

I GRANDI CAPOLAVORI DI

Stephen W. Hawking

La grande storia del tempo

Guida ai misteri del cosmo

Che cosa sappiamo realmente dell'universo? Qual è la sua natura? Da dove è venuto e dove sta andando? Le nostre conoscenze sono fondate? E su cosa si basano? Stephen Hawking torna a occuparsi dei misteri del cosmo, e lo fa senza rinunciare al suo stile diretto e comunicativo. Aggiornandoci sulle recenti scoperte sia sul piano teorico che su quello delle osservazioni empiriche, Hawking descrive gli ultimi progressi compiuti nella ricerca di una teoria unificata di tutte le forze della fisica: la teoria delle “superstringhe” e le “dualità” tra modelli apparentemente diversi; i tunnel spazio-temporali e l'affascinante questione dei viaggi nel tempo. Questi alcuni degli argomenti di un saggio che riproduce il quadro di una realtà in continua evoluzione e che ci aiuta a compiere un ulteriore passo nella comprensione della natura dell'universo.

STEPHEN W. HAWKING (Oxford 1942) è uno dei 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 *Dal big bang ai buchi neri*, *La teoria del tutto*, *Buchi neri e universi neonati* e *La natura dello spazio e del tempo*, scritto con Roger Penrose.

Stephen W. Hawking

con Leonard Mlodinow

La grande storia del tempo

Guida ai misteri del cosmo

BUR scienza

Proprietà letteraria riservata
© 2005 by Stephen W. Hawking
© 2005 RCS Libri S.p.A., Milano

ISBN 978-88-58-67711-7

Titolo originale dell'opera:
A Brief History of Time

Traduzione di Daniele Didero

Prima edizione digitale 2015 da
Prima edizione BUR scienza gennaio 2015

Original art copyright 2005 © The Book Laboratory ® Inc.
Per le illustrazioni: The Book Laboratory ® Inc., James Zang and Kees Veenenbos
Per le immagini di Stephen Hawking: © Stewart Cohen
Per l'immagine di Marilyn Monroe: The Estate of Andre de Dienes/Ms. Shirley de Dienes licensed
by On West Publishing, Beverly Hills, Ca. 90210

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

Seguici su:
www.bur.eu
Twitter: [@BUR_Rizzoli](https://twitter.com/BUR_Rizzoli)
Facebook: [BUR_Rizzoli](https://www.facebook.com/BUR_Rizzoli)

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

Introduzione

Il titolo di questo volume richiama quello di un altro libro, *Dal big bang ai buchi neri. Breve storia del tempo*, che è stato pubblicato nel 1988 ed è rimasto per 237 settimane nella classifica dei libri più venduti del «Sunday Times» di Londra. Approssimativamente, ne è stata venduta una copia per ogni 750 uomini, donne e bambini presenti sulla Terra: un notevole successo per un testo che affrontava alcune delle questioni più ardue della fisica contemporanea. Dobbiamo però tener presente che questi temi non sono soltanto tra i più difficili, ma anche tra i più emozionanti, poiché si rivolgono alle grandi domande fondamentali: che cosa sappiamo realmente dell'universo? Su che cosa si basano queste nostre conoscenze? Da dove è venuto l'universo, e dove sta andando? Tali domande costituivano l'essenza di *Dal big bang ai buchi neri*, e rimangono al centro anche di questo libro.

Negli anni successivi alla pubblicazione di *Dal big bang ai buchi neri*, un gran numero di lettori di tutte le età, di tutte le professioni e di tutti i Paesi del mondo ha voluto esprimere i propri commenti e le proprie impressioni al riguardo. Una delle richieste più ripetute è stata quella di una nuova versione del libro che mantenesse la sua struttura essenziale ma che, al contempo, ne spiegasse i concetti fondamentali in un modo più chiaro e con maggior calma. Tuttavia, in base agli stessi commenti dei lettori emergeva chiaramente che erano in pochi a cercare una lunga e tediosa dissertazione di cosmologia che si ponesse al livello di un corso accademico. L'approccio che abbiamo seguito nello scrivere *La grande storia del tempo* è stato pertanto questo: abbiamo mantenuto e ampliato il contenuto essenziale del primo libro, curandoci insieme di conservare la sua lunghezza e la sua leggibilità originarie. Di fatto, questa seconda storia del tempo è più breve della prima, dato che abbiamo evitato di affrontare alcuni dei temi di carattere più strettamente tecnico; riteniamo però che questa esclusione sia più che compensata dalla maggiore attenzione che abbiamo invece riservato alle questioni che stanno veramente al cuore del libro.

Abbiamo inoltre approfittato di questa opportunità per aggiornare il volume e includere alcuni nuovi risultati raggiunti sia sul piano teorico, sia su quello delle osservazioni empiriche, descrivendo i recenti progressi che sono stati fatti nella ricerca di una teoria unificata completa di tutte le forze della fisica. In particolare, abbiamo descritto i progressi raggiunti nel campo della teoria delle stringhe e le «dualità» – o corrispondenze – tra teorie fisiche apparentemente diverse, che costituiscono un indizio che ci spinge ad affermare l'esistenza di una teoria unificata della fisica. Sul piano empirico, poi, questo libro presenta alcune nuove osservazioni di notevole importanza, come quelle compiute dal satellite COBE (Cosmic Background Explorer, esploratore dello sfondo cosmico) e dal telescopio spaziale Hubble.

Circa quarant'anni fa, Richard Feynman disse: «Siamo fortunati a vivere in un'epoca in cui continuiamo ancora a fare delle scoperte. È un po' come per la scoperta dell'America – sono cose che si possono fare soltanto una volta nella storia. L'epoca in cui viviamo è un'epoca in cui stiamo individuando le leggi fondamentali della natura». Oggi siamo più vicini che mai alla comprensione della natura dell'universo. Il nostro scopo nello scrivere questo libro è quello di condividere parte dell'entusiasmo generato da queste acquisizioni e il nuovo quadro della realtà che da esse viene a emergere.

