

LE SCOPERTE • LE INVENZIONI

STEPHEN W. HAWKING

LA TEORIA DEL TUTTO

ORIGINE E DESTINO
DELL'UNIVERSO

BUR
Rizzoli

Sommario

Introduzione

Prima lezione: *Idee sull'universo*

Seconda lezione: *L'universo in espansione*

Terza lezione: *I buchi neri*

Quarta lezione: *I buchi neri non sono poi così neri*

Quinta lezione: *L'origine e il destino dell'universo*

Sesta lezione: *La direzione del tempo*

Settima lezione: *La teoria del tutto*

Come ha avuto origine il cosmo? Qual è il destino che ci attende? Fino agli anni Venti del secolo scorso queste domande erano competenza della religione o della filosofia, mentre oggi è possibile affrontarle da un punto di vista scientifico.

Con il suo inconfondibile stile chiaro e comunicativo, Stephen Hawking ci guida in un viaggio che – a partire dalla cosmologia di Aristotele attraverso le teorie di Copernico, di Newton e di Einstein – giunge fino alle ultime frontiere della fisica contemporanea per spiegarci i grandi misteri dell'universo: dal big bang alla formazione delle galassie, dalla morte delle stelle ai buchi neri, dai limiti della teoria della relatività generale alla proposta della condizione di assenza di confini.

Coniugando come sempre profondità e chiarezza, nelle sette lezioni di queste pagine Hawking illustra una panoramica delle concezioni sostenute in passato per scoprire come siamo giunti alla nostra immagine attuale, in altre parole la storia della storia dell'universo, giungendo a prefigurare l'affascinante compito che attende la scienza nei prossimi anni: elaborare una teoria definitiva sulla natura dell'universo, una teoria del tutto che ci permetta di indagare sul fine ultimo della creazione. “Se riusciremo a raggiungerla, potremo realmente comprendere l'universo e la posizione che in esso occupiamo.”

STEPHEN W. HAWKING (1942-2018) è stato uno degli astrofisici e cosmologi più conosciuti e autorevoli, famoso soprattutto per i suoi studi sui buchi neri. Nonostante la grave malattia neurologica che l'ha condannato all'immobilità, ha occupato dal 1979 al 2009 la cattedra di Matematica lucasiana – la stessa che fu di Newton – a Cambridge. Tra i suoi libri disponibili in BUR ricordiamo *La teoria del tutto*, *La grande storia del tempo*, *Buchi neri e universi neonati*, *Dove il tempo si ferma* e *La natura dello spazio e del tempo*, scritto con Roger Penrose.

BUR

Dello stesso autore in BUR

Buchi neri e universi neonati
Dal big bang ai buchi neri
La grande storia del tempo
La natura dello spazio e del tempo
(con Roger Penrose)

Stephen W. Hawking

La teoria del tutto

Origine e destino dell'universo

BUR scienza

Proprietà letteraria riservata
© 1996 by Dove Audio, Inc.
© 2002 by New Millennium Press
First published under the title *The Cambridge Lectures: Life Works*
© 2003 RCS Libri S.p.A., Milano

eISBN 978-88-58-69342-1

Titolo originale dell'opera:
The Theory of Everything. The Origin and Fate of the Universe

Traduzione di Daniele Didero

Prima edizione Rizzoli 2003
Prima edizione BUR 2004
Prima edizione BUR Scienza gennaio 2015

Seguici su:

Twitter: @BUR_Rizzoli www.bur.eu Facebook: BUR Rizzoli

In copertina:
fotografia © NASA / National Geographic / Getty Images
Art Director: Francesca Leoneschi
Progetto grafico: Emilio Ignozza / *theWorldofDOT*

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

Introduzione

In questa serie di lezioni cercherò di presentare un quadro di ciò che riteniamo essere la storia dell'universo, dal big bang ai buchi neri. Nella prima lezione prenderò brevemente in esame le concezioni dell'universo che sono state sostenute in passato per poi vedere come siamo giunti alla nostra immagine attuale; in altre parole, mi soffermerò su ciò che potremmo indicare come la storia della storia dell'universo.

Nella seconda lezione spiegherò come sia la teoria della gravità di Newton sia quella di Einstein ci portano a concludere che l'universo non può essere una realtà immobile; esso, cioè, si trova necessariamente in uno stato di espansione oppure di contrazione. Ciò implica, a sua volta, che dev'esserci stato un tempo – tra i dieci e i venti miliardi di anni fa – in cui la densità dell'universo aveva un valore infinito: il cosiddetto «big bang», col quale sarebbe iniziata la storia dell'universo.

Nella terza lezione parlerò dei buchi neri, che si formano quando una stella dalla massa sufficientemente grande – o anche un corpo astronomico di dimensioni maggiori – collassa su se stessa, sotto la propria forza di attrazione gravitazionale. Stando alla teoria della relatività generale formulata da Einstein, chiunque fosse abbastanza folle da cadere in un buco nero sarebbe perduto per sempre. Non sarebbe cioè più possibile, per lui, uscirne; la sua storia si concluderebbe definitivamente in questo evento. Tuttavia, dobbiamo tenere presente che la relatività generale è una teoria classica: essa, cioè, non tiene conto del principio di indeterminazione della meccanica quantistica.

Nella quarta lezione descriverò come, in base alla meccanica quantistica, è possibile che un buco nero emetta radiazioni energetiche. I buchi neri, detto in altri termini, non sono poi così neri come li si dipinge.

Nella quinta lezione applicherò i principi della meccanica quantistica al big bang e alle origini dell'universo. Giungeremo così all'idea secondo la quale lo spazio e il tempo, pur avendo un'estensione finita, possono

essere privi di un confine, di un margine esterno che li delimiti; un po' come la superficie della Terra, ma con due dimensioni in più.

Nella sesta lezione mostrerò come questa nuova proposta di interpretazione dei limiti dello spazio-tempo sia in grado di spiegare perché il passato – nonostante la simmetria che contraddistingue le leggi della fisica – sia così palesemente diverso dal futuro.

In ultimo, nella settima lezione, presenterò i nostri sforzi di trovare una teoria unificata che includa, in un'unica spiegazione coerente, la meccanica quantistica, la forza di gravità e le altre interazioni di cui parla la fisica. Se riusciremo a raggiungerla, potremo realmente comprendere l'universo e la posizione che in esso occupiamo.

La teoria del tutto

Prima lezione:
Idee sull'universo

Già nel 340 a.C., nel suo trattato *De caelo*, Aristotele riuscì ad avanzare due validi argomenti a sostegno della tesi per cui la Terra è sferica e non piatta. In primo luogo, egli comprese che le eclissi di Luna sono causate dall'interposizione della Terra fra il Sole e la Luna stessa. L'ombra proiettata dalla Terra sulla Luna, notava Aristotele, è sempre di forma circolare, e ciò implica la sfericità della Terra; se infatti la Terra fosse un disco piatto, la sua ombra sulla Luna avrebbe una forma allungata ed ellittica, a meno che le eclissi non si verificassero sempre nei momenti in cui il Sole è direttamente perpendicolare al centro del disco terrestre.

In secondo luogo, i greci sapevano, grazie ai loro viaggi, che nelle regioni meridionali la Stella Polare è più bassa, sulla linea dell'orizzonte, di quanto non lo sia quando ci si trova più a nord. Basandosi sulla differenza nella posizione apparente della Stella Polare in Egitto e in Grecia, Aristotele citava anche una stima sulla misura della circonferenza terrestre: *400.000 stadia*. Non sappiamo con precisione quanto fosse lungo uno *stadium*, ma possiamo ipotizzare che corrispondesse a circa 180 metri; la stima fornita da Aristotele, quindi, sarebbe all'incirca il doppio di quella oggi accettata.

I greci conoscevano inoltre un terzo argomento a sostegno della tesi della sfericità della Terra: quello per cui, quando una nave si sta avvicinando, all'orizzonte si scorgono dapprima le vele, e solo in un secondo momento lo scafo. Aristotele pensava che la Terra fosse immobile e che il Sole, la Luna, i pianeti e le stelle si muovessero intorno a essa seguendo orbite circolari; questo perché, per ragioni di carattere mistico, era convinto che la Terra fosse il centro dell'universo e che il moto circolare fosse quello più perfetto.

Quest'idea venne poi elaborata da Tolomeo che, nel II secolo d.C., la sviluppò in un modello cosmologico completo. La Terra stava immobile al

centro dell'universo, circondata da otto sfere cave che portavano con sé, nel loro movimento circolare, la Luna, il Sole, le stelle e i cinque pianeti allora conosciuti: Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Per rendere conto dei percorsi, assai complicati, che i pianeti seguono nella volta celeste, Tolomeo postulava poi che essi, a loro volta, si muovessero lungo dei cerchi più piccoli, legati alle loro rispettive sfere. La sfera più esterna portava con sé le cosiddette stelle fisse, così chiamate perché, pur ruotando tutte lungo la volta celeste, mantengono sempre la stessa posizione l'una rispetto all'altra. Nessuno si preoccupò mai troppo di chiarire che cosa ci fosse oltre quest'ultima sfera; in ogni caso, qualunque cosa ci fosse, non faceva senz'altro parte dell'universo che gli uomini potevano osservare.

In base al modello elaborato da Tolomeo era possibile predire, con ragionevole accuratezza, le posizioni dei diversi astri nella volta celeste. Per poterlo fare correttamente, però, Tolomeo aveva dovuto assumere che la Luna seguisse un percorso in base al quale, in alcuni momenti, si trovava a essere due volte più vicina alla Terra che in altri momenti; di conseguenza, in alcuni periodi essa sarebbe dovuta apparire due volte più grande del solito. Lo stesso Tolomeo era consapevole di questo grave inconveniente; ciononostante, il suo modello venne generalmente, anche se non universalmente, accettato. Esso fu adottato dalla Chiesa cristiana come l'immagine dell'universo in accordo con le Scritture. Aveva il grande vantaggio di lasciare, oltre la sfera delle stelle fisse, un sacco di spazio per il paradiso e l'inferno.

Nel 1514, tuttavia, un canonico e astronomo polacco, Niccolò Copernico, presentò un modello molto più semplice. In un primo momento, temendo di essere accusato di eresia, Copernico pubblicò il proprio modello sotto la copertura dell'anonimato. Egli sosteneva che la Terra e i pianeti si muovevano lungo orbite circolari attorno al Sole, immobile al centro dell'universo. Purtroppo per Copernico, ci volle quasi un secolo prima che le sue idee venissero prese sul serio. Due astronomi – il tedesco Johannes Keplero e Galileo Galilei – iniziarono quindi a sostenere pubblicamente la teoria copernicana, nonostante il fatto che le orbite da essa predette non corrispondessero del tutto a quelle realmente osservate. Per la teoria aristotelico-tolemaica, l'ora della condanna giunse nel 1609, quando Galileo iniziò a osservare il cielo notturno con uno strumento che era appena stato inventato: il telescopio.

Osservando Giove, Galileo scoprì che questo pianeta era accompagnato da diversi piccoli satelliti, o lune, che gli orbitavano

attorno. Ciò implicava che non tutti i corpi celesti dovevano per forza orbitare direttamente intorno alla Terra, come avevano invece sostenuto Aristotele e Tolomeo. Naturalmente, era ancora possibile ritenere che la Terra fosse immobile al centro dell'universo e che le lune di Giove, nella loro orbita intorno a essa, seguissero percorsi estremamente complicati, tali da dare all'osservatore terrestre l'illusione che orbitassero intorno a Giove. Tuttavia, la teoria di Copernico era molto più semplice.

In quello stesso periodo, Keplero aveva apportato una modifica alla teoria copernicana, suggerendo che le orbite dei pianeti non erano circolari, bensì ellittiche. In questo modo, le predizioni teoriche riuscivano infine a trovare un riscontro positivo con le osservazioni empiriche. Per quanto riguarda Keplero, le orbite ellittiche erano semplicemente un'ipotesi *ad hoc*; e, in verità, erano anche un'ipotesi alquanto ripugnante, dato che le ellissi erano chiaramente meno perfette dei cerchi. Avendo scoperto, quasi per caso, che le orbite ellittiche ben si accordavano con le osservazioni empiriche, egli non poteva più riconciliarsi con la propria idea secondo la quale il moto orbitale dei pianeti attorno al Sole era causato da forze magnetiche.

Per trovare una spiegazione si dovette attendere fino al 1687, quando Newton pubblicò quella che, probabilmente, è stata la singola opera più importante mai scritta nel campo delle scienze fisiche: i *Philosophiae naturalis principia mathematica*. In quest'opera, Newton non si limitò ad avanzare una teoria di come i corpi si muovono nello spazio e nel tempo, ma sviluppò anche la matematica necessaria ad analizzare questi movimenti. Inoltre, Newton postulò una legge di gravitazione universale, secondo la quale ogni corpo nell'universo era attratto verso ogni altro corpo da una forza la cui intensità cresceva all'aumentare della massa dei corpi stessi e diminuiva all'aumentare della loro distanza. Si trattava della stessa forza che, sulla Terra, faceva sì che gli oggetti cadessero al suolo. L'aneddoto secondo il quale Newton venne colpito in testa da una mela è quasi sicuramente spurio. In verità, Newton si era semplicemente limitato a dire che l'idea della gravità gli era venuta in mente vedendo cadere una mela mentre era seduto, assorto nei propri pensieri.

Newton proseguiva mostrando che, secondo la sua legge, la gravità fa sì che la Luna si muova intorno alla Terra seguendo un'orbita ellittica e, a loro volta, la Terra e gli altri pianeti seguano un'orbita ellittica nel loro moto di rivoluzione attorno al Sole. Il modello copernicano si sbarazzava delle sfere celesti di Tolomeo e, con esse, dell'idea che l'universo avesse un qualche limite fisico naturale. Se le stelle fisse sembravano non mutare

la loro posizione relativa mentre la Terra si muoveva intorno al Sole, diventava allora naturale supporre che esse fossero oggetti simili al nostro Sole, ma molto più distanti. Ciò, tuttavia, faceva nascere un problema. Newton comprese che, secondo la propria teoria della gravità, le stelle dovevano attrarsi a vicenda e, di conseguenza, non avrebbero potuto rimanere completamente immobili. Non era quindi logico supporre che avrebbero finito per collassare tutte quante in un unico punto?

In una lettera del 1691 a Richard Bentley – un altro grande pensatore di quell'epoca – Newton sostenne che quest'esito sarebbe stato inevitabile se ci fosse stato soltanto un numero finito di stelle. Ma se invece – ragionava Newton – ci fosse stato un numero infinito di stelle, distribuite più o meno uniformemente in uno spazio infinito, ciò non sarebbe successo, perché non avrebbero avuto alcun punto centrale verso il quale cadere. Questo ragionamento costituisce un esempio dei trabocchetti logici in cui può imbattersi chi si mette a discutere sull'infinito.

In un universo infinito, infatti, ogni punto può essere considerato come il centro, proprio perché ogni punto è circondato da tutte le parti da un numero infinito di stelle. Il modo corretto di affrontare il problema (che venne compreso solo molto più tardi) è quello di considerare la situazione di una regione finita nella quale tutte le stelle collassano l'una nell'altra. Ci si può dunque chiedere che cosa succederebbe se si aggiungessero altre stelle distribuite più o meno uniformemente al di fuori di questa regione. Stando alla legge di Newton, le nuove stelle non cambierebbero minimamente la situazione originaria, e quindi le stelle continuerebbero a cadere le une sulle altre con la medesima velocità di prima. Possiamo aggiungere tutte le stelle che vogliamo: esse continueranno sempre a collassare le une nelle altre. Oggi sappiamo quindi che è impossibile avere un modello infinito statico di un universo nel quale la gravità agisce sempre come una forza attrattiva.

Il fatto che prima del XX secolo nessuno abbia mai sostenuto l'ipotesi di un'espansione o di una contrazione dell'universo ci permette di sviluppare un'interessante riflessione sul clima generale di quel periodo. Le tesi generalmente accettate erano riconducibili a una di queste due: o che l'universo, pur esistendo da sempre, non aveva mai subito cambiamenti sostanziali, oppure che esso era stato creato in un determinato istante del passato già in una forma più o meno identica a quella che osserviamo oggi. Ciò è in parte ascrivibile alla tendenza, da parte degli uomini, a credere all'esistenza di verità eterne, nonché al conforto psicologico che essi possono trarre dall'idea che, per quanto loro

possano invecchiare e infine morire, l'universo rimarrebbe sempre lo stesso.

Anche coloro che comprendevano come, in base alla teoria della gravità di Newton, l'universo non potesse essere una realtà statica, non pensavano poi di suggerire che esso potesse trovarsi in uno stato di espansione; al contrario, cercavano piuttosto di modificare la teoria stessa, postulando che, a distanze molto elevate, la forza gravitazionale agisse come una forza repulsiva. In base a questo assunto, che non veniva a influire pesantemente sulle loro previsioni sul moto dei pianeti, potevano sostenere che un universo infinito, con le stelle distribuite in modo uniforme, sarebbe rimasto in equilibrio: le forze attrattive fra le stelle più vicine sarebbero infatti state bilanciate dalle forze repulsive rispetto a quelle più lontane.

Oggi, però, siamo giunti alla conclusione che un simile equilibrio sarebbe comunque instabile. Infatti, se in una qualche regione dell'universo le stelle si avvicinassero anche solo di poco, le forze attrattive fra di esse diventerebbero più forti e finirebbero per surclassare le forze repulsive; di conseguenza, le stelle continuerebbero ad avvicinarsi, collassando le une nelle altre. Se invece, al contrario, le stelle si allontanassero un po', sarebbero le forze repulsive a prendere il sopravvento e a spingerle sempre più lontano.

C'è poi un'ulteriore obiezione contro la possibilità di un universo infinito statico, obiezione che viene comunemente ascritta al filosofo tedesco Heinrich Olbers. In realtà, già diversi contemporanei di Newton avevano sollevato la questione, e l'articolo di Olbers del 1823 non fu nemmeno la prima pubblicazione a contenere argomentazioni plausibili intorno a questo problema; tuttavia, esso fu il primo ad avere un'ampia risonanza. La difficoltà in questione sta nel fatto che, in un universo statico infinito, praticamente ogni linea, in qualunque direzione venga tracciata, terminerebbe sulla superficie di una stella; di conseguenza, l'intera volta celeste dovrebbe avere la luminosità del Sole, anche di notte. Olbers controargomentava che la luce proveniente dalle stelle più lontane ci sarebbe giunta affievolita per via della materia interposta fra noi ed esse. Tuttavia, anche se così fosse, questa materia finirebbe per scaldarsi al punto da ardere con lo stesso splendore delle stelle.

L'unico modo per evitare questa conclusione – quella, cioè, per la quale l'intera volta celeste avrebbe dovuto avere la stessa luminosità del Sole – sarebbe stato quello di dire che le stelle non hanno sempre avuto il loro splendore, ma si sono accese in un qualche determinato istante del

passato. In questo caso, la materia interposta potrebbe non avere ancora fatto in tempo a riscaldarsi; oppure, la luce proveniente dalle stelle più distanti potrebbe non essere ancora giunta fino a noi. In ogni caso, comunque, si affaccerebbe il problema di stabilire che cosa possa aver causato l'originario accendersi delle stelle.

La nascita dell'universo

Come tutti sanno, la nascita dell'universo è una questione sulla quale si è discusso fin dai tempi più remoti. Secondo un certo numero di cosmologi appartenenti alla tradizione giudaico-cristiano-musulmana, l'universo è stato creato in un determinato istante, non molto lontano, del passato. Uno degli argomenti a sostegno di questa tesi era la convinzione che, per spiegare l'esistenza dell'universo, fosse necessario ammettere una causa prima.

Un ulteriore argomento viene poi sviluppato da sant'Agostino ne *La città di Dio*. Il filosofo sottolinea che il cammino della civiltà va progredendo, e che noi ricordiamo i nomi di chi ha compiuto una determinata impresa o ha messo a punto una particolare tecnica. Pertanto l'uomo, e forse anche l'intero universo, non può essere esistito da troppo tempo; in caso contrario, infatti, i nostri progressi ci avrebbero già condotti ben oltre il punto che abbiamo raggiunto ora.

Attenendosi al libro della Genesi, sant'Agostino poneva la data della creazione dell'universo intorno al 5000 a.C. È interessante notare come questa data non sia poi così lontana da quella della fine dell'ultima era glaciale, intorno al 10.000 a.C., in seguito alla quale, di fatto, la civiltà ebbe inizio. Dal canto loro, Aristotele e la maggior parte degli altri filosofi greci non accettavano l'idea di una creazione, poiché ciò avrebbe implicato un eccessivo intervento divino nelle vicende terrene. Essi credevano, pertanto, che gli uomini – e il mondo intorno a loro – fossero esistiti da sempre e avrebbero continuato a esistere per sempre. Essi avevano già preso in esame quell'argomento sul progresso al quale accennavamo poco sopra, e rispondevano dicendo che c'erano state delle inondazioni o altre catastrofi che, ciclicamente, avevano riportato la razza umana ai principi della civilizzazione.

In un'epoca in cui la maggior parte delle persone credevano in un universo sostanzialmente statico e immutabile, la questione se avesse avuto o meno un inizio apparteneva di fatto al campo della metafisica o a

quello della teologia. Qualunque ipotesi si accettasse, era comunque possibile rendere ragione dei fenomeni che venivano osservati. O l'universo era esistito da sempre, oppure, in un determinato istante, era stato messo in moto in modo tale da dare l'idea che fosse esistito da sempre. Nel 1929, però, Edwin Hubble fece un'osservazione che avrebbe avuto un'importanza fondamentale: da qualunque parte si guardi nel cielo, le stelle distanti si allontanano rapidamente da noi. Detto in altri termini, l'universo si sta espandendo. Ciò significa che in passato i corpi celesti erano più vicini fra di loro; e di fatto pare che, in un tempo molto remoto – fra i dieci e i venti miliardi di anni fa – si trovassero tutti nello stesso punto.

In seguito a questa scoperta, la questione dell'origine dell'universo entrò finalmente nel campo d'indagine proprio della scienza. Le osservazioni di Hubble suggerivano che in un determinato istante, quello del cosiddetto big bang, l'universo era stato infinitamente piccolo e, quindi, infinitamente denso. Se anche fosse accaduto qualcosa prima di questo istante, questi ipotetici eventi non avrebbero comunque avuto alcuna influenza su ciò che accade oggi. La loro eventuale esistenza può quindi essere trascurata, proprio perché non avrebbe conseguenze al livello della realtà osservabile.

Si potrebbe anche dire che il tempo stesso ha avuto inizio con il big bang, nel senso che non è semplicemente possibile definire dei tempi antecedenti a esso. Bisognerebbe sottolineare che questo inizio nel tempo è profondamente diverso da quelli che erano stati ipotizzati nelle epoche passate. Un universo statico può avere un inizio nel tempo solo per via di una causa esterna; non c'è infatti alcuna necessità fisica intrinseca che giustifichi il suo iniziare a esistere, e potremmo quindi immaginare che Dio lo abbia creato in un qualsiasi momento del passato. D'altro canto, se l'universo si sta espandendo, ci potrebbero essere delle ragioni di carattere fisico che spieghino la necessità del suo inizio. Sarebbe certo possibile continuare a credere che Dio abbia creato l'universo nell'istante del big bang; e si potrebbe anche sostenere che lo abbia creato in un momento successivo, realizzandolo in modo tale da far sembrare che ci sia stato un big bang. Non avrebbe però senso supporre che l'universo sia stato creato prima del big bang. In altri termini, il fatto che l'universo si stia espandendo non preclude l'ipotesi dell'esistenza di un creatore, ma pone dei precisi limiti temporali al suo operare.

Seconda lezione: *L'universo in espansione*

Il nostro Sole e le stelle a noi più vicine fanno tutte parte di una medesima galassia: la Via Lattea. Per lungo tempo, gli uomini hanno creduto che essa costituisse l'intero universo. Fu solo nel 1924 che l'astronomo americano Edwin Hubble dimostrò che la nostra non è l'unica galassia ma che ce ne sono molte altre, separate da immensi spazi vuoti. Per poter dimostrare questa tesi, Hubble dovette prima trovare un modo per misurare le distanze che ci separano da queste ulteriori galassie. Ci è infatti possibile determinare la distanza delle stelle vicine osservando il variare della loro posizione nella volta celeste durante il tragitto della Terra attorno al Sole; le altre galassie, però, sono così distanti che, a differenza delle stelle vicine, appaiono realmente immobili. Hubble fu quindi costretto a usare dei metodi di misurazione indiretta.

Ora, la luminosità apparente di una stella dipende da due fattori: la sua luminosità reale o assoluta, cioè la quantità di luce che essa emette, e la distanza che ci separa da essa. Per quanto riguarda le stelle vicine, siamo in grado di misurare sia la loro luminosità apparente, sia la loro distanza, e in base a questi due dati possiamo ricavare la loro luminosità reale. Per converso, qualora conoscessimo la luminosità reale di alcune stelle appartenenti ad altre galassie, potremmo ricavare la loro distanza misurandone la luminosità apparente. Hubble notò che certi tipi di stelle, abbastanza vicine da poterne calcolare la distanza, presentavano sempre lo stesso valore di luminosità reale; pertanto, argomentava, se riuscissimo a individuare alcune stelle di questi tipi in un'altra galassia, potremmo supporre che esse abbiano quegli stessi valori di luminosità reale, e da qui ci sarebbe possibile calcolare la distanza di quella galassia. Se poi fossimo in grado di applicare questo procedimento per un certo numero di stelle appartenenti a una data galassia, e dai nostri calcoli risultasse sempre la medesima distanza, la nostra stima potrebbe essere considerata

sufficientemente attendibile. Procedendo in questo modo, Edwin Hubble calcolò la distanza di nove diverse galassie.

