

LE SCOPERTE • LE INVENZIONI

STEPHEN W. HAWKING ROGER PENROSE

LA NATURA DELLO SPAZIO E DEL TEMPO

CHE COSA LA MENTE UMANA PUÒ
COMPNDERE DELL'UNIVERSO

BUR
Rizzoli

**STEPHEN W. HAWKING
ROGER PENROSE**

**LA NATURA DELLO SPAZIO
E DEL TEMPO**

**CHE COSA LA MENTE UMANA
PUÒ COMPRENDERE DELL'UNIVERSO**

BUR
Rizzoli

LE SCOPERTE • LE INVENZIONI

Proprietà letteraria riservata
© 1996 by Princeton University Press
© 1996 R.C.S. Libri & Grandi Opere S.p.A., Milano
© 2002 RCS Libri S.p.A., Milano
© 2017 Rizzoli Libri S.p.A. / BUR Rizzoli

ISBN 978-88-17-09275-3

Titolo originale dell'opera:
The Nature of Space and Time

Traduzione di Libero Sosio

Prima edizione Rizzoli 1996
Prima edizione BUR 2002
Prima edizione BUR Scienza gennaio 2017

Seguici su:

Twitter: @BUR_Rizzoli www.bur.eu Facebook: /RizzoliLibri

Premessa

Il dibattito fra Roger Penrose e Stephen Hawking registrato in questo libro fu il punto culminante di un programma di sei mesi tenuto nel 1994 all'Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences dell'Università di Cambridge. Esso rappresenta una seria discussione di alcune fra le idee più fondamentali sulla natura dell'universo. Non occorre dire che non siamo ancora giunti a una conclusione definitiva; persistono ancora incertezze e contrasti, e c'è molto su cui discutere.

Una sessantina di anni fa si aprì un'estesa e famosa controversia fra Niels Bohr e Albert Einstein sulle fondazioni della meccanica quantistica. Einstein si rifiutava di accettare la tesi che la meccanica quantistica fosse una teoria definitiva. Egli la trovava filosoficamente insufficiente, e combatté una dura battaglia contro l'interpretazione ortodossa della Scuola di Copenaghen, rappresentata dallo stesso Bohr.

In un certo senso il dibattito fra Penrose e Hawking è una continuazione di quella controversia, con Penrose che svolge il ruolo di Einstein e Hawking quello di Bohr. Oggi i problemi sono più complessi e più vasti ma rappresentano come in passato una combinazione di argomenti tecnici e di punti di vista filosofici.

La teoria quantistica, o la sua versione più complessa nota come teoria quantistica dei campi, è oggi altamente sviluppata e ha tecnicamente un grande successo, anche se ci sono ancora persone scettiche per motivi filosofici come Roger Penrose. Anche la relatività generale, la teoria della gravità di Einstein, ha superato la prova del tempo e può vantare un successo notevole, benché persistano gravi problemi concernenti il ruolo delle singolarità o dei buchi neri.

Il vero problema che domina la discussione fra Hawking e Penrose è la combinazione di queste due teorie di successo, come elaborare

una teoria della «gravità quantistica». Sono in gioco profondi problemi concettuali e tecnici, i quali forniscono l'occasione per gli argomenti discussi in queste lezioni.

Fra gli esempi dei problemi fondamentali sollevati ci sono la «freccia del tempo», le condizioni iniziali alla nascita dell'universo e il modo in cui i buchi neri inghiottono informazione. Su questi problemi, e su molti altri, Hawking e Penrose difendono posizioni sottilmente diverse. Gli argomenti vengono presentati in modo accurato sia in termini matematici sia in termini fisici, e la forma di discussione permette uno scambio significativo di critiche.

Benché una parte della presentazione richieda una conoscenza tecnica della meccanica e della fisica, gran parte della discussione è condotta a un livello più alto (o più profondo), che interesserà a un pubblico più ampio. Il lettore riceverà almeno un'indicazione dell'ampiezza e sottigliezza delle idee in discussione e dell'enorme difficoltà di elaborare un quadro coerente dell'universo che tenga pienamente conto sia della gravitazione sia della teoria quantistica.

