



Steven S. Gubser e Frans Pretorius

I BUCHI NERI

«Ne raccomando caldamente
la lettura a chiunque».

Roger Penrose



Bollati Boringhieri

Nuovi Saggi Bollati Boringhieri

47

Steven S. Gubser e Frans Pretorius

I buchi neri

Traduzione di Laura Servidei

Bollati Boringhieri



www.bollatiboringhieri.it



facebook.com/BollatiBoringhieri

IL LIBRAIO

www.illibraio.it

© 2017 by Steven S. Gubser & Frans Pretorius. All rights reserved

Titolo originale *The Little Book of Black Holes*

© 2018 Bollati Boringhieri editore
Torino, corso Vittorio Emanuele II, 86
Gruppo editoriale Mauri Spagnol
ISBN 978-88-339-3004-6

Prima edizione digitale: aprile 2018

Quest'opera è protetta dalla Legge sul diritto d'autore.
È vietata ogni duplicazione, anche parziale, non autorizzata

Indice

7	Prefazione
	I buchi neri
17	1. Relatività ristretta
34	2. Relatività generale
55	3. Il buco nero di Schwarzschild
82	4. Il buco nero rotante
103	5. Buchi neri nell'Universo
118	6. Collisioni di buchi neri
142	7. La termodinamica dei buchi neri
162	Epilogo

Prefazione

Era il 14 settembre 2015, quasi cent'anni esatti dopo la formulazione della teoria della relatività generale da parte di Albert Einstein. Si stava ultimando la preparazione di due enormi rilevatori, uno in Louisiana e uno nello stato di Washington, per una prova di rilevazione di onde gravitazionali. All'improvviso arrivò, del tutto inaspettato, un «cinguettio» particolare, rilevato dagli strumenti. Se fosse stato un suono, sarebbe stato un tonfo sordo, molto debole.

Cinque mesi dopo, a seguito di attente analisi dei dati registrati dagli strumenti, l'osservatorio a interferometria laser per le onde gravitazionali (LIGO) annunciò pubblicamente i risultati. Quel cinguettio era esattamente il tipo di segnale che si sperava di rilevare. Era la lontana eco della collisione di due buchi neri che si fondevano in un unico buco nero più grande. L'annuncio entusiasmò la comunità scientifica: era come se, dopo aver vissuto tutta la vita in bianco e nero, in quell'istante il velo si fosse alzato e, per la prima volta, avessimo potuto ammirare una rosa in tutto il suo splendore.

E che rosa! La valutazione di LIGO indicava che il tonfo sordo registrato era il risultato della fusione di due buchi neri avvenuta più di un miliardo di anni fa, ognuno dei quali aveva una massa pari a circa trenta volte quella del Sole. Durante la collisione, l'energia corrispondente a circa tre masse solari si era vaporizzata sotto forma di radiazione gravitazionale.

I buchi neri e le onde gravitazionali sono entrambi conseguenze della teoria della relatività generale, la quale prevede che tipo di onde gravitazionali si dovrebbe rilevare nel caso di una collisione; il cinguettio del 14 settembre 2015 fu splendidamente coerente con le previsioni teoriche. Questo primo rilevamento non fu solo la conferma di teorie in cui si credeva fermamente, ma rappresentò l'alba di una nuova era dell'astronomia. I rilevatori di LIGO videro un evento che si sognava da anni; ora vogliamo esplorare tutte le sorprese gravitazionali nascoste in questa nuova area di ricerca.