Pensare l'universo

Noi viviamo in un universo strano e meraviglioso. Per poter comprendere la sua età, le sue dimensioni, la sua violenza e anche la sua bellezza dobbiamo compiere uno straordinario sforzo di immaginazione. Il posto che noi esseri umani occupiamo all'interno di questo immenso cosmo può sembrare piuttosto insignificante. Siamo quindi spinti a cercare di cogliere il senso della totalità dell'universo, per capire come l'uomo si inserisca in questo quadro. Alcuni decenni fa, un famoso scienziato (alcuni dicono Bertrand Russell) tenne una conferenza pubblica sull'astronomia, soffermandosi a descrivere come la Terra ruoti intorno al Sole e quest'ultimo, a sua volta, percorra un'orbita intorno al centro di quel grande insieme di stelle che costituisce la nostra galassia. Al termine della conferenza, una piccola signora anziana, seduta in fondo alla sala, si alzò in piedi e disse: «Quelle che ci ha raccontato sono soltanto un cumulo di sciocchezze. In realtà, il mondo è un disco piatto che poggia sul dorso di una gigantesca tartaruga». Lo scienziato si lasciò sfuggire un sorriso di superiorità prima di replicare: «E su che cosa poggia questa tartaruga?». «Lei è molto intelligente, giovanotto, davvero molto intelligente,» disse l'anziana signora «ma la verità è che la tartaruga poggia su un'altra tartaruga e così via, all'infinito!»

Oggi la maggior parte delle persone troverebbe ridicola questa rappresentazione dell'universo come una torre infinita di tartarughe impilate l'una sopra l'altra. Ma perché mai dovremmo ritenere che le nostre odierne conoscenze cosmologiche siano migliori di quelle che avevamo ieri? Provate per un attimo a mettere da parte ciò che sapete – o credete di sapere – a proposito dello spazio. Ora, uscite di casa di notte e mettetevi a guardare il cielo stellato. Come considerereste tutti quei puntini luminosi? Sono forse dei minuscoli fuochi accesi nel cielo? Può essere difficile riuscire a immaginare che cosa in realtà siano, dato che si tratta di oggetti che sfuggono dal campo della nostra esperienza quotidiana. Se osservate il cielo con regolarità, avrete probabilmente avuto modo di notare, subito dopo il tramonto, una piccola luce sfuggente che si muove sopra la linea dell'orizzonte. Si tratta di Mercurio: è anch'esso un pianeta, come la Terra, ma la sua realtà è totalmente diversa da quella del pianeta sul quale abitiamo. Un giorno di Mercurio è lungo due terzi della durata complessiva dell'anno di questo pianeta. Nelle zone illuminate dal Sole, la temperatura supera i 400 gradi, per poi precipitare a quasi – 200 gradi nel cuore della notte. Tuttavia, per quanto sia già difficile rappresentarsi concretamente la situazione di Mercurio (con le sue profonde differenze rispetto al nostro pianeta), immaginare la situazione di una stella tipica è senza dubbio qualcosa di incredibilmente più arduo: si tratta infatti di un'immensa fornace che brucia milioni di tonnellate di materia al secondo, e il cui nucleo raggiunge una temperatura dell'ordine di decine di milioni di gradi.

Un'altra cosa molto difficile da comprendere è l'effettiva distanza dei pianeti e delle stelle. Gli antichi cinesi costruivano torri di pietra per poter guardare gli astri più da vicino. Ritenere che le stelle e i pianeti siano molto più vicini di quanto in realtà sono è per gli uomini qualcosa di naturale: dopotutto, nella nostra vita quotidiana non abbiamo alcun modo di confrontarci direttamente con gli immensi spazi siderali. Queste distanze sono talmente grandi che non ha neppure senso misurarle in

metri o in chilometri, come facciamo con la maggior parte delle lunghezze. Ci serviamo invece dell'anno-luce, ossia la distanza che la luce percorre in un anno. Ora, dato che in un singolo secondo un fascio di luce percorre circa 300.000 chilometri, un anno-luce è una distanza incredibilmente elevata. La stella a noi più vicina, a parte il Sole, è Proxima Centauri (conosciuta anche come Alpha Centauri C) che si trova a circa quattro anni-luce di distanza: anche viaggiando sulle astronavi più veloci che oggi potremmo progettare, per raggiungerla impiegheremmo circa diecimila anni.

Gli antichi hanno cercato per secoli di comprendere l'universo, ma non avevano ancora a disposizione la nostra matematica e la nostra scienza. Oggi, invece, noi possiamo contare su strumenti molto potenti, sia sul piano concettuale (come la matematica e il metodo scientifico), sia su quello tecnologico (come i computer e i telescopi). Servendosi di questi mezzi, gli scienziati hanno accumulato un gran numero di conoscenze sullo spazio che ci circonda. Ma che cosa possiamo dire di sapere, in realtà, riguardo all'universo, e su che cosa si basano queste nostre conoscenze? Da dove è venuto l'universo? Dove sta andando? Ha avuto un inizio? E, se l'ha avuto, che cosa è successo prima di allora? Qual è la natura del tempo? Esso avrà mai fine? Possiamo tornare indietro nel tempo? Recenti scoperte nell'ambito della fisica, rese possibili in parte grazie alle nuove tecnologie, ci suggeriscono delle risposte ad alcune di queste domande. Un giorno queste risposte ci potranno forse sembrare qualcosa di ovvio, come il fatto che la Terra orbita intorno al Sole, oppure qualcosa di ridicolo, come la torre di tartarughe giganti. Solo il tempo (qualunque cosa esso sia) ce lo dirà.

L'evoluzione della nostra immagine dell'universo

Anche se ai tempi di Cristoforo Colombo erano ancora in molti a ritenere che la Terra fosse piatta (e, a dire il vero, alcune persone lo credono tutt'oggi), le radici dell'astronomia moderna possono comunque essere fatte risalire all'antica Grecia. Intorno al 340 a.C., il filosofo greco Aristotele scrisse il trattato *Sul cielo*, in cui avanzava dei validi argomenti a sostegno della tesi secondo la quale la Terra era sferica e non piatta.

Uno di questi argomenti si basava sulle eclissi di Luna. Aristotele comprese che tali eclissi sono causate dall'interposizione della Terra fra il Sole e la Luna stessa: quando si verifica questo allineamento, cioè, la Terra copre con la propria ombra la Luna, eclissandola. L'ombra proiettata dalla Terra, 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 proiettata sulla Luna avrebbe una forma circolare soltanto quando il Sole è direttamente perpendicolare al centro del disco terrestre, mentre in tutti gli altri casi avrebbe invece la forma allungata di un'ellisse (l'ellisse è, per l'appunto, un cerchio allungato).