Oggi sappiamo che la nostra è solo una fra alcune centinaia di miliardi di galassie osservabili tramite i moderni telescopi, ciascuna delle quali contiene a sua volta centinaia di miliardi di stelle. Noi viviamo in una galassia a spirale, il cui diametro si aggira intorno ai centomila anni-luce, che ruota lentamente su se stessa: per compiere un intero moto di rivoluzione intorno al centro, le sue stelle impiegano circa cento milioni di anni. Il nostro Sole è una comune stella gialla, di media grandezza, che si trova in prossimità del bordo esterno di uno dei bracci di questa spirale. Ne abbiamo fatta di strada da quando, con Aristotele e Tolomeo, pensavamo che la Terra fosse il centro dell'universo.

Le stelle sono talmente lontane da noi che ci appaiono come semplici puntini di luce. Non siamo in grado di determinare quali siano la loro dimensione o la loro forma. Come possiamo quindi distinguere diversi tipi di stelle? Per quanto riguarda la grande maggioranza delle stelle, esiste una sola caratteristica distintiva che possiamo osservare correttamente: il colore della loro luce. Newton scoprì che quando la luce del Sole passa attraverso un prisma, si scompone nei diversi colori che la costituiscono – il suo spettro –, come in una sorta di arcobaleno. In modo simile, mettendo a fuoco col telescopio una singola stella o una singola galassia, possiamo osservare lo spettro della sua luce. Stelle diverse hanno spettri fra loro differenti, ma la luminosità relativa dei singoli colori corrisponde sempre esattamente a quella che ci si aspetterebbe di trovare nella luce emessa da un oggetto al calor rosso. Ciò significa che possiamo determinare la temperatura di una stella partendo dall'analisi dello spettro della sua luce. Inoltre, notiamo come dallo spettro delle stelle manchino certi determinati colori, che possono variare da una stella all'altra. Poiché sappiamo che ogni diverso elemento chimico assorbe una propria serie caratteristica di determinati colori, esaminando i colori mancanti (le cosiddette «righe di assorbimento») nello spettro di una stella siamo quindi in grado di stabilire con precisione quali elementi siano presenti nella sua atmosfera.

Quando, negli anni Venti, gli astronomi iniziarono a osservare gli spettri di stelle appartenenti ad altre galassie, si imbatterono in un fenomeno estremamente peculiare: essi presentavano le stesse righe di assorbimento caratteristiche delle stelle della nostra galassia, ma con la differenza che erano tutti spostati, di una medesima quantità relativa, verso l'estremo rosso. L'unica spiegazione razionale di questo fenomeno era che le galassie si stavano allontanando da noi e che, quindi, la

frequenza delle onde luminose provenienti da esse risultava ridotta (ossia, spostata verso il rosso) per via dell'effetto Doppler. Provate ad ascoltare il rumore di un'auto che passa per strada. Mentre l'auto si avvicina, il suo motore produce un suono più acuto, corrispondente a una maggiore frequenza delle onde sonore; quando ci ha superati e si allontana, il rumore si fa più grave. Anche le onde luminose e le onde radio si comportano in modo simile; e, in effetti, la polizia si serve proprio dell'effetto Doppler per determinare la velocità delle automobili, misurando la frequenza degli impulsi di onde radio che esse riflettono.

Dopo aver dimostrato resistenza di altre galassie, Hubble dedicò gli anni successivi alla determinazione delle loro distanze e all'osservazione dei loro spettri. A quei tempi la maggior parte degli scienziati si aspettava che i movimenti delle galassie fossero del tutto casuali e, quindi, che ci fossero tante galassie con lo spettro spostato verso il blu – ossia, in avvicinamento – quante erano quelle con lo spettro spostato verso il rosso; la scoperta che tutte le galassie avevano lo spettro spostato verso il rosso costituì pertanto un'inaspettata sorpresa. Ogni singola galassia si stava allontanando da noi. Ancora più sorprendenti furono poi i risultati delle osservazioni di Hubble, pubblicati dall'astronomo nel 1929: neppure l'entità dello spostamento verso il rosso (*red shift*) aveva un valore casuale, bensì cresceva in modo direttamente proporzionale alla distanza che ci separava dalle singole galassie. Detto in altri termini, quanto più una galassia era lontana, tanto maggiore era la sua velocità di allontanamento. Ciò significava che, in realtà, l'universo non poteva essere statico, come si era sempre supposto, ma che si stava espandendo. La distanza fra le diverse galassie continuava ininterrottamente a crescere.

La scoperta dell'espansione dell'universo fu una delle più grandi rivoluzioni intellettuali del XX secolo. Col senno di poi, ci si potrebbe facilmente chiedere perché nessuno ci avesse mai pensato prima. Newton e altri avrebbero dovuto rendersi conto che un universo statico avrebbe ben presto iniziato a contrarsi sotto la spinta della forza di gravità. Ma proviamo ora a supporre che l'universo sia in espansione. Se la sua velocità di espansione fosse abbastanza ridotta, la forza di gravità finirebbe per avere la meglio, causandone dapprima l'arresto e quindi la contrazione. D'altro lato, se questa velocità di espansione fosse superiore a un certo livello critico, la forza di gravità non riuscirebbe mai ad arrestarla e l'universo continuerebbe quindi a espandersi per sempre. È un po' come quando, dalla superficie terrestre, lanciamo un razzo diretto verso l'alto: se la sua velocità è abbastanza ridotta, la forza di gravità

finirà per fermarlo, facendolo poi ricadere al suolo; se la velocità del nostro razzo supera invece un determinato valore critico, pari a circa 11,3 km/sec, la gravità non sarà sufficiente a trattenerlo ed esso continuerà quindi per sempre la propria corsa di allontanamento dalla Terra.

Sulla base della teoria della gravità elaborata da Newton, sarebbe stato possibile predire questo carattere dell'universo in un qualunque momento dell'Ottocento e del Settecento, o persino negli ultimi anni del Seicento. Tuttavia, la fede in un universo statico era talmente forte e radicata da persistere fino agli inizi del Novecento. Anche lo stesso Einstein, quando, nel 1915, formulò la teoria generale della relatività, era pienamente convinto della staticità dell'universo. Per giustificarla, modificò quindi la propria teoria, introducendo nelle sue equazioni una cosiddetta «costante cosmologica»; si trattava di una nuova forza «antigravitazionale» che, a differenza di altre forze, non traeva origine da una qualche particolare fonte, ma era intrinseca allo stesso tessuto spazio-temporale. Questa sua costante cosmologica conferiva allo spazio-tempo una tendenza intrinseca all'espansione, in modo da controbilanciare esattamente l'attrazione fra tutta la materia presente nell'universo; il risultato era quindi quello di un universo statico.

Soltanto un uomo, a quanto pare, fu disposto ad assumere la relatività generale nel suo valore nominale, senza correzioni. Mentre Einstein e altri fisici cercavano dei modi per evitare la predizione, in essa implicita, di un universo dinamico, il fisico russo Aleksandr Fridman cercò invece di spiegarla.

I modelli di Fridman

Le equazioni della relatività generale, che determinano come l'universo si evolva nel tempo, sono troppo complicate per essere risolte in dettaglio. La strada percorsa da Fridman fu quindi quella di fare due semplici assunzioni sull'universo: che esso sembra identico in qualunque direzione guardiamo, e che ciò varrebbe anche se lo osservassimo da qualunque altra posizione. Sulla base della relatività generale e di queste due assunzioni, Fridman dimostrò che non dovremmo attenderci che l'universo sia una realtà statica. Così, nel 1922, cioè diversi anni prima della scoperta di Edwin Hubble, Fridman predisse esattamente quello che Hubble avrebbe poi di fatto osservato.

L'assunto secondo il quale l'universo sembra identico in qualunque direzione guardiamo è chiaramente in contrasto con la nostra esperienza quotidiana. Per esempio, nel cielo notturno le stelle che compongono la nostra galassia formano una fascia di luce ben definita, la cosiddetta Via Lattea. Se però volgiamo il nostro sguardo verso le galassie lontane, sembra che il loro numero sia più o meno lo stesso in qualunque direzione. L'universo sembra così essere più o meno identico in ogni direzione lo si osservi, a patto che lo si consideri su una scala sufficientemente grande, in relazione con la distanza che separa le galassie.

Per molto tempo questa considerazione bastò a giustificare la validità dell'assunto di Fridman, in cui era quindi possibile vedere una rappresentazione approssimativa dell'universo reale. Tuttavia, una quarantina d'anni più tardi, per via di un caso fortunato, emerse che l'assunto di Fridman costituiva di fatto una descrizione notevolmente accurata del nostro universo. Nel 1965 due fisici americani, Arno Penzias e Robert Wilson, stavano lavorando – presso i laboratori della Bell, nel New Jersey – al progetto di un rivelatore di microonde estremamente sensibile, che serviva per le comunicazioni con i satelliti orbitali. I due scienziati, quando si accorsero che il loro rivelatore captava un segnale di interferenza più forte di quanto avrebbe dovuto, si preoccuparono; in più, questo segnale non sembrava provenire da una particolare direzione. Dapprima si accertarono che sul loro rivelatore non ci fossero degli escrementi di uccelli e controllarono altri possibili malfunzionamenti; ma ben presto dovettero scartare tutte queste ipotesi. Sapevano infatti che qualunque segnale proveniente dall'interno dell'atmosfera sarebbe stato più debole quando il rivelatore fosse stato puntato dritto verso l'alto, dato che, in questo caso, la fascia atmosferica davanti allo strumento sarebbe stata più sottile; se lo strumento fosse stato puntato a un angolo più basso dei 90° , la fascia atmosferica di fronte a esso sarebbe stata più spessa e quindi anche il segnale – se avesse avuto la propria origine nell'atmosfera stessa – avrebbe dovuto essere più forte.

Il segnale di interferenza, invece, era esattamente lo stesso in qualunque direzione puntassero il rivelatore, e doveva pertanto provenire dall'esterno dell'atmosfera. Inoltre, esso si manteneva costante di giorno come di notte, in tutte le stagioni dell'anno, anche se la Terra ruota sul proprio asse e orbita intorno al Sole. Era quindi chiaro che la radiazione captata dal rivelatore doveva provenire dall'esterno del sistema solare e persino dall'esterno della galassia, dato che altrimenti sarebbe variata a

seconda della direzione in cui lo strumento veniva puntato durante il moto della Terra.

In effetti, sappiamo che questa radiazione di fondo dev'essere giunta fino a noi attraversando la maggior parte dell'universo osservabile; e, dato che sembra essere identica in qualunque direzione, anche l'universo stesso dev'essere uniforme, almeno su grande scala. Oggi sappiamo che, in qualunque direzione si osservi, l'intensità di questo segnale varia al massimo di un decimillesimo. Penzias e Wilson si erano quindi casualmente imbattuti in una conferma notevolmente accurata del primo assunto di Fridman.

Più o meno nello stesso periodo, due fisici americani della vicina università di Princeton, Bob Dicke e Jim Peebles, si stavano interessando allo studio delle microonde. I due scienziati stavano lavorando su un'ipotesi di George Gamow (un ex studente di Aleksandr Fridman) secondo la quale l'universo, nelle sue fasi iniziali, avrebbe dovuto essere stato estremamente caldo – risplendente al calor bianco – ed estremamente denso. Dicke e Peebles arguirono che avremmo dovuto poter ancora vedere questi primi bagliori, dato che la luce proveniente da regioni molto remote dell'universo primitivo avrebbe dovuto raggiungerci soltanto ora. Tuttavia, a causa dell'espansione dell'universo e dell'effetto Doppler, questa luce originaria avrebbe dovuto essere talmente spostata verso il rosso da apparirci sotto forma di una radiazione a microonde. Dicke e Peebles stavano cercando questa radiazione quando Penzias e Wilson sentirono parlare del loro lavoro e compresero di averla già trovata. Per questa loro casuale scoperta, nel 1978 Penzias e Wilson ricevettero il Premio Nobel – cosa che sembra un po' ingiusta nei confronti di Dicke e Peebles.

Ora, tutte queste prove di come l'universo presenti il medesimo aspetto in qualunque direzione guardiamo potrebbero anche suggerire, di primo acchito, l'idea che ci sia qualcosa di speciale nella nostra posizione. In particolare, potremmo credere che, dato che vediamo tutte le altre galassie allontanarsi da noi, la nostra posizione deve allora coincidere con il centro dell'universo. Esiste però una spiegazione alternativa, e cioè che l'universo potrebbe sembrare identico in qualunque direzione si guardi anche qualora lo si osservasse da una qualunque altra galassia. Questo, come abbiamo già avuto modo di vedere, era il secondo assunto di Fridman.

Non ci sono prove scientifiche pro o contro questo assunto. Ciò che ci spinge ad accettarlo sono delle semplici ragioni di modestia. Sarebbe

infatti veramente strano se l'universo sembrasse lo stesso in qualunque direzione intorno a noi, ma non intorno ad altri punti dello spazio. Nel modello di Fridman, tutte le galassie si allontanano direttamente le une dalle altre. È un po' come quando gonfiamo un palloncino su cui sono stati disegnati un certo numero di pallini: mentre il palloncino si espande, viene a crescere la distanza tra ogni pallino e ciascuno degli altri, ma non c'è comunque alcun pallino che possa essere considerato come il centro dell'espansione. Inoltre, quanto più i pallini sono lontani fra loro, tanto maggiore sarà la velocità alla quale si allontaneranno l'uno dall'altro. Similmente, nel modello di Fridman la velocità alla quale due galassie qualsiasi si allontanano l'una dall'altra è proporzionale alla distanza che le separa. Esso prediceva pertanto che lo spostamento verso il rosso dello spettro di una galassia sarebbe stato direttamente proporzionale alla sua distanza da noi, proprio come fu poi confermato da Hubble.

Nonostante il valore del suo modello e la sua predizione delle osservazioni di Hubble, il lavoro di Fridman rimase per lo più sconosciuto in Occidente. La sua conoscenza si diffuse solo dopo il 1935, quando il fisico americano Howard Robertson e il matematico britannico Arthur Walker elaborarono dei modelli simili a questo, in seguito alla scoperta, da parte di Hubble, dell'espansione uniforme dell'universo.

Benché Fridman ne abbia identificato soltanto uno, ci sono in realtà tre diversi tipi di modelli che obbediscono ai suoi due assunti fondamentali. Nel primo tipo, quello trovato da Fridman, l'espansione dell'universo avviene a una velocità sufficientemente ridotta, tale che la forza di attrazione gravitazionale fra le diverse galassie riesce via via a rallentarla fino a fermarla; le galassie inizieranno quindi a muoversi l'una verso l'altra e l'universo entrerà in una fase di contrazione. La distanza fra due galassie, che è inizialmente pari a zero, cresce fino a raggiungere un massimo per poi diminuire fino ad azzerarsi nuovamente.

Nel secondo tipo di soluzione, l'espansione dell'universo avviene a una velocità talmente elevata che l'attrazione gravitazionale, pur rallentandola di un po', non sarà mai in grado di arrestarla. Secondo questo modello, all'inizio la distanza fra le galassie vicine è pari a zero, e alla fine esse si allontanano l'una dall'altra a una velocità costante.

Vi è infine un terzo tipo di soluzione, per la quale la velocità di espansione dell'universo è appena sufficiente a evitare che esso torni a contrarsi sotto la forza di attrazione gravitazionale. Anche in questo caso la distanza fra le galassie parte da zero e aumenta all'infinito; ma, a differenza di quanto avviene nel secondo modello, qui la velocità alla

quale le galassie si allontanano le une dalle altre diventa via via più piccola, pur senza raggiungere mai lo zero.

Una caratteristica degna di nota che emerge dal primo tipo di modello di Fridman è questa: l'universo non è infinito nello spazio, e tuttavia lo spazio non ha alcun limite esterno, non ha confini. La gravità ha una forza tale che lo spazio si incurva su se stesso. Possiamo fare un paragone con la superficie della Terra. Se uno continua a camminare sulla superficie terrestre muovendosi in una determinata direzione, non si imbatte mai in una qualche barriera invalicabile, né cadrà nel vuoto una volta raggiunto un ipotetico limite estremo di questa superficie: alla fine del suo cammino, semplicemente, si ritroverà allo stesso punto da cui era partito. Lo spazio, secondo il primo modello di Fridman, è rappresentabile in questo stesso modo, solo che ci sono tre dimensioni al posto delle due della superficie terrestre. Anche la quarta dimensione (il tempo) ha un'estensione finita; a differenza dello spazio, però, il tempo è qui visto come una linea racchiusa fra due punti estremi (o limiti), un inizio e una fine. Vedremo in seguito come, unendo la relatività generale col principio di indeterminazione della meccanica quantistica, sia possibile concepire tanto il tempo quanto lo spazio come finiti ma privi di limiti. L'idea per la quale potremmo metterci a viaggiare in linea retta muovendoci attorno all'universo per poi tornare, alla fine, allo stesso punto dal quale eravamo partiti, andrà anche bene per la fantascienza, ma non ha molto valore sul piano pratico: è infatti possibile dimostrare che, ben prima di aver terminato il nostro giro, l'universo sarebbe già ricollassato su se stesso, tornando ad avere un raggio pari a zero. Per poter ritornare al nostro punto di partenza prima della fine dell'universo dovremmo viaggiare a una velocità superiore a quella della luce, ma ciò non è possibile.

Ma quale, fra i modelli di Fridman, descrive realmente il nostro universo? Un giorno l'universo finirà di espandersi per iniziare a contrarsi, o continuerà invece a espandersi per sempre? Per rispondere a questa domanda dovremmo conoscere l'attuale velocità di espansione dell'universo e la sua odierna densità media. Se la densità è inferiore a un determinato valore critico (dipendente dalla velocità di espansione), l'attrazione gravitazionale risulterà essere troppo debole per arrestare l'espansione. Se invece la densità supera questo valore critico, verrà un tempo in cui l'attrazione gravitazionale finirà per arrestare l'espansione dell'universo e lo farà quindi ricollassare su se stesso.

Possiamo determinare l'attuale tasso di espansione dell'universo misurando, grazie all'effetto Doppler, le velocità alle quali le altre

galassie si allontanano dalla nostra. Questa misurazione può essere effettuata in modo molto accurato. Non siamo tuttavia in grado di dire con altrettanta precisione quali siano le distanze fra le galassie, dato che possiamo misurare queste distanze solo per vie indirette. Di conseguenza, tutto ciò che sappiamo è che l'universo si espande di un valore compreso fra il cinque e il dieci per cento ogni miliardo di anni. Se poi ci chiediamo quale sia l'attuale densità media dell'universo, la nostra incertezza cresce ulteriormente.

Se sommiamo le masse di tutte le stelle che possiamo vedere nella nostra e nelle altre galassie, il totale che otteniamo è meno di un centesimo di quanto servirebbe per arrestare l'espansione dell'universo, anche attenendoci alla più bassa fra le stime del tasso di espansione. Sappiamo tuttavia che la nostra e le altre galassie devono contenere una grande quantità di materia oscura: non siamo in grado di osservarla direttamente, ma dobbiamo ammetterne comunque l'esistenza per via dell'influsso che la sua attrazione gravitazionale esercita sulle orbite di stelle e gas nelle galassie. Inoltre, dato che la maggior parte delle galassie si trovano all'interno di raggruppamenti, analizzando i loro movimenti possiamo inferire, in modo simile, l'esistenza di un'ulteriore quantità di materia oscura presente fra queste galassie (materia oscura che, appunto, viene a influire sul loro moto). Anche aggiungendo tutta questa materia oscura, però, arriviamo soltanto a un decimo della massa necessaria per arrestare l'espansione dell'universo. Tuttavia, rimane ancora la possibilità che esista qualche altra forma di materia che non abbiamo ancora scoperto e che potrebbe portare la densità media dell'universo al di sopra di quel valore critico necessario per fermarne l'espansione.

I dati attualmente disponibili suggeriscono quindi che, probabilmente, l'universo continuerà a espandersi per sempre. Ma non scommetteteci troppo. Tutto ciò di cui possiamo dirci veramente sicuri è che anche qualora l'universo fosse destinato a ricollassare, ciò non accadrebbe comunque prima di altri dieci miliardi di anni, dato che la sua espansione dura da almeno altrettanto tempo. Non ci dovremmo quindi preoccupare troppo, visto che per allora il genere umano sarà già scomparso da parecchio tempo, essendo destinato – a meno di fondare delle colonie al di fuori del sistema solare – a estinguersi assieme al nostro Sole.

Il big bang

I tre modelli di Fridman presentano un tratto in comune: essi, cioè, vengono tutti ad affermare che, in un tempo compreso fra i dieci e i venti miliardi di anni fa, la distanza fra le galassie vicine deve essere stata pari a zero. In quel momento, che noi indichiamo come big bang, la densità dell'universo e la curvatura dello spazio-tempo avrebbero dovuto essere infinite. Ciò significa che la teoria generale della relatività, sulla quale si basano le soluzioni di Fridman, predice l'esistenza di una cosiddetta «singolarità» nell'universo.

Tutte le nostre teorie scientifiche sono formulate in base all'assunto per il quale lo spazio-tempo è liscio, quasi piatto, ossia con un livello di curvatura prossimo allo zero; esse, pertanto, perderebbero la propria validità in presenza della singolarità del big bang, dove la curvatura dello spazio-tempo assume un valore infinito. Ciò implica che, anche qualora ci fossero stati degli eventi prima del big bang, non sarebbe comunque possibile servirsene per determinare che cosa avrebbe dovuto accadere dopo, visto che in concomitanza con esso verrebbe meno ogni possibilità di fare predizioni scientifiche. Parallelamente, se conoscessimo solo ciò che è accaduto dopo il big bang, non saremmo in grado di determinare che cosa è successo prima. Per quanto ci riguarda, gli ipotetici eventi anteriori al big bang non possono avere alcuna conseguenza nell'ambito della realtà attuale, e pertanto non dovrebbero entrare a far parte di un modello scientifico dell'universo; in altri termini, dovremmo escluderli dal nostro modello e dire che il tempo ha avuto inizio con il big bang.

A parecchie persone l'idea che il tempo abbia avuto un inizio non va molto a genio, probabilmente perché essa sa un po' di intervento divino. (La Chiesa cattolica, dal canto suo, ha invece messo le mani sul modello del big bang e, nel 1951, ha ufficialmente dichiarato che esso è in accordo con la Bibbia.) Ci furono diversi tentativi volti ad aggirare la conclusione per cui c'era stato un big bang. La proposta che ottenne il più ampio consenso fu la cosiddetta teoria dello stato stazionario. Venne avanzata nel 1948 da due profughi emigrati dall'Austria durante l'occupazione nazista, Hermann Bondi e Thomas Gold, assieme all'inglese Fred Hoyle, che durante la guerra aveva lavorato con loro allo sviluppo del radar. L'idea centrale di questa teoria afferma che, mentre le galassie esistenti si allontanano l'una dall'altra, negli spazi rimasti vuoti vanno continuamente formandosi nuove galassie, a partire da nuova materia che viene costantemente creata. In questo modo, sarebbe possibile salvare l'assunto per il quale l'universo sembrerebbe grossomodo lo stesso in qualunque momento del tempo e da qualunque punto dello spazio lo si osservi.

Per spiegare la continua creazione di nuova materia, la teoria dello stato stazionario presupponeva una modifica nella teoria della relatività generale; tuttavia, i valori implicati erano talmente bassi (all'incirca una nuova particella all'anno per ogni chilometro cubico) da non essere in conflitto con l'osservazione sperimentale. Si trattava quindi di una buona teoria scientifica, nel senso che era semplice e avanzava delle predizioni ben definite che potevano poi essere verificate o falsificate tramite l'osservazione. Una di queste predizioni era che il numero delle galassie o degli oggetti simili in un dato volume di spazio avrebbe dovuto essere lo stesso in qualunque punto dell'universo e in qualunque istante della sua storia.

Fra la fine degli anni Cinquanta e l'inizio degli anni Sessanta, un gruppo di astronomi di Cambridge, guidato da Martin Ryle, si dedicò a uno studio delle sorgenti delle onde radio provenienti dallo spazio. Essi dimostrarono che la maggior parte di queste sorgenti radio doveva trovarsi al di fuori della nostra galassia e che le sorgenti deboli erano di gran lunga più numerose di quelle forti; interpretarono poi le sorgenti deboli come quelle più distanti e quelle più forti come le più vicine. Ne risultò quindi che, per ogni unità di volume dello spazio, il numero delle sorgenti vicine è minore di quello delle sorgenti lontane.

Ciò poteva significare che la Terra si trovava al centro di una vasta regione dell'universo nella quale le sorgenti radio erano meno numerose che altrove. In alternativa, poteva anche indicare che le sorgenti erano più numerose in passato – cioè al tempo in cui le onde radio avevano iniziato il loro viaggio fino a noi – di quanto non lo siano oggi. Entrambe le spiegazioni, comunque, contraddicevano le predizioni avanzate dalla teoria dello stato stazionario. Inoltre, anche la scoperta, nel 1965, delle radiazioni a microonde – a opera di Penzias e Wilson – indicava che, in passato, l'universo doveva essere stato molto più denso di quanto non lo sia oggi. La teoria dello stato stazionario, seppure con rammarico, dovette quindi essere abbandonata.