Michael Atiyah

La teoria classica

di Stephen W. Hawking

In queste lezioni Roger Penrose e io proporremo i nostri punti di vista, affini ma un po' diversi, sulla natura dello spazio e del tempo. Ci alterneremo tenendo ciascuno tre lezioni, seguite da una discussione sui nostri diversi approcci. Dovrei subito sottolineare che saranno lezioni tecniche; daremo quindi per scontata una conoscenza di base della teoria della relatività e della teoria quantistica.

Descrivendo in un breve articolo le sue esperienze a un congresso sulla relatività generale (credo fosse il congresso di Varsavia del 1962) Richard Feynman commenta in termini molto sfavorevoli la competenza generale dei presenti e la pertinenza di ciò che facevano. Che la relatività generale abbia acquistato ben presto una reputazione molto migliore, e suscitato un maggiore interesse, lo si deve in misura considerevole al lavoro di Roger. Fino allora essa era stata formulata come un insieme disordinato di equazioni alle derivate parziali in un singolo sistema di coordinate. Gli scienziati erano così contenti di aver trovato una soluzione che non si preoccuparono del fatto che essa non aveva probabilmente alcun significato fisico. Roger introdusse però concetti moderni come spinori e metodi globali. Egli fu il primo a mostrare che si potevano scoprire proprietà generali anche senza risolvere esattamente le equazioni. Fu il suo primo teorema delle singolarità a introdurmi allo studio della struttura causale e a ispirare il mio lavoro classico sulle singolarità e sui buchi neri.

Penso che Roger e io abbiamo idee molto simili sulla parte classica. Dissentiamo però nel nostro approccio alla gravità quantistica e di fatto anche alla teoria quantistica stessa. Benché io sia considerato dai fisici delle particelle un pericoloso estremista per avere suggerito che potrebbe verificarsi una perdita della coerenza quantica, rispetto

a Roger sono decisamente un conservatore. Io adotto il punto di vista positivistico che una teoria fisica sia solo un modello matematico e che non abbia senso domandarsi se essa corrisponda o no alla realtà. Tutto quello che le si può chiedere è che le predizioni siano in accordo con l'osservazione. Io penso che Roger sia fundamentalmente un platonico, ma dev'essere lui a rispondere per se stesso.

Benché qualcuno abbia suggerito che lo spazio-tempo possa avere una struttura discreta, io non vedo alcuna ragione per abbandonare le teorie del continuo che hanno avuto un così grande successo. La relatività generale è una bella teoria che concorda con tutte le osservazioni che sono state fatte finora. Essa può richiedere modificazioni alla scala di Planck, ma non penso che questo fatto inciderà su molte delle predizioni che se ne possono ricavare. Può darsi che essa sia solo un'approssimazione a bassa energia a qualche teoria più fondamentale, come la teoria delle stringhe o corde, ma io penso che la teoria delle stringhe sia stata sopravvalutata. Innanzitutto, non ci sono indicazioni che la relatività generale, se sarà combinata con vari altri campi in una teoria della supergravità, non possa dare una teoria quantistica ragionevole. Le relazioni sulla morte della supergravità sono esagerazioni. Un anno tutti erano convinti che la supergravità fosse finita, e l'anno seguente cambiava la moda e tutti dicevano che la supergravità doveva avere divergenze, anche se finora non se ne era trovata nessuna. La seconda ragione per cui ho deciso di non occuparmi della teoria delle stringhe è che essa non ha fatto alcuna predizione verificabile. Di contro, la semplice applicazione della teoria quantistica alla relatività generale, della quale ci occuperemo, ha già fatto due predizioni verificabili. Una di queste, lo sviluppo di piccole perturbazioni nel corso dell'inflazione, sembra confermata da recenti osservazioni di fluttuazioni nella radiazione di fondo a microonde. La seconda, che i buchi neri debbano presentare una radiazione termica, è teoricamente verificabile. Tutto quel che dobbiamo fare è trovare un buco nero primordiale. Purtroppo non pare che ce ne siano molti in questa regione. Se ce ne fossero stati noi sapremmo come quantizzare la gravità.