I greci conoscevano poi un altro argomento a sostegno della sfericità della Terra. Se la Terra fosse piatta, quando una nave si avvicina dall'orizzonte dovrebbe apparire inizialmente come un minuscolo puntino informe; poi, man mano che avanza, dovremmo essere in grado di individuarne sempre più dettagli, come le vele e lo scafo. Le cose, però, non stanno affatto così. Quando una nave compare all'orizzonte, la prima cosa che vediamo sono infatti le sue vele, e solo in un momento successivo possiamo scorgerne anche lo scafo. Il fatto che gli alberi di una nave, che si ergono sopra lo scafo, siano la prima parte dell'imbarcazione che viene vista spuntare all'orizzonte, costituisce una prova della sfericità della Terra.



Figura 1. Una nave compare all'orizzonte

A causa della forma sferica della Terra, l'albero e le vele di una nave

che compare all'orizzonte ci appaiono prima del suo scafo.

I greci, inoltre, osservavano con molta attenzione il cielo stellato. Ai tempi di Aristotele, gli uomini registravano già da secoli gli spostamenti delle luci che brillano nel cielo notturno. Avevano così avuto modo di notare che anche se quasi tutte le migliaia di luci visibili sembrano muoversi insieme attraverso la volta celeste, ce ne sono cinque (oltre alla Luna) che si comportano in modo differente. A volte sembrano deviare dal regolare tragitto da est a ovest, per poi fare un'altra inversione di marcia e ritornare sui loro passi. Queste particolari luci vennero così chiamate «pianeti»: il termine greco che significa «vaganti». I greci scoprirono solo cinque dei nove pianeti per il semplice fatto che questi cinque sono gli unici che possono essere visti a occhio nudo: Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Oggi siamo in grado di spiegare il perché di questi strani percorsi seguiti dai pianeti nella volta celeste: mentre le stelle, a causa della loro grandissima distanza, risultano praticamente immobili rispetto al nostro sistema solare, i pianeti orbitano intorno al Sole, e quindi il loro tragitto apparente nel cielo notturno è molto più complicato di quello seguito dalle stelle fisse. Aristotele pensava che la Terra fosse immobile e che il Sole, la Luna, i pianeti e le stelle le ruotassero intorno seguendo orbite circolari; per ragioni di carattere mistico, infatti, era convinto che la Terra fosse il centro dell'universo e che il moto circolare fosse quello più perfetto. Quest'idea venne in seguito elaborata da un altro greco, Tolomeo, che – nel II secolo d.C. – la sviluppò in un modello cosmologico completo. Tolomeo nutriva una profonda passione per i propri studi: «Quando mi diletto a seguire i moti circolari della grande moltitudine delle stelle,» scrisse «sono così felice che mi sembra di librarmi a mezz'aria».

Nel sistema di Tolomeo, la Terra era circondata da otto sfere concentriche rotanti, ciascuna delle quali era più grande della precedente – un po' come una matrioska. La Terra era collocata al centro di queste sfere. Nessuno si preoccupò mai troppo di chiarire che cosa ci fosse al di là dell'ultima sfera; ma in ogni caso, qualunque cosa ci fosse, non faceva senz'altro parte dell'universo che gli uomini potevano osservare. La sfera più esterna, pertanto, costituiva una specie di confine, una sorta di contenitore che racchiudeva al proprio interno l'universo. Le stelle occupavano delle posizioni fisse all'interno di quest'ultima sfera, così che, durante la sua rotazione, esse mantenevano la stessa posizione relativa le une rispetto alle altre ruotando insieme attraverso la volta celeste, come possiamo vedere dalla Terra. Le sfere interne portavano i pianeti: a differenza delle stelle, questi ultimi non occupavano una posizione fissa nelle loro rispettive sfere, ma si muovevano al loro interno lungo cerchi più piccoli, i cosiddetti epicicli. Il moto dei pianeti relativamente alla Terra era quindi di tipo complesso, poiché era il risultato della rotazione di ciascuna delle sfere planetarie e del movimento dei pianeti stessi lungo gli epicicli. In questo modo, Tolomeo riusciva a spiegare il fatto che le traiettorie seguite dai pianeti lungo la volta celeste – osservate dalla Terra – non erano semplici cerchi, ma erano molto più complesse.

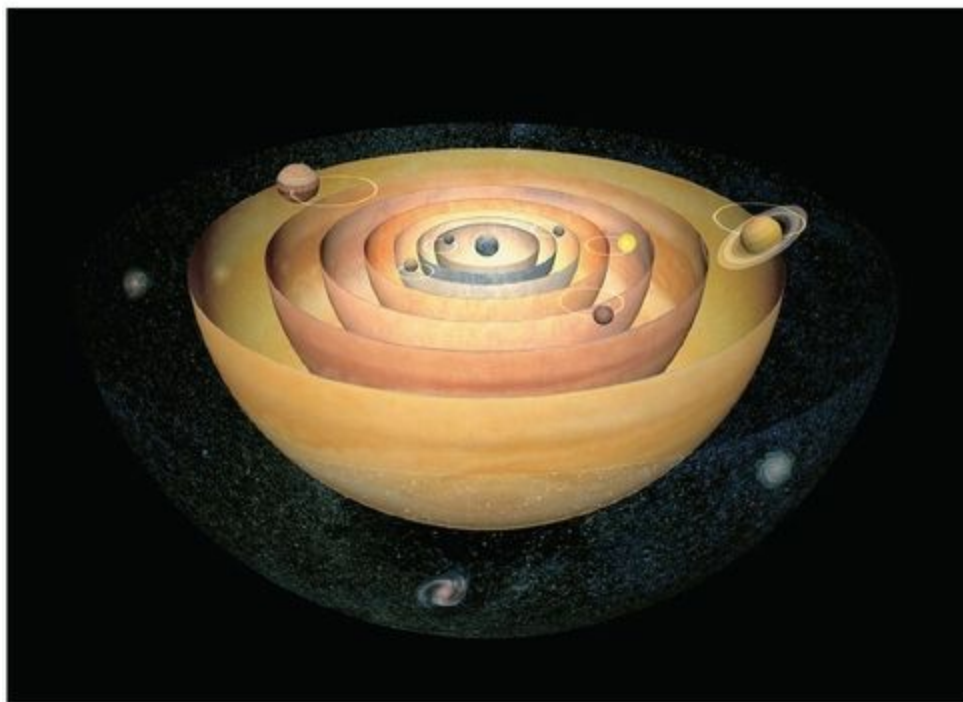


Figura 2. Il modello di Tolomeo

Nel modello di Tolomeo, la Terra si trovava immobile al centro dell'universo, circondata da otto sfere concentriche rotanti che portavano al loro interno tutti i corpi celesti allora conosciuti. L'ottava sfera, sede delle stelle fisse, è qui rappresentata sullo sfondo.

