

**BIBLIOTECA SCIENTIFICA**

**68**

DELLO STESSO AUTORE:

*Il bosone di Higgs*

*Massa*

*Origini*

*Jim Baggott*

# QUANTI DI SPAZIO

LA GRAVITÀ QUANTISTICA A LOOP E LA RICERCA  
DELLA STRUTTURA DELLO SPAZIO, DEL TEMPO  
E DELL'UNIVERSO

*Traduzione di Franco Ligabue*



ADELPHI EDIZIONI

TITOLO ORIGINALE:

*Quantum Space*  
*Loop Quantum Gravity and the Search*  
*for the Structure of Space, Time, And the Universe*

© 2018 JIM BAGGOTT

*Quantum Space* was originally published in English in 2018. 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

© 2022 ADELPHI EDIZIONI S.P.A. MILANO

*Quanti di spazio* è uscito originariamente in inglese nel 2018. 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 978-88-459-3740-8

Anno

Edizione

2025 2024 2023 2022

1 2 3 4 5 6 7 8

## INDICE

<i>Prefazione</i>	9
-------------------	---

### QUANTI DI SPAZIO

PROLOGO. L'irresistibile desiderio di capire i segreti della natura	19
PARTE PRIMA. Fondamenti	25
1. Le leggi della fisica sono le stesse per tutti	27
2. La forza di gravità non esiste	41
3. Perché nessuno capisce la meccanica quantistica	57
4. La massa non è più quella di una volta	75
5. Come rattoppare le equazioni dell'universo	92
PARTE SECONDA. Formulazione	113
6. Per arrivarci non partirei da qui	115
7. Un dono della nonna del diavolo	130

8. Dopo due o tre tentativi le equazioni erano risolte	147
9. Ho usato tutti i portachiavi di Verona	164
10. Davvero il tempo migliore è il presente?	185
<b>PARTE TERZA. Elaborazioni</b>	<b>205</b>
11. Gravitoni, fisica olografica, e perché le cose cadono	207
12. Fermioni, particelle emergenti e la natura delle cose	225
13. La meccanica quantistica relazionale e perché « qui » potrebbe in realtà essere « là »	243
14. <i>Big bounce</i> , superinflazione e cosmologia a schiuma di spin	262
15. L'entropia dei buchi neri, il paradosso dell'informazione e le stelle di Planck	282
16. Sull'orlo del gorgo: realtà del tempo e futuro aperto	303
<b>EPILOGO. Come essere legati insieme su una montagna</b>	<b>323</b>
<i>Note</i>	333
<i>Glossario</i>	375
<i>Bibliografia</i>	413
<i>Crediti delle illustrazioni</i>	425
<i>Indice analitico</i>	429

## PREFAZIONE

Mettiamo subito le cose in chiaro.

Questo è un libro sulla gravità quantistica a loop, uno degli approcci contemporanei allo sviluppo di una teoria quantistica della gravità, che si colloca al limite estremo della nostra attuale comprensione di spazio, tempo e universo. In quanto scienza di frontiera, dovrebbe essere un argomento di lettura interessante, ma attenzione: come per ogni teoria di questo genere, a tutt'oggi non esiste *alcuna osservazione o evidenza sperimentale che la confermi*.<sup>1</sup>

Allora perché dovrebbe interessarci? Ecco la mia risposta. È indubbio che questi primi decenni del ventunesimo secolo ci presentino enormi sfide economiche, politiche e ambientali, alcune molto più ostinate e intrattabili di altre. Ma se si parla della nostra capacità di capire la natura dello spazio e del tempo, di comprendere a fondo il tessuto della realtà fisica, allora *la teoria quantistica della gravità è semplicemente il più grande problema scientifico della nostra epoca*,<sup>2</sup> perché affronta il « quesito fondamentale » dell'esistenza. Risolvere questo problema richiede conoscenze e abilità scientifiche molto approfondite; richiede momenti di intuito, di ispirazio-

ne, ed esige un livello di creatività intellettuale che probabilmente non ha precedenti nella storia della fisica.

Il motivo è semplice. Oggi abbiamo la fortuna di avere a disposizione due teorie di straordinario successo. La prima è la teoria generale della relatività di Albert Einstein, che descrive il comportamento su larga scala della materia in uno spazio-tempo curvo. La relatività generale ci spiega come funziona la *gravità*: la materia dice allo spazio-tempo come incurvarsi, e lo spazio-tempo incurvato dice alla materia come muoversi. La teoria è alla base del cosiddetto modello standard della cosmologia del big bang, usato per descrivere l'evoluzione dell'universo praticamente dal suo inizio, avvenuto secondo i dati attuali circa 13,8 miliardi di anni fa. La scoperta delle onde gravitazionali all'osservatorio LIGO negli Stati Uniti (a cui si è aggiunto Virgo, nei pressi di Pisa) è solo il più recente dei tanti trionfi della teoria.