La scienza raramente comporta certezze matematiche, quindi dovremmo chiederci: quanto siamo sicuri che la perturbazione rilevata da LIGO sia veramente l'eco lontana di una fusione di buchi neri avvenuta un miliardo di anni fa? In breve, la risposta è «abbastanza sicuri». Tutto torna. Il segnale fu rilevato da entrambi i dispositivi. Nient'altro che potesse spiegare quel segnale stava succedendo nei dintorni. Era abbastanza potente da venire osservato dai rilevatori moderni, ma troppo debole per i dispositivi tecnologicamente più datati. L'ipotesi di una fusione di buchi neri avvenuta un miliardo di anni fa non è in contraddizione con la nostra attuale comprensione dell'astrofisica e della cosmologia. Il punto chiave è che abbiamo buone speranze di vedere altri eventi simili. Anzi, LIGO ha confermato un secondo evento avvenuto il giorno di Natale del 2015, e un terzo il 4 gennaio 2017. Entrambi sono in gran parte confrontabili con la prima scoperta e rappresentano una significativa conferma del fatto che LIGO sta effettivamente osservando collisioni di buchi neri. In sostanza, siamo fiduciosi di essere all'inizio di una nuova era dell'astrofisica sperimentale, un'era in cui i buchi neri giocheranno un ruolo chiave.

In questo libro descriviamo i buchi neri, sia come oggetti astrofisici, la cui esistenza è ora quasi al di là di ogni dubbio, sia come laboratori teorici in cui affinare la nostra comprensione, non solo della gravità, ma anche della meccanica quantistica e della termodinamica. Una panoramica sulla relatività ristretta e quella generale prepara il terreno, nei capitoli 1 e 2. Poi, nei capitoli successivi, procediamo a esaminare i buchi neri

di Schwarzschild, quelli rotanti, le collisioni tra buchi neri, la radiazione gravitazionale, la radiazione di Hawking e la perdita di informazione.

Ma cos'è un buco nero? Essenzialmente, è una regione di spaziotempo verso la quale la materia è attratta, e da cui è impossibile sfuggire. Concentriamo la nostra analisi sui buchi neri più semplici, quelli di Schwarzschild, così chiamati in onore del loro scopritore, Karl Schwarzschild. «Chi troppo in

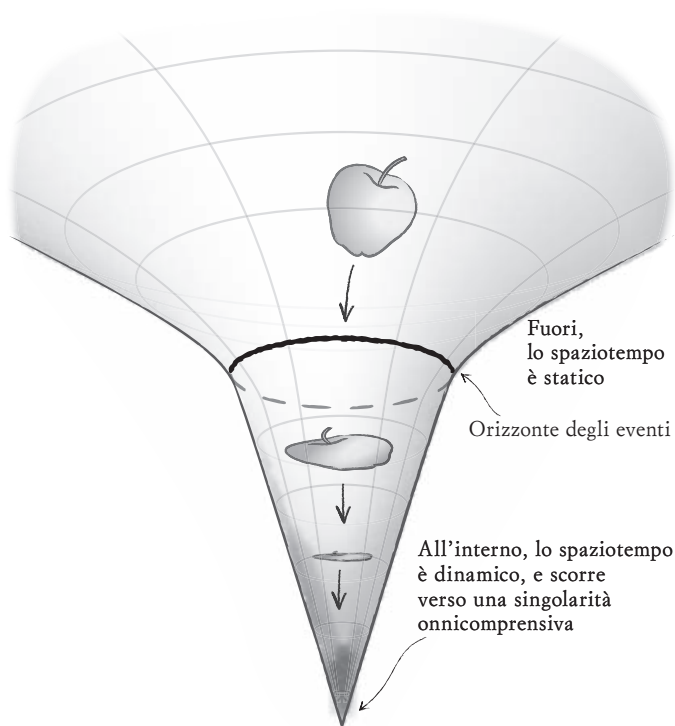


Figura 0.1

Sezione aperta di una rappresentazione schematica della geometria di un buco nero. Lontano dall'orizzonte, lo spaziotempo è piatto. Muovendosi verso l'orizzonte, diventa sempre più curvo, ma è ancora statico, cioè indipendente dal tempo. Una volta attraversato l'orizzonte, però, lo spaziotempo diventa molto dinamico: con lo scorrere del tempo, due dimensioni spaziali (a geometria sferica) sono compresse, mentre la terza (non mostrata nel disegno) si allunga, fino a che tutto lo spazio si schiaccia e si stira in una singolarità infinitamente lunga e sottile.

alto sal cade sovente precipitevolissimevolmente» dice il vecchio adagio, ma all'interno di un buco nero di Schwarzschild l'adagio è molto più categorico: non si sale mai, si cade precipitevolissimevolmente e basta. Però non siamo sicurissimi di dove si vada a finire. L'ipotesi più semplice, date le strutture matematiche a sostegno dei buchi neri di Schwarzschild, è che un tremendo nucleo di materia, infinitamente compresso, stia al centro del buco nero. Una collisione con questo nucleo è la fine di tutto, perfino del tempo. Un'ipotesi difficile da verificare, perché nessun osservatore che entri in un buco nero potrà mai uscirne e raccontarci cos'ha visto.