In base al modello elaborato da Tolomeo era possibile predire, con ragionevole accuratezza, le posizioni dei diversi astri nella volta celeste. Per poter predire correttamente tali posizioni, però, Tolomeo aveva dovuto supporre 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; di conseguenza, in quei primi momenti essa sarebbe dovuta apparire due volte più grande rispetto a questi ultimi! Lo stesso Tolomeo era consapevole del grave inconveniente creatosi; 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 Sacre Scritture, poiché aveva il grande vantaggio di lasciare, al di là della sfera delle stelle fisse, moltissimo spazio per il paradiso e l'inferno. Tuttavia, nel 1514 un canonico polacco, Niccolò Copernico, propose un modello alternativo. (In un primo momento, temendo forse di essere accusato di eresia dalla sua stessa Chiesa, Copernico fece circolare il proprio modello in forma anonima.) Secondo la sua idea rivoluzionaria, non tutti i corpi celesti dovevano orbitare intorno alla Terra: erano invece quest'ultima e i pianeti a muoversi lungo orbite circolari intorno al Sole, che si trovava immobile al centro del sistema solare. Il modello copernicano (così come, del resto, quello tolemaico) funzionava bene, anche se le orbite da esso predette non corrispondevano perfettamente a quelle di fatto osservate. Dato che era molto più semplice di quello di Tolomeo, ci si sarebbe potuti aspettare un suo successo immediato. Tuttavia, la teoria copernicana venne presa sul serio soltanto un secolo dopo, quando due astronomi – il tedesco Giovanni Keplero e Galileo Galilei – iniziarono a sostenerla pubblicamente. Nel 1609, Galileo iniziò a scrutare 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 intorno. Ciò implicava che non tutti i corpi celesti

dovevano per forza ruotare direttamente intorno alla Terra, come avevano invece sostenuto Aristotele e Tolomeo. Nel medesimo tempo, Keplero perfezionò la teoria copernicana, suggerendo che le orbite dei pianeti non erano circolari, bensì ellittiche: in questo modo, le predizioni teoriche riuscirono infine a concordare pienamente con le osservazioni empiriche. Per il modello tolemaico, questi due eventi rappresentarono un colpo mortale.

Anche se l'introduzione delle orbite ellittiche veniva a migliorare sostanzialmente il modello copernicano, Keplero la considerava come una semplice ipotesi *ad hoc*. Egli, infatti, nutriva dei pregiudizi sulla natura che non si basavano su nessuna osservazione empirica: al pari di Aristotele, era semplicemente convinto che le ellissi fossero meno perfette dei cerchi, e gli era quindi ben difficile accettare che i pianeti potessero veramente seguire delle orbite così imperfette. Inoltre, non riusciva a conciliare queste orbite ellittiche con la propria idea secondo la quale il moto orbitale dei pianeti intorno al Sole era causato da forze magnetiche. Anche se Keplero aveva torto nel vedere nelle forze magnetiche la ragione del moto dei pianeti, bisogna comunque rendergli atto di aver compreso che doveva esistere una forza responsabile di tale movimento. L'autentica spiegazione fu trovata soltanto molto tempo dopo, nel 1687, quando Isaac Newton pubblicò quella che, probabilmente, è stata la singola opera più importante mai scritta nel campo delle scienze fisiche: i *Philosophiae naturalis principia mathematica* (*Principi matematici della filosofia naturale*).

Nei *Principia*, Newton presentò una legge secondo la quale tutti gli oggetti che si trovano in uno stato di quiete tendono naturalmente a rimanere in questo stato finché una forza non viene ad agire su di essi, e descrisse come l'azione di una forza fa sì che un oggetto si muova o cambi il proprio movimento. Perché, quindi, i pianeti si muovono intorno al Sole seguendo orbite ellittiche? Newton affermò che questo movimento era dovuto a una particolare forza, la stessa che fa sì che, quando lasciamo andare un oggetto, esso cade per terra anziché restare sospeso a mezz'aria. Egli diede a questa forza il nome di «gravità» (prima di allora, il termine «gravità» veniva adoperato per indicare un atteggiamento serio e solenne, oppure la proprietà fisica della pesantezza). Newton inventò inoltre la matematica con cui analizzare in termini numerici la reazione degli oggetti sottoposti a forze come quella di gravità, e risolse le rispettive equazioni. In questo modo, egli fu anche in grado di dimostrare che, per via della gravità del Sole, la Terra e gli altri pianeti dovevano muoversi lungo orbite ellittiche – proprio come aveva predetto Keplero! Newton affermò che le sue leggi si applicavano a ogni oggetto dell'universo, dalle stelle e dai pianeti fino a una mela che cade per terra. Per la prima volta nella storia, il moto dei pianeti era stato spiegato attraverso leggi che determinavano anche i movimenti sulla Terra: fu il principio sia della fisica sia dell'astronomia moderne.

Abbandonate le sfere celesti di Tolomeo, non c'era più alcun motivo per ipotizzare che l'universo avesse un qualche confine naturale (quello che, nel sistema tolemaico, era costituito dalla sfera più esterna). Inoltre, dato che le stelle fisse non sembravano mutare le loro posizioni (a parte il moto apparente intorno alla volta celeste causato dal movimento di rotazione della Terra sul proprio asse), diventava naturale supporre che esse fossero oggetti simili al nostro Sole, ma molto più distanti. Gli uomini si erano così sbarazzati non solo dell'idea che la Terra fosse il centro dell'universo, ma anche di quella che il nostro Sole – e forse lo stesso sistema solare – fosse qualcosa di unico. Questo cambiamento nell'immagine del cosmo rappresentò un importante passo avanti per il pensiero

umano: l'inizio della visione scientifica moderna dell'universo.