La seconda è la meccanica quantistica, una teoria che descrive il comportamento della materia e della radiazione su piccola scala, ossia a livello molecolare, atomico, subatomico e subnucleare. Sotto forma di teoria dei campi, la meccanica quantistica è alla base del cosiddetto modello standard della fisica delle particelle, che costruisce tutti i costituenti visibili dell'universo (comprese le stelle, i pianeti, e noi) a partire da quark, elettroni e portatori di forza come il fotone. La scoperta del bosone di Higgs al CERN di Ginevra è solo il più recente dei tanti trionfi della teoria.

Pur rappresentando traguardi intellettuali grandiosi e di enorme successo, entrambi i modelli sono però crivellati di buchi. È davvero parecchio quel che non riescono a spiegare, e molti interrogativi importanti rimangono irrisolti. Si potrebbe quasi dire che i loro successi sono serviti solo a far apparire l'universo ancor più sfuggente e misterioso, se non addirittura del tutto bizzarro. Più impariamo, meno sembriamo capire.

Le due teorie sono anche fundamentalmente incompatibili. Nella meccanica classica di Isaac Newton gli og-



getti esistono e gli eventi accadono all'interno di un « contenitore » di spazio e tempo assoluti che funge in qualche modo da sfondo. Se si potesse eliminare tutto il contenuto dell'universo newtoniano, il contenitore vuoto rimarrebbe. La relatività generale toglie di mezzo il contenitore. Nell'universo di Einstein lo spazio e il tempo diventano relativi, non più assoluti, e la teoria risulta « indipendente dal fondo ». Lo spazio-tempo è dinamico, ed *emerge* come conseguenza delle interazioni fisiche che coinvolgono la materia e l'energia.

La meccanica quantistica, inesorabilmente corretta nelle previsioni nonostante l'exasperante livello di bizzarria, è formulata invece in modo diverso. Le interazioni che coinvolgono le particelle elementari di materia e radiazione avvengono proprio in quel contenitore spaziotemporale che la relatività generale ha eliminato. La meccanica quantistica è « dipendente dal fondo ».

Eccoci dunque. Abbiamo una teoria classica (cioè non quantistica) dello spazio-tempo che non dipende dal fondo, e una teoria quantistica della materia e della radiazione che invece dipende dal fondo. Le nostre teorie fisiche meglio riuscite sono costruite su interpretazioni dello spazio e del tempo tra loro incompatibili, sono trame intessute su due tipi diversi di ordito, uno generato insieme alla fisica stessa (co-generato), l'altro preesistente e assoluto.

Abbiamo due descrizioni incompatibili ma, per quanto ne sappiamo (e certamente per quanto possiamo dimostrare), abbiamo sempre avuto un universo solo. Questo è un problema, giacché sappiamo anche che nei primi istanti dopo il big bang la scala caratteristica dell'universo era quella quantistica, regno incontrastato della teoria dei quanti. Ora, il fatto di non riuscire a spiegare l'origine e i primi istanti di vita dell'universo potrebbe non turbarci più di tanto, ma la storia della fisica degli ultimi cent'anni ci ha incoraggiati ad aspettarci di più. Quel che *ci serve* è una teoria quantistica della gravità.

Sono riuscito a catturare la vostra attenzione?

Il filosofo cinese Laozi disse una volta che anche un viaggio di mille miglia inizia da un primo passo. La prima cosa da fare è riconoscere che l'unica maniera per mettere insieme meccanica quantistica e relatività generale è inventare un nuovo tessuto, un nuovo modo di concepire lo spazio e il tempo, compatibile con la fisica a tutte le scale.

Una volta fissata la missione, armati di novello entusiasmo dobbiamo scegliere la strada da imboccare. Partiamo dallo spazio-tempo assoluto e preesistente della meccanica quantistica? O da quello co-generato della relatività generale?

Nell'ultima quarantina d'anni i giudizi sulla percorribilità di queste due strade hanno diviso la comunità dei fisici teorici in fazioni contrapposte. La divisione emerge molto chiaramente in un recente lavoro che cerca di classificare i legami tra i diversi tentativi di sviluppare una teoria quantistica della gravità, e nel quale vengono individuati due filoni «fondamentali»: la teoria delle stringhe e la gravità quantistica a loop.<sup>3</sup> La divisione non deriva semplicemente dalle differenze di opinione fra i teorici della relatività generale e quelli delle particelle, dal momento che i fisici delle due fazioni rivali usano spesso idee e tecniche prese a prestito da entrambi i settori.