Nessuna di queste due predizioni sarà modificata neppure se la teoria delle stringhe si rivelasse la teoria ultima della natura. Essa però, almeno nel suo stato attuale di sviluppo, è del tutto incapace di fare queste predizioni tranne che appellandosi alla relatività generale come alla teoria efficace a basse energie. Io sospetto che anche in

seguito potrebbe essere sempre così e che potrebbero non esserci predizioni osservabili della teoria delle stringhe che non possano essere fatte anche dalla relatività generale o dalla supergravità. Se ciò che sto dicendo è vero, si pone il problema se la teoria delle stringhe sia un'autentica teoria scientifica. La bellezza matematica e la completezza sono sufficienti in assenza di precise predizioni confermate dall'osservazione? Non che la teoria delle stringhe nella sua forma presente sia bella o completa.

Perciò in queste lezioni parlerò della relatività generale. Mi concentrerò su due aree in cui la gravità sembra condurre a risultati che sono completamente diversi rispetto a quelli forniti da altre teorie dei campi. La prima è l'idea che, in conseguenza della gravità, lo spazio-tempo dovrebbe avere un inizio e forse anche una fine. La seconda è la scoperta che pare esista un'entropia gravitazionale intrinseca che non è la conseguenza della grossolanità del nostro approccio. Alcuni hanno sostenuto che queste predizioni sono solo artefatti dell'approssimazione semiclassica. Dicono che la teoria delle stringhe, la vera teoria quantistica della gravità, cancellerà le singolarità e introdurrà correlazioni nella radiazione dei buchi neri, la quale risulterà essere approssimativamente termica solo a una considerazione grossolana. Sarebbe davvero un peccato se fosse così. La gravità sarebbe allora simile a qualsiasi altro campo. Io credo invece che essa sia decisamente diversa, in quanto plasma l'arena in cui agisce, diversamente da altri campi, che agiscono su uno sfondo spaziotemporale fisso. È questo carattere della gravità a suggerire la possibilità che il tempo abbia un inizio. Esso conduce anche alla nozione di regioni dell'universo inaccessibili all'osservazione, la quale dà origine a sua volta al concetto di entropia gravitazionale come misura di ciò che non possiamo conoscere.

In questa lezione passerò in rassegna le ricerche nella relatività generale classica che conducono a queste idee. Nella mia seconda e terza lezione (capitoli 3 e 5) mostrerò come queste mutino e si estendano quando si passa alla teoria quantistica. La mia seconda lezione sarà sui buchi neri e la terza sulla cosmologia quantistica.

La tecnica cruciale per l'investigazione delle singolarità e dei buchi neri che fu introdotta da Roger e che io contribuì a sviluppare, fu lo studio della struttura causale globale dello spazio-tempo.

Definiamo $I^+(p)$ l'insieme di tutti i punti dello spazio-tempo M che possono essere raggiunti a partire da p da curve di tipo tempo

dirette verso il futuro. Si può pensare $I^+(p)$ come l'insieme di tutti gli eventi che possono essere influenzati da ciò che accade in p . Ci sono definizioni simili in cui il segno più è sostituito dal meno e il futuro dal passato. Io considererò tali definizioni come evidenti.

Consideriamo ora il confine $i^+(S)$ del futuro di un insieme S . È abbastanza facile vedere che questo confine non può essere di tipo tempo. In tal caso, infatti, un punto q subito fuori del confine sarebbe il futuro di un punto p immediatamente all'interno. Né il confine del futuro può essere di tipo spazio, tranne che nell'insieme S : se lo fosse, infatti, ogni curva diretta verso il passato a partire da un punto q , esattamente al futuro del confine, attraverserebbe il confine stesso e lascerebbe il futuro di S . Ciò sarebbe in contraddizione col fatto che q si trova nel futuro di S (figura 1.2)