Un ulteriore tentativo volto a evitare la conclusione per la quale dev'esserci stato un big bang e, quindi, un inizio del tempo, venne formulato nel 1963 da due scienziati russi, Evgenij Lifšitz e Isaac Khalatnikov. Essi suggerirono che il big bang avrebbe potuto essere una semplice peculiarità dei modelli di Fridman – che, dopotutto, erano soltanto delle mere approssimazioni all'universo reale. Forse, fra tutti i modelli grossomodo simili all'universo reale, erano soltanto quelli di Fridman a contenere la singolarità del big bang. Stando ai modelli di

Fridman, tutte le galassie si allontanano direttamente le une dalle altre; non ci stupisce, quindi, che in un determinato momento del passato esse fossero tutte riunite in un medesimo punto. Nell'universo reale, però, le galassie non si limitano ad allontanarsi direttamente le une dalle altre, ma posseggono anche delle piccole velocità laterali: di conseguenza, nella realtà non ci sarebbe bisogno di ammettere che abbiano occupato tutte un medesimo punto, ma sarebbe sufficiente dire che, in un qualche momento del passato, esse si siano trovate a essere molto vicine. Può quindi darsi che l'attuale espansione dell'universo non abbia avuto origine da una singolarità – il big bang, appunto –, bensì da una precedente fase di contrazione; è cioè possibile che, con il collasso dell'universo su se stesso, le particelle presenti in esso non siano entrate tutte in collisione, ma alcune di esse siano sfuggite e abbiano iniziato ad allontanarsi le une dalle altre, dando origine all'attuale fase di espansione. Come potremmo quindi dire se l'universo reale abbia avuto veramente origine da un big bang?

Lifšitz e Khalatnikov si dedicarono allo studio di modelli dell'universo che, pur essendo più o meno simili a quelli di Fridman, tenevano conto di quelle irregolarità e di quelle velocità casuali delle galassie che ritroviamo nell'universo reale. I due scienziati mostrarono che questi modelli potevano iniziare con un big bang, anche se in essi il moto delle galassie non era più sempre e soltanto quello di un semplice allontanamento diretto le une dalle altre; tuttavia, il big bang era ancora possibile soltanto in certi modelli dalle caratteristiche eccezionali, nei quali tutte le galassie venivano a muoversi esattamente in uno specifico modo. Sostennero quindi che, poiché i modelli simili a quelli di Fridman che non contengono la singolarità di un big bang sembrano essere infinitamente più numerosi di quelli che la contengono, dovremmo concludere che le probabilità che ci sia stato un big bang siano infinitamente basse. In seguito, però, essi si resero conto che esisteva anche una classe molto più generale di modelli simili a quelli di Fridman nei quali sono presenti delle singolarità e che non presuppongono alcun moto speciale da parte delle galassie; nel 1970, quindi, ritirarono la loro proposta.

Il lavoro svolto da Lifšitz e Khalatnikov fu di particolare importanza perché mostrò che, se la teoria della relatività generale fosse stata corretta, l'universo avrebbe potuto avere una singolarità, un big bang. La loro opera, tuttavia, non diede ancora una risposta alla domanda cruciale: la relatività generale predice che il nostro universo abbia avuto un big bang, un inizio del tempo? La risposta a questo interrogativo emerse a partire da un approccio completamente diverso, introdotto nel 1965 dal fisico

britannico Roger Penrose. Sulla base del modo in cui i coni di luce si comportano nella relatività generale e del fatto che la gravità è sempre attrattiva, egli dimostrò che, quando una stella collassa sotto la propria forza gravitazionale, viene a trovarsi intrappolata in una regione la cui superficie esterna si contrae fino ad annullarsi. Ciò significa che tutta la materia contenuta nella stella verrà compressa in una regione dal volume pari a zero: la densità della materia e la curvatura dello spazio-tempo diverranno quindi infinite. Detto in altri termini, avremo una singolarità contenuta all'interno di una regione dello spazio-tempo nota come «buco nero».

A prima vista, sembrava che i risultati di Penrose non avessero nulla da dire circa il problema se, all'origine dell'universo, ci sia stata o meno la singolarità di un big bang. Tuttavia, proprio mentre Penrose stava elaborando il suo teorema, io ero uno studente di dottorato alla disperata ricerca di un tema col quale completare la mia tesi. Compresi che se nel teorema di Penrose si inverte la direzione del tempo (così che il collasso divenga un'espansione), le sue condizioni rimangono ancora valide, posto che attualmente l'universo sia grossomodo simile, su vasta scala, a un modello di Fridman. Col suo teorema, Penrose aveva dimostrato che qualunque stella soggetta al collasso gravitazionale doveva terminare in una singolarità; invertendo la direzione del tempo, si poteva dimostrare che qualunque universo in espansione (che fosse stato simile ai modelli di Fridman) doveva aver avuto inizio con una singolarità. Per ragioni di carattere tecnico, il teorema di Penrose richiedeva che l'universo fosse infinito nello spazio. Di conseguenza, io me ne potei servire per dimostrare che l'esistenza di una singolarità iniziale (un big bang) era necessaria solo nel caso in cui la velocità di espansione dell'universo fosse sufficiente a evitare un nuovo collasso; infatti, solo i modelli di Fridman che contemplano questa espansione continua vengono ad affermare che l'universo è infinito nello spazio.

Negli anni immediatamente successivi, misi a punto nuove tecniche matematiche in modo da poter rimuovere questa e altre condizioni di carattere tecnico dai teoremi che dimostravano la necessità dell'esistenza delle singolarità. Il risultato finale fu un articolo che Penrose e io pubblicammo insieme nel 1970, in cui si dimostrava che all'origine dell'universo doveva esserci stata la singolarità di un big bang, sotto le uniche condizioni che la teoria della relatività generale fosse corretta e che l'universo contenesse tanta materia quanta ne osserviamo.

Il nostro lavoro incontrò molte opposizioni, sia da parte dei russi – che seguirono la linea del partito, tracciata da Lifšitz e Khalatnikov –, sia da parte di alcuni scienziati che ritenevano che l'idea stessa delle singolarità fosse qualcosa di ripugnante e deprivasse la teoria di Einstein della sua intrinseca bellezza. Non è tuttavia possibile discutere a lungo di fronte a un teorema matematico, e così la tesi per la quale l'universo deve aver avuto un inizio è oggi generalmente accettata.

Terza lezione:
I buchi neri

Il termine «buco nero» è stato introdotto molto di recente. Venne infatti coniato nel 1969 dallo scienziato americano John Wheeler come descrizione grafica di un'idea risalente ad almeno due secoli prima. In quell'epoca c'erano due teorie della luce: la prima (detta corpuscolare) affermava che la luce era composta di particelle, mentre la seconda (detta ondulatoria) sosteneva che era costituita da onde. Oggi sappiamo che, in realtà, queste teorie sono entrambe corrette. In forza della dualità onde/particelle della meccanica quantistica, la luce può essere considerata sia come un'onda, sia come una particella. Stando alla teoria per la quale la luce era costituita da onde, non era chiaro in che modo essa si sarebbe comportata in presenza di un campo gravitazionale. Se però la luce era composta da particelle, ci si poteva aspettare che essa risentisse della gravità nello stesso modo in cui ne risentivano le palle di cannone, i razzi e i pianeti.

Partendo da questo assunto, nel 1783 un professore di Cambridge, John Michell, pubblicò un saggio nelle «Philosophical Transactions of the Royal Society of London». In questo saggio, Michell sottolineava come una stella di massa e densità sufficientemente elevate avrebbe avuto un campo gravitazionale talmente forte che neppure la luce sarebbe riuscita a sfuggirne. Qualsiasi raggio luminoso emesso dalla superficie della stella sarebbe stato trascinato indietro dalla forza di attrazione gravitazionale prima di potersi allontanare molto. Michell ipotizzò che ci sarebbero potute essere un gran numero di stelle come questa; pur non potendole vedere direttamente – proprio perché la loro luce non potrà mai raggiungerci –, potremmo però ancora percepire la loro attrazione gravitazionale. Simili oggetti si presenterebbero quindi come degli spazi vuoti, neri, nell'universo; ed è proprio per questo motivo che oggi li indichiamo col termine «buchi neri».

Pochi anni dopo uno scienziato francese, il marchese de Laplace, avanzò un'ipotesi simile a questa, alla quale sembra fosse giunto indipendentemente da Michell. È alquanto interessante notare come egli abbia inserito queste osservazioni soltanto nella prima e nella seconda edizione del suo libro, *Esposizione del sistema del mondo*, per poi toglierle dalle edizioni successive; si era forse convinto che si trattava di un'idea assurda. In effetti, propriamente parlando, nel quadro della teoria della gravità di Newton sarebbe contraddittorio trattare i raggi luminosi al pari delle palle di cannone, poiché la velocità della luce è una costante. Una palla di cannone sparata verso l'alto dalla superficie della Terra verrà rallentata dall'attrazione gravitazionale, e alla fine si fermerà e ricadrà al suolo; un fotone, invece, dovrà continuare la sua corsa verso l'alto a una velocità costante. In che modo, quindi, la gravità newtoniana potrebbe incidere sulla luce? Per avere una teoria coerente degli effetti della gravità sulla luce fu necessario attendere fino al 1915, quando Einstein formulò la propria teoria della relatività generale; e anche allora dovette passare molto tempo prima che si traessero da questa teoria le sue implicazioni relative alle stelle di grande massa.

Al fine di comprendere in che modo potrebbe formarsi un buco nero, dobbiamo prima prendere in esame il ciclo vitale di una stella. Essa viene a formarsi quando una grande massa di gas (principalmente idrogeno) inizia a collassare su se stessa a causa della propria attrazione gravitazionale. Durante la contrazione, le collisioni fra gli atomi del gas aumentano progressivamente di frequenza e di intensità e, quindi, il gas si riscalda. Alla fine sarà talmente caldo che, quando due atomi di idrogeno verranno a scontrarsi, anziché rimbalzare si fonderanno assieme, dando origine a un atomo di elio. È proprio il calore liberato nel corso di questa reazione, che potremmo paragonare a una bomba all'idrogeno controllata, a far sì che le stelle risplendano. Questo calore aggiuntivo determina inoltre un ulteriore aumento della pressione del gas, fino a portarla a un livello tale da controbilanciare la forza di attrazione gravitazionale; giunti a questo punto, il gas cessa di contrarsi. È un po' come nel caso di un palloncino, dove la pressione interna dell'aria (che tende a farlo espandere) e la tensione della gomma (che tende a farlo contrarre) vengono a trovarsi in uno stato di equilibrio.

Le stelle godranno per molto tempo dell'equilibrio stabile così raggiunto, fino a quando il calore generato dalle reazioni nucleari sarà in grado di controbilanciare la forza di attrazione gravitazionale. Alla fine, però, la stella esaurirà il proprio idrogeno e gli altri combustibili nucleari.

E, paradossalmente, quanto più combustibile la stella avrà all'inizio della propria vita, tanto prima finirà per esaurirlo. Questo perché quanto più la stella è grande, tanto più elevata dev'essere la sua temperatura per poter controbilanciare la sua stessa forza di attrazione gravitazionale; e quanto più una stella è calda, tanto più velocemente esaurirà il proprio combustibile nucleare. Il nostro Sole ha probabilmente combustibile sufficiente per altri cinque miliardi di anni, ma stelle di massa maggiore possono consumare le loro riserve in appena un centinaio di milioni di anni, cioè molto meno dell'età dell'universo. Quando una stella esaurisce il proprio combustibile, inizia a raffreddarsi e, quindi, a contrarsi. Fu solo verso la fine degli anni Venti che si cominciò a capire che cosa può succederle a questo punto.

Nel 1928, uno studente universitario indiano, Subrahmanyan Chandrasekhar, partì in nave per l'Inghilterra per andare a studiare a Cambridge con l'astronomo britannico Sir Arthur Eddington. Eddington era un esperto sulla relatività generale. Narra un aneddoto che, all'inizio degli anni Venti, un giornalista gli riportò di aver sentito dire che c'erano al mondo solo tre persone che capivano la teoria della relatività generale. Al che Eddington replicò: «Sto cercando di immaginare chi possa essere il terzo».

Durante il suo viaggio dall'India, Chandrasekhar calcolò quale fosse la massima quantità di materia che avrebbe dovuto avere una stella per riuscire ancora a controbilanciare la propria forza di gravità una volta consumato tutto il combustibile nucleare. L'idea era questa: quando la stella si contrae, le particelle di materia vengono a trovarsi molto vicine le une alle altre. Ma il principio di esclusione di Pauli afferma che due particelle di materia non possono avere entrambe la stessa posizione e la stessa velocità; quindi le particelle di materia che costituiscono la stella dovranno avere velocità molto differenti. Ciò fa sì che esse si allontanino le une dalle altre, così che la stella tende a espandersi. Una stella può quindi mantenersi a un raggio costante grazie a un equilibrio fra l'attrazione gravitazionale e la forza di repulsione derivante dal principio di esclusione (proprio come, nella fase precedente del suo ciclo vitale, la forza di gravità era controbilanciata dal calore).

Chandrasekhar si rese però conto che c'è un limite alla forza di repulsione garantita dal principio di esclusione. La teoria della relatività pone un limite alla differenza massima nelle velocità delle particelle di materia che costituiscono la stella, e questo limite è costituito dalla velocità della luce. Ciò implica che quando la stella diventa

sufficientemente densa, la forza di repulsione derivante dal principio di esclusione non è più in grado di controbilanciare la forza di attrazione gravitazionale. Chandrasekhar calcolò che una stella fredda la cui massa superi di circa una volta e mezza la massa solare non sarebbe in grado di resistere al collasso determinato dalla propria forza di gravità. Questa massa è oggi indicata come il «limite di Chandrasekhar».

Ciò ha importanti implicazioni per quanto riguarda il destino ultimo di una stella di grande massa. Se la massa di una stella non eccede il limite di Chandrasekhar, essa può infine cessare di contrarsi stabilizzandosi in un possibile stadio finale, quello di «nana bianca», con un raggio di poche migliaia di chilometri e una densità di centinaia di tonnellate per centimetro cubico. In virtù del principio di esclusione, una nana bianca è sostenuta dalla forza di repulsione fra gli elettroni nella sua materia. Possiamo osservare un gran numero di queste nane bianche; una delle prime a essere scoperta è stata quella che orbita attorno a Sirio, la stella più luminosa nel cielo notturno.

Gli scienziati compresero poi che c'era un altro possibile stadio finale per una stella anch'essa non eccedente una massa limite pari a circa una o due volte la massa solare, ma molto più piccola anche delle stesse nane bianche. Queste stelle dovrebbero essere sostenute dalla forza di repulsione fra i neutroni e i protoni (anziché fra gli elettroni), e vennero quindi chiamate «stelle di neutroni». Il loro raggio dovrebbe ridursi a circa una quindicina di chilometri, con una densità dell'ordine di centinaia di milioni di tonnellate per centimetro cubico. Quando venne predetta per la prima volta la loro esistenza, però, non c'era alcun modo per poter osservare queste stelle di neutroni, che furono di fatto individuate solo molti anni più tardi.

Le stelle con una massa superiore al limite di Chandrasekhar, dal canto loro, una volta che abbiano esaurito il proprio combustibile, si trovano a dover affrontare un problema di non poco conto. In alcuni casi possono esplodere o riuscire a espellere una quantità di materia sufficiente a far scendere la loro massa al di sotto di questo limite; ma è difficile credere che ciò sia sempre possibile, indipendentemente da quali siano le dimensioni della stella. Come potrebbero infatti sapere di dover perdere peso? E, quand'anche tutte le stelle riuscissero a perdere abbastanza massa, che cosa accadrebbe se si aggiungesse ulteriore materia a una nana bianca o a una stella di neutroni, in modo da portare la loro massa al di sopra del limite di Chandrasekhar? Continuerebbe a collassare fino a raggiungere una densità infinita?

Eddington rimase impressionato di fronte a queste implicazioni e si rifiutò di credere ai risultati di Chandrasekhar. Egli pensava che non fosse semplicemente possibile, per una stella, collassare fino a ridursi a un punto. Questa era l'opinione condivisa dalla maggior parte degli scienziati, e lo stesso Einstein scrisse un articolo in cui sosteneva che le stelle non si sarebbero mai contratte fino a dimensioni nulle. L'ostilità degli altri scienziati – e in particolare di Eddington, che oltre a essere il suo ex-maestro era anche la principale autorità nel campo della struttura delle stelle – convinse Chandrasekhar ad abbandonare questa linea di ricerca e a dedicarsi allo studio di altri problemi astronomici. Tuttavia, quando ricevette il Premio Nobel (nel 1983), ciò fu dovuto, almeno in parte, ai suoi primi lavori sulla massa limite delle stelle fredde.

Chandrasekhar aveva dimostrato che il principio di esclusione non basta ad arrestare il collasso di una stella la cui massa superi il valore limite da lui calcolato; il problema di capire che cosa sarebbe successo a una stella di questo tipo venne però risolto solamente nel 1939, dal giovane fisico americano Robert Oppenheimer. I risultati ai quali pervenne, tuttavia, suggerivano che non ci sarebbero comunque state conseguenze empiricamente osservabili tramite i telescopi disponibili all'epoca. Ci fu poi lo scoppio della guerra, durante la quale lo stesso Oppenheimer fu direttamente coinvolto nel progetto della bomba atomica; e, al termine del conflitto, il problema del collasso gravitazionale era stato ormai in gran parte dimenticato, visto che l'interesse della maggior parte degli scienziati era indirizzato a ciò che accade al livello dell'atomo e del suo nucleo. Nel corso degli anni Sessanta, però, l'applicazione delle moderne tecnologie portò a un forte aumento nel numero e nella varietà delle osservazioni astronomiche, le quali, a loro volta, generarono un rinnovato interesse verso i problemi dell'astronomia e della cosmologia. L'opera di Oppenheimer venne allora riscoperta, e la sua portata venne estesa dal lavoro di parecchi scienziati.

Il quadro fornitoci dalle ricerche di Oppenheimer è il seguente. Il campo gravitazionale generato da una stella modifica le traiettorie dei raggi di luce nello spazio-tempo facendole deviare da quelle che avrebbero seguito in assenza della stella stessa. I coni di luce, che indicano le traiettorie seguite nello spazio-tempo dai lampi di luce emessi dai loro vertici, in prossimità della superficie di una stella vengono leggermente deflessi verso l'interno. È possibile osservare questo fenomeno nella deflessione della luce proveniente da stelle lontane durante un'eclisse di Sole. Man mano che la stella si contrae, il campo gravitazionale in

prossimità della sua superficie diventa più forte e i coni di luce si incurvano sempre più verso l'interno. Ciò fa sì che per la luce sia sempre più difficile allontanarsi dalla stella; un osservatore distante la vedrà quindi sempre più debole e più rossa.

Alla fine, quando la stella è collassata al di sotto di un certo raggio critico, il campo gravitazionale in prossimità della sua superficie diviene così intenso da deflettere i coni di luce verso l'interno con una forza tale che i raggi luminosi non riescono più ad abbandonarla per sfuggire nello spazio. Ora, secondo quanto ci dice la teoria della relatività, nulla può viaggiare a una velocità superiore a quella della luce; pertanto, se neppure la luce riesce a sfuggire, nient'altro potrà farlo. Il campo gravitazionale trascinerà indietro qualunque cosa. Avremo così un insieme di eventi, una regione dello spazio-tempo, dalla quale non è possibile sfuggire per raggiungere un osservatore esterno. Questa regione è ciò che oggi indichiamo col termine «buco nero». Il suo limite esterno è noto come l'orizzonte degli eventi, e coincide con le traiettorie dei raggi luminosi che sono stati quasi sul punto di riuscire a sfuggire dal buco nero.

Per poter comprendere che cosa vedremmo se ci trovassimo a osservare il processo in cui una stella collassa su se stessa fino a formare un buco nero, dobbiamo tener presente che nel quadro della teoria della relatività non esiste un tempo assoluto, ma ogni osservatore ha una sua propria misura del tempo. A causa del campo gravitazionale generato da una stella, il tempo per chi si trova su di essa sarà diverso da quello misurato da un osservatore lontano. Questo fenomeno è stato misurato in un esperimento effettuato sulla Terra, nel corso del quale sono stati collocati degli orologi sul fondo e alla sommità di una torre serbatoio. Supponiamo ora che un intrepido astronauta, stando sulla superficie della stella che sta collassando, misurando il tempo col proprio orologio, invii un segnale ogni secondo alla sua astronave in orbita attorno alla stella. A una certa ora sul suo orologio, diciamo alle 11:00:00, la stella si contrae al di sotto di quel raggio critico in corrispondenza del quale il campo gravitazionale diventa così intenso da impedire ai suoi segnali di raggiungere l'astronave.

I suoi compagni sulla stazione orbitante noterebbero che, all'approssimarsi delle 11:00:00, gli intervalli fra i segnali successivi si fanno sempre più lunghi; tuttavia, prima delle 10:59:59 questa dilatazione del tempo sarebbe ridotta a un livello molto piccolo. Essi dovrebbero infatti attendere solo poco più di un secondo fra il segnale delle 10:59:58 e quello lanciato dall'astronauta quando il suo orologio segnava le 10:59:59;

la loro attesa del segnale delle 11:00:00, però, sarebbe destinata a durare per sempre. Le onde luminose emesse dalla superficie della stella fra le 10:59:59 e le 11:00:00 (secondo l'orologio dell'astronauta) subirebbero infatti una deflessione sempre più marcata, fino ad arrivare al punto in cui, per poter raggiungere gli osservatori sull'astronave, avrebbero bisogno di un tempo infinito – ossia, non potrebbero mai raggiungerli.

Prima delle 11:00:00, l'intervallo temporale fra l'arrivo alla stazione orbitante di due segnali luminosi successivi si farebbe via via più lungo, cosicché la luce proveniente dalla stella apparirebbe sempre più rossa e sempre più debole. Alla fine, la luce sarebbe così debole che dall'astronave non sarebbe più possibile osservare la stella: al suo posto, rimarrebbe soltanto un buco nero nello spazio. L'attrazione gravitazionale esercitata dalla stella sulla nostra astronave rimarrebbe comunque la medesima. La stella, infatti, continuerebbe a trovarsi di fronte all'astronave e, quindi, sarebbe anche visibile, almeno in linea di principio; soltanto, la luce emessa dalla sua superficie sarebbe così spostata verso il rosso – per via del campo gravitazionale – da non poter più essere vista. Questo spostamento verso il rosso, però, non influisce in alcun modo sul campo gravitazionale della stella; la nostra astronave, quindi, continuerebbe a orbitare attorno al buco nero.

Le ricerche che ho compiuto insieme a Roger Penrose fra il 1965 e il 1970 hanno dimostrato che, stando alla teoria della relatività generale, all'interno del buco nero ci dev'essere una singolarità di densità infinita. È un po' come nel big bang, col quale il tempo ha avuto inizio; solo che, in questo caso, il buco nero coinciderebbe con la fine del tempo per la stella che sta collassando e per l'astronauta che si trova sulla sua superficie. In corrispondenza di questa singolarità, le leggi scientifiche e la nostra capacità di prevedere il futuro verrebbero meno; tuttavia, un osservatore esterno al buco nero non risentirebbe di questo venir meno della validità delle previsioni scientifiche, poiché dalla singolarità non potrebbero giungergli né la luce, né alcun altro segnale.

Questo fatto degno di nota spinse Roger Penrose a proporre la sua ipotesi della censura cosmica, che potremmo parafrasare dicendo che «Dio aborre una singolarità nuda». In altri termini, le singolarità prodotte da un collasso gravitazionale esistono solo all'interno di luoghi come i buchi neri dove, grazie a un orizzonte degli eventi, rimangono pudicamente nascoste allo sguardo degli osservatori esterni. Strettamente parlando, questa teoria è nota come l'ipotesi debole della censura cosmica: essa protegge gli osservatori che si trovano all'esterno del buco nero da quel

venir meno della possibilità di fare previsioni scientifiche che accompagna la singolarità, ma non può fare nulla per il povero astronauta che ha la sfortuna di cadere dentro al buco. Ma Dio non dovrebbe fare qualcosa per proteggere anche il senso del pudore di questo sventurato?

Ci sono alcune soluzioni delle equazioni della relatività generale stando alle quali è possibile che il nostro astronauta veda una singolarità nuda. Egli potrebbe riuscire a evitare l'impatto con la singolarità e a cadere invece in un «tunnel spazio-temporale» (*worm hole*), per poi uscire in un'altra regione dell'universo. Ciò aprirebbe certo grandi possibilità sul fronte dei viaggi nello spazio e nel tempo; sfortunatamente, però, sembra che le soluzioni siano tutte altamente instabili. Il minimo fattore di disturbo, come la semplice presenza di un astronauta, potrebbe infatti alterarle: l'astronauta potrebbe non essere in grado di vedere la singolarità fino al momento dell'impatto con essa, momento che segnerebbe la fine del suo tempo. Detto altrimenti, la singolarità si trova sempre nel futuro dell'astronauta e mai nel suo passato.

La versione forte dell'ipotesi della censura cosmica afferma che, in una soluzione realistica, le singolarità si troverebbero sempre o interamente nel futuro (come le singolarità derivanti dal collasso gravitazionale), o interamente nel passato (come il big bang). È nel nostro interesse sperare che qualche versione dell'ipotesi della censura cosmica sia valida, poiché nei pressi di una singolarità potrebbe essere possibile viaggiare nel passato; e, se è pur vero che i viaggi di questo genere sono una manna per gli scrittori di fantascienza, è altrettanto vero che nessuno di noi potrebbe più sentirsi al sicuro. Qualcuno potrebbe infatti viaggiare nel passato e uccidere tuo padre o tua madre prima del tuo concepimento.

Nel collasso gravitazionale che porta alla formazione di un buco nero, i movimenti sarebbero frenati dall'emissione di onde gravitazionali. Di conseguenza, sarebbe logico supporre che il buco nero non impieghi molto tempo prima di stabilizzarsi in uno stato stazionario. Era convinzione generale che i tratti di questo stato stazionario definitivo dipendessero dalle caratteristiche specifiche del corpo celeste che, collassando su se stesso, aveva dato origine al buco nero. Il buco nero avrebbe quindi potuto avere qualunque forma e dimensione; si credeva inoltre che la sua stessa forma, anziché mantenersi fissa, avrebbe potuto presentare delle variazioni ritmiche, delle pulsazioni.