La natura di una teoria scientifica

Per poter parlare della natura dell'universo e discutere di problemi come se esso abbia avuto un inizio o se avrà una fine, occorre avere ben chiaro che cosa sia una teoria scientifica. Adotteremo qui la concezione più semplice, secondo la quale una teoria è soltanto un modello dell'universo (o di una sua parte limitata) e un insieme di regole che mettono in relazione i valori quantitativi che compaiono nel modello con le osservazioni che facciamo nella realtà. Questo modello sussiste solo nella nostra mente e non ha alcun'altra realtà (qualunque cosa si possa intendere con questo termine). Una teoria, per essere una buona teoria scientifica, deve soddisfare due requisiti: deve descrivere accuratamente un ampio insieme di osservazioni empiriche sulla base di un modello che contenga solo pochi elementi arbitrari, e deve formulare predizioni ben definite sui risultati di future osservazioni. Per esempio, Aristotele credeva alla teoria di Empedocle secondo la quale ogni cosa era composta da quattro elementi: terra, aria, fuoco e acqua. Si trattava di un modello sufficientemente semplice, ma non faceva alcuna predizione ben definita. D'altro canto, la teoria della gravitazione di Newton si fondava su un modello ancora più elementare, nel quale i corpi si attraevano a vicenda con una forza direttamente proporzionale a una quantità indicata come la loro massa e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Eppure, nonostante la sua estrema semplicità, questa teoria predice con un alto grado di precisione i moti del Sole, della Luna e dei pianeti.

Qualsiasi teoria fisica è sempre provvisoria, nel senso che è soltanto un'ipotesi: in altri termini, non può mai essere dimostrata. Per quante volte i risultati sperimentali siano stati in accordo con una teoria, non possiamo mai essere sicuri di non ottenere, la volta successiva, un risultato che la contraddica. D'altra parte, si può confutare una teoria trovando anche una sola osservazione empirica che sia in disaccordo con le sue predizioni. Come ha sottolineato il filosofo della scienza Karl Popper, una buona teoria è quella che produce un alto numero di predizioni suscettibili, in linea di principio, di essere confutate (o falsificate) dall'osservazione. Ogni volta che nuovi esperimenti forniscono risultati in accordo con le predizioni, la teoria sopravvive e la nostra fiducia in essa aumenta; ma se troviamo anche solo una nuova osservazione in disaccordo con le previsioni, dobbiamo abbandonare o modificare la teoria.

O, perlomeno, ciò è quanto dovrebbe accadere: di fatto, però, si può sempre mettere in questione la competenza della persona che ha compiuto le osservazioni.

In pratica, spesso accade che una nuova teoria sia in realtà solo un'estensione della teoria precedente. Per esempio, osservazioni estremamente precise del pianeta Mercurio rivelarono una piccola discrepanza tra il suo moto effettivo e le predizioni della teoria della gravitazione di Newton. La teoria della relatività generale di Einstein prediceva un moto leggermente diverso da quello previsto in base alla teoria newtoniana. Il fatto che le predizioni einsteiniane fossero in pieno accordo con le osservazioni, mentre quelle di Newton no, costituì una delle conferme più importanti della nuova teoria. Tuttavia, noi oggi continuiamo a usare per tutti i fini pratici la teoria di Newton, poiché, nelle situazioni con le quali abbiamo normalmente a che fare, la differenza tra le sue predizioni e quelle della relatività generale è estremamente ridotta. (Inoltre, la teoria di Newton ha il

grande vantaggio di richiedere calcoli molto meno complessi di quella di Einstein!) Il fine ultimo della scienza è quello di fornire una singola teoria che sia in grado di descrivere l'intero universo. Di fatto, però, la maggior parte degli scienziati scelgono di procedere dividendo il problema in due parti. Da un lato ci sono le leggi che descrivono in che modo l'universo cambi con lo scorrere del tempo (in altri termini, se sappiamo qual è la situazione dell'universo in un determinato momento, queste leggi fisiche ci dicono quale sarà la sua situazione in un qualunque istante successivo); dall'altro, il problema dello stato iniziale dell'universo. Alcuni pensano che la scienza dovrebbe occuparsi soltanto della prima parte: ritengono, cioè, che il problema dello stato iniziale sia un argomento da lasciare alla metafisica o alla religione. Secondo queste persone, Dio, essendo onnipotente, avrebbe potuto stabilire a suo piacimento una qualunque condizione di inizio dell'universo. Ciò potrebbe anche essere vero, ma, da questo stesso punto di vista, potremmo allora ugualmente affermare che – in forza di questa onnipotenza – avrebbe potuto farlo sviluppare in un modo completamente arbitrario. Pare invece che egli abbia scelto di farlo evolvere in un modo molto regolare, secondo determinate leggi. Sembra quindi altrettanto ragionevole supporre che anche le condizioni iniziali siano state governate da leggi ben precise.

Risulta molto difficile trovare una teoria in grado di descrivere l'intero funzionamento dell'universo. Pertanto, di solito scomponiamo il problema in varie parti e inventiamo diverse teorie parziali. Ognuna di queste teorie parziali descrive e predice una certa classe limitata di osservazioni, trascurando gli effetti di altre quantità o rappresentandole per mezzo di semplici insiemi di numeri. Può darsi che questo approccio sia completamente sbagliato. Se ogni cosa presente nell'universo dipende in modo fondamentale da ogni altra cosa, potrebbe essere impossibile approssimarsi a una soluzione completa investigando isolatamente le diverse parti del problema. Ciononostante, è proprio seguendo tale via che, fino a ora, abbiamo fatto i nostri progressi. Anche in questo caso, l'esempio classico è costituito dalla teoria newtoniana della gravità, che ci dice che la forza gravitazionale esercitata fra due corpi dipende soltanto da un numero associato a ciascun corpo, quello che indica la sua massa, mentre è per il resto indipendente dalla composizione dei corpi stessi. Di conseguenza, non è necessario avere una teoria della struttura e della costituzione del Sole e dei pianeti per poter calcolare le loro orbite.

Oggi gli scienziati descrivono l'universo nei termini di due teorie fondamentali, ciascuna delle quali ha però un ambito di applicazione soltanto parziale: la teoria della relatività generale e la meccanica quantistica. Queste due teorie sono le grandi conquiste intellettuali della prima metà del XX secolo. La teoria della relatività generale descrive la forza di gravità e la struttura dell'universo su larga scala, vale a dire, in ordini di grandezza che vanno da pochi chilometri a milioni di milioni di milioni di milioni (1 seguito da 24 zeri) di chilometri, le dimensioni dell'universo osservabile. La meccanica quantistica, d'altro lato, si occupa dei fenomeni che accadono su scala estremamente ridotta, come un milionesimo di milionesimo di centimetro. Sfortunatamente, però, sappiamo che queste due teorie sono in contraddizione tra loro e non possono quindi essere entrambe corrette. Uno dei più grandi sforzi della fisica odierna (che è anche l'argomento principale di questo libro) è quello della ricerca di una nuova teoria che le includa entrambe: una teoria quantistica della gravità. Noi non possediamo ancora una tale teoria, e può darsi che debba passare ancora molto tempo prima che venga scoperta, ma conosciamo già parecchie delle proprietà che essa dovrebbe avere. E, come

vedremo nei capitoli successivi, sappiamo già molto sulle predizioni che una teoria quantistica della gravità dovrebbe fare.