Prima di iniziare l'esplorazione dei buchi neri di Schwarzschild in dettaglio, facciamo un passo indietro e consideriamo la gravità nelle sue forme più deboli. Dalla superficie della Terra, se lanciamo un oggetto verso l'alto con velocità sufficiente, continuerà a muoversi nella stessa direzione per sempre. La velocità minima per cui questo accade è la velocità di fuga, che, trascurando l'attrito dell'aria, è circa 11,2 km/s. Per fare un paragone, è difficile per un essere umano lanciare una palla a più di 45 m/s, cioè meno della metà dell'1% della velocità di fuga. La velocità di una pallottola che esce da un fucile di precisione è circa 1,2 km/s, quindi un po' più del 10% della velocità di fuga. Questa è la ragione per cui, nel vecchio adagio, chi sale in alto cade: la gravità della Terra è potente, a confronto con la forza che si riesce a impartire agli oggetti con mezzi ordinari.

La missilistica è il sistema moderno per sottomettere la gravità della Terra e mandare oggetti nello spazio. Per sfuggire alla gravità terrestre, non è strettamente necessario che un razzo vada più veloce di 11,2 km/s (sebbene alcuni razzi superino questa velocità). Un'altra possibilità è che un razzo viaggi a una velocità minore, ma abbia abbastanza carburante per continuare a spingersi verso l'alto, fino a raggiungere un'altezza in cui il campo gravitazionale della Terra è significativamente meno intenso. La velocità di fuga da un'altezza del genere sarà minore, in modo corrispondente. In altre parole, un razzo progettato per portare una sonda spaziale completamente fuori dal

campo gravitazionale terrestre deve andare più veloce di quella che è la velocità di fuga nel punto in cui il razzo si spegne.

Ora potremmo chiederci cosa succederebbe se la Terra fosse molto più densa: in quel caso la velocità di fuga dalla superficie sarebbe maggiore, perché il campo gravitazionale sarebbe più forte. La forma stabile più densa di materia ordinaria nell'Universo conosciuto sono le stelle di neutroni. Riescono a condensare una massa equivalente a una volta e mezzo il Sole in una sfera di soli 12 chilometri di raggio, sebbene questo raggio non sia misurato con precisione. La materia ordinaria è completamente stritolata sulla superficie da una tremenda forza di gravità, qualcosa come cento miliardi di volte la gravità terrestre. Se il raggio è 12 chilometri, la velocità di fuga è circa il 60% della velocità della luce.

Ma perché fermarsi qui? Come esperimento concettuale, potremmo immaginare di comprimere ulteriormente una stella di neutroni, fino a un raggio di circa quattro chilometri e mezzo; in tal caso la velocità di fuga diventerebbe uguale alla velocità della luce. Se si va oltre questo punto, la gravità cambia completamente carattere. La materia non riesce più a sostenersi, in nessuna forma, e a resistere all'attrazione gravitazionale. Andare avanti nel tempo significa avvicinarsi al centro. La fuga è impossibile. Questo è un buco nero.