Nel 1967, però, lo studio dei buchi neri venne rivoluzionato da un articolo scritto a Dublino da Werner Israel. Israel dimostrò che tutti i buchi neri che non siano in rotazione su se stessi devono avere una forma

perfettamente sferica; le loro dimensioni, inoltre, dipenderebbero esclusivamente dalle loro rispettive masse. In effetti, essi potrebbero essere descritti da una particolare soluzione delle equazioni di Einstein – soluzione che Karl Schwarzschild aveva trovato già nel 1917, poco dopo la scoperta della relatività generale. All’inizio, i risultati a cui era giunto Israel vennero letti da molti scienziati – tra cui Israel stesso – come una prova che i buchi neri si sarebbero potuti formare soltanto dal collasso di corpi perfettamente sferici; e, poiché in natura non esisterebbero dei corpi perfettamente sferici, ciò significherebbe che, in linea generale, il collasso gravitazionale porterebbe soltanto alla formazione di singolarità nude. Era tuttavia possibile leggere in un altro modo i risultati di Israel, come fecero, in particolare, Roger Penrose e John Wheeler. Secondo questa interpretazione, un buco nero dovrebbe comportarsi come una sfera di materiale fluido. Per quanto un corpo possa anche non avere una forma sferica, durante il collasso che lo porterà a diventare un buco nero esso finirà per stabilizzarsi, a causa dell’emissione di onde gravitazionali, in uno stato perfettamente sferico. Questa tesi, poi corroborata da ulteriori calcoli, venne infine universalmente accettata.

I risultati ottenuti da Israel riguardavano solamente il caso dei buchi neri formatisi dal collasso di corpi celesti non rotanti su se stessi. Stando all’analogia con una sfera di materiale fluido, ci si aspetterebbe che un buco nero originatosi dal collasso di un oggetto in rotazione non abbia una forma perfettamente sferica: dovrebbe infatti avere un rigonfiamento in corrispondenza dell’equatore, dovuto proprio all’effetto della sua rotazione. Nel nostro Sole, ad esempio, possiamo osservare un rigonfiamento di questo tipo, causato dal moto di rotazione che spinge il nostro astro a compiere un giro su se stesso ogni venticinque giorni circa. Nel 1963, il neozelandese Roy Kerr aveva trovato un insieme di soluzioni delle equazioni della relatività generale che descrivevano i buchi neri e che godevano di una maggiore generalità rispetto a quelle di Schwarzschild. I buchi neri di Kerr ruotano a una velocità costante, le loro dimensioni e la loro forma dipendono soltanto dalla massa e dalla velocità di rotazione che li caratterizzano. Se la velocità di rotazione fosse pari a zero, il buco nero sarebbe perfettamente sferico e la soluzione sarebbe identica a quella di Schwarzschild. Ma se la velocità di rotazione fosse diversa da zero, il buco nero avrebbe un rigonfiamento in prossimità del suo equatore. Era quindi naturale ipotizzare che un corpo in rotazione su se stesso, collassando fino a formare un buco nero, avrebbe finito per stabilizzarsi in uno stato descritto dalla soluzione di Kerr.

Nel 1970, un mio collega e compagno ricercatore, Brandon Carter, mosse il primo passo per la dimostrazione di questa congettura. Egli dimostrò che se un buco nero stazionario in rotazione avesse avuto un asse di simmetria (come una trottola), le sue dimensioni e la sua forma sarebbero dipese soltanto dalla sua massa e dalla sua velocità di rotazione. Successivamente, nel 1971, io dimostrai che qualunque buco nero stazionario in rotazione doveva avere un tale asse di simmetria. Infine, nel 1973, David Robinson (del Kings College di Londra), sfruttando i risultati di Carter e i miei, dimostrò che la congettura era corretta: un buco nero di questo genere doveva essere proprio quello prospettato nella soluzione di Kerr.

Quindi, dopo il collasso gravitazionale, un buco nero deve stabilizzarsi in uno stato in cui può ruotare su se stesso, ma non pulsare. Inoltre, le sue dimensioni e la sua forma dipenderanno esclusivamente dalla sua massa e dalla sua velocità di rotazione, e non dalla natura del corpo dal cui collasso gravitazionale aveva avuto origine. Questo risultato acquistò notorietà attraverso la massima: «Un buco nero non ha capelli». Ciò significa che, quando si forma un buco nero, una grandissima quantità di informazioni circa il corpo che ha subito il collasso gravitazionale deve andare perduta, poiché tutto ciò che potremo misurare di quel corpo da quel momento in poi saranno esclusivamente la sua massa e la sua velocità di rotazione. Nel corso della prossima lezione ci soffermeremo sul significato di questo fatto. Il teorema per il quale i buchi neri non hanno capelli presenta inoltre una grande importanza dal punto di vista pratico, poiché viene a limitare grandemente i tipi possibili di buchi neri; è quindi possibile elaborare dei modelli dettagliati di oggetti che potrebbero contenere dei buchi neri, e confrontare poi le predizioni fatte sulla base dei modelli con i dati provenienti dalle osservazioni empiriche.

I buchi neri costituiscono uno di quei casi, piuttosto rari nel panorama della storia della scienza, in cui una teoria è stata sviluppata fin nei più piccoli dettagli a livello di modello matematico prima che ci fosse la benché minima prova empirica della sua correttezza. In effetti era proprio questo, solitamente, l'argomento principe di chi contestava l'esistenza dei buchi neri. Come si faceva a credere all'esistenza di questi oggetti, quando l'unica prova nelle mani di chi la sosteneva erano dei calcoli basati sulla dubbia teoria della relatività generale?

Nel 1963, però, Maarten Schmidt – astronomo all'osservatorio di Monte Palomar, in California – individuò un debole oggetto, dall'aspetto simile a una stella, in direzione della sorgente di onde radio chiamata

3C273 (sigla che sta a indicare la sorgente numero 273 nel terzo catalogo delle sorgenti radio di Cambridge). Quando misurò lo spostamento verso il rosso nello spettro di questo oggetto, si accorse che era troppo marcato per poter essere causato da un campo gravitazionale: se la causa di questo *red shift* fosse infatti stata di natura gravitazionale, l'oggetto avrebbe dovuto essere così massiccio e così vicino a noi da perturbare le orbite dei pianeti del sistema solare. Era quindi logico supporre che questo spostamento verso il rosso fosse invece determinato dall'espansione dell'universo; cosa che, a sua volta, significava che l'oggetto doveva essere lontanissimo. Ora, per essere visibile a una così grande distanza, un oggetto deve essere molto luminoso e deve emettere una quantità immensa di energia.

L'unico meccanismo concepibile in grado di produrre una simile quantità di energia sembrava essere il collasso gravitazionale non di una semplice stella, ma dell'intera regione centrale di una galassia. Da allora sono stati scoperti diversi altri «oggetti quasi stellari», o quasar, simili a questo, tutti caratterizzati da un forte spostamento verso il rosso nel loro spettro; ma sono tutti troppo lontani, e quindi troppo difficili da osservare, per poterci fornire una prova certa dell'esistenza dei buchi neri.

Ulteriori indizi a favore dell'esistenza dei buchi neri emersero poi nel 1967, con la scoperta, da parte di una studentessa ricercatrice di Cambridge, Jocelyn Bell, di alcuni oggetti celesti che emettevano impulsi regolari di onde radio. In un primo momento, Jocelyn e il suo supervisore, Anthony Hewish, pensarono alla possibilità di essere entrati in contatto con una civiltà aliena nella galassia. In effetti, rammento che, al seminario in cui annunciarono la loro scoperta, indicarono le prime quattro sorgenti scoperte con le sigle LGM 1-4, dove LGM sta per «*Little Green Men*», «omini verdi».

Alla fine, comunque, giunsero anche loro – assieme a tutti gli altri – alla meno romantica conclusione che questi oggetti, a cui venne dato il nome di *pulsar*, erano in realtà delle semplici stelle di neutroni in rotazione su se stesse, che emettevano impulsi di onde radio a causa di una complicata interazione fra i loro campi magnetici e la materia circostante. Si trattava di una brutta notizia per gli scrittori di western dello spazio, ma per quei pochi fra noi che credevano nell'esistenza dei buchi neri era decisamente una fonte di grandi speranze: era infatti la prima prova empirica dell'esistenza delle stelle di neutroni. Una stella di neutroni ha un raggio di una quindicina di chilometri, poche volte al di sopra del raggio critico in corrispondenza del quale una stella sarebbe diventata un buco nero. Se quindi una stella aveva potuto contrarsi fino a dimensioni

così ridotte, non era illogico attendersi che altre stelle avrebbero potuto contrarsi fino a dimensioni ancor più piccole e diventare quindi dei buchi neri.

Ma come potevamo sperare di individuare un buco nero, visto che, in base alla sua stessa definizione, si tratta di un oggetto che non emette luce? Sembrerebbe un po' come cercare un gatto nero in una carbonaia. Per fortuna, però, un modo c'è. Come John Michell aveva evidenziato nel suo articolo pionieristico del 1783, un buco nero continua a esercitare una forza di attrazione gravitazionale sugli oggetti vicini. Gli astronomi hanno osservato parecchi sistemi binari, nei quali due stelle orbitano l'una intorno all'altra, attratte l'una verso l'altra dalle rispettive forze di gravità. Essi hanno inoltre osservato anche dei sistemi simili a questi, nei quali però è visibile solo una stella che orbita attorno a una sua invisibile compagna.

Non è certo possibile concludere immediatamente che questa compagna invisibile sia un buco nero. Potrebbe infatti semplicemente trattarsi di una stella troppo debole per essere vista. Tuttavia, alcuni di questi sistemi, come quello chiamato Cygnus X-1, sono anche intense sorgenti di raggi X. La migliore spiegazione di questo fenomeno è che i raggi X sono generati da materia che è sfuggita dalla superficie della stella visibile. Precipitando verso la compagna invisibile, questa materia sviluppa un movimento a spirale – come l'acqua che esce dal tubo di scarico di una vasca da bagno che si sta svuotando – e diventa estremamente calda, emettendo raggi X. Perché questo meccanismo possa funzionare, l'oggetto invisibile dev'essere estremamente piccolo, come una nana bianca, una stella di neutroni o, appunto, un buco nero.

Ora, partendo dall'osservazione del moto della stella visibile, si può determinare quale sia il più piccolo valore possibile per la massa dell'oggetto invisibile; e, nel caso di Cygnus X-1, questo valore è pari a circa sei volte la massa solare. Stando ai risultati di Chandrasekhar, si tratta di una massa troppo grande non solo perché l'oggetto invisibile possa essere una nana bianca, ma anche perché possa essere una stella di neutroni. Sembrerebbe, quindi, che debba trattarsi proprio di un buco nero.

Ci sono altri modelli in grado di spiegare Cygnus X-1 senza ricorrere all'ipotesi di un buco nero, ma sono tutti alquanto forzati. Quella del buco nero sembra essere l'unica spiegazione veramente naturale di ciò che viene osservato. Nonostante questo, ho scommesso con Kip Thorne, del California Institute of Technology, che Cygnus X-1 non contiene alcun buco nero. Per me è come una sorta di polizza d'assicurazione. Ho

lavorato moltissimo sul problema dei buchi neri e, se risultasse che in realtà non esistono, sarebbe tutto lavoro perso. Ma, in quel caso, mi potrei almeno consolare vincendo la mia scommessa e portandomi a casa un abbonamento quadriennale alla rivista «Private Eye». Se invece i buchi neri esistono, Kip vincerà soltanto un abbonamento annuale a «Penthouse», dato che, quando abbiamo fatto la scommessa, nel 1975, eravamo certi all'80 per cento che Cygnus fosse un buco nero. Oggi direi che questa nostra certezza è salita al 95 per cento, ma la scommessa non può ancora dirsi chiusa.

Ci sono prove in favore dell'esistenza di buchi neri in diversi altri sistemi della nostra galassia, oltre che di buchi neri molto più grandi in prossimità delle zone centrali di altre galassie e quasar. Non è inoltre da trascurare la possibilità che ci siano dei buchi neri con masse di gran lunga più piccole di quelle del Sole. I buchi neri di quest'ultimo tipo non potrebbero essersi formati in seguito a un collasso gravitazionale, dato che le loro masse sono al di sotto del limite di Chandrasekhar. Le stelle che hanno una massa così ridotta sono in grado di controbilanciare la propria forza di gravità, sostenendosi anche quando hanno ormai esaurito il proprio combustibile nucleare. Quindi, i buchi neri di piccola massa potrebbero formarsi solo se la materia venisse compressa fino a densità immense da elevatissime pressioni esterne. Condizioni simili potrebbero realizzarsi con l'esplosione di una bomba all'idrogeno dalle dimensioni gigantesche. Il fisico John Wheeler calcolò che se si prendesse tutta l'acqua pesante contenuta in tutti gli oceani del mondo, sarebbe possibile costruire una bomba all'idrogeno al cui centro la materia verrebbe compressa al punto da creare un buco nero. Sfortunatamente, però, sulla Terra non rimarrebbe più nessuno a osservarlo.

Una possibilità più pratica è che questi buchi neri di piccola massa si siano formati nelle condizioni di temperature e pressioni elevatissime dei primissimi stadi di vita dell'universo. La condizione necessaria perché ciò sia potuto accadere è che l'universo primordiale non sia stato perfettamente omogeneo e uniforme, poiché solo una piccola regione con una densità più alta della media avrebbe potuto comprimersi in questo modo fino a formare un buco nero. Ma noi sappiamo che, di fatto, devono esserci state delle irregolarità, altrimenti la materia, anziché essere aggregata in stelle e galassie, sarebbe ancora oggi distribuita in modo perfettamente uniforme per tutto l'universo.

Se poi le irregolarità necessarie a spiegare la formazione delle stelle e delle galassie abbiano portato o meno alla formazione di un numero

significativo di questi buchi neri primordiali, questo dipende da quali siano state le specifiche condizioni dell'universo nelle sue prime fasi di vita. Di conseguenza, se fossimo in grado di determinare l'attuale numero di questi buchi neri primordiali, potremmo apprendere una grande quantità di informazioni circa questi primissimi stadi della vita dell'universo. I buchi neri primordiali con masse maggiori di un miliardo di tonnellate (più o meno la massa di una grande montagna) potrebbero essere individuati solo in base all'influsso che la loro forza gravitazionale esercita su altra materia visibile o sull'espansione dell'universo. Tuttavia, come impareremo nel corso della prossima lezione, i buchi neri non sono, dopotutto, così neri: in quanto caldi, essi emettono radiazioni, e quanto più sono piccoli, tante più ne emettono. Così, paradossalmente, i buchi neri più piccoli potrebbero in realtà rivelarsi più facili da individuare di quelli più grandi.

Quarta lezione:
I buchi neri non sono poi così neri

Prima del 1970, le mie ricerche sulla relatività generale si erano concentrate principalmente sul problema se ci fosse stata o no la singolarità del big bang. Tuttavia, una sera di novembre di quell'anno – poco dopo la nascita di mia figlia Lucy – iniziai a riflettere sui buchi neri mentre mi stavo preparando per andare a letto. Per via della mia invalidità questa è un'operazione piuttosto lunga, e avevo quindi molto tempo per riflettere. A quell'epoca non c'era ancora una definizione precisa di quali punti nello spazio-tempo si trovino all'interno di un buco nero e quali invece si trovino al suo esterno.

Avevo già discusso con Roger Penrose l'ipotesi di definire un buco nero come l'insieme di eventi da cui non è possibile allontanarsi e sfuggire. Questa definizione, che è quella oggi generalmente accettata, significa che il limite esterno del buco nero, l'orizzonte degli eventi, è costituito dalle traiettorie dei raggi di luce che più si sono avvicinati al successo nel tentativo di sfuggire al buco nero, ma che tuttavia hanno fallito, rimanendo per sempre sospesi lungo il suo margine esterno. Per rendere l'idea, è un po' come quando uno scappa inseguito dalla polizia e, pur riuscendo a tenersi sempre a un passo di distanza dagli agenti, non è comunque in grado di seminarli.

All'improvviso, mi resi conto che le traiettorie di questi raggi luminosi non potrebbero mai avvicinarsi le une alle altre, dato che, se lo facessero, finirebbero per scontrarsi. Sarebbe come, per tornare all'esempio di prima, se chi scappa dalla polizia si scontrasse con un altro che scappa correndo nella direzione opposta: finirebbero entrambi per essere catturati. Nel caso dei raggi di luce, cadrebbero entrambi nel buco nero. Ora, però, se venissero inghiottiti dal buco nero, non potrebbero essere stati, come invece supponeva la nostra definizione, sul suo confine; è pertanto necessario che i raggi luminosi nell'orizzonte degli eventi si

muovano lungo traiettorie parallele oppure si allontanino gli uni dagli altri.

Un altro modo di considerare questa situazione consiste nel vedere l'orizzonte degli eventi (il limite esterno del buco nero) come il margine di un'ombra: il margine della luce che riesce a sfuggire a grande distanza ma anche, al contempo, il bordo dell'ombra che segna la fine incombente. Se si guarda l'ombra proiettata da una sorgente luminosa che si trova a grande distanza, come il Sole, si vedrà che i raggi di luce al margine dell'ombra non si avvicinano gli uni agli altri. Ora, se i raggi di luce che formano l'orizzonte degli eventi non possono mai avvicinarsi gli uni agli altri, col passare del tempo l'area delimitata da questo orizzonte potrà soltanto rimanere la stessa o aumentare la propria estensione, ma mai diminuirla, perché ciò significherebbe che almeno alcuni dei raggi di luce presenti al margine dovrebbero avvicinarsi gli uni agli altri. Di fatto, l'area delimitata dall'orizzonte degli eventi dovrebbe aumentare ogni qualvolta una quantità di materia o di energia venissero a cadere nel buco nero.

Supponiamo poi che due buchi neri entrino in collisione e si fondano assieme, dando origine a un singolo buco nero; l'area di quest'ultimo sarà allora maggiore della somma delle aree degli orizzonti degli eventi dei due buchi neri iniziali. Questa proprietà caratteristica dell'area delimitata dall'orizzonte degli eventi, proprietà per la quale essa non può mai decrescere, veniva a porre un'importante restrizione al possibile comportamento dei buchi neri. Quella notte ero così eccitato dalla mia scoperta che quasi non chiusi occhio.

Il giorno dopo telefonai a Roger Penrose, che fu subito d'accordo con me. In effetti, credo che egli fosse già consapevole di questa proprietà dell'area, solo che aveva adottato una definizione leggermente diversa di buco nero; non aveva capito che, partendo da entrambe le definizioni, i confini del buco nero sarebbero comunque stati gli stessi, a patto che il buco nero si fosse stabilizzato in uno stato stazionario.

La seconda legge della termodinamica

La proprietà dell'area di un buco nero di non diminuire mai ricordava molto da vicino il comportamento di quella quantità fisica chiamata entropia, che misura il grado di disordine di un sistema. Tutti sperimentiamo quotidianamente come, lasciando le cose a se stesse, il

disordine tenda ad aumentare; per accorgersene, basta provare a smettere di fare le riparazioni in casa. È certo possibile creare ordine partendo dal disordine (per esempio, imbiancando la casa); ma per far questo occorre un consumo di energia, e ciò conduce alla diminuzione della quantità di energia ordinata disponibile.

La seconda legge della termodinamica è la formulazione precisa di questa idea. Essa afferma che l'entropia di un sistema isolato non diminuisce mai al passare del tempo; inoltre, quando due sistemi si uniscono assieme, l'entropia del sistema combinato è maggiore della somma delle entropie dei sistemi di partenza presi singolarmente. Prendiamo, per esempio, un sistema costituito da un recipiente che contiene delle molecole di gas. Possiamo immaginare le molecole come piccole palle da biliardo che si urtano di continuo e che rimbalzano contro le pareti del recipiente. Supponiamo che, inizialmente, le molecole siano tutte confinate, per mezzo di un divisorio, nella metà sinistra del recipiente. Se rimuoviamo il divisorio, le molecole tenderanno a diffondersi e a occupare entrambe le metà del nostro recipiente. Passato un po' di tempo, è possibile che, per caso, esse si ritrovino tutte nella parte destra, oppure che siano tornate in quella sinistra; tuttavia, è incomparabilmente più probabile che siano distribuite, in quantità grossomodo uguale, in tutte e due le parti. Quest'ultima situazione è meno ordinata – o più disordinata – di quella iniziale, in cui tutte le molecole erano raccolte da un'unica parte; diremo pertanto che l'entropia del gas è aumentata.

Analogamente, supponiamo ora di partire con due recipienti, uno contenente molecole di ossigeno e l'altro contenente molecole di azoto. Se congiungiamo i due recipienti, le molecole di ossigeno e di azoto inizieranno a mescolarsi. Trascorso un po' di tempo, lo stato più probabile sarà quello in cui le molecole di ossigeno e di azoto si ritrovino, mescolate in modo più o meno uniforme, in entrambi i recipienti. Questo stato risulta infatti avere meno ordine, e quindi più entropia, rispetto a quello iniziale, con i due recipienti separati.

La seconda legge della termodinamica è caratterizzata da uno status che la distingue dalle altre leggi scientifiche che, come la legge della gravitazione di Newton, per fare un esempio, sono leggi assolute, cioè valgono sempre. La seconda legge della termodinamica, invece, è una legge statistica, ossia non vale sempre, ma soltanto nella grande maggioranza dei casi. C'è una probabilità di uno contro molti milioni di milioni che tutte le molecole di gas vengano a trovarsi, in un secondo

momento, nella stessa metà del nostro recipiente; ma, per quanto infinitamente improbabile, ciò rimane tuttavia possibile.

Se però ci troviamo di fronte a un buco nero, pare che ci sia un modo piuttosto semplice di violare la seconda legge della termodinamica: basterebbe gettarvi dentro della materia con un alto livello di entropia, come un recipiente pieno di gas, e l'entropia totale della materia all'esterno del buco nero diminuirebbe. Qualcuno potrebbe certo dire che l'entropia totale, compresa quella all'interno del buco nero, non è affatto scesa; sennonché, non essendoci modo di guardare dentro il buco nero, noi non possiamo vedere quanta entropia abbia la materia al suo interno. Sarebbe quindi bello se i buchi neri avessero un qualche carattere che permettesse a un osservatore esterno di determinare la loro entropia – che dovrebbe crescere ogni qualvolta una quantità di materia portatrice di entropia cadesse dentro di essi.

Muovendosi sulle orme della mia scoperta secondo la quale l'area dell'orizzonte degli eventi crescerebbe ogni qualvolta della materia venisse a cadere in un buco nero, uno studente ricercatore di Princeton, Jacob Bekenstein, avanzò l'ipotesi che l'area dell'orizzonte degli eventi fosse una misura dell'entropia del buco nero. Qualora della materia portatrice di entropia venisse a cadere dentro il buco nero, l'area del suo orizzonte degli eventi aumenterebbe, così che la somma dell'entropia della materia all'esterno dei buchi neri e dell'area degli orizzonti non scenderebbe mai.

Quest'ipotesi sembrava evitare che la seconda legge della termodinamica venisse violata nella maggior parte delle situazioni. In essa, tuttavia, c'era una pecca fatale: se un buco nero ha un'entropia, dovrebbe infatti avere anche una temperatura. Ora, un corpo con una temperatura superiore allo zero assoluto deve emettere un determinato tasso di radiazioni. È un dato comune di esperienza che, se si riscalda un attizzatoio sul fuoco, esso diventa rovente ed emette una forma di radiazioni; ma anche i corpi a temperature più basse emettono radiazioni, anche se, trattandosi di livelli molto ridotti, normalmente non ce ne accorgiamo. Questa emissione di radiazioni è necessaria per impedire violazioni della seconda legge. I buchi neri, pertanto, dovrebbero emettere delle radiazioni; tuttavia, in base alla loro stessa definizione, si tratta di oggetti che non dovrebbero emettere alcunché. Sembrava quindi che l'area dell'orizzonte degli eventi di un buco nero non potesse essere considerata alla stregua della sua entropia.

In effetti, nel 1972 scrissi un articolo su questo problema insieme a Brandon Carter e a un collega americano, Jim Bardeen. In esso sottolineavamo come, nonostante ci fossero molte somiglianze fra l'entropia e l'area dell'orizzonte degli eventi, rimaneva comunque questa difficoltà apparentemente insormontabile. Devo ammettere che, scrivendo questo articolo, ero in parte mosso dall'irritazione nei confronti di Bekenstein, poiché ritenevo che si fosse servito impropriamente della mia scoperta sulla crescita dell'area dell'orizzonte degli eventi. In ogni caso, alla fine emerse che Bekenstein aveva sostanzialmente ragione, anche se in un senso che lui di certo non si aspettava.

La radiazione dei buchi neri

Nel settembre 1973, mentre mi trovavo a Mosca, discussi sui buchi neri con due dei più grandi esperti sovietici, Yakov Zel'dovič e Aleksandr Starobinskij. Essi mi convinsero che, stando al principio di indeterminazione della meccanica quantistica, i buchi neri in rotazione dovrebbero creare ed emettere particelle. Io accettai le loro argomentazioni su basi fisiche ma, nonostante questo, non mi piaceva il metodo matematico con il quale avevano calcolato l'emissione. Mi misi quindi a cercare un metodo matematico migliore, che descrissi in occasione di un seminario informale a Oxford alla fine del novembre 1973. A quel tempo non avevo ancora calcolato quale fosse il valore effettivo dell'emissione; mi aspettavo di trovare esattamente la radiazione prevista da Zel'dovič e Starobinskij a partire dal caso dei buchi neri in rotazione. Una volta fatti i calcoli, però, scoprii con sorpresa e disappunto che anche i buchi neri non rotanti avrebbero dovuto creare ed emettere particelle a un ritmo costante.