Figura 3. Dagli atomi alle galassie

Nella prima metà del XX secolo i fisici hanno esteso l'ambito delle loro teorie dalla realtà di ogni giorno, di cui parlava Isaac Newton, fino ad abbracciare l'infinitamente piccolo e l'infinitamente grande.

Ora, se crediamo che l'universo non sia arbitrario ma sia invece governato da leggi ben definite, dovremo infine combinare le teorie parziali in una teoria unificata completa che sia in grado di descrivere ogni cosa presente nell'universo. Tuttavia, nella ricerca di una simile teoria unificata c'è un fondamentale paradosso. Le idee sulle teorie scientifiche che abbiamo appena delineato presuppongono che noi siamo esseri razionali liberi di osservare l'universo come vogliamo e di trarre deduzioni logiche da ciò che vediamo. In quest'ottica, è ragionevole supporre che potremmo continuare a progredire approssimandoci sempre più alle leggi che governano il nostro universo. Ma, qualora ci fosse veramente una teoria unificata completa, essa dovrebbe presumibilmente determinare anche le nostre azioni. In tal modo, sarebbe la teoria stessa a determinare l'esito della sua ricerca da parte nostra! E per quale motivo essa dovrebbe stabilire che, a partire dalle evidenze empiriche, dovremmo giungere alle conclusioni corrette? Non potrebbe forse, altrettanto plausibilmente, stabilire che dovremmo invece trarne le conclusioni sbagliate? O magari nessuna conclusione?

L'unica risposta che possiamo dare a questo problema si basa sul principio darwiniano della selezione naturale. L'idea è che, in ogni popolazione di organismi che si autoriproducono, ci saranno delle variazioni nel materiale genetico e nell'educazione ricevuta dai diversi individui. Tali differenze implicano che alcuni soggetti saranno più in grado di altri di dedurre le conclusioni appropriate sul mondo che li circonda e di agire di conseguenza. Questi individui avranno maggiori probabilità di sopravvivere e di riprodursi, così che il loro modello di comportamento e di pensiero diventerà quello dominante. Almeno per quanto riguarda il passato, è certamente vero che l'intelligenza e la scoperta scientifica hanno fornito un vantaggio ai fini della sopravvivenza. Non è altrettanto chiaro se anche oggi le cose stiano ancora così: le nostre scoperte scientifiche, infatti, potrebbero benissimo distruggere l'intero genere umano e, quand'anche così non fosse, una teoria

unificata completa potrebbe non fare molta differenza per quanto riguarda le nostre possibilità di sopravvivere. Comunque, ammesso che l'universo si sia evoluto in modo regolare, potremmo attenderci che quelle capacità di ragionamento che la selezione naturale ci ha dato conservino la loro validità anche nella nostra ricerca di una teoria unificata completa, e non ci conducano quindi alle conclusioni sbagliate.

Dato che le teorie parziali di cui già disponiamo sono sufficienti a formulare accurate predizioni in quasi ogni situazione (tolte solo le più estreme), la ricerca della teoria ultima dell'universo sembra difficile da giustificare sul piano pratico. (Vale però la pena di notare che sarebbe stato possibile avanzare argomentazioni simili anche a proposito della teoria della relatività e della meccanica quantistica: eppure, queste teorie ci hanno poi dato l'energia nucleare e la rivoluzione della microelettronica.) La scoperta di una teoria unificata completa, quindi, potrebbe anche non portare alcun contributo ai fini della sopravvivenza della nostra specie. Essa potrebbe anche non avere alcun impatto sul nostro stile di vita. Tuttavia, fin dall'alba della civiltà gli uomini non si sono mai accontentati di vedere gli eventi come sconnessi l'uno dall'altro e inesplicabili, ma si sono sempre sforzati di comprendere l'ordine che sta dietro i fenomeni del mondo. Oggi noi desideriamo ancora sapere perché siamo qui e da dove veniamo. Il profondissimo desiderio di conoscenza che caratterizza gli uomini basta a giustificare il procedere della nostra ricerca. E il nostro obiettivo non è niente di meno che una descrizione completa dell'universo in cui viviamo.

L'universo di Newton

Le nostre attuali idee sul moto dei corpi risalgono a Galileo e a Newton. Prima di allora, gli uomini credevano ad Aristotele, secondo il quale lo stato naturale di un corpo era la quiete e un oggetto si muoveva soltanto se spinto da una forza (o impulso). Di conseguenza, un corpo più pesante doveva cadere più velocemente di uno più leggero, essendo soggetto a un'attrazione più forte verso la Terra. La tradizione aristotelica riteneva anche che fosse possibile determinare tutte le leggi che governano l'universo per mezzo del puro pensiero: la verifica empirica attraverso l'osservazione non era considerata necessaria. Così, fino a Galileo, nessuno si preoccupò di accertare se corpi di peso diverso cadessero effettivamente a velocità diverse. Si dice che Galileo abbia dimostrato l'erroneità della teoria aristotelica lasciando cadere oggetti di vario peso dalla Torre di Pisa. Questo aneddoto è quasi certamente falso, ma Galileo fece comunque qualcosa di equivalente: fece rotolare delle palle di diverso peso lungo un piano inclinato ben levigato. La situazione è simile a quella dei gravi che cadono verticalmente, con il vantaggio che, in questo caso, l'osservazione risulta più facile in quanto le velocità sono minori. I valori raccolti da Galileo indicavano che tutti i corpi aumentavano la loro velocità con la medesima accelerazione, indipendentemente dal loro peso. Per esempio, se lasciamo discendere una palla lungo un piano inclinato con una pendenza del 10 per cento, la palla – qualunque sia il suo peso – si muoverà alla velocità di circa un metro al secondo dopo un secondo, di due metri al secondo dopo due secondi, e così via. Naturalmente, in condizioni ordinarie un oggetto di piombo cadrà più velocemente di una piuma, ma solo per il fatto che quest'ultima viene rallentata dalla resistenza dell'aria. Se si lasciano invece cadere due corpi che non trovano molta resistenza nell'aria, come due oggetti di piombo di peso diverso, essi cadranno con la stessa velocità. (Tra poco vedremo il perché.) L'astronauta David R. Scott fece l'esperimento con la piuma e il piombo sulla Luna (dove non c'è un'atmosfera che possa frenare la caduta dei corpi) e vide che, in effetti, sia la prima sia il secondo toccavano il suolo nel medesimo istante.