Lo scopo principale dei primi capitoli di questo libro è rendere più precisa l'idea di buco nero. Un concetto chiave che esploreremo è l'idea dell'orizzonte degli eventi, che è la «superficie» del buco nero. Si tratta di una superficie in senso geometrico: un luogo geometrico bidimensionale in uno spazio a tre dimensioni. Per esempio, nel più semplice esempio di buco nero di Schwarzschild, l'orizzonte è una sfera, il cui raggio si chiama «raggio di Schwarzschild». La cosa strana dell'orizzonte dei buchi neri è che (per lo meno secondo le teorie correnti) non rappresenta il confine di niente di particolare. Nel momento in cui lo si attraversa, non si osserva niente di speciale. I problemi cominciano quando si cerca di girarsi e tornare indietro. Non c'è razzo, cannone laser o nessun'altro mezzo che possa riuscire nell'intento, nemmeno facendosi aiu-

tare dall'esterno, perché non si riesce nemmeno a mandare un segnale di s.o.s. Poeticamente, potremmo pensare all'orizzonte di un buco nero come all'orlo di una cascata, oltre il quale lo spaziotempo cade precipitevolissimamente verso una singolarità che tutto distrugge.

I buchi neri sono più di un esperimento mentale. Secondo le teorie scientifiche correnti, si formano in almeno due situazioni distinte. Una è quella delineata in precedenza, a partire dalle stelle di neutroni. Quando stelle molto grandi esauriscono il carburante nucleare, collassano su sé stesse. Questo collasso è un processo caotico, durante il quale grandi quantità di materia vengono proiettate nello spazio circostante, in un'esplosione chiamata «supernova» (generalmente si pensa che le supernove giochino un ruolo cruciale nel distribuire i metalli e altri elementi moderatamente pesanti in tutto l'Universo). La materia che resta a volte è così tanta da rendere impossibile la formazione di una stella di neutroni che rimanga stabile. Però, questa materia rimanente collassa e forma un buco nero, la cui massa è almeno un certo numero di volte la massa del Sole. I buchi neri la cui collisione fu osservata da LIGO erano un po' più grandi, ma ancora plausibilmente creati dal collasso di stelle.

Buchi neri molto più grandi si trovano (si pensa) al centro delle galassie. Come si siano formati esattamente è una questione più misteriosa, che forse ha a che fare con la materia oscura, o con la fisica delle origini dell'Universo, o forse con entrambe le cose. I buchi neri al centro delle galassie hanno massa enorme, centinaia di miliardi di volte più grande del Sole. Si pensa che uno stia in mezzo alla Via Lattea, grande circa quattro milioni di masse solari. Potremmo chiederci: come facciamo sapere che c'è un buco nero se nessun segnale può uscire dal suo orizzonte? La risposta è che gli oggetti circostanti rispondono alla sua attrazione gravitazionale. Osservando il moto delle stelle che si trovano vicino al centro della Via Lattea, possiamo concludere che lì c'è un oggetto molto denso, di massa enorme. Non possiamo dimostrare che sia un buco nero, ma possiamo concludere che, se non è un buco nero, allora è qualcosa di molto più strano. In poche parole, i buchi

neri sono la possibilità più semplice, e il consenso, nella comunità scientifica odierna, è che esistano e stiano al centro di gran parte delle galassie, se non addirittura di tutte.

I buchi neri rappresentano laboratori teorici estremamente utili, perché sono matematicamente semplici da descrivere, in confronto ad altri oggetti astronomici. Le stelle sono molto complicate. Sono alimentate dalle reazioni nucleari nel nucleo; la pressione e la fluidodinamica della materia al loro interno si possono simulare numericamente, ma non sono certo comprese del tutto. E poi le stelle hanno dinamiche di superficie forse altrettanto complicate delle dinamiche meteorologiche terrestri. Un buco nero, al confronto, è meravigliosamente semplice. In assenza di altra materia, i buchi neri si stabilizzano secondo poche possibili forme predefinite, tutte esprimibili come geometrie curve che risolvono le equazioni di Einstein della relatività generale. Certamente la materia in caduta dentro i buchi neri complica le cose, ma questo moto, e il comportamento della materia che cade, è sufficientemente compreso. Oggigiorno ci sono perfino buone approssimazioni numeriche degli eventi di collisione di buchi neri, e uno degli scopi principali del capitolo 6 è descrivere questi eventi e i loro effetti su esperimenti come LIGO.