Si conclude perciò che il confine del futuro è nullo, tranne che a partire dallo stesso insieme S . Più precisamente, se q è nel confine del futuro ma non nella chiusura di S , c'è un segmento geodetico di lunghezza nulla diretto verso il passato che passa per q , che giace sul confine (vedi figura 1.3). Può esserci più di un segmento geodetico nullo passante per q , che giace sul confine, ma in tal caso q sarà un estremo futuro dei segmenti. In altri termini, il confine del futuro di S è generato da geodetiche di lunghezza nulla che hanno un estremo futuro sul confine e che entrano nell'interno del futuro se intersecano un'altra generatrice. D'altra parte, le geodetiche nulle generatrici possono avere un estremo passato solo su S . Si possono avere però

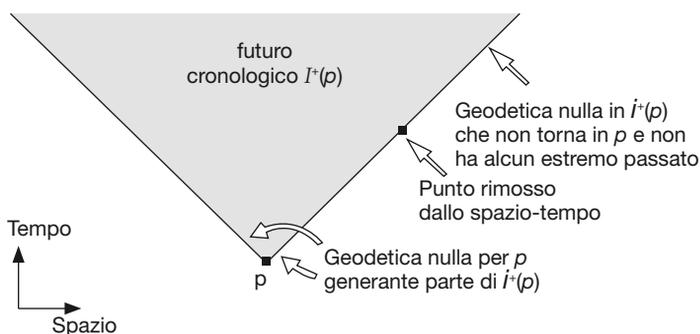


Figura 1.1. Il futuro cronologico di un punto p .

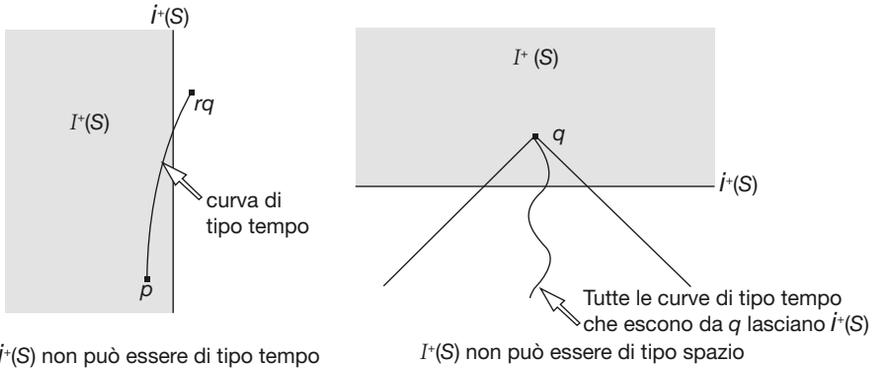


Figura 1.2. Il confine del futuro cronologico non può essere di tipo tempo o di tipo spazio.

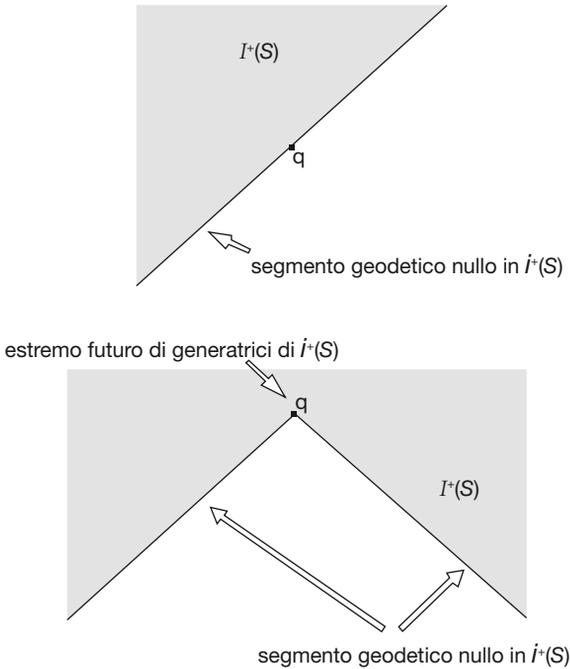


Figura 1.3. *In alto*: il punto q si trova sul confine del futuro, cosicché c'è un segmento geodetico nullo nel confine che passa per q . *In basso*: se c'è più di un segmento siffatto, il punto q sarà il loro estremo futuro.