Dapprima pensai che questa emissione indicasse che una delle approssimazioni da me usate non fosse valida; temevo che, se Bekenstein ne fosse venuto a conoscenza, se ne sarebbe servito come ulteriore argomento a sostegno delle sue idee sull'entropia dei buchi neri, idee che io non avevo ancora accettato. Tuttavia, quanto più ci riflettevo, tanto più mi sembrava che le mie approssimazioni dovessero essere corrette. Ma ciò che infine mi convinse della realtà dell'emissione fu il fatto che lo spettro delle particelle emesse era esattamente uguale a quello che sarebbe stato emesso da un corpo caldo.

Il buco nero stava emettendo particelle proprio al ritmo necessario per evitare che venisse violata la seconda legge della termodinamica.

Da allora, i calcoli sono stati rifatti da altre persone in più forme diverse, e i risultati hanno sempre confermato che un buco nero dovrebbe emettere particelle e radiazioni come se si trattasse di un corpo caldo, con una temperatura dipendente solo dalla sua massa: al crescere della massa, diminuirebbe la temperatura. Per capire come si possa intendere questa emissione dobbiamo ragionare nel seguente modo. Ciò che noi normalmente consideriamo come uno spazio vuoto, non può essere completamente vuoto, poiché altrimenti tutti i campi, come quello gravitazionale e quello elettromagnetico, sarebbero pari esattamente a zero. Il valore di un campo e la rapidità della sua variazione nel tempo sono però come la posizione e la velocità di una particella; e, secondo il principio di indeterminazione, quanto più è precisa la nostra conoscenza di una di queste quantità, tanto meno accurata sarà quella dell'altra.

Nello spazio vuoto, quindi, il campo non può essere fissato esattamente a zero, poiché in tal caso avrebbe sia un preciso valore – zero, appunto –, sia una precisa velocità di mutamento, cioè sempre zero. Nel valore di un campo deve invece esserci almeno un minimo di indeterminazione, o di fluttuazioni quantiche. Possiamo pensare a esse come a coppie di particelle di luce o di gravità che appaiono insieme in un certo istante, si separano e quindi tornano a unirsi, annichilendosi a vicenda. Queste particelle vengono chiamate virtuali. A differenza di quelle reali, non possono essere osservate direttamente con un rivelatore di particelle. Tuttavia, è sempre possibile misurare i loro effetti indiretti, come delle piccole variazioni nell'energia degli atomi e delle orbite degli elettroni, e questi effetti sono in accordo, con un notevole grado di precisione, con le predizioni teoriche.

Per via del principio di conservazione dell'energia, uno dei membri della coppia di particelle virtuali avrà energia positiva e l'altro energia negativa. Quello con energia negativa è condannato a essere una particella virtuale dalla vita breve poiché, in situazioni normali, le particelle reali hanno sempre energia positiva; dovrà quindi cercare l'altra particella e annichilirsi assieme a essa. Tuttavia, il campo gravitazionale all'interno di un buco nero è così forte che in esso anche una particella reale può avere energia negativa.

In presenza di un buco nero è quindi possibile che la particella virtuale con energia negativa cada all'interno dell'orizzonte degli eventi e divenga una particella reale. In questo caso, essa non dovrà più annichilirsi con

l'altra particella della coppia, che potrà cadere a sua volta all'interno del buco nero, ma potrà anche sfuggirvi (e proseguire la propria corsa all'infinito) sotto forma di particella reale; e, a un osservatore esterno, sembrerà che essa sia stata emessa dal buco nero. Quanto più piccolo è il buco nero, tanto minore sarà la distanza che la particella con energia negativa dovrà percorrere prima di diventare una particella reale; di conseguenza, l'emissione delle particelle sarà più frequente e la temperatura apparente del buco nero sarà più elevata.

L'energia positiva della radiazione in uscita verrebbe controbilanciata da un flusso di particelle di energia negativa che cadono nel buco nero. Ora, secondo la famosa equazione di Einstein $E=mc^2$, l'energia è direttamente proporzionale alla massa; un flusso di energia negativa che entri nel buco nero verrà quindi a ridurre la sua massa. Via via che il buco nero perde massa, l'area del suo orizzonte degli eventi diventa più piccola; ma questa diminuzione dell'entropia del buco nero è ampiamente compensata da quella della radiazione emessa, così che la seconda legge della termodinamica non risulta mai violata.

Le esplosioni dei buchi neri

Quanto più la massa di un buco nero è piccola, tanto più elevata sarà la sua temperatura; pertanto, man mano che il buco nero perde massa, la sua temperatura e la sua frequenza di emissione aumentano, con la conseguenza che esso perde massa ancora più rapidamente. Non è ancora del tutto chiaro che cosa accada quando, alla fine, la massa del buco nero diventa estremamente piccola. L'ipotesi più ragionevole è comunque che esso scompaia definitivamente in un'ultima, tremenda esplosione di emissioni, equivalente allo scoppio di milioni di bombe H.

Un buco nero con una massa di poche volte superiore a quella del Sole dovrebbe avere una temperatura di un solo decimilionesimo di grado al di sopra dello zero assoluto, cioè molto meno della temperatura della radiazione a microonde di cui è permeato l'universo (ossia circa 2,7 gradi al di sopra dello zero assoluto); in questa situazione, i buchi neri dovrebbero emettere meno di quanto assorbono, per quanto poco possa essere. Ma se l'universo è destinato a continuare a espandersi per sempre, alla fine la temperatura della radiazione a microonde scenderà al di sotto di quella di questi buchi neri, che inizieranno allora ad assorbire meno di quanto emettano e, quindi, a perdere massa. Anche così, comunque, per

via della loro temperatura estremamente bassa, impiegheranno circa 10^{66} (1 seguito da 66 zeri) anni prima di evaporare completamente; un periodo di tempo di gran lunga superiore all'attuale età dell'universo, che si aggira intorno a soli dieci miliardi di anni.

D'altra parte, come abbiamo appreso nella lezione precedente, potrebbero esistere anche dei buchi neri primordiali con una massa molto più piccola, formatisi dal collasso di alcune irregolarità nei primissimi stadi di vita dell'universo. Tali buchi neri avrebbero una temperatura molto più elevata e, di conseguenza, emetterebbero radiazioni a un ritmo molto maggiore. Un buco nero primordiale con una massa iniziale pari a un miliardo di tonnellate avrebbe una durata di vita grossomodo uguale all'attuale età dell'universo. Alcuni buchi neri primordiali con una massa iniziale inferiore sarebbero già evaporati completamente, mentre quelli con una massa leggermente superiore continuerebbero ancora a emettere radiazioni sotto forma di raggi X e raggi gamma (che sono simili alle onde luminose, ma hanno una lunghezza d'onda molto più corta). A proposito di questi buchi, l'aggettivo «neri» è del tutto fuori luogo: in realtà, essi sono incandescenti – al calor bianco – e l'energia da essi emessa è dell'ordine di circa diecimila megawatt.

Un buco nero di questo genere potrebbe alimentare dieci grandi centrali elettriche, se solo potessimo imbrigliarne l'energia. Ma sarebbe un'impresa alquanto difficile. Esso, infatti, avrebbe la massa di una montagna compressa nelle dimensioni del nucleo di un atomo. Se avessimo uno di questi buchi neri sulla superficie della Terra, non ci sarebbe modo di impedirgli di sprofondare fino al centro del pianeta, dove si fermerebbe definitivamente dopo qualche oscillazione avanti e indietro. L'unico posto dove sistemarlo in modo da poter sfruttare la sua energia sarebbe quindi in orbita attorno alla Terra, e l'unico modo per portarlo in orbita sarebbe quello di attrarlo trascinando davanti a esso una grande massa – un po' come una carota davanti a un asino. Ma, sul piano dei fatti, questa non sembra essere una proposta molto praticabile, perlomeno nell'immediato futuro.

La ricerca dei buchi neri primordiali

Ma, pur non potendo imbrigliare le emissioni di questi buchi neri, quali probabilità abbiamo di riuscire a osservarli? Potremmo cercare i raggi gamma che i buchi neri primordiali emettono per la maggior parte del loro

ciclo vitale. Anche se le radiazioni provenienti dalla maggior parte di questi buchi neri sarebbero molto deboli a causa della loro grande distanza, potremmo però riuscire a rilevare la somma complessiva delle radiazioni emesse da tutti questi corpi. In effetti, abbiamo già individuato una sorta di radiazione gamma di fondo, che però è stata probabilmente generata da processi diversi da quelli dei buchi neri primordiali. Si può dire che le osservazioni della radiazione gamma di fondo non ci forniscono alcuna prova empirica dell'esistenza dei buchi neri primordiali; esse, però, ci dicono che nell'universo non ci possono essere più di trecento di tali buchi neri per ogni anno-luce cubico. Questo limite significa che tutti i buchi neri primordiali potrebbero costituire al massimo un milionesimo della materia presente nell'universo.

Dato che i buchi neri primordiali sono così rari, potrebbe sembrare difficile che ce ne sia uno abbastanza vicino a noi da poterlo osservare direttamente. Poiché però la gravità attrarrebbe i buchi neri primordiali verso qualunque concentrazione di materia, essi dovrebbero essere molto più numerosi all'interno delle galassie. Se all'interno delle galassie essi fossero, diciamo, un milione di volte più comuni, il buco nero a noi più vicino dovrebbe probabilmente trovarsi a una distanza di circa un miliardo di chilometri, che è più o meno uguale a quella che ci separa da Plutone, il più lontano fra i pianeti conosciuti. A questa distanza, però, sarebbe ancora molto difficile riuscire a captare l'emissione costante di un buco nero, anche qualora fosse di diecimila megawatt.

Per poter osservare un buco nero primordiale, si dovrebbero captare diversi quanti di raggi gamma provenienti dalla stessa direzione in un arco di tempo ragionevole (come, per esempio, una settimana); i raggi gamma provenienti da altre direzioni potrebbero semplicemente far parte delle radiazioni di fondo. Ma il principio quantistico di Planck ci dice che, dato che i raggi gamma hanno una frequenza elevatissima, ciascuno dei loro quanti ha una carica energetica molto grande; pertanto, non occorrerebbero molti quanti per irradiare persino diecimila megawatt. E per osservare un numero così esiguo di raggi gamma proveniente dalla distanza di Plutone, sarebbe necessario un rivelatore più grande di tutti quelli finora realizzati. Inoltre, questo rivelatore dovrebbe trovarsi nello spazio, dato che i raggi gamma non possono penetrare nell'atmosfera.

Naturalmente, se un buco nero alla distanza di Plutone dovesse giungere alla fine del proprio ciclo vitale ed esplodere, sarebbe molto facile rilevare questa sua ultima esplosione di emissioni. D'altro lato, però, se un buco nero ha continuato a emettere normalmente radiazioni per

gli ultimi dieci o venti miliardi di anni, è assai improbabile che giunga al termine del suo ciclo vitale proprio nei prossimi anni; potrebbe infatti tranquillamente estinguersi tra (o essersi estinto da) qualche milione di anni. Quindi, per avere delle ragionevoli speranze di osservare un'esplosione prima di esaurire gli eventuali fondi per questa ricerca, bisognerebbe trovare un modo per rilevare tali esplosioni in un raggio di circa un anno-luce. Occorrerebbe poi avere un rivelatore molto grande per poter captare i quanti di raggi gamma emessi dall'esplosione. Comunque, in questo caso non sarebbe necessario determinare che tutti i quanti provengano dalla medesima direzione; per essere certi, al di là di ogni ragionevole dubbio, che hanno avuto origine dalla stessa esplosione, basterebbe osservare che sono giunti tutti in un arco di tempo molto breve.

Un rivelatore di raggi gamma che potrebbe essere in grado di individuare i buchi neri primordiali è l'intera atmosfera terrestre. (In ogni caso, è improbabile che riusciremo mai a costruire un rivelatore più grande di questo.) Colpendo gli atomi della nostra atmosfera, un quanto di raggi gamma ad alta energia crea coppie di elettroni e positroni che a loro volta, urtando altri atomi, generano ulteriori coppie di elettroni e positroni; il risultato è una cosiddetta cascata di elettroni, che si manifesta in una forma di luce nota come la radiazione di Cerenkov. È quindi possibile scoprire eventuali esplosioni di raggi gamma cercando dei lampi di luce nel cielo notturno.

Naturalmente, ci sono anche diversi altri fenomeni, come i fulmini, che possono produrre dei lampi di luce nell'atmosfera. È tuttavia possibile distinguere le emissioni di raggi gamma da questi altri fenomeni osservando simultaneamente i lampi di luce da due o più punti molto lontani fra loro. In Arizona, servendosi di telescopi, due scienziati di Dublino, Neil Porter e Trevor Weekes, hanno effettuato una ricerca di questo tipo: sono giunti a individuare un buon numero di lampi di luce, ma nessuno che possa essere attribuito con sicurezza a esplosioni di raggi gamma generate da buchi neri primordiali.

Quand'anche la ricerca di buchi neri primordiali avesse esito negativo, come sembra possibile, essa ci fornirebbe comunque una serie di importanti informazioni sui primissimi stadi della vita dell'universo. Se l'universo primigenio avesse avuto una conformazione caotica o irregolare, o se la pressione della materia fosse stata bassa, ci si attenderebbe un numero di buchi neri primordiali molto superiore al limite fissato dalle nostre rilevazioni di radiazioni gamma di fondo. Solo una conformazione molto omogenea e uniforme, assieme a un livello di

pressione molto elevato, nell'universo primigenio potrebbe spiegare l'assenza di una quantità osservabile di buchi neri primordiali.

Relatività generale e meccanica quantistica

Quello della radiazione proveniente dai buchi neri è stato il primo esempio di una predizione scientifica dipendente da entrambe le grandi teorie fisiche del XX secolo, la relatività generale e la meccanica quantistica. In principio quest'idea suscitò un mare di opposizioni, in quanto sfidava l'opinione comune: «Com'è possibile che un buco nero emetta qualcosa?». Quando annunciai per la prima volta i risultati dei miei calcoli, nel corso di una conferenza al Rutherford Laboratory, vicino a Oxford, le mie parole furono accolte dall'incredulità generale. Alla fine del mio discorso il presidente della sessione, John G. Taylor, del Kings College di Londra, affermò che erano tutte assurdità (e scrisse poi addirittura un articolo per ribadirlo).

Alla fine, però, la maggior parte delle persone – tra cui lo stesso John Taylor – sono giunte ad accettare la conclusione che, se le nostre altre idee sulla relatività generale e la meccanica quantistica sono corrette, i buchi neri devono emettere radiazioni come ogni altro oggetto caldo. Pertanto, anche se non siamo ancora riusciti a trovare un buco nero primordiale, è ormai opinione diffusa che, nel caso vi riuscissimo, esso dovrebbe emettere una grande quantità di raggi gamma e raggi X. Se ne troveremo uno, io riceverò il Premio Nobel.

L'esistenza di una radiazione dei buchi neri sembra implicare che il collasso gravitazionale non sia poi così definitivo e irreversibile come pensavamo. Se un astronauta cade in un buco nero, la massa di quest'ultimo viene ad aumentare. Alla fine, però, l'energia equivalente a questa ulteriore massa ritornerà comunque all'universo sotto forma di radiazioni e quindi, in un certo senso, il nostro astronauta verrà riciclato. Si tratterebbe certo di una forma di immortalità ben misera, visto che per l'astronauta qualunque concetto personale di tempo finirebbe quasi certamente assieme alla distruzione del suo corpo all'interno del buco nero. Anche gli stessi tipi di particelle emessi infine dal buco nero sarebbero in genere differenti da quelli che formavano il corpo dell'astronauta; il suo unico carattere destinato a sopravvivere sarebbe quindi la sua massa, o energia.

Le approssimazioni di cui mi sono servito per calcolare l'emissione dei buchi neri dovrebbero andare bene fino a quando il buco nero ha una massa superiore a una frazione di grammo. Esse, tuttavia, cesserebbero di essere valide alla fine della vita del buco nero, quando la sua massa diventa estremamente piccola. L'esito più probabile sembra essere che il buco nero sia semplicemente destinato a svanire, almeno dalla nostra regione dell'universo, portando con sé l'astronauta e qualunque singolarità eventualmente contenuta al suo interno. Questa fu la prima indicazione che la meccanica quantistica avrebbe potuto eliminare le singolarità predette dalla relatività generale, che è una teoria classica. Nel 1974, però, per studiare gli effetti quantistici della gravità, io e altre persone ci servivamo di metodi che non ci permettevano di rispondere a domande come quella che si chiede se anche nella gravità quantistica si sarebbero presentate delle singolarità.

A partire dal 1975 iniziai quindi a sviluppare un approccio più efficace alla gravità quantistica, basato sull'idea di Feynman di una somma sulle storie. Nelle prossime due lezioni presenterò le risposte che questo nuovo approccio viene a suggerire in relazione ai problemi dell'origine e del destino dell'universo. Vedremo come la meccanica quantistica permetta all'universo di avere un inizio che non sia una singolarità. Non sarebbe più necessario, quindi, che le leggi della fisica perdano la propria validità in corrispondenza dell'origine dell'universo: lo stato dell'universo e tutto ciò che esso contiene – come noi stessi – sono completamente determinati dalle leggi della fisica, entro i limiti stabiliti dal principio di indeterminazione. E lo stesso vale anche per il libero arbitrio.

Quinta lezione:
L'origine e il destino dell'universo

Nel corso degli anni Settanta mi ero occupato principalmente dei buchi neri. Tuttavia, il mio interesse per le questioni inerenti l'origine dell'universo venne a risvegliarsi nel 1981, quando partecipai a un convegno sulla cosmologia tenutosi in Vaticano. La Chiesa cattolica aveva commesso un grave errore con Galileo, quando aveva cercato di dettare legge su una questione scientifica dichiarando che era il Sole a muoversi intorno alla Terra; ora, a distanza di secoli, aveva invece deciso che sarebbe stato meglio invitare un buon numero di esperti che la informassero circa i problemi della cosmologia.

Al termine del convegno, i partecipanti vennero ricevuti in udienza dal papa. Egli ci disse che era giusto studiare l'evoluzione dell'universo dopo il big bang, ma che non avremmo dovuto cercare di penetrare i segreti del big bang stesso, poiché quello era il momento della creazione e, in quanto tale, era l'opera stessa di Dio.

Fui quindi contento che egli non sapesse quale era stato il tema dell'intervento che avevo appena tenuto alla conferenza. Non avevo un particolare desiderio di condividere la sorte di Galileo, per il quale nutro una profonda simpatia, dovuta in parte al fatto che sono nato esattamente tre secoli dopo la sua morte.

Il modello del big bang caldo

Per spiegare il contenuto di questo mio intervento, dovrò prima descrivere la storia dell'universo generalmente accettata, secondo quello che viene indicato come il «modello del big bang caldo» e che assume che l'universo sia descritto, fin dal momento del big bang, da un modello di Fridman. In questi modelli, man mano che l'universo si espande, la

temperatura della sua radiazione continua a diminuire. Poiché la temperatura è semplicemente un indice dell'energia media delle particelle, questo raffreddarsi dell'universo avrà un grande effetto sulla materia in esso contenuta. A temperature estremamente elevate, le particelle si muoveranno così velocemente da essere in grado di sfuggire a qualunque forza, nucleare o elettromagnetica, che le attrarrebbe le une verso le altre. Al diminuire della temperatura, però, ci si aspetterebbe che le particelle che si attraggono a vicenda inizino a raggrupparsi assieme.

Nell'istante del big bang, le dimensioni dell'universo erano pari a zero e, quindi, la sua temperatura doveva essere infinitamente elevata. Ma, all'espandersi dell'universo, la temperatura della radiazione era destinata a diminuire. Un secondo dopo il big bang, essa era scesa a circa dieci miliardi di gradi; si tratta di una temperatura che è più o meno un migliaio di volte superiore a quella che si ritrova al centro del Sole, ma valori come questi sono già stati raggiunti in esplosioni di bombe H. In questo momento, nell'universo c'erano soprattutto fotoni, elettroni e neutrini (con le loro rispettive antiparticelle), assieme a un numero ridotto di protoni e neutroni.

Mentre l'universo continuava a espandersi e la sua temperatura a diminuire, il ritmo al quale gli elettroni e le coppie di elettroni venivano prodotti durante le collisioni scese infine al di sotto del ritmo con cui essi si distruggevano per annichilazione. In tal modo, la maggior parte degli elettroni e degli antielettroni finì per annichilirsi a vicenda, producendo una quantità più elevata di fotoni e lasciando solo una quantità relativamente piccola di elettroni residui.

Circa cento secondi dopo il big bang, la temperatura era scesa a un miliardo di gradi, un valore che si ritrova all'interno delle stelle più calde. A questa temperatura, i protoni e i neutroni, non avendo più un'energia sufficiente a sottrarsi all'attrazione della forza nucleare forte, iniziarono a unirsi gli uni agli altri per formare i nuclei degli atomi di deuterio (altresì noto come idrogeno pesante), che contengono un protone e un neutrone. I nuclei di deuterio si combinarono quindi con altri protoni e neutroni, dando origine ai nuclei di elio, che contengono due protoni e due neutroni. Si formarono poi anche piccole quantità di un paio di elementi più pesanti, il litio e il berillio.

È possibile calcolare che, nel modello del big bang caldo, circa un quarto dei protoni e dei neutroni avrebbero dovuto trasformarsi in nuclei di elio, insieme a una piccola quantità di idrogeno pesante e altri elementi. I restanti neutroni sarebbero dovuti decadere in protoni, che costituiscono

i nuclei degli atomi del normale idrogeno. Queste predizioni scientifiche si accordano molto bene con i dati delle osservazioni empiriche.

Il modello del big bang caldo predice inoltre che dovrebbe essere tuttora possibile rilevare la radiazione emessa in questi primi stadi caldi della vita dell'universo; a causa dell'espansione, però, la sua temperatura dovrebbe essersi ridotta a pochi gradi al di sopra dello zero assoluto. Si spiega così la radiazione a microonde di fondo scoperta da Penzias e Wilson nel 1965. Siamo quindi abbastanza fiduciosi di essere giunti a un'immagine corretta dello sviluppo dell'universo, almeno per quanto riguarda ciò che è accaduto a partire da circa un secondo dopo il big bang. A sole poche ore dal big bang, la produzione di elio e di altri elementi venne ad arrestarsi; da quel momento in poi, per qualche milione di anni, l'universo continuò semplicemente a espandersi, senza che vi accadesse nulla di molto importante. Infine, quando ormai la temperatura era scesa a poche migliaia di gradi, gli elettroni e i nuclei, non avendo più energia sufficiente a vincere la forza elettromagnetica che attraeva gli uni verso gli altri, iniziarono a unirsi per formare gli atomi.

Nel suo complesso, l'universo continuò a espandersi e a raffreddarsi. Tuttavia, in quelle regioni la cui densità era leggermente superiore alla media, l'espansione era rallentata dalla maggiore attrazione gravitazionale; in alcune zone, poi, questa forza di attrazione riuscì infine ad arrestare l'espansione, facendo sì che la materia ritornasse a collassare su se stessa. Nel corso di questo collasso, l'attrazione di materia esterna a queste regioni potrebbe aver dato avvio a un lento moto rotatorio; e, man mano che la regione soggetta al collasso si contraeva diventando più piccola, la sua velocità di rotazione si faceva sempre più accentuata – un po' come nel caso dei pattinatori su ghiaccio, che girano più veloci quando portano a sé le loro braccia distendendole lungo il corpo. Una volta che le dimensioni di questa regione si erano sufficientemente ridotte, la forza centrifuga derivante dall'accresciuta velocità di rotazione riuscì infine a controbilanciare la forza centripeta di attrazione gravitazionale; era così nata una galassia discoidale in rotazione su se stessa.

Con il passare del tempo, il gas contenuto nelle galassie venne a frazionarsi in nubi più piccole, che iniziarono a collassare sotto la loro stessa gravità. Man mano che queste nubi si contraevano, la temperatura del gas aumentava, diventando infine sufficientemente alta da innescare delle reazioni nucleari. Queste reazioni trasformavano l'idrogeno in altro elio, mentre il calore da esse sprigionato innalzava la pressione del gas impedendo alle nubi di contrarsi ulteriormente. Le stelle simili al nostro

Sole potrebbero rimanere in questo stato per molto tempo, trasformando l'idrogeno in elio e irradiando la loro energia sotto forma di calore e di luce.

Le stelle di massa superiore, per poter controbilanciare la loro maggiore attrazione gravitazionale, dovrebbero però avere una temperatura più elevata; di conseguenza, le loro reazioni di fusione nucleare dovrebbero avvenire più rapidamente, a una velocità tale da esaurire il loro idrogeno in appena un centinaio di milioni di anni. Passato questo tempo, inizierebbero a contrarsi leggermente e, grazie al calore così generato, comincerebbero a trasformare l'elio in elementi più pesanti, come il carbonio o l'ossigeno. Anche in questo modo, comunque, non riuscirebbero a sviluppare una quantità di energia molto più alta, e andrebbero quindi incontro a quella crisi che ho descritto nella mia lezione sui buchi neri.

Quel che accade poi non è del tutto chiaro; sembra comunque probabile che le regioni centrali della stella collassino fino a raggiungere uno stato di densità elevatissima, come quello di una stella di neutroni o di un buco nero. Le regioni più esterne possono essere espulse dalla stella nel corso di una tremenda esplosione: assisteremo così al fenomeno di una cosiddetta supernova, la cui luminosità supera quella di tutti gli altri astri della sua galassia. Alcuni degli elementi più pesanti prodotti nelle ultime fasi del ciclo vitale della stella torneranno così a ricongiungersi con i gas della galassia, e costituiranno parte della materia prima da cui si formerà la successiva generazione di stelle.

Il nostro Sole, essendo una stella di seconda (o terza) generazione, contiene circa il due per cento di questi elementi più pesanti. Esso si è formato intorno a cinque miliardi di anni fa da una nube di gas in rotazione che conteneva i detriti di precedenti supernove. La maggior parte dei gas presenti in quella nube andò a formare il Sole oppure si disperse nello spazio; una piccola quantità degli elementi più pesanti, però, si raccolse a formare i pianeti che oggi orbitano attorno al Sole, come la nostra Terra.