È però vero che la comunità dei fisici teorici è dominata dai fisici delle particelle, e i fisici delle particelle tendono a favorire la teoria delle stringhe. Negli ultimi due decenni la loro efficiente attività di pubbliche relazioni ha raggiunto anche la letteratura scientifica divulgativa, facendo sì che pochi lettori siano a conoscenza dell'esistenza stessa di un'alternativa, del fatto che le strade possibili sono più d'una. In un recente libro divulgativo sulla gravità, per esempio, la gravità quantistica a loop è nominata solo di sfuggita, relegata a una nota a piè di pagina.<sup>4</sup> Ci sono molti motivi alla base di questo, e più avanti ne discuterò alcuni.

Questo libro parla della strada meno battuta, la quale

parte dalla relatività generale, prende in prestito idee dalla cromodinamica quantistica e cerca un modo per trasformare il risultato in una teoria quantistica della gravità. Il punto di arrivo è un tessuto in cui lo spazio non è continuo, ma quantizzato; granulare, come la materia e la radiazione. Il tessuto è un sistema di anelli (loop) di forza gravitazionale concatenati tra loro a formare una « rete di spin ». Sulla geometria di questi anelli ci sono limiti fondamentali, che definiscono i quanti di area e di volume in termini di una quantità chiamata lunghezza di Planck, pari a circa  $1,6 \times 10^{-35}$  m, ossia circa un centomiliardesimo di miliardesimo del diametro del protone.

Diverse reti di spin – diversi modi di concatenare gli anelli – definiscono diversi stati quantistici della geometria dello spazio. L'evoluzione delle reti di spin (la variazione delle connessioni tra una geometria e la successiva) dà quindi origine a una « schiuma di spin ». Sommare le schiume di spin in una cosiddetta sovrapposizione descrive uno spazio-tempo emergente, un tessuto co-generato dalla fisica quantistica.

Questa è la gravità quantistica a loop, o LQG. Ha ormai trent'anni di età, e attualmente se ne occupano circa trenta gruppi di ricerca nel mondo. La strada che parte dalla relatività si è rivelata accidentata, piena di alti e bassi. Molte sfide rimangono ancora da superare, non ultima quella di obbligarla la teoria a produrre una o più verifiche sperimentali definitive. Ma come ha spiegato non molto tempo fa Carlo Rovelli, uno dei principali architetti della LQG, « la situazione della gravità quantistica è a mio parere molto migliorata rispetto a venticinque anni fa, e a giorni alterni sono ottimista ».<sup>5</sup>

I lettori di libri scientifici divulgativi potrebbero aver sentito nominare la LQG da Lee Smolin, un altro dei suoi principali artefici, che nel 2000 ha pubblicato *Three Roads to Quantum Gravity*. Smolin ha accennato alla LQG anche in *L'universo senza stringhe*, uscito nel 2006, e più di recente (2013) in *La rinascita del tempo*. Rovelli parla

della gravità a loop nel suo libro di grande successo *Sette brevi lezioni di fisica* e in *La realtà non è come ci appare*, entrambi del 2014.

Il mio proposito con questo libro è correggere uno sbilanciamento nella percezione pubblica. Vorrei persuadere i lettori che la LQG non è solo un bel gioco, ma rappresenta anche una vera e credibile alternativa alla teoria delle stringhe. Per far questo scenderò nei dettagli della teoria un po' più di quanto abbiano fatto finora Smolin e Rovelli nei loro libri divulgativi. Non voglio solo dare un'idea di quel che la teoria ci dice sullo spazio, sul tempo e sull'universo, ma anche di *come* e *perché* ce lo dice.

Durante il lavoro di ricerca e di scrittura ho avuto la fortuna di ricevere una notevole dose di incoraggiamento, supporto e illuminazione tanto da parte di Smolin quanto di Rovelli. *Questo libro parla di loro*, ma c'è un altro paio di cose che vorrei chiarire. La LQG è il risultato di una collaborazione che vede molti fisici impegnati da molti anni. Ho cercato di rendere merito a questo impegno per quanto è possibile in un'esposizione divulgativa, e posso solo scusarmi in anticipo con qualunque membro della comunità che, leggendo queste pagine, giudichi il proprio lavoro sottorappresentato o, ancor peggio, trascurato. Del resto il libro, concentrandosi principalmente sugli studi di due autori in particolare, non intende fornire una panoramica completa di ciò che è stato fatto nell'ambito della LQG.<sup>6</sup>