Le cose diventano davvero strane quando si scopre che i buchi neri non sono completamente neri. Usando la meccanica quantistica, Stephen Hawking dimostrò che hanno una temperatura definita, collegata con la loro gravità di superficie. In effetti, esiste un'intera area di ricerca, la termodinamica dei buchi neri, in cui le proprietà geometriche sono messe in precisa relazione con proprietà termodinamiche: temperatura, energia, entropia. Esiste perfino un'ipotesi secondo cui i buchi neri in zone lontane dell'Universo possono avere l'interno in comune, e questi interni comunicanti possono rivelare un effetto chiamato «correlazione quantistica». Un'introduzione a questi concetti si trova nel capitolo 7.

I buchi neri continuano a catturare l'immaginazione degli scienziati. Gli astronomi cercano prove più precise delle proprietà dei buchi neri rotanti, e ora si accingono a collaborare con gli osservatori di onde gravitazionali per comprendere e

spiegare gli eventi catastrofici di collisione. E questo è solo l'inizio dell'astronomia delle onde gravitazionali, con la costruzione di una rete di rilevatori in tutto il mondo, negli Stati Uniti (i due rilevatori LIGO a Hanford, nello stato di Washington, e a Livingston, in Louisiana), in Europa (Virgo e GEO600), in Giappone (KAGRA) e in India (LIGO India). Intanto, i teorici delle stringhe studiano i buchi neri in molte dimensioni non solo come mezzo per misurare gli effetti quantistici nella teoria della gravità, ma anche come modelli per la fisica di eventi molto vari, dalla collisione di ioni pesanti, ai fluidi viscosi, fino ai superconduttori. E ispirano le domande più complesse: ci potranno mai essere utili? Cosa c'è al loro interno? Che effetto fa cadere dentro a un buco nero? O perfino: è possibile che ci siamo già caduti dentro e non ce ne siamo accorti?

I buchi neri

1.

Relatività ristretta

Per capire i buchi neri, bisogna imparare un po' di teoria della relatività, che è divisa in due parti: generale e ristretta. Albert Einstein scoprì la relatività ristretta nel 1905: una teoria che riguarda oggetti in movimento relativo gli uni rispetto agli altri, e la percezione dello spazio e del tempo da parte di un osservatore a seconda del suo stato di moto. L'idea centrale della relatività ristretta si può formulare in termini geometrici, usando un elegante concetto chiamato «spaziotempo di Minkowski».

La relatività generale comprende quella ristretta, e anche la gravità; è la teoria che ci permette di capire a fondo i buchi neri. Einstein la sviluppò in un periodo di diversi anni, culminato in un articolo pubblicato verso la fine del 1915¹ in cui presentò le cosiddette «equazioni di campo di Einstein». Queste equazioni descrivono come la gravità distorce lo spaziotempo di Minkowski e lo rende curvo, per esempio secondo la geometria di Schwarzschild, che prevede i buchi neri, di cui parleremo nel capitolo 3. La relatività ristretta è più semplice di quella generale, perché non si occupa della gravità; cioè, la gravità è ignorata, o si ipotizza che sia debole e quindi non significativa.

La relatività ristretta include la formula $E = mc^2$, che mette in relazione l'energia E , la massa m e la velocità della luce c . Si tratta di una delle equazioni più famose di tutta la fisica, forse

¹ Einstein A., *Feldgleichungen der Gravitation*, «Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften», 1915, pp. 844-47 [trad. it. di Pratelli A. M. e Sagittario E., *Le due relatività*, Bollati Boringhieri, Torino 2015].

di tutto il sapere umano. Grazie a questa formula è stato possibile immaginare la tremenda potenza delle armi nucleari, ed è altresì alla base delle nostre speranze, non ancora realizzate, di riuscire a sviluppare una fonte di energia pulita per mezzo della fusione nucleare. $E = mc^2$ è rilevante anche nella fisica dei buchi neri. Per esempio, l'energia sprigionata dalla prima collisione di buchi neri mai osservata, pari a tre masse solari, è un'eccellente illustrazione dell'equivalenza tra massa ed energia. Per farsi un'idea del cataclisma rappresentato da quello scontro, considerate che la massa convertita in energia in una «normale» esplosione nucleare (per esempio in una bomba con un rendimento di 400 chilotoni) equivale a soli 19 grammi.