Questioni aperte

Questo quadro di un universo che, dopo un inizio estremamente caldo, è andato via via raffreddandosi ed espandendosi, si trova in accordo con tutti i dati di osservazione di cui siamo oggi in possesso. Ciononostante, esso

lascia senza risposte una serie di domande importanti. Primo: perché l'universo primigenio era così caldo? Secondo: perché l'universo è così uniforme su vasta scala, perché appare identico da qualunque parte dello spazio e in qualunque direzione lo si guardi?

Terzo: perché, all'origine dell'universo, la sua velocità di espansione era così vicina al valore critico da essere appena sufficiente per evitare una nuova contrazione? Se la velocità di espansione, un secondo dopo il big bang, fosse stata più piccola anche solo di una parte su cento milioni di miliardi, l'universo sarebbe ricollassato su se stesso prima di raggiungere le sue attuali dimensioni. D'altro lato, se essa fosse stata più grande di questa stessa frazione, l'universo si sarebbe espanso al punto da essere ormai praticamente vuoto.

Quarto: pur essendo così uniforme e omogeneo su larga scala, l'universo contiene delle irregolarità locali, come le stelle e le galassie. Si pensa che esse si siano sviluppate a partire da piccole differenze, fra una regione e l'altra, nella densità dell'universo primordiale. Ma quale fu l'origine di queste fluttuazioni di densità?

Presa da sola, la teoria della relatività generale non è in grado di spiegare questi caratteri dell'universo e di dare una risposta a queste domande. Essa, infatti, predice che l'universo ebbe inizio con una densità infinita nella singolarità del big bang e, in corrispondenza di questa singolarità, la relatività generale stessa e tutte le altre leggi della fisica verrebbero a perdere la loro validità; di conseguenza, non è possibile servirsi di queste leggi per predire che cosa dovrebbe emergere dalla singolarità. Come ho precedentemente spiegato, ciò significa che si potrebbero tranquillamente escludere dalla teoria tutti gli (ipotetici) eventi che hanno preceduto il big bang, dato che essi non avrebbero comunque alcun effetto su ciò che osserviamo. Lo spazio-tempo avrebbe così un proprio confine, un inizio, in corrispondenza del big bang. Ma perché mai l'universo deve aver avuto origine dal big bang esattamente in un modo tale da condurre proprio a quello stato che osserviamo oggi? Perché l'universo è così uniforme, e si espande con una velocità appena sufficiente a evitare di tornare a contrarsi? Ci sentiremmo più felici se fossimo in grado di dimostrare che l'universo che osserviamo oggi – o comunque un universo simile – avrebbe potuto svilupparsi a partire da un discreto numero di configurazioni iniziali fra loro differenti.

In questo caso, un universo sviluppatosi a partire da una qualche sorta di condizioni iniziali casuali dovrebbe contenere un certo numero di regioni simili a quelle che oggi osserviamo. Ci potrebbero poi essere

anche delle regioni profondamente diverse; tuttavia, le condizioni di queste ultime sarebbero probabilmente tali da non consentire la formazione di galassie e di stelle, che costituiscono un prerequisito essenziale per lo sviluppo di forme di vita intelligenti (almeno come le conosciamo noi). Queste regioni, pertanto, non conterrebbero alcun essere in grado di osservare la loro diversità.

Riflettendo sulla cosmologia, dobbiamo tenere conto del principio di selezione, per il quale noi viviamo in una regione dell'universo adatta a ospitare forme di vita intelligenti. Questa considerazione, alquanto ovvia ed elementare, viene a volte indicata come il principio antropico. Supponiamo, d'altro lato, che lo stato iniziale dell'universo dev'essere stato scelto con estrema attenzione per poter condurre a qualcosa di simile a ciò che oggi vediamo intorno a noi; in questo caso, sarebbe stato di per sé improbabile che l'universo contenesse una qualche regione in grado di ospitare la vita.

Stando al modello del big bang caldo che ho descritto sopra, nell'universo primordiale non ci fu abbastanza tempo perché il calore potesse fluire da una regione all'altra. Ciò implica che, all'inizio, le diverse regioni dell'universo avrebbero dovuto avere la medesima temperatura, in modo che sia possibile rendere ragione del fatto che la radiazione a microonde di fondo da noi osservata ha la stessa temperatura in qualunque direzione puntiamo i nostri strumenti. Inoltre, sarebbe stato necessario scegliere con estrema precisione la velocità iniziale di espansione dell'universo, in modo da spiegare come mai, finora, non sia tornato a contrarsi. Tutto ciò significa che se il modello del big bang caldo è corretto, a ritroso, fin dall'inizio del tempo, lo stato iniziale dell'universo dev'essere stato scelto davvero con grande cura. Sarebbe molto difficile spiegare come mai l'universo abbia dovuto iniziare proprio in questo preciso modo, a meno di non appellarsi all'azione di un Dio la cui intenzione era proprio quella di creare degli esseri come noi.

Il modello inflazionario

Per evitare questa difficoltà insita nei primissimi stadi del modello del big bang caldo, Alan Guth, del Massachusetts Institute of Technology, avanzò la proposta di un nuovo modello, in cui molte configurazioni iniziali fra loro diverse avrebbero potuto evolversi in qualcosa di simile all'universo attuale. Egli ipotizzò la possibilità che l'universo primordiale abbia

attraversato un periodo di espansione rapidissima, o esponenziale. Questa espansione viene indicata con l'aggettivo «inflazionaria», in analogia con l'inflazione nei prezzi che, a livelli più o meno alti, si fa sentire in ogni Paese. Per quanto riguarda l'inflazione nei prezzi, il primato mondiale va probabilmente alla Germania del primo dopoguerra, quando, nel giro di pochi mesi, il prezzo di una pagnotta lievitò da meno di un marco a milioni di marchi. Tuttavia, per quanto riguarda le dimensioni dell'universo primordiale, il tasso di inflazione da noi ipotizzato è di gran lunga superiore anche a questo stesso record, essendo pari a circa un milione di milioni di milioni di milioni di milioni di volte nel giro di una minuscola frazione di secondo. Naturalmente, era prima dell'attuale governo.

Guth suggerì che la temperatura dell'universo emerso dal big bang fosse estremamente elevata. Ci si potrebbe aspettare che, a temperature simili, le forze nucleari potente e debole e la forza elettromagnetica fossero tutte unificate in una singola forza. Espandendosi, l'universo si sarebbe via via raffreddato e l'energia delle particelle sarebbe progressivamente diminuita. Infine, ci sarebbe stata una cosiddetta transizione di fase e la simmetria tra le forze sarebbe venuta a rompersi: la forza potente si sarebbe differenziata da quella debole e da quella elettromagnetica. Un comune esempio di transizione di fase è dato dalla trasformazione dell'acqua in ghiaccio quando la si raffredda: mentre l'acqua allo stato liquido è simmetrica (è cioè identica in ogni punto e in ogni direzione), i cristalli di ghiaccio che da essa si formano assumono delle posizioni ben definite e sono allineati in una qualche direzione; trasformandosi in ghiaccio, quindi, l'acqua viene a perdere la propria simmetria.

Nel caso dell'acqua, se si opera con attenzione è possibile «sovraraffreddarla», ossia portare la sua temperatura al di sotto del punto di congelamento (0°C) senza che si formi il ghiaccio. Guth suggerì che l'universo potrebbe essersi comportato in un modo simile: la sua temperatura, cioè, potrebbe essere scesa al di sotto del valore critico senza che la simmetria tra le forze venisse a rompersi. In questo caso, l'universo si sarebbe trovato in uno stato di instabilità, con una quantità di energia maggiore rispetto a quella che avrebbe avuto se la simmetria si fosse rotta. Ora, è possibile dimostrare che questa speciale energia extra avrebbe un effetto antigravitazionale: essa agirebbe esattamente come una costante cosmologica.

Einstein introdusse la costante cosmologica in seno alla teoria della relatività generale nel tentativo di costruire un modello statico dell'universo. Nel nostro caso, però, l'universo era già in espansione, e l'effetto repulsivo di questa costante cosmologica lo avrebbe quindi fatto espandere a una velocità sempre crescente. Persino nelle regioni in cui si aveva una concentrazione di particelle di materia superiore alla media, la forza di attrazione gravitazionale della materia sarebbe stata comunque sopraffatta dalla forza repulsiva derivante dall'effettiva costante cosmologica, e anche queste regioni si sarebbero così espanse a un ritmo inflazionario.

Man mano che l'universo si espandeva, le particelle di materia si allontanavano sempre più le une dalle altre; il risultato sarebbe quindi stato quello di un universo in espansione contenente appena qualche particella. Inoltre, esso si sarebbe ancora trovato nello stato di sovraraffreddamento, in cui la simmetria fra le forze rimane integra. Qualunque irregolarità presente al suo interno sarebbe stata semplicemente spianata dall'espansione, come le pieghe di un palloncino che si distendono quando lo si gonfia. Lo stato omogeneo e uniforme che contraddistingue l'universo attuale potrebbe pertanto essersi sviluppato a partire da molti stati iniziali non uniformi fra loro. E anche la velocità di espansione tenderebbe a essere molto vicina al valore critico necessario per evitare una nuova contrazione.

Inoltre, l'idea dell'inflazione potrebbe anche spiegare perché nell'universo ci sia tanta materia. Nella regione dell'universo che noi possiamo osservare ci sono qualcosa come 10^{80} particelle. Da dove hanno avuto origine? La risposta è che, nella teoria quantistica, le particelle possono essere create a partire dall'energia sotto forma di coppie costituite da una particella e dalla relativa antiparticella. A questo punto, però, emerge il problema di dove abbia avuto origine questa energia. La risposta è che l'energia totale dell'universo è esattamente pari a zero.

La materia dell'universo è costituita da energia positiva. Tuttavia, occorre tenere presente che tutta la materia continua ad attrarsi per mezzo della forza di gravità. Due pezzi di materia posti l'uno vicino all'altro hanno meno energia di due pezzi identici tra i quali vi sia però una grande distanza; questo perché bisogna spendere dell'energia per tenerli separati contro la forza gravitazionale, che tende ad avvicinarli (e il cui effetto, nel secondo caso, sarebbe trascurabile). Quindi, in un certo senso, il campo gravitazionale ha un'energia negativa. Se prendiamo poi l'intero universo, è possibile dimostrare che l'ammontare di questa energia gravitazionale

negativa è esattamente tale da cancellare l'energia positiva della materia, così che l'energia totale dell'universo è pari a zero.

Ora, il doppio di zero è sempre uguale a zero. Pertanto, l'universo potrebbe raddoppiare la quantità di energia positiva della materia e, nel contempo, raddoppiare l'energia negativa del campo gravitazionale, senza con ciò violare il principio di conservazione dell'energia. Ciò non accade nella normale espansione dell'universo, durante la quale la densità della materia-energia diminuisce man mano che l'universo aumenta di volume. Accade, però, nell'espansione inflazionaria, poiché in essa, mentre l'universo si espande, la densità di energia dello stato sovraraffreddato rimane costante: quando l'universo raddoppia le proprie dimensioni, sia l'energia positiva della materia sia quella negativa del campo gravitazionale vengono a raddoppiare, così che l'energia totale è sempre pari a zero. Durante la fase inflazionaria, le dimensioni dell'universo aumentano moltissimo; di conseguenza, la quantità totale di energia disponibile per la creazione di particelle materiali diventa estremamente grande. Come ha sottolineato Guth: «Si dice che non esiste un pasto gratis. Ma l'intero universo è, in ultima analisi, un pasto gratis».

La fine dell'inflazione

Attualmente l'universo non si sta espandendo in modo inflazionario; deve quindi esserci stato un qualche meccanismo che ha eliminato l'effettiva costante cosmologica, il cui valore era molto elevato, facendo così passare l'espansione da una fase accelerata a una fase rallentata dalla gravità, quale è quella che osserviamo oggi. Ci si potrebbe aspettare che, con l'espandersi e il raffreddarsi dell'universo, la simmetria fra le forze sia infine venuta a rompersi, così come anche l'acqua sovraraffreddata finisce comunque sempre per trasformarsi in ghiaccio. L'energia extra dello stato di simmetria integro si sarebbe allora liberata e avrebbe riscaldato nuovamente l'universo, che avrebbe in tal modo continuato a espandersi e a raffreddarsi proprio come nel modello del big bang caldo. Tuttavia, ora ci sarebbe una spiegazione del perché la velocità di espansione dell'universo corrispondesse esattamente a quella critica e del perché regioni diverse avessero la stessa temperatura.

Nella proposta originaria di Guth, la transizione di fase con la rottura della simmetria doveva aver luogo improvvisamente (un po' come, nell'acqua molto fredda, i cristalli di ghiaccio compaiono all'improvviso).

L'idea era che delle «bolle» della nuova fase – quella segnata dalla rottura della simmetria – si sarebbero dovute formare già nel corso della fase precedente, come bolle di vapore circondate dall'acqua bollente. Queste bolle avrebbero dovuto espandersi e congiungersi le une con le altre, fino a quando l'intero universo si sarebbe infine trovato nella nuova fase. Il problema, come sottolineammo io e diverse altre persone, era che l'universo si stava espandendo troppo velocemente: le bolle si sarebbero allontanate l'una dall'altra troppo rapidamente per potersi unire. L'universo sarebbe quindi rimasto in uno stato molto eterogeneo e, in alcune delle sue regioni, si sarebbe conservata la simmetria fra le diverse forze. Un simile modello dell'universo non corrisponderebbe a ciò che di fatto osserviamo.

Nell'ottobre 1981 mi recai a Mosca per una conferenza sulla gravità quantistica, dopo la quale tenni un seminario sul modello inflazionario e i suoi problemi presso l'Istituto Astronomico Sternberg. Fra il pubblico c'era un giovane russo, Andrej Linde, che sostenne che il problema delle bolle che non riuscivano a congiungersi si sarebbe potuto evitare se le bolle fossero state molto grandi. In questo caso, la nostra regione dell'universo avrebbe potuto essere contenuta all'interno di una singola bolla. Perché questo schema funzioni, il passaggio dalla simmetria alla sua rottura dev'essere avvenuto molto lentamente all'interno della bolla; ma, stando alle grandi teorie unificate, questa lentezza nella transizione non costituirebbe affatto un problema.

L'idea di Linde di una rottura lenta della simmetria era in sé molto buona, ma io evidenziai come queste sue bolle avrebbero dovuto essere più grandi delle dimensioni allora possedute dallo stesso universo. Mostrai che la simmetria, anziché rompersi soltanto all'interno delle bolle, si sarebbe rotta contemporaneamente in ogni luogo; ciò avrebbe condotto alla formazione di un universo uniforme, come quello che di fatto osserviamo. Il modello della rottura lenta della simmetria costituiva un buon tentativo di spiegare perché l'universo sia così com'è. Tuttavia, io e diverse altre persone mostrammo che esso prediceva delle variazioni nel valore della radiazione a microonde di fondo molto più grandi di quelle di fatto osservate. Inoltre, ricerche successive hanno sollevato dubbi sul fatto che, nell'universo primordiale, possa esserci stata una transizione di fase corrispondente al tipo richiesto. Nel 1983, Linde presentò comunque un modello migliore, il cosiddetto modello inflazionario caotico, che non dipende dalle transizioni di fase e che predice delle variazioni nella radiazione a microonde di fondo corrispondenti a quelle che di fatto

registriamo. Il modello inflazionario ha mostrato come l'attuale stato dell'universo avrebbe potuto emergere da una serie piuttosto ampia di configurazioni iniziali fra loro differenti. Tuttavia, resta pur sempre vero che non sarebbe bastato prendere una qualsiasi configurazione iniziale per giungere all'universo che ci sta dinnanzi. Pertanto, anche il modello inflazionario non ci spiega perché la configurazione iniziale sia stata esattamente quella richiesta per produrre ciò che noi oggi osserviamo. Dobbiamo quindi cercare una spiegazione nel principio antropico? Tutto questo avvenne solamente grazie a un caso fortuito? Questa sembrerebbe una conclusione del tutto insoddisfacente, una rinuncia a tutte le nostre speranze di comprendere l'ordine sotteso all'universo.

La gravità quantistica

Per poter comprendere quale dovrebbe essere stata l'origine dell'universo, abbiamo bisogno di leggi che conservino la propria validità anche in corrispondenza dell'inizio del tempo. I teoremi della singolarità dimostravano, sotto la condizione che la teoria della relatività generale fosse corretta, che all'inizio del tempo avrebbe dovuto esserci un punto di infinita densità e curvatura. Ma, in corrispondenza di questo punto, tutte le leggi scientifiche a noi note verrebbero meno. Si potrebbe supporre che ci siano nuove leggi applicabili alle singolarità, ma sarebbe molto difficile anche solo formulare delle leggi per punti dal comportamento bizzarro; inoltre, le osservazioni empiriche non potrebbero fornirci alcuna indicazione su come tali leggi dovrebbero essere strutturate. Quello che i teoremi della singolarità realmente ci dicono, però, è soltanto che il campo gravitazionale diventa talmente intenso che gli effetti della gravità quantistica si fanno rilevanti: la teoria classica non costituisce più, in queste situazioni, una buona descrizione dell'universo. Per discutere i primissimi stadi della vita dell'universo, dovremmo quindi servirci di una teoria quantistica della gravità. Come vedremo, nella teoria quantistica le leggi scientifiche possono mantenere la loro validità in qualunque situazione, anche all'inizio del tempo: in essa non c'è quindi bisogno di postulare nuove leggi per spiegare le singolarità, per il semplice fatto che non è necessario ammettere l'esistenza di alcuna singolarità.

A tutt'oggi non abbiamo ancora sviluppato una teoria completa e consistente che combini la meccanica quantistica e la gravità; tuttavia, conosciamo ormai con sufficiente certezza almeno alcuni dei caratteri che

una tale teoria unificata dovrebbe avere. Uno è che dovrebbe incorporare la proposta di Feynman di formulare la teoria quantistica nei termini di una somma sulle storie. Stando a questo approccio, una particella in movimento da A verso B non ha solo una singola storia, come in una teoria classica, ma deve invece seguire ogni possibile traiettoria nello spazio-tempo. A ciascuna di queste storie è poi associata una coppia di numeri, uno dei quali rappresenta le dimensioni di un'onda e l'altro la sua posizione nel ciclo, ossia la sua fase.

Per calcolare la probabilità che la particella, diciamo, passi per un determinato punto, dobbiamo sommare le onde associate a ogni possibile storia che passi per quel punto. Quando però proviamo a calcolare effettivamente il valore di queste somme, veniamo a imbatterci in una serie di gravi difficoltà di carattere tecnico, e l'unico modo per aggirarle consiste nel seguire questa peculiare prescrizione: si devono sommare le onde per storie di particelle che non si trovano nel tempo reale di cui facciamo esperienza, ma che hanno luogo in un tempo immaginario.

Anche se l'espressione «tempo immaginario» può richiamare alla mente qualcosa di fantascientifico, si tratta però di un concetto matematico ben definito. Per evitare le difficoltà tecniche legate alla somma sulle storie di Feynman, è necessario servirsi di questo tempo immaginario. Ciò ha un effetto interessante sullo spazio-tempo: la distinzione fra tempo e spazio viene a scomparire completamente. Uno spazio-tempo in cui gli eventi assumono valori immaginari sulla coordinata del tempo viene indicato come euclideo, poiché la sua metrica è definita sul positivo.

Nello spazio-tempo euclideo non c'è alcuna differenza tra la direzione del tempo e le direzioni nello spazio. Sul fronte opposto, nello spazio-tempo reale, in cui gli eventi sono contrassegnati da valori reali sulla coordinata del tempo, è facile indicare questa differenza: la direzione del tempo si trova all'interno del cono di luce, mentre le direzioni nello spazio si trovano all'esterno. Si può anche considerare l'uso del tempo immaginario al pari di un semplice espediente matematico, una specie di trucco, di cui ci serviamo per calcolare le risposte concernenti lo spazio-tempo reale. Tuttavia, in questo espediente potrebbe anche nascondersi qualcosa di più profondo: potrebbe anche darsi, cioè, che lo spazio-tempo euclideo sia il concetto fondamentale, e che quello che consideriamo come lo spazio-tempo reale sia soltanto una finzione creata dalla nostra immaginazione.

Quando applichiamo all'universo la somma sulle storie di Feynman, l'analogo della storia di una particella è ora uno spazio-tempo curvo completo che rappresenta la storia dell'intero universo. Per le ragioni di carattere tecnico sopra menzionate, si deve supporre che questi spazi-tempi curvi siano euclidei; in essi, cioè, il tempo è immaginario e indistinguibile dalle direzioni nello spazio. Per calcolare la probabilità di trovare uno spazio-tempo reale che goda di una determinata proprietà, bisogna sommare le onde associate a tutte le storie nel tempo immaginario che hanno tale proprietà; da qui è poi possibile ricavare quale sarebbe, nel tempo reale, la probabile storia dell'universo.

La condizione dell'assenza di confini

Nella teoria classica della gravità (che si basa sullo spazio-tempo reale) ci sono soltanto due modi possibili in cui l'universo può comportarsi: o esiste da un tempo infinito, oppure ha avuto origine da una singolarità in un determinato istante del passato. Di fatto, i teoremi della singolarità dimostrano poi che la seconda ipotesi è quella corretta. Nella teoria quantistica della gravità, invece, viene a emergere una terza possibilità. Dato che ci stiamo servendo di spazi-tempi euclidei (nei quali la direzione del tempo si trova sullo stesso piano delle direzioni nello spazio), è possibile che lo spazio-tempo abbia un'estensione finita e che tuttavia non abbia alcuna singolarità che lo delimiti al pari di un confine, di un margine esterno. Lo spazio-tempo sarebbe quindi simile alla superficie della Terra, con l'unica differenza di avere due dimensioni in più. Anche la superficie della Terra, infatti, ha un'estensione finita, ma è comunque priva di un confine o di un bordo esterno. Se ci si mette a viaggiare per nave veleggiando verso ponente, non si finisce per cadere giù dal bordo della Terra, né ci si imbatte in una qualche singolarità; questo lo so per esperienza, dato che ho già fatto il giro del mondo.

Sia che lo spazio-tempo euclideo si estenda a ritroso per un tempo infinito immaginario, sia che abbia avuto inizio in una singolarità, ci troveremmo comunque di fronte allo stesso problema che dovevamo affrontare nel quadro di una teoria classica: quello di specificare lo stato iniziale dell'universo. Dio saprà anche come è nato l'universo, ma noi non siamo in grado di fornire alcuna particolare ragione per cui abbia dovuto iniziare in un determinato modo piuttosto che in un altro. La teoria quantistica della gravità, però, è venuta a dischiuderci una nuova

possibilità: quella, cioè, che lo spazio-tempo non abbia un confine e che, di conseguenza, non ci sia necessità di determinare che cosa avviene in corrispondenza di questo confine. Non ci sarebbero singolarità in presenza delle quali le leggi della scienza vengono meno, né margini estremi dello spazio-tempo arrivati ai quali potremmo solo appellarci a Dio o a qualche nuova legge per stabilire quali siano le condizioni di confine dello spazio-tempo. Si potrebbe dire che «la condizione di confine dell'universo è quella di non avere alcun confine». L'universo sarebbe quindi completamente autonomo, racchiuso in se stesso, e non sarebbe soggetto ad alcuna eventuale influenza esterna. Non sarebbe stato creato, né verrebbe mai distrutto; esso esisterebbe e basta.

Fu proprio a quel convegno in Vaticano che avanzai per la prima volta l'ipotesi che il tempo e lo spazio, presi assieme, avrebbero potuto formare una superficie che, pur avendo dimensioni finite, non fosse racchiusa da alcun confine, da alcun margine esterno. Il mio intervento era però di carattere prettamente matematico, e quindi le sue implicazioni a proposito del ruolo di Dio nella creazione dell'universo non furono allora generalmente notate, nemmeno da me. Al tempo del convegno in Vaticano, non avrei saputo sfruttare l'idea dell'assenza di confini per fare predizioni scientifiche sull'universo. Tuttavia, trascorsi poi l'estate seguente presso l'Università della California a Santa Barbara, dove un mio amico e collega, Jim Hartle, calcolò insieme a me quali dovrebbero essere le condizioni dell'universo se lo spazio-tempo non avesse confini.

Dovrei sottolineare come quest'idea che il tempo e lo spazio, pur avendo un'estensione finita, non sono racchiusi da alcun confine, è soltanto una proposta, che non può essere dedotta a partire da qualche altro principio. Come tutte le altre teorie scientifiche, essa può essere inizialmente avanzata per ragioni di carattere estetico o metafisico; il suo autentico test consisterà però poi nel vedere se essa faccia delle predizioni che siano in accordo con le osservazioni empiriche. Nel caso della gravità quantistica, comunque, questa è una cosa difficile da determinare, per due distinte ragioni. In primo luogo, non siamo ancora totalmente sicuri di quale teoria riesca a combinare con successo la relatività generale e la meccanica quantistica, anche se sappiamo molte cose intorno alla forma che una tale teoria dovrebbe avere. In secondo luogo, qualunque modello che descriva dettagliatamente l'intero universo verrebbe a essere matematicamente troppo complicato per consentirci di calcolare predizioni esatte; sarebbe quindi necessario ricorrere ad approssimazioni,

ma anche così il problema di ricavarne delle predizioni rimarrebbe di difficile soluzione.