Le misurazioni di Galileo furono usate da Newton come base delle proprie leggi del moto. Negli esperimenti di Galileo, quando un corpo rotolava lungo il piano inclinato, la forza che agiva su di esso era sempre la stessa (il suo peso), e l'effetto era un'accelerazione costante del moto. Ciò dimostrava che il vero effetto di una forza era sempre quello di modificare la velocità di un corpo e non – come si pensava in precedenza – di metterlo semplicemente in movimento. Ma significava anche che, quando su un corpo non agiva alcuna forza, esso continuava a muoversi in linea retta con velocità uniforme. Quest'idea venne formulata esplicitamente per la prima volta nel 1687, nei *Principia mathematica* di Newton, ed è conosciuta come prima legge di Newton. Quel che accade a un corpo sottoposto all'azione di una forza è espresso invece nella seconda legge di Newton, che afferma che il corpo accelererà – ossia, varierà la propria velocità – in modo direttamente proporzionale alla forza stessa. (Per esempio, se raddoppieremo la forza applicata, raddoppierà anche l'accelerazione.) L'accelerazione è inoltre inversamente proporzionale alla massa (o quantità di materia) del corpo. (La stessa forza, cioè, agendo su un corpo di massa doppia, produrrà un'accelerazione pari alla metà.) Un esempio familiare ci viene fornito dalle automobili: quanto più

il motore è potente, tanto maggiore è l'accelerazione, ma quanto più la macchina è pesante, tanto minore è l'accelerazione che il medesimo motore riesce a produrre.

In aggiunta alle sue leggi del moto – che descrivono il comportamento dei corpi sottoposti all'azione delle forze – Newton formulò anche una teoria della gravità, che indica come è possibile determinare l'intensità di un particolare tipo di forza, ossia, appunto, la gravità. Come abbiamo anticipato, questa teoria afferma che ogni corpo attrae ogni altro corpo con una forza che è direttamente proporzionale alla massa di ciascun corpo: in altri termini, la forza di attrazione fra due corpi verrebbe a raddoppiare nel caso uno dei due (per esempio, il corpo A) raddoppiasse la propria massa. Questa conclusione è del resto facilmente prevedibile. Possiamo infatti pensare il nuovo corpo A come costituito da due corpi, ognuno dei quali con una massa uguale a quella originaria: ciascuno di essi attrarrebbe il corpo B con la forza originaria, e la forza totale di attrazione tra A e B sarebbe pertanto pari al doppio della forza originaria. E se (per fare un altro esempio) uno dei due corpi avesse una massa sestupla rispetto a quella iniziale (o se uno avesse una massa doppia e l'altro una massa tripla rispetto ai loro valori originari), la forza di attrazione fra di essi sarebbe sei volte maggiore.



Figura 4. Attrazione gravitazionale dei corpi composti

Se la massa di un corpo raddoppia, raddoppia anche la forza gravitazionale da esso esercitata.

Possiamo così spiegarci come mai tutti i corpi cadano con la stessa velocità. Stando alla teoria della gravità di Newton, un corpo di peso doppio sarà attratto verso la Terra da una forza di gravità doppia; esso, però, avrà d'altro lato anche il doppio della massa e quindi, in base alla seconda legge di Newton, una medesima unità di forza gli potrà imprimere soltanto la metà dell'accelerazione. Pertanto, secondo le leggi di Newton, questi due effetti verranno a cancellarsi esattamente a vicenda, così che l'accelerazione sarà la stessa in tutti i casi, indipendentemente dal peso.

La legge di gravità di Newton ci dice però anche che la forza di attrazione sarà tanto minore quanto più i corpi saranno lontani l'uno dall'altro. Essa afferma che l'attrazione gravitazionale di una stella è pari esattamente a un quarto di quella di una stella simile posta a metà della sua distanza. In base a questa legge è possibile predire con grande accuratezza le orbite della Terra, della Luna e dei

pianeti. Se l'attrazione gravitazionale esercitata da una stella crescesse o diminuisse più rapidamente con il variare della distanza, i pianeti seguirebbero un movimento a spirale che li porterebbe a precipitare nel Sole, oppure si allontanerebbero fino a sfuggire dal sistema solare.

La grande differenza tra le idee di Aristotele da un lato e quelle di Galileo e di Newton dall'altro consiste nel fatto che Aristotele riteneva la quiete uno stato privilegiato in cui i corpi tendevano sempre a rimanere a meno di non essere sottoposti all'azione di una qualche forza o impulso. In particolare, egli pensava che la Terra fosse immobile. Dalle leggi di Newton, però, consegue che non esiste un unico sistema di riferimento privilegiato in base al quale possiamo parlare di quiete. Potremmo infatti dire che il corpo A è in quiete e il corpo B si sta muovendo con velocità costante rispetto ad A, ma potremmo anche dire che è il corpo B a essere in quiete mentre il corpo A si sta muovendo. Per esempio, se mettiamo da parte per un momento la rotazione della Terra e la sua rivoluzione intorno al Sole, potremmo dire che la Terra è in quiete e che un treno sta viaggiando verso nord alla velocità di 150 chilometri all'ora, oppure che il treno è in quiete ed è invece la Terra a muoversi verso sud alla velocità di 150 chilometri all'ora. Se si facessero degli esperimenti con degli oggetti in movimento sul treno, tutte le leggi di Newton conserverebbero la loro validità. Ha ragione Newton oppure Aristotele? E come possiamo dirlo?

Una prova potrebbe essere la seguente. Immaginate di essere chiusi in una scatola e di non sapere se questa scatola sia adagiata sul pavimento di un treno in movimento oppure sulla terraferma (che per Aristotele rappresentava il sistema di riferimento per lo stato di quiete). C'è un modo per verificare se la scatola si trova sulla terraferma oppure sul treno? Se così fosse, potremmo forse dire che Aristotele aveva ragione nel ritenere che lo stato di quiete sulla Terra godesse di uno statuto speciale. Tuttavia, tutti gli esperimenti che potremmo condurre all'interno della scatola posta sul treno darebbero esattamente gli stessi risultati che avremmo se ci trovassimo in una scatola sulla terraferma (ammesso, naturalmente, che non ci siano sobbalzi, svolte o altre irregolarità nella corsa del treno). Se ci mettessimo a giocare a ping-pong sul treno, vedremmo la pallina comportarsi esattamente come se stessimo giocando su un tavolo da ping-pong posto accanto al binario. E se, all'interno della nostra scatola, provassimo a giocare a diverse velocità relative rispetto alla Terra – per esempio a 0,80 e 150 chilometri all'ora –, in tutte queste differenti situazioni la pallina si comporterebbe sempre allo stesso modo. Il mondo funziona così, e la matematica delle leggi di Newton riflette questa realtà: non c'è alcun modo per dire se a muoversi sia il treno oppure la Terra. Il concetto di moto ha quindi senso solo in riferimento ad altri oggetti.

