le fondamenta del nostro universo non sono solide, certe e affidabili come pensavamo. Sono invece fatte di fantasmi, ectoplasmi di una particolare natura quantistica. E a un certo punto di questo entusiasmante viaggio di scoperta ci è sfuggito di mano il rassicurante e familiare concetto di massa, l'onnipresente *m* che compare in tutte le equazioni della fisica, della chimica e della biologia.

Per gli atomisti dell'antica Grecia gli atomi dovevano avere un *pe-so*. Per Isaac Newton la massa era semplicemente la quantità di materia (*quantitas materiae*) contenuta in un corpo. Sembra difficile trovare qualcosa da obiettare a queste conclusioni, in apparenza perfettamente logiche. La massa è certamente una proprietà «quotidiana», che ha ben poco di misterioso. Quando saliamo sulla bilancia al mattino, quando solleviamo pesi in palestra, o quando inciampiamo in un oggetto pesante, rendiamo omaggio al concetto classico di massa newtoniana.

Ma quando un singolo elettrone attraversa due fenditure contemporaneamente, come un fantasma, per poi manifestarsi come un singolo punto in un rivelatore, che cosa accade alla massa di questa particella elementare, supposta «indivisibile»? La più celebre equazione di Einstein, $E = mc^2$, è nota a tutti, ma in che senso massa ed energia sono equivalenti e intercambiabili?

Il cosiddetto «Modello Standard» della fisica delle particelle è la più efficace descrizione teorica di particelle e forze fino a oggi formulata. In questo modello le particelle sono rimpiazzate da campi quantistici. Ora, come fa un *campo* distribuito nello spazio e nel tempo ad avere massa? E poi, che cos'è un campo quantistico? Che cosa si intende quando si dice che le particelle elementari acquistano massa attraverso l'interazione con il campo di Higgs, recentemente scoperto? Sommando le masse dei tre quark che, secondo la teoria, formano il protone, si ottiene solo l'un per cento della sua massa. Il resto dov'è?

Dal modello standard della cosmologia apprendiamo, infine, che questa cosa da cui siamo quasi ossessionati, la cosiddetta «materia barionica» formata da protoni e neutroni, costituisce meno del 5 per cento del totale di massa-energia dell'universo. Circa il 26 per cento è massa oscura, una forma di materia onnipresente ma completamente invisibile e sconosciuta, responsabile della struttura su larga scala delle galassie visibili, degli ammassi galattici e degli spazi che li separano. Il resto (un mero 69 per cento) è attualmente attri-

buito all'energia oscura, l'energia del vuoto che causa l'accelerazione dell'espansione dell'universo.

Come è accaduto tutto questo? Come hanno fatto le domande che ci parevano tanto semplici a diventare così difficili da comprendere?

In questo libro cercherò di spiegare come siamo arrivati a un modo completamente diverso di intendere la natura della materia e l'origine della massa, e le conseguenze che questo ha avuto sulla nostra comprensione del mondo materiale.

Da ultimo, un'avvertenza. Gli autori di libri che hanno la pretesa di presentare interpretazioni divulgative delle conclusioni della scienza moderna tendono ad aggirare l'ostacolo delle sue complessità matematiche. È famoso al riguardo un passo del libro di Stephen Hawking *Dal big bang ai buchi neri*: «Qualcuno mi disse che ogni equazione che avessi incluso nel libro avrebbe dimezzato le vendite». ² Nei miei libri precedenti ho più o meno seguito questo dogma, limitandomi a un numero assai ridotto di formule o a equazioni molto note (per esempio $E = mc^2$, come sopra).

Ma il linguaggio della matematica ha dimostrato di essere uno strumento molto efficace e potente nella descrizione delle leggi della natura e delle proprietà della materia. È importante rendersi conto che i teorici molto spesso seguono una linea di ragionamento matematica per vedere dove questa li porta, senza preoccuparsi eccessivamente dell'interpretazione fisica dei termini che compaiono nelle loro equazioni.

Agli inizi dello sviluppo della meccanica quantistica, per esempio, il fisico austriaco Erwin Schrödinger lamentava la perdita generale di quella che chiamava *Anschaulichkeit* (chiarezza, visualizzabilità), a causa di una matematica che diventava sempre più opaca e astratta. I teorici, sostenuti dall'esperimento o dall'osservazione, riescono magari a dimostrare che una certa formula matematica rappresenta un dato aspetto della realtà fisica, ma non c'è alcuna garanzia che sia possibile interpretare quei concetti in qualche altro modo, che ne migliori la comprensione.

Per questo ho deciso di rivelare un po' più di matematica del solito, così da dare a chi è interessato una migliore comprensione del significato di questi concetti, di come i fisici li usino e di come talvolta debbano essi stessi faticare per capirli. Mi limiterò a grattare la superficie, in questo, sperando di riuscire a far pensare il lettore, senza tuttavia distrarlo con troppi dettagli. ³ Chi non dovesse riuscire a seguire sempre la logica, o non capisse il significato fisico di questo o quel simbolo, non si deve demoralizzare.

C'è una discreta probabilità che nessun altro l'abbia davvero capito.

È un vero piacere ringraziare Carlo Rovelli per i suoi utili e inco-

raggianti commenti in fase di bozza. Non ho certo mai preteso che amici e familiari leggessero i miei scritti, anche se quando lo fanno è sempre bello (specialmente se ne parlano bene). Ovviamente sono grato a mia madre per molte cose, ma in quest'occasione lo sono in modo particolare, giacché si è presa la briga di leggere dalla prima all'ultima parola, e mi ha dato utili suggerimenti per rendere quelle parole più semplici e più accessibili. Mia mamma non ha avuto formazione scientifica ufficiale (si è laureata in storia, all'università inglese di Warwick, all'età di settantaquattro anni), ma è animata da una sconfinata curiosità e da un'entusiastica sete di conoscenza del mondo. La mia speranza è che, se riesce a seguire mia madre...

Sono in debito anche nei confronti di Latha Menon, revisora alla Oxford University Press, e di Jenny Nugee, che ha aiutato a trasformare i miei vaniloqui in un libro, spero, coerente, qualunque cosa sia ciò di cui è fatto.

Ottobre 2016