Stando a questa proposta dell'assenza di confini, la probabilità che l'universo si trovi a seguire la maggior parte delle storie possibili è trascurabile. C'è tuttavia una particolare famiglia di storie che risultano essere molto più probabili delle altre. Possiamo raffigurare queste storie servendoci dell'immagine della superficie terrestre: la distanza dal Polo Nord rappresenterebbe il tempo immaginario e le dimensioni di un parallelo rappresenterebbero le dimensioni spaziali dell'universo. L'universo ha inizio al Polo Nord come un singolo punto. Man mano che si procede verso sud, i paralleli diventano più grandi, corrispondendo all'espansione dell'universo al passare del tempo immaginario. L'universo raggiungerebbe le sue massime dimensioni in corrispondenza dell'equatore, per poi iniziare a contrarsi fino a ridursi nuovamente a un singolo punto al Polo Sud. In corrispondenza del Polo Nord e del Polo Sud, le dimensioni dell'universo sarebbero pari a zero; tuttavia, questi punti nello sviluppo dell'universo non sarebbero affatto delle singolarità, non più di quanto possano essere considerati singolari i due poli terrestri. Le leggi della scienza conserverebbero quindi la loro validità anche all'inizio del tempo, proprio come la conservano, sulla Terra, in corrispondenza del Polo Nord e del Polo Sud.

Nel tempo reale, tuttavia, la storia dell'universo ci sembrerebbe molto diversa. Esso sembrerebbe iniziare a una certa dimensione minima, equivalente al raggio massimo della storia nel tempo immaginario, e si espanderebbe quindi nel tempo reale secondo le previsioni del modello inflazionario. Così, tuttavia, non sarebbe più necessario assumere che l'universo sia stato creato, in qualche modo, proprio nello stato iniziale corretto. L'universo si espanderebbe poi fino a raggiungere dimensioni vastissime, ma alla fine tornerebbe a collassare in quella che, nel tempo reale, sembrerebbe una singolarità. Pertanto, in un certo senso, noi siamo ancora tutti condannati, anche se ci teniamo alla larga dai buchi neri. Solo se riuscissimo a raffigurarci l'universo nei termini del tempo immaginario potremmo evitare le singolarità.

I teoremi delle singolarità della relatività generale classica hanno dimostrato che l'universo deve avere un inizio, e che questo inizio dev'essere descritto nei termini della teoria quantistica. Questa deduzione ci ha poi condotti, a sua volta, all'idea che l'universo, nel tempo immaginario, potrebbe essere finito pur senza avere confini o singolarità. Quando però torniamo al tempo reale, quello in cui viviamo, ci sembrerà

ancora che ci siano delle singolarità. Il povero astronauta che cade in un buco nero andrà ancora incontro a una brutta fine. Solo se potesse vivere nel tempo immaginario non incontrerebbe alcuna singolarità.

Ciò potrebbe suggerire che, in realtà, il cosiddetto tempo immaginario è quello fondamentale, e che quello che chiamiamo tempo reale è solo una finzione creata dalla nostra mente. Nel tempo reale, l'universo inizia e finisce in corrispondenza di singolarità che costituiscono un confine dello spazio-tempo e in presenza delle quali la validità delle leggi scientifiche viene meno. Nel tempo immaginario, invece, non ci sono né singolarità, né confini. Può quindi darsi che quello che chiamiamo tempo immaginario sia in realtà più fondamentale, e che quel tempo che chiamiamo reale sia soltanto un'idea da noi inventata per aiutarci a descrivere ciò che pensiamo sia l'universo. Ora, però, dobbiamo tenere presente che una teoria scientifica è semplicemente un modello matematico da noi creato al fine di descrivere le nostre osservazioni. Essa esiste soltanto nella nostra mente. Non ha quindi senso chiedersi se sia reale il tempo che chiamiamo «reale» o quello che indichiamo come «immaginario»; si tratta solo di vedere quale delle due descrizioni sia la più utile.

La proposta dell'assenza di confini sembra predire che, nel tempo reale, l'universo dovrebbe comportarsi come nei modelli inflazionari. Un problema particolarmente interessante è costituito dall'entità delle piccole variazioni nella densità uniforme dell'universo primordiale, variazioni che si pensa abbiano portato dapprima alla formazione delle galassie, quindi delle stelle e infine degli esseri come noi. Il principio di indeterminazione implica l'impossibilità che l'universo primordiale sia stato perfettamente uniforme, dato che ci devono essere state alcune indeterminazioni o fluttuazioni nelle posizioni e nelle velocità delle particelle. Servendoci della condizione dell'assenza di confini, troviamo che l'universo dev'essere iniziato esattamente con il grado minimo di eterogeneità consentito dal principio di indeterminazione.

L'universo sarebbe poi passato attraverso una fase di rapida espansione, come quella prevista dai modelli inflazionari. Durante questo periodo, le eterogeneità iniziali si sarebbero amplificate fino a diventare abbastanza grandi da poter spiegare l'origine delle galassie. Così, tutte quelle complicate strutture che osserviamo nell'universo potrebbero essere spiegate dalla condizione dell'assenza di confini e dal principio di indeterminazione della meccanica quantistica.

L'idea per cui lo spazio e il tempo possono formare una superficie chiusa ma priva di confini ha anche delle profonde implicazioni per

quanto riguarda il ruolo di Dio nelle vicende dell'universo. Con il successo delle teorie scientifiche nella descrizione degli eventi, la maggior parte delle persone è giunta a credere che Dio consenta all'universo di evolversi secondo un insieme di leggi. Non sembra che egli intervenga nell'universo per sospendere la validità di queste leggi. Tuttavia, esse non ci dicono quale dev'essere stata la struttura dell'universo nel momento della sua nascita; toccherebbe ancora a Dio caricare la molla dell'orologio e scegliere come metterlo in moto. Se l'universo avesse avuto inizio con una singolarità, si potrebbe sempre supporre l'esistenza di un creatore a esso esterno. Ma se l'universo fosse davvero completamente autonomo e racchiuso in se stesso, non avendo confini o limiti esterni, esso non potrebbe essere né creato, né distrutto; esisterebbe e basta. Quale posto rimarrebbe, allora, per un creatore?

Sesta lezione:
La direzione del tempo

Nel suo libro *L'età incerta*, L.P. Hartley ha scritto che «il passato è una terra straniera, dove le cose vanno diversamente; ma perché il passato è così diverso dal futuro? Perché ricordiamo il passato, ma non il futuro?». In altri termini, perché il tempo procede in avanti? Ciò è in qualche modo legato al fatto che l'universo si sta espandendo?

C, P, T

Le leggi della fisica non distinguono fra passato e futuro. Più precisamente, esse rimangono invariate sotto la combinazione di quelle operazioni note come C, P e T (C indica lo scambio fra particelle e antiparticelle; P indica l'assunzione dell'immagine speculare, così che sinistra e destra risultino invertite; T, infine, indica l'inversione del moto di tutte le particelle, ossia il procedere all'indietro.) Le leggi della fisica che governano il comportamento della materia in tutte le normali situazioni rimangono invariate sotto le operazioni C e P prese a sé stanti. Detto in altri termini, gli abitanti di un altro pianeta che fossero la nostra immagine speculare e che fossero costituiti da antimateria anziché da materia, avrebbero comunque una vita del tutto identica alla nostra. Se però vi capitasse di incontrare un ipotetico abitante di un altro pianeta, e questi vi tendesse la mano sinistra, voi non stringetela: potrebbe essere fatto di antimateria, e, in tal caso, scomparireste entrambi in un tremendo lampo di luce. Se le leggi della fisica rimangono invariate sotto la combinazione delle operazioni C e P, e tali rimangono anche sotto la combinazione di C, P e T, allora non devono variare neppure sotto l'operazione T presa da sola. Eppure, nella vita di tutti i giorni sperimentiamo una grande differenza tra la direzione del tempo in avanti e

quella all'indietro. Immaginiamo di filmare una tazza d'acqua che, cadendo da un tavolo, si frantuma in mille pezzi sul pavimento; riguardando la registrazione, possiamo dire subito se la pellicola sta girando in avanti oppure all'indietro. Facendola girare all'indietro, vedremmo i cocci che, all'improvviso, si ricongiungono fino a ricomporre una tazza intera, che torna d'un balzo sul tavolo. Di fronte a questa scena, capiamo subito che il film sta girando all'indietro poiché, nella vita di tutti i giorni, non ci è mai dato di osservare una cosa del genere; se così fosse, i produttori di stoviglie fallirebbero.

Le frecce del tempo

Di solito, per spiegare perché non ci capita mai di vedere le tazze frantumate ricongiungersi e saltare sui tavoli, si dice che questo comportamento è proibito dalla seconda legge della termodinamica, secondo la quale, al passare del tempo, il disordine (o entropia) è sempre destinato ad aumentare. Si tratta, in altri termini, della legge di Murphy: le cose vanno sempre per il peggio. Una tazza integra sul tavolo rappresenta uno stato altamente ordinato, mentre una tazza frantumata sul pavimento rappresenta uno stato disordinato. È quindi possibile passare dalla tazza integra sul tavolo in passato alla tazza rotta sul pavimento in futuro, ma non viceversa.

L'aumento del disordine, o entropia, al passare del tempo costituisce un esempio di una cosiddetta *freccia del tempo*, ossia qualcosa che, distinguendo il passato dal futuro, dà al tempo una precisa direzione. Esistono almeno tre diverse frecce del tempo. In primo luogo, c'è la freccia del tempo termodinamica, che indica la direzione del tempo in cui il disordine o entropia viene ad aumentare. C'è poi la freccia del tempo psicologica, cioè la direzione in cui noi percepiamo il passaggio del tempo, ricordando il passato ma non il futuro. E c'è infine la freccia del tempo cosmologica, che è la direzione del tempo in cui l'universo si espande anziché contrarsi.

La tesi che sosterrò è che la freccia psicologica è determinata da quella termodinamica e che queste due frecce puntano sempre nella stessa direzione. Se assumiamo che l'universo non abbia confini, esse sono poi legate alla freccia cosmologica del tempo, anche se non è necessario che puntino sempre nella stessa direzione. Sosterrò, tuttavia, che solo quando esse puntano nella stessa direzione della freccia cosmologica, possono

esistere degli esseri intelligenti in grado di porsi la domanda: «Perché il disordine aumenta nella stessa direzione del tempo in cui l'universo si espande?».

La freccia termodinamica

Inizierò col parlare della freccia termodinamica del tempo. La seconda legge della termodinamica si basa sul fatto che gli stati disordinati sono molto più numerosi di quelli ordinati. Consideriamo, per esempio, le tessere di un puzzle racchiuse in una scatola. Esiste una e una sola disposizione in cui le tessere vengono a formare una figura completa, mentre esistono numerosissime disposizioni in cui le tessere sono in uno stato di disordine e non compongono alcuna immagine.

Supponiamo che un sistema abbia origine in uno dei pochi stati ordinati. Al passare del tempo, esso si evolverà in accordo con le leggi della fisica e, di conseguenza, il suo stato verrà a cambiare. In un momento successivo, è altamente probabile che questo sistema si troverà in uno stato di maggiore disordine, per il semplice motivo che il numero degli stati disordinati è di gran lunga superiore. Pertanto, se lo stato iniziale del sistema è altamente ordinato, il disordine tenderà a crescere col passare del tempo.

Supponiamo ora che le tessere del nostro puzzle si trovino, all'inizio, in quello stato di ordine nel quale compongono un'immagine. Se scuotiamo la scatola, le tessere verranno ad assumere un'altra disposizione che, probabilmente, sarà una disposizione disordinata, nella quale esse non formeranno più una figura significativa; questo per il semplice motivo che le disposizioni disordinate sono di gran lunga più numerose. Alcuni gruppi di tessere potranno ancora comporre parti dell'immagine originaria, ma quanto più continuiamo a scuotere la scatola, tanto più cresce la probabilità che anche questi gruppi vengano a rompersi; alla fine, quindi, le tessere si troveranno in uno stato di completo disordine, senza formare più alcuna sorta di immagine. Pertanto, se le tessere partono da uno stato iniziale altamente ordinato, è probabile che il loro disordine aumenterà al passare del tempo.

Supponiamo, tuttavia, che Dio abbia deciso che l'universo debba finire in uno stato altamente ordinato, ma che non abbia importanza in quale stato abbia avuto inizio. In questo caso, all'inizio l'universo si troverebbe probabilmente in uno stato di disordine, e questo disordine sarebbe

destinato a diminuire al passare del tempo: i cocci delle tazze si ricongiungerebbero insieme e le tazze salterebbero quindi sui tavoli. In ogni caso, qualunque essere umano che si trovasse a osservare queste tazze vivrebbe in un universo dove il disordine diminuisce col tempo. La tesi che sosterrò è che tali esseri avrebbero una freccia psicologica del tempo orientata all'indietro: essi, cioè, ricorderebbero gli eventi del futuro e non quelli del passato.

La freccia psicologica

Dato che non conosciamo ancora dettagliatamente come funzioni il nostro cervello, è alquanto difficile parlare della memoria umana. In compenso, sappiamo tutto su come funzionano le memorie dei computer. Discuterò pertanto la freccia del tempo psicologica per i computer, pensando che sia ragionevole assumere che si tratti della stessa freccia che caratterizza anche gli esseri umani; se non lo fosse, infatti, sarebbe possibile fare man bassa sul mercato azionario sfruttando un computer in grado di ricordare le quotazioni di domani.

Fondamentalmente, la memoria di un computer è un dispositivo che può essere in uno dei due stati differenti. Come esempio, possiamo prendere un circuito realizzato in un materiale superconduttore. Se per questo circuito passa la corrente elettrica, questa corrente continuerà ad attraversarlo, dato che non c'è resistenza; d'altro lato, anche quando non è attraversato dalla corrente, il nostro circuito continuerà comunque a sussistere. Possiamo indicare questi due stati della memoria rispettivamente come «uno» e «zero».

Prima che vi sia registrata un'informazione, la memoria si trova in uno stato di disordine, con eguali probabilità per l'uno e per lo zero; dopo aver immagazzinato l'informazione, essa si troverà invece ad assumere un valore ben definito fra i due possibili, a seconda dell'informazione stessa (o del sistema di informazioni). La memoria viene così a passare da uno stato di disordine a uno di ordine. Per essere certi, però, che la memoria si trovi nello stato corretto, è necessario usare una determinata quantità di energia, che viene dissipata sotto forma di calore e va ad accrescere la quantità totale di disordine dell'universo. È possibile dimostrare che questo aumento del disordine totale è superiore all'aumento di ordine nella memoria; quindi, ogni volta che un computer memorizza

un'informazione, l'ammontare complessivo del disordine nell'universo viene a crescere.

La direzione del tempo nella quale un computer ricorda il passato è la stessa nella quale aumenta il disordine complessivo dell'universo. Ciò significa che il nostro senso soggettivo della direzione del tempo (la freccia psicologica del tempo) è determinato dalla freccia termodinamica del tempo. Questo fatto rende quasi banale la seconda legge della termodinamica: il disordine aumenta al passare del tempo perché noi misuriamo il tempo nella direzione in cui il disordine aumenta. Non c'è nulla di cui possiamo essere più sicuri.

Le condizioni di confine dell'universo

Ma perché mai, in un determinato limite estremo del tempo (quello che indichiamo come passato, all'inizio del tempo stesso), l'universo dovrebbe trovarsi in uno stato altamente ordinato? Perché non si è sempre trovato in uno stato di completo disordine? Dopotutto, quest'ultimo assetto potrebbe sembrare il più probabile. E perché, poi, la direzione del tempo nella quale il disordine aumenta è la stessa in cui l'universo si espande? Una possibile risposta è che Dio ha semplicemente scelto che, all'inizio della fase di espansione, l'universo dovesse trovarsi in uno stato omogeneo e uniforme. Non dovremmo cercare di comprendere o mettere in questione le Sue ragioni, poiché l'origine dell'universo è stata l'opera stessa di Dio. Ma, a ben vedere, l'intera storia dell'universo può essere considerata come l'opera di Dio.

Stando a quanto appare, l'universo si evolve secondo leggi ben definite. Queste leggi potranno essere state stabilite o meno da Dio, ma sembra comunque che noi siamo in grado di scoprirle e di comprenderle. È quindi così irragionevole sperare che queste stesse leggi, o leggi simili, possano valere anche in corrispondenza dell'inizio dell'universo? Nella teoria classica della relatività generale, l'universo ha avuto inizio con una singolarità la cui densità e curvatura dello spazio-tempo avevano un valore infinito. Sotto tali condizioni, tutte le leggi della fisica a noi note perderebbero la loro validità, così che non potremmo servircene per predire come l'universo avrebbe dovuto iniziare.

L'universo potrebbe aver avuto inizio in uno stato molto omogeneo e ordinato; la freccia del tempo cosmologica e quella termodinamica sarebbero così state ben definite, come quelle che di fatto osserviamo

oggi. Tuttavia, sarebbe stata egualmente possibile anche una condizione iniziale molto eterogenea e disordinata. In questo caso, l'universo si troverebbe già in uno stato di completo disordine, così che il disordine non potrebbe crescere al passare del tempo; potrebbe solo o rimanere costante (nel qual caso non ci sarebbe una freccia termodinamica del tempo ben definita), oppure diminuire (nel qual caso la freccia termodinamica del tempo punterebbe in direzione opposta rispetto a quella cosmologica), ma né l'una né l'altra di queste due possibilità corrisponde a ciò che di fatto osserviamo.

Ma, come accennavo sopra, la teoria classica della relatività generale predice che l'universo deve aver avuto inizio con una singolarità, con un punto in cui la curvatura dello spazio-tempo è infinita. Di fatto, ciò significa che la relatività generale classica predice il suo proprio venir meno, poiché quando la curvatura dello spazio-tempo diventa molto accentuata, gli effetti gravitazionali quantistici acquistano un'importanza rilevante e la teoria classica cessa di essere una buona descrizione dell'universo. Per comprendere la nascita dell'universo, dobbiamo pertanto ricorrere alla teoria quantistica della gravità.

In una teoria quantistica della gravità, si considerano tutte le possibili storie dell'universo. A ciascuna di esse è associata una coppia di numeri, uno dei quali rappresenta le dimensioni di un'onda e l'altro il suo aspetto (ossia, se l'onda si presenta come una curva verso l'alto oppure verso il basso). La probabilità che l'universo abbia una determinata proprietà si calcola sommando le onde per tutte le storie che hanno quella proprietà. Le storie sarebbero degli spazi curvi che rappresentano l'evoluzione dell'universo al passare del tempo. Ci si potrebbe ancora chiedere in che modo si sarebbero comportate queste storie in quel punto corrispondente al confine dello spazio-tempo nel passato. Noi non conosciamo, né possiamo conoscere, quali siano state le condizioni di confine dell'universo nel passato. Tuttavia, potremmo evitare questa difficoltà se la condizione di confine dell'universo fosse proprio quella di non avere un confine. In altri termini, tutte le possibili storie avrebbero un'estensione finita, ma non avrebbero confini, margini estremi o singolarità. Sarebbero come la superficie della Terra, ma con due dimensioni in più. In questo caso, il principio del tempo sarebbe un normale punto omogeneo dello spazio-tempo. Ciò significa che l'universo avrebbe iniziato la propria espansione in uno stato molto omogeneo e ordinato. Non avrebbe potuto comunque essere totalmente uniforme, poiché in tal caso avrebbe violato il principio di indeterminazione della meccanica quantistica; dovettero

quindi esserci delle piccole fluttuazioni nella densità e nella velocità delle particelle. Secondo la condizione dell'assenza di confini, però, queste fluttuazioni erano ridotte al minimo indispensabile richiesto dal principio di indeterminazione.

L'universo avrebbe avuto inizio con un periodo di espansione esponenziale o «inflazionaria», nel quale le sue dimensioni sarebbero cresciute di un fattore molto elevato. Durante questa espansione, le fluttuazioni di densità sarebbero dapprima rimaste piccole ma, successivamente, avrebbero cominciato a crescere. Le regioni in cui la densità era leggermente più accentuata della media avrebbero subito un rallentamento della loro espansione proprio per via di questa massa supplementare; e, alla fine, avrebbero smesso di espandersi per iniziare a contrarsi, dando così origine alle galassie, alle stelle e agli esseri come noi.

L'universo avrebbe quindi avuto origine in uno stato omogeneo e ordinato, e sarebbe diventato eterogeneo e disordinato al passare del tempo. Ciò spiegherebbe l'esistenza della freccia termodinamica del tempo: l'universo inizierebbe in uno stato altamente ordinato e diventerebbe disordinato al passare del tempo. Come ho mostrato sopra, la freccia psicologica del tempo punta nella stessa direzione di quella termodinamica. Il nostro senso soggettivo del tempo – la direzione con cui distinguiamo il passato dal futuro – corrisponderebbe pertanto alla direzione in cui l'universo si espande, anziché a quella opposta, in cui esso si contrae.

La freccia del tempo è reversibile?

Ma che cosa accadrebbe se e quando l'universo cessasse di espandersi e iniziasse a contrarsi di nuovo? La direzione della freccia termodinamica si invertirebbe e il disordine inizierebbe a decrescere al passare del tempo? Ciò aprirebbe ogni sorta di possibilità fantascientifiche per coloro che fossero riusciti a sopravvivere nel passaggio dalla fase di espansione a quella di contrazione. Queste persone vedrebbero i cocci delle tazze rotte ricongiungersi assieme e tornare con un balzo dal pavimento al tavolo? Sarebbero in grado di ricordarsi le quotazioni di Borsa di domani, così da farsi una fortuna sul mercato azionario?

Potrebbe sembrare un po' accademico preoccuparsi ora di che cosa dovrebbe accadere qualora l'universo tornasse a contrarsi, visto che di

certo non inizierà a farlo per almeno altri dieci miliardi di anni. C'è però anche un modo più veloce per scoprire che cosa accadrà allora: saltare dentro a un buco nero. Il collasso di una stella fino alla formazione di un buco nero è piuttosto simile agli ultimi stadi del collasso dell'intero universo; pertanto, se il disordine dovesse diminuire nella fase di contrazione dell'universo, ci si potrebbe aspettare che esso diminuisca anche all'interno di un buco nero. Così, un astronauta caduto dentro a un buco nero riuscirebbe forse a farsi una fortuna giocando alla roulette e ricordandosi, prima ancora di scommettere, i numeri effettivamente usciti. Sfortunatamente, però, non potrebbe giocare a lungo prima di essere ridotto a uno spaghetti dal fortissimo campo gravitazionale. E non potrebbe neppure farci sapere nulla sull'inversione della freccia termodinamica (né potrebbe incassare le sue vincite), dato che sarebbe intrappolato dietro all'orizzonte degli eventi del buco nero.

In principio credevo che, nella fase di ricontrazione dell'universo, il disordine sarebbe diminuito; pensavo infatti che, riducendosi nuovamente a piccole dimensioni, l'universo dovesse ritornare a uno stato omogeneo e ordinato. La fase di contrazione sarebbe quindi stata simile all'inversione temporale della fase di espansione; in essa, le persone avrebbero vissuto le loro vite a ritroso, morendo prima di nascere e ringiovanendo al procedere della contrazione dell'universo. Quest'idea è attraente, poiché comporta l'esistenza di una bella simmetria tra la fase di espansione e quella di contrazione. Non è però possibile adottarla come una singola tesi isolata, indipendentemente dalle altre nostre idee sull'universo. La domanda è quindi: questa tesi è implicata dalla condizione dell'assenza di confini, o è in contraddizione con tale condizione?

Come ho accennato, in principio pensavo che la condizione dell'assenza di confini implicasse proprio che, nella fase di contrazione, il disordine sarebbe diminuito. Mi basavo sul lavoro svolto su un modello semplificato dell'universo, nel quale la fase di collasso assomigliava all'inversione temporale della fase di espansione. Un mio collega, Don Page, mi fece però notare che la condizione dell'assenza di confini non richiedeva necessariamente che la fase di contrazione fosse l'inversione temporale di quella di espansione. Inoltre un mio allievo, Raymond Laflamme, scoprì poi che, in un modello leggermente più complesso, il collasso dell'universo era profondamente diverso dalla sua espansione. Compresi quindi che mi ero sbagliato e che, di fatto, la condizione dell'assenza di confini implicava che il disordine avrebbe continuato a crescere anche durante la fase di contrazione. La freccia del tempo

termodinamica e quella psicologica non avrebbero invertito la loro direzione all'inizio della fase di contrazione dell'universo (o, prima di allora, all'interno dei buchi neri).

Che cosa dovrebbe fare una persona quando si accorge di aver commesso un errore di questa portata? Alcuni, come Eddington, non ammettono mai di avere torto, e continuano a trovare nuovi argomenti – spesso anche in contraddizione fra loro – per sostenere le proprie tesi. Altri affermano invece di non avere mai realmente sostenuto la teoria sbagliata, oppure dicono che, se l'hanno fatto, era solo per mostrare la sua contraddittorietà. Potrei citare un gran numero di esempi, ma mi guarderò bene dal farlo, visto che ciò mi renderebbe troppo impopolare. Dal canto mio, mi sembra molto meglio e molto più chiaro ammettere in una pubblicazione di essersi sbagliati. Un buon esempio in proposito ci è stato dato da Einstein, che definì la costante cosmologica, da lui introdotta mentre cercava di costruire un modello statico dell'universo, come il più grande errore della sua vita.

Settima lezione:
La teoria del tutto

Sarebbe molto difficile costruire di getto una teoria unificata completa in grado di dare una spiegazione a ogni cosa. Così, anziché seguire questa strada, abbiamo compiuto progressi scoprendo via via teorie parziali, che descrivono un ambito limitato di fenomeni e ne trascurano altri, o li considerano usando valori approssimativi. In chimica, per esempio, siamo in grado di calcolare le interazioni fra gli atomi anche senza conoscere la struttura interna del loro nucleo. Ciononostante, la nostra speranza resta quella di trovare infine una teoria unificata, coerente e completa, che includa tutte queste teorie parziali come semplici approssimazioni. La ricerca di una tale teoria viene indicata come «l'unificazione della fisica».