La relatività ristretta è intimamente legata alla teoria dell'elettromagnetismo, dovuta a James Clerk Maxwell. In verità, un indizio della visione relativistica di spazio e tempo emerse già nel tardo Ottocento, sotto forma delle cosiddette «trasformazioni di Lorentz», che spiegano come la percezione dei fenomeni elettromagnetici dipende dal movimento dell'osservatore. Il fenomeno elettromagnetico più comune è la luce: un'onda di campi elettrici e magnetici. Una conseguenza della teoria di Maxwell è che la luce ha una velocità ben definita; la relatività è costruita sul principio che questa velocità è in realtà costante, indipendente dal moto dell'osservatore.

Nella relatività ristretta, il moto degli osservatori si descrive in termini di sistemi di riferimento. Per farci un'idea di cosa sono, immaginiamo un treno che viaggia ad alta velocità. Se tutti i passeggeri sono seduti, e i bagagli sono ben sistemati, tutto sul treno è stazionario rispetto al treno stesso. Ma il treno si muove velocemente rispetto alla Terra. Supponiamo che il treno viaggi in linea retta a velocità costante. Per descrivere con precisione i sistemi di riferimento, dobbiamo ignorare i campi gravitazionali. Per esempio, invece di un treno sulla superficie della Terra, possiamo considerare un'astronave che viaggia a velocità costante nello spazio vuoto. Il campo gravitazionale terrestre è abbastanza debole da poter ignorare i suoi effetti sul treno, per i nostri scopi, e lavorare solo con la relatività ristretta, piuttosto che con quella generale.

Se non si guarda dal finestrino, è difficile stabilire qual è la velocità del treno. In una situazione in cui gli ammortizzatori sono efficienti, e i binari sono perfettamente livellati, se le tendine sono tirate diventa impossibile addirittura rendersi conto se il treno si sta muovendo o no. Il treno fornisce un sistema di riferimento: quello usato istintivamente dai passeggeri per giudicare se un oggetto all'interno del treno si sta spostando. Nella situazione ideale descritta, non riescono a capire se il treno stesso si muove, ma certamente vedono una persona camminare nel corridoio, perché quella persona si muove rispetto al loro sistema di riferimento. Inoltre, tutti i fenomeni fisici, come una palla che cade, o una trottola che gira, seguiranno le stesse regole, che il treno sia in moto oppure no. In breve, quindi, un sistema di riferimento è un modo di considerare lo spazio e il tempo associati a un osservatore che si trova in uno stato di moto uniforme. «Moto uniforme» significa che il treno non accelera e non rallenta, e non cambia direzione. Se il treno fa una di queste cose, allora i passeggeri se ne accorgeranno; per esempio, una rapida accelerazione li spingerà all'indietro verso lo schienale, mentre una decelerazione li spingerà in avanti.

Immaginiamo ora il nostro treno che passa per una stazione, senza fermarsi o rallentare. I passeggeri (chiamiamoli Alice, Allan e Avery) sono osservatori situati all'interno di un sistema di riferimento che chiameremo «riferimento A». Intanto, i loro amici Bob, Betty e Bill sono sul binario, all'interno del loro sistema di riferimento stazionario, che chiameremo «riferimento B». Per disegnare questi sistemi di riferimento, mettiamo le posizioni nel riferimento B sull'asse orizzontale, e il tempo del riferimento B su quello verticale, disegnando le traiettorie dei nostri vari osservatori attraverso lo spazio e il tempo, in modo che gli osservatori nel riferimento B siano sempre nello stesso punto, mentre gli osservatori nel riferimento A si muovono in avanti. Il grafico risultante è lo spazio-tempo di Minkowski! La parola «spaziotempo» si riferisce al fatto che mostriamo lo spazio e il tempo nello stesso grafico. Nello spaziotempo di Minkowski è possibile adottare una pro-