Il volume è strutturato in tre parti. La prima prepara la scena, raccontando ciò che Smolin e Rovelli hanno imparato di relatività, meccanica quantistica e cosmologia del big bang inizialmente da giovani studenti e poi da fisici maturi. I lettori che conoscono già questi argomenti possono saltare tranquillamente questa parte (anche se spero non lo facciano!). La seconda racconta la storia della nascita e dell'evoluzione della LQG, dai tentativi di unificare relatività e meccanica quantistica messi in atto alla fine degli anni Novanta, alla scoperta, da parte di

Abhay Ashtekar, delle « nuove variabili » che avrebbero reso possibile l'impresa, fino alla collaborazione tra lo stesso Ashtekar, Smolin e Rovelli (assieme a molti altri) che, verso la fine del millennio, ha dato luogo ai quanti di area e di volume e al formalismo della schiuma di spin. La terza parte ci aggiorna, entro limiti ragionevoli, sulla situazione attuale, con una panoramica sui tentativi di calcolare grandezze fisiche familiari usando la LQG, nonché sulle implicazioni della teoria sulla cosmologia quantistica e sulla fisica dei buchi neri. In questa parte esploreremo anche l'interpretazione della meccanica quantistica e la questione della realtà del tempo.

Voglio anche essere schietto su un'ultima cosa. Come la teoria delle stringhe o la teoria M, la LQG è tuttora *in fieri*. Non è completata, e non ha ancora tutte le risposte. Smolin e Rovelli ne sono ovviamente entusiasti e, sebbene io abbia cercato di mantenere un punto di vista obiettivo, molto del loro entusiasmo è inevitabilmente filtrato nel mio modo di presentare. È importante però non farsi prendere la mano. Molti dei teorici coinvolti a vari livelli del percorso hanno in seguito perso la fede, e l'ottimismo degli anni Novanta ha ceduto il passo a giudizi più misurati (e cupi). Alcuni hanno deciso di abbandonare completamente il campo e lavorare su problemi diversi. Spero che il lettore riesca almeno a percepire l'enormità della sfida: l'inseguimento di una teoria della gravità quantistica non è certo indicato ai deboli di cuore. Il libro si chiude con una conversazione a tre fra Smolin, Rovelli e me, che guarda sia alla storia recente, sia al futuro.

La posta in palio è alta. Le grandi rivoluzioni scientifiche che hanno plasmato il nostro modo di investigare la realtà hanno profondamente cambiato il modo in cui pensiamo allo spazio, al tempo e all'universo. Ne abbiamo forse un'altra alle porte?

Questo libro non sarebbe stato possibile se Lee e Carlo non mi avessero affidato le loro storie personali. È dunque un vero piacere ringraziarli per l'impegno che

hanno profuso nel progetto, sbirciandomi da dietro le spalle mentre stavo componendo il testo, indirizzandomi nella direzione giusta e correggendomi quando sbagliavo. Detto questo, è importante mettere in chiaro che i punti di vista espressi qui sono interamente miei e, se è vero che Carlo e Lee concordano con molto di ciò che ho scritto, ciò non significa che concordino su tutto.

Oltre a ringraziare Lee e Carlo, devo rendere omaggio anche al lavoro di molti altri impegnatissimi scienziati che hanno rinunciato a parte del loro prezioso tempo per leggere le mie bozze, correggere molti dei miei errori e interpretazioni sbagliate, contribuendo anche con idee personali. Tra questi vorrei ricordare Abhay Ash-tekhar dell'Università statale della Pennsylvania, John Baez dell'Università della California, Alejandro Corichi dell'Università nazionale autonoma del Messico, George Ellis dell'Università di Città del Capo, Ted Jacobson dell'Università del Maryland, Kirill Krasnov dell'Università di Nottingham, Jorge Pullin all'Università statale della Louisiana e Peter Woit della Columbia University.

La LQG è una teoria lungi dall'essere completa. Questo significa che nemmeno i fisici più strettamente coinvolti nel suo sviluppo sono tutti concordi sulle risposte alle tante domande che essa lascia ancora aperte. Per mantenere leggibile e, spero, coerente l'esposizione di una materia di cui quasi ogni aspetto può essere messo in discussione, ho dovuto essere selettivo negli argomenti presentati. Sono sicuro di non averlo fatto sempre nel modo corretto, e sono ben felice di attribuirmi la colpa per qualunque errore rimasto.

Devo infine ancora una volta dichiararmi in debito verso Latha Menon, la mia editor alla Oxford University Press, e verso Jenny Nugee, che si è di nuovo prodigata dietro le quinte. Senza il loro lavoro, il libro che avete in mano sarebbe stato sicuramente peggiore.

Che dite, cominciamo?