Einstein dedicò la maggior parte dei suoi ultimi anni all'infruttuosa ricerca di una teoria unificata, ma i tempi non erano ancora maturi: si sapeva infatti ancora ben poco sulle forze nucleari. Inoltre, Einstein si rifiutava di credere nella realtà della meccanica quantistica, nonostante avesse giocato un ruolo importante nello sviluppo di questa teoria. Tuttavia, sembra che il principio di indeterminazione costituisca un tratto fondamentale dell'universo in cui viviamo; una teoria unificata, per poter raggiungere il proprio obiettivo, dovrà quindi necessariamente incorporare questo principio.

Oggi le prospettive di trovare una teoria unificata sembrano migliori, poiché sappiamo molto di più sull'universo. Dobbiamo comunque guardarci da un eccesso di fiducia, visto che non sarebbe la prima volta che nutriamo false speranze. Agli inizi del XX secolo, per esempio, si pensava che fosse possibile spiegare ogni cosa nei termini delle proprietà della materia continua, come l'elasticità e la conduzione del calore. La scoperta della struttura dell'atomo e il principio di indeterminazione posero fine a queste illusioni. Poi, di nuovo, nel 1928, Max Born disse a un gruppo di persone in visita all'Università di Göttingen che «la fisica, come

la conosciamo oggi, entro sei mesi potrà dirsi una scienza compiuta». La sua fiducia si basava sulla recente scoperta, da parte di Dirac, dell'equazione che governava l'elettrone. Si pensava che un'equazione simile governasse anche il protone (l'unica altra particella conosciuta all'epoca), e che la sua scoperta avrebbe segnato la conclusione della ricerca nell'ambito della fisica teorica. Arrivò invece la scoperta del neutrone e delle forze nucleari, che seppellì anche questa illusione.

Detto questo, continuo però a credere che ci siano motivi di cauto ottimismo per sperare che oggi potremmo essere vicini alla fine della ricerca delle leggi ultime della natura. Al momento, abbiamo un certo numero di teorie parziali: la relatività generale, la teoria parziale della gravità e le teorie parziali che governano la forza debole, quella forte e quella elettromagnetica. Le ultime tre possono essere combinate nelle cosiddette grandi teorie unificate, le quali però, non includendo la gravità, non risultano ancora molto soddisfacenti. La difficoltà principale nel trovare una teoria che unifichi la gravità con le altre forze è data dal fatto che la relatività generale è una teoria classica, ossia non incorpora il principio di indeterminazione della meccanica quantistica. Le altre teorie parziali, dal canto loro, dipendono in modo essenziale dalla meccanica quantistica. Un primo passo da compiersi, quindi, è quello di combinare la relatività generale con il principio di indeterminazione. Come abbiamo visto, ciò può portare a conseguenze notevoli, come l'idea che i buchi neri non siano neri e che l'universo sia completamente racchiuso in se stesso e privo di un confine. Il problema è che, secondo il principio di indeterminazione, anche lo spazio vuoto è, in realtà, pieno di coppie di particelle e antiparticelle virtuali; ora, dato che queste coppie dovrebbero avere una quantità di energia infinita, la loro attrazione gravitazionale dovrebbe incurvare l'universo riducendolo a dimensioni infinitamente piccole.

In modo più o meno simile, anche nelle altre teorie quantistiche compaiono delle quantità infinite apparentemente assurde; in queste teorie, però, esse possono essere cancellate per mezzo di un procedimento chiamato «rinormalizzazione». Con questo procedimento, le masse delle particelle e le intensità delle forze che compaiono in una teoria vengono normalizzate tramite l'introduzione di un'ulteriore quantità infinita. Pur essendo alquanto dubbia sotto il profilo matematico, sul piano pratico questa tecnica sembra funzionare, ed è stata usata per fare delle predizioni che si accordano in modo straordinariamente preciso con le osservazioni empiriche. Dal punto di vista della ricerca di una teoria completa, però, la

rinormalizzazione presenta un grave inconveniente: quando sottraiamo l'infinito dall'infinito, possiamo ottenere qualunque risultato vogliamo. Ciò significa che gli attuali valori delle masse e le intensità delle forze non possono essere predetti dalla teoria stessa, ma devono essere volutamente scelti in modo da conciliarsi con le osservazioni. Nel caso della relatività generale, ci sono solo due quantità che possono essere aggiustate con la tecnica di rinormalizzazione: la forza di gravità e il valore della costante cosmologica. La normalizzazione di questi valori, però, non è sufficiente a rimuovere tutti gli infiniti. Abbiamo così una teoria che sembra prevedere che certe quantità, come la curvatura dello spazio-tempo, siano realmente infinite; sennonché, osservandole e misurandole, scopriamo che esse sono perfettamente finite. In un tentativo di superare questo problema, nel 1976 venne avanzata la cosiddetta teoria della «supergravità», che, in realtà, era la stessa relatività generale con alcune particelle in più.

Nella relatività generale, possiamo pensare che la forza gravitazionale sia veicolata da una particella di spin 2, chiamata gravitone. L'idea era quella di aggiungere certe altre nuove particelle di spin $3/2$, 1, $1/2$ e 0. In un certo senso, tutte queste particelle potrebbero essere considerate come differenti aspetti della medesima «superparticella». Le coppie virtuali particella/antiparticella di spin $1/2$ e $3/2$ avrebbero energia negativa, e ciò tenderebbe a cancellare l'energia positiva delle particelle di spin 0, 1 e 2. In questo modo, molti dei possibili infiniti verrebbero eliminati; restava però il sospetto che qualche infinito potesse ancora rimanere. Tuttavia, i calcoli richiesti per scoprire se ci fossero ancora degli infiniti non cancellati erano così lunghi e difficili che nessuno si sentiva preparato ad affrontarli. Si stimava che, anche con un computer, ci sarebbero voluti almeno quattro anni, e le probabilità di commettere un errore, o anche più di uno, erano estremamente elevate. In sostanza, uno avrebbe avuto la certezza di essere giunto alla risposta corretta solo se qualcun altro avesse ripetuto i calcoli trovando la stessa risposta, cosa che non sembrava molto probabile.

Per via di questo problema, ci fu un mutamento di opinione in favore delle cosiddette teorie delle stringhe (*string theories*). In queste teorie, gli oggetti fondamentali non sono particelle che occupano un singolo punto dello spazio, bensì cose che hanno una lunghezza ma nessun'altra dimensione, come un anello di filo infinitamente sottile. Una particella occupa un punto dello spazio in ogni istante del tempo, così che la sua storia può essere rappresentata da una linea nello spazio-tempo, la

cosiddetta «linea d'universo» (*world-line*). Una stringa, dal canto suo, occupa una linea nello spazio in ogni istante del tempo, così che la sua storia nello spazio-tempo è data da una superficie bidimensionale chiamata il «foglio d'universo» (*world-sheet*). Ogni punto su un tale foglio d'universo può essere descritto da due numeri, uno dei quali specifica il tempo e l'altro la posizione del punto sulla stringa. Il foglio d'universo di una stringa è un cilindro, o un tubo; una sezione di questo tubo è un cerchio, che rappresenta la posizione della stringa in un particolare istante.

Due pezzi di stringa possono unirsi insieme per formare un'unica stringa, un po' come le due gambe di un paio di pantaloni. Similmente, un singolo pezzo di stringa può dividersi in due stringhe. Nelle teorie delle stringhe, quelle che in precedenza erano concepite come particelle vengono ora raffigurate come onde che viaggiano lungo la stringa, un po' come delle onde su una corda per stendere il bucato. L'emissione o l'assorbimento di una particella da parte di un'altra corrispondono, rispettivamente, alla divisione o alla congiunzione delle stringhe. Per esempio, la forza gravitazionale esercitata dal Sole sulla Terra corrisponde a un tubo a forma di H. In un certo senso, la teoria delle stringhe assomiglia un po' all'idraulica. Le onde lungo i due tratti verticali dell'H corrispondono alle particelle nel Sole e nella Terra, e le onde lungo il tratto orizzontale corrispondono alla forza gravitazionale che viaggia fra l'uno e l'altra.

La teoria delle stringhe ha una storia curiosa. Fu inventata verso la fine degli anni Sessanta nel tentativo di trovare una teoria che descrivesse la forza forte. L'idea di fondo era che le particelle come il protone e il neutrone potessero essere considerate come onde lungo una stringa. Le forze forti tra le particelle corrisponderebbero a pezzi di stringa che si uniscono ad altri pezzi di stringa, un po' come in una ragnatela. Perché questa teoria possa dare il valore effettivamente osservato della forza forte tra le particelle, le stringhe dovrebbero essere simili a elastici con un potenziale di trazione di circa dieci tonnellate.

Nel 1974, Joël Scherk e John Schwarz pubblicarono un articolo in cui dimostravano che la teoria delle stringhe potrebbe descrivere la forza gravitazionale, ma solo se la tensione nella stringa fosse estremamente più elevata (circa 10^{39} tonnellate). Su scale di lunghezza ordinarie, le predizioni della teoria delle stringhe sarebbero esattamente le stesse di quelle della relatività generale; si differenzerebbero però da queste ultime a distanze estremamente piccole, minori di 10^{-33} centimetri. La loro ricerca non ricevette però molta attenzione, poiché proprio in quel periodo

la maggior parte degli scienziati abbandonò la teoria originaria delle stringhe sulla forza forte. Scherk morì in circostanze tragiche: soffriva di diabete e cadde in coma quando non c'era nessuno vicino a lui che gli potesse praticare un'iniezione di insulina. Così Schwarz rimase da solo come quasi unico sostenitore della teoria delle stringhe, ma ora con la proposta di un valore molto più elevato per la tensione delle corde.

Sembra che ci siano state due ragioni alla base dell'improvvisa rinascita, nel 1984, dell'interesse verso le stringhe. Una di queste ragioni era che, in realtà, non si stavano facendo molti progressi nel cammino della dimostrazione che la supergravità garantisse valori finiti o che fosse in grado di spiegare i tipi di particelle che di fatto osserviamo. L'altra fu la pubblicazione di un articolo di John Schwarz e Mike Green in cui si dimostrava che la teoria delle stringhe potrebbe spiegare l'esistenza di particelle intrinsecamente sinistrorse, come alcune delle particelle che osserviamo nella realtà. Per una ragione o per l'altra, comunque, un gran numero di persone iniziarono ben presto a lavorare sulla teoria delle stringhe. Ne venne sviluppata una nuova versione, la cosiddetta teoria delle stringhe eterotiche, che sembrava in grado di spiegare i tipi di particelle che osserviamo.

Anche le teorie delle stringhe conducono a quantità infinite, ma si pensa che questi infiniti verranno cancellati completamente in versioni come quella delle stringhe eterotiche. Le teorie delle stringhe, però, presentano un problema più grande: sembrano cioè essere consistenti solo sotto la condizione che lo spazio-tempo abbia dieci oppure ventisei dimensioni, al posto delle solite quattro. Naturalmente, le ulteriori dimensioni spazio-temporali sono un luogo comune nella fantascienza, dove costituiscono quasi una necessità: se non ci fossero, infatti, data l'impossibilità di viaggiare a una velocità superiore a quella della luce – impossibilità dettata dalla teoria della relatività – gli spostamenti all'interno della nostra galassia (per non parlare di quelli fra una galassia e l'altra) richiederebbero tempi troppo lunghi per essere accettabili. L'idea della fantascienza è che uno potrebbe prendere una scorciatoia passando per una dimensione superiore. È possibile visualizzare quest'idea nel modo seguente. Immaginiamo che lo spazio in cui viviamo abbia soltanto due dimensioni e sia incurvato come la superficie interna di una ciambella o del solido geometrico noto come toro. Se ci trovassimo su un lato dell'anello e volessimo raggiungere un punto sul lato opposto, dovremmo muoverci lungo la superficie dell'anello stesso; se però fossimo in grado

di viaggiare in una terza dimensione, potremmo raggiungere direttamente quel punto tagliando per il centro dell'anello.

Ma perché, se tutte queste ulteriori dimensioni esistono realmente, noi non le percepiamo? Perché vediamo soltanto tre dimensioni spaziali e una temporale? L'ipotesi è che le altre dimensioni siano arrotolate in uno spazio estremamente piccolo, dell'ordine di un milionesimo di centimetro; uno spazio così piccolo che semplicemente non potremmo percepirlo. Noi vediamo soltanto le tre dimensioni spaziali e quella temporale, nelle quali lo spazio-tempo è completamente piatto. È un po' come per la superficie di un'arancia: se la osserviamo da vicino è tutta incurvata e corrugata, ma se la guardiamo da lontano non siamo in grado di vederne le irregolarità e ci sembra liscia. Lo stesso vale anche per lo spazio-tempo: su una scala estremamente ridotta è decadimensionale e altamente incurvato, ma su scale maggiori noi non ne percepiamo la curvatura o le ulteriori dimensioni.

Se questo quadro è corretto, ci sono cattive notizie per gli aspiranti viaggiatori dello spazio: le ulteriori dimensioni, infatti, sarebbero di gran lunga troppo piccole per permettere il passaggio di un'astronave. Ma c'è comunque anche un problema più grande. Perché alcune delle dimensioni, ma non tutte, dovrebbero essere arrotolate in una piccola palla? È presumibile che, nei primissimi stadi della vita dell'universo, tutte le dimensioni siano state estremamente incurvate. Ma perché, allora, solo tre dimensioni spaziali e una temporale si sono poi spianate, mentre le altre sono rimaste saldamente arrotolate su se stesse?

Una possibile risposta è data dal principio antropico. Due dimensioni spaziali non sembrano sufficienti per consentire lo sviluppo di esseri complicati come noi. Per esempio, delle persone bidimensionali che vivessero su una Terra unidimensionale dovrebbero scavalcarsi a vicenda per potersi superare. Se una creatura bidimensionale mangiasse qualcosa che non fosse in grado di digerire completamente, dovrebbe espellere i residui di cibo per la stessa via per cui li aveva ingeriti, perché se ci fosse un canale digerente che attraversasse tutto il suo corpo, esso dividerebbe la creatura in due parti separate. Il nostro essere bidimensionale cadrebbe a pezzi. Similmente, è difficile immaginare come, in una creatura bidimensionale, ci potrebbe essere una qualche circolazione sanguigna. Ci sarebbero però dei problemi anche nel caso che le dimensioni spaziali fossero più di tre. L'attrazione gravitazionale fra due corpi diminuirebbe con la distanza più rapidamente di quanto non faccia in tre dimensioni. Di conseguenza, le orbite dei pianeti che, come la Terra, si muovono attorno

al Sole sarebbero instabili: basterebbe la più piccola deviazione da un'orbita circolare – come quella che sarebbe causata dall'attrazione gravitazionale di altri pianeti – per far immettere la Terra su una traiettoria a spirale che la porterebbe ad allontanarsi sempre più dal Sole o a precipitare in esso. In altre parole, finiremmo congelati oppure arsi. Di fatto, poi, questo comportamento della gravità in relazione alla distanza renderebbe instabile anche lo stesso Sole: esso finirebbe per andare a pezzi, oppure per collassare fino a formare un buco nero; in un caso come nell'altro, non potrebbe più servirci molto come fonte di luce e calore per la vita sulla Terra. Su una scala più piccola, le forze elettriche che, in un atomo, causano il movimento orbitale degli elettroni attorno al nucleo si comporterebbero nello stesso modo delle forze gravitazionali. Di conseguenza, gli elettroni o sfuggirebbero completamente dall'atomo, oppure cadrebbero nel nucleo seguendo una traiettoria a spirale; nell'uno come nell'altro caso, non potrebbero esistere gli atomi quali li conosciamo oggi.

Sembra quindi chiaro che la vita, almeno come la conosciamo noi, può esistere solo in regioni dello spazio-tempo in cui tre dimensioni spaziali e una temporale non siano fortemente arrotondate su se stesse. Ciò significa che ci si potrebbe appellare al principio antropico, ammesso che sia possibile dimostrare che la teoria delle stringhe permetta resistenza di tali regioni dell'universo; e, in effetti, sembra che tutte le teorie delle stringhe la permettano. Ci potrebbero benissimo essere altre regioni dell'universo (o altri universi, qualunque cosa quest'espressione possa significare) nelle quali tutte le dimensioni siano fortemente arrotondate su se stesse, o nelle quali quelle quasi totalmente dispiegate siano più di quattro; tuttavia, in tali regioni non ci sarebbero esseri intelligenti in grado di cogliere questa differenza nel numero delle dimensioni effettivamente osservabili.

Anche a prescindere dalla questione del numero di dimensioni che lo spazio-tempo sembra possedere, la teoria delle stringhe ha ancora diversi altri problemi che devono essere risolti prima che la si possa acclamare come la teoria unificata definitiva della fisica. Non sappiamo ancora se tutti gli infiniti si cancellino fra di loro, né come vadano esattamente correlate le onde lungo le stringhe con i determinati tipi di particelle che di fatto osserviamo. Ciononostante, è probabile che le risposte a queste domande verranno trovate nel giro di pochi anni, e che per la fine del secolo saremo in grado di dire se la teoria delle stringhe è davvero quella teoria unificata della fisica che ricerchiamo da tanto tempo.

Ma può esistere veramente una teoria unificata del tutto? O ciò che stiamo inseguendo è soltanto un miraggio? Sembra che le possibilità siano tre.

- Esiste realmente una teoria unificata completa, che un giorno, se siamo abbastanza intelligenti, riusciremo a scoprire.
- Non esiste una teoria definitiva dell'universo, ma solo un'infinita serie di teorie che lo descrivono in modo sempre più accurato.
- Non esiste alcuna teoria dell'universo. Al di là di un certo limite, gli eventi si verificano in modo casuale e arbitrario e, come tali, non possono essere predetti.

Alcuni argomenterebbero a favore della terza possibilità sostenendo che, se ci fosse un insieme completo di leggi, verrebbe violata la libertà di Dio di cambiare parere e intervenire nel mondo. È un po' come il vecchio paradosso: Dio potrebbe creare una pietra così pesante da non essere in grado di sollevarla? Ma l'idea stessa che Dio possa voler cambiare parere è un esempio di quella fallacia, evidenziata da sant'Agostino, che consiste nell'immaginare Dio come un essere esistente nel tempo. Il tempo, invece, è una proprietà che si riferisce esclusivamente all'universo che Dio ha creato; e, presumibilmente, Egli, quando lo creò, sapeva ciò che voleva.

Con l'avvento della meccanica quantistica, siamo giunti a comprendere che gli eventi non possono essere predetti con un'accuratezza assoluta, ma che rimane sempre un certo grado di indeterminazione. Volendo, si potrebbe anche ascrivere questa casualità all'intervento di Dio. Ma sarebbe un tipo di intervento molto strano: non c'è infatti prova che sia diretto a un qualche fine (e anzi, se così fosse, non potremmo più parlarne in termini di casualità). In tempi moderni, abbiamo effettivamente rimosso la terza possibilità ridefinendo lo scopo della scienza: il nostro obiettivo, cioè, è oggi quello di formulare un insieme di leggi che ci permettano di predire gli eventi solo fino al limite fissato dal principio di indeterminazione.

La seconda possibilità, che è quella di una serie infinita di teorie sempre più perfezionate, è in accordo con tutta l'esperienza che abbiamo finora maturato. In numerose occasioni, abbiamo accresciuto la sensibilità delle nostre misurazioni o abbiamo introdotto una nuova classe di osservazioni solo per poi scoprire nuovi fenomeni che non erano predetti dalla teoria esistente. Per spiegare questi nuovi fenomeni, abbiamo dovuto sviluppare una teoria più avanzata. Non ci sarebbe quindi molto di che

stupirsi se le nostre attuali grandi teorie unificate si rivelassero inadeguate una volta messe alla prova con acceleratori di particelle più grandi e più potenti di quelli che abbiamo oggi a disposizione. Anzi, se non ci aspettassimo affatto di poterle superare, non avrebbe molto senso spendere un sacco di soldi per la costruzione di macchine più potenti.

Sembra, tuttavia, che la gravità possa porre un limite a questa serie di «scatole cinesi». Se avessimo una particella con un'energia superiore alla cosiddetta energia di Planck, pari a 10^{19} GeV, la sua massa sarebbe così concentrata che essa si separerebbe dal resto dell'universo e formerebbe un piccolo buco nero. Pare quindi che, procedendo verso energie sempre più elevate, la serie di teorie via via più raffinate dovrebbe infine incontrare un limite: ci dovrebbe essere, pertanto, una qualche teoria definitiva dell'universo. Ovviamente, l'energia di Planck è qualcosa di incredibilmente lontano dalle energie che possiamo attualmente produrre in laboratorio, che si aggirano al massimo intorno a un GeV. Per superare questo abisso, occorrerebbe un acceleratore di particelle più grande dell'intero sistema solare; ma, coi tempi di crisi economica che corrono, è poco probabile che il progetto di un acceleratore del genere riceva i finanziamenti necessari.

Tuttavia, energie di questo livello devono essersi dispiagate nei primissimi stadi della vita dell'universo. Penso che ci siano buone probabilità che lo studio dell'universo primordiale e i requisiti di consistenza matematica ci possano condurre, entro la fine del secolo, a una teoria unificata completa (sempre ammesso che non ci facciamo saltare in aria prima).

Quale significato avrebbe questa nostra eventuale scoperta della teoria definitiva dell'universo? Essa metterebbe fine a un lungo e glorioso capitolo nella storia del nostro sforzo di comprendere l'universo, ma rivoluzionerebbe anche la comprensione che la gente comune ha delle leggi che lo governano. Ai tempi di Newton, per una persona istruita era ancora possibile conoscere, almeno in linea generale, l'intero ambito del sapere umano. Da allora in poi, però, il ritmo dello sviluppo della scienza ha reso impossibile una simile impresa: le teorie vengono continuamente modificate per tener conto di nuove osservazioni e non c'è quindi tempo perché vengano debitamente assimilate o semplificate in modo che anche la gente comune possa capirle. Per farlo bisogna essere degli specialisti, e anche in questo caso tutto ciò che si può sperare è di raggiungere una buona comprensione di una piccola parte dell'insieme delle teorie scientifiche.

Inoltre, il ritmo del progresso è così rapido che ciò che uno impara a scuola o all'università è sempre un po' superato. Solo poche persone riescono a tenersi al passo con la rapida avanzata delle frontiere della conoscenza, dedicandovi tutto il proprio tempo e specializzandosi in una piccola area tematica. Il resto della popolazione sa ben poco sui progressi che vengono compiuti o sull'eccitazione che essi suscitano.

Se si deve credere a Eddington, settant'anni fa solo due persone capivano la teoria della relatività generale. Oggi decine di migliaia di laureati la comprendono, e molti milioni di persone hanno perlomeno acquisito una certa familiarità con la sua idea di fondo. Se scopriremo una teoria completa unificata, anch'essa verrebbe assimilata e semplificata allo stesso modo; sarebbe solo questione di tempo. Potrebbe essere insegnata nelle scuole, almeno a grandi linee. Tutti noi potremmo allora avere una certa comprensione delle leggi che governano l'universo e dalle quali dipende la nostra esistenza.

Una volta, Einstein si pose questa domanda: «Quanto fu ampia la libertà di scelta di Dio nella costruzione dell'universo?». Se la proposta dell'assenza di confini è corretta, Egli non ebbe alcuna libertà nella scelta delle condizioni iniziali. Avrebbe avuto ancora, naturalmente, la libertà di scegliere le leggi alle quali l'universo doveva obbedire, ma questa, in realtà, potrebbe non essere stata poi una gran scelta: ci potrebbero infatti essere soltanto poche (e forse solo una) teorie complete unificate non autocontraddittorie e tali da permettere l'esistenza di esseri intelligenti.

Ma possiamo interrogarci sulla natura di Dio anche se c'è solo una possibile teoria unificata, che si riduce a un semplice insieme di leggi ed equazioni. Che cos'è che soffia il fuoco vitale nelle equazioni, e crea un universo che esse possono descrivere? L'approccio solitamente adottato dalla scienza, quello di costruire dei modelli matematici, non può rispondere alla domanda del perché dovrebbe esserci un universo descrivibile da quei modelli. Perché mai l'universo si dà pena di esistere? La teoria unificata ha una forza tale da determinare la sua propria esistenza? O ha invece bisogno di un creatore? E, in tal caso, questo creatore esercita qualche altro effetto sull'universo oltre a essere responsabile della sua esistenza? E chi ha creato questo creatore?

Fino a oggi, gli scienziati sono stati troppo occupati a elaborare nuove teorie che descrivono che cos'è l'universo per porsi la domanda del perché. D'altro canto, le persone il cui lavoro è proprio quello di chiedersi il perché delle cose – ossia i filosofi – non sono riuscite a tenere il passo con il progresso delle teorie scientifiche. Nel XVIII secolo, essi ritenevano

che l'intero scibile umano, scienza inclusa, fosse di loro competenza, e discutevano su questioni come «L'universo ha avuto un inizio?». Nel corso del XIX e del XX secolo, però, la scienza è diventata troppo tecnica e troppo matematica per i filosofi o per chiunque altro, tranne per pochi specialisti. I filosofi hanno quindi a tal punto ridotto l'ambito delle proprie ricerche che Ludwig Wittgenstein, il filosofo più illustre del XX secolo, è venuto ad affermare che «L'unico compito che resta alla filosofia è l'analisi del linguaggio». Che declino rispetto a quella grande tradizione filosofica che da Aristotele va fino a Kant!

Tuttavia, se riuscissimo a scoprire una teoria completa, col tempo tutti – e non solo pochi scienziati – dovrebbero essere in grado di comprenderla, almeno nei suoi principi generali. Saremmo quindi tutti in grado di prender parte alla discussione sul perché l'universo esiste. E, se trovassimo la risposta a quest'ultima domanda, decreteremmo il definitivo trionfo della ragione umana, poiché allora conosceremmo il pensiero stesso di Dio.