Ma è davvero importante sapere se ha ragione Aristotele oppure Newton? Si tratta semplicemente di una differenza di vedute – una questione filosofica – oppure è un problema di rilevanza scientifica? In realtà, l'assenza di un sistema di riferimento assoluto con cui determinare lo stato di quiete ha profonde implicazioni nel campo della fisica: significa infatti che non è possibile stabilire se due eventi che sono avvenuti in momenti diversi hanno avuto luogo nella medesima posizione spaziale.

Per rappresentarci questo concetto, immaginiamo che su un treno ci sia una persona che faccia rimbalzare una pallina da ping-pong colpendo due volte, a distanza di un secondo, lo stesso punto del tavolo. Per questa persona, i punti del primo e del secondo impatto avranno una distanza spaziale pari a zero. Per un osservatore esterno posto di fianco al binario, invece, questi due punti sembreranno trovarsi a quaranta metri di distanza l'uno dall'altro, poiché fra i due rimbalzi il treno

avrà percorso questa distanza muovendosi lungo le rotaie. Stando a Newton, i due osservatori hanno pari diritto di considerarsi in uno stato di quiete, e quindi i loro punti di vista risultano ugualmente accettabili. Aristotele aveva torto a ritenere che uno dei due si trovasse in una situazione privilegiata rispetto all'altro. Le posizioni osservate e la distanza fra di esse saranno diverse per una persona che si trovi sul treno e per un osservatore posto accanto al binario, e non c'è alcuna ragione per preferire le osservazioni di uno rispetto a quelle dell'altro.



Figura 5. Relatività della distanza

La distanza percorsa da un oggetto in movimento e il tragitto da esso compiuto possono sembrare diversi se osservati da differenti punti di vista.

La mancanza di una posizione assoluta (o di uno spazio assoluto, come venne chiamato) preoccupava molto Newton, poiché essa non si conciliava con la sua idea di un Dio assoluto. Di fatto, egli si rifiutò di accettare tale assenza di uno spazio assoluto, anche se erano le sue stesse leggi a implicarla. Newton venne aspramente criticato per questa sua convinzione irrazionale da molte persone e, in particolare, dal vescovo Berkeley, un filosofo il quale riteneva che tutti gli oggetti materiali, lo spazio e il tempo fossero un'illusione. Quando a un altro celebre filosofo, il dottor Johnson, venne riferita l'opinione di Berkeley, esclamò: «Io la confuto così!» e colpì con un calcio una grossa pietra.

Tanto Aristotele quanto Newton credevano nell'esistenza di un tempo assoluto. Essi, cioè, ritenevano che fosse possibile misurare inequivocabilmente l'intervallo di tempo tra due eventi, e che questo intervallo sarebbe stato lo stesso per chiunque lo avesse misurato (purché si fosse usato un buon orologio). A differenza dello spazio assoluto, il tempo assoluto era compatibile con le leggi di Newton, e ancora oggi la maggior parte delle persone riterrebbe che questa è la concezione sensata della realtà. Tuttavia, nel corso del XX secolo i fisici hanno compreso che avrebbero dovuto cambiare le loro idee sia sullo spazio sia sul tempo. Come vedremo, essi hanno scoperto che l'intervallo di tempo tra due eventi, così come la distanza tra i punti di rimbalzo della pallina da

ping-pong, dipende dall'osservatore. Hanno inoltre scoperto che il tempo non è completamente separato e indipendente dallo spazio. La chiave che ha aperto la strada a queste scoperte è stata la nuova comprensione delle proprietà della luce. Tali proprietà potrebbero sembrare in contrasto con la nostra esperienza; ma anche se le nozioni del nostro cosiddetto senso comune funzionano bene quando ci occupiamo di cose che si muovono con relativa lentezza, come le mele o i pianeti, esse si dimostrano del tutto inadeguate quando abbiamo a che fare con oggetti che si muovono a velocità prossime o uguali a quella della luce.

La relatività

Il fatto che la luce si propaga a una velocità finita, anche se elevatissima, venne scoperto nel 1676 dall'astronomo danese Ole Christensen Rømer. Se osservate le lune di Giove noterete che, di tanto in tanto, esse scompaiono dalla vista, nascondendosi dietro il pianeta gigante. Queste eclissi delle lune di Giove dovrebbero succedersi a intervalli regolari, ma Rømer osservò che, di fatto, questa regolarità veniva meno. Era quindi necessario concludere che le lune, per qualche misterioso motivo, variassero la velocità delle loro orbite, accelerando e decelerando di tanto in tanto? Rømer avanzò un'altra spiegazione. Se la luce viaggiasse a velocità infinita, sulla Terra vedremmo queste eclissi succedersi a intervalli regolari, esattamente negli stessi momenti in cui di fatto avvengono, un po' come i ticchettii di un orologio cosmico. Dato che, in questa ipotesi, la luce percorrerebbe istantaneamente qualunque distanza, la maggiore o minore lontananza di Giove dalla Terra non cambierebbe la situazione.

Immaginiamo però ora che la luce viaggi a una velocità finita. In questo caso, noi vedremmo le eclissi con un certo ritardo rispetto al momento in cui sono avvenute, ritardo che dipenderebbe dalla velocità della luce e dalla distanza fra Giove e la Terra. Se la distanza tra i due pianeti restasse invariata, anche il ritardo sarebbe sempre lo stesso per ogni eclisse. Di fatto, però, in alcuni periodi Giove si avvicina alla Terra; durante questi avvicinamenti, il «segnale» di ogni successiva eclisse deve percorrere una distanza via via minore per arrivare fino alla Terra e, di conseguenza, impiega sempre meno tempo. Analogamente, quando Giove si allontana dal nostro pianeta, vediamo l'intervallo fra un'eclisse e l'altra farsi progressivamente più lungo. L'effettiva entità di questi anticipi (o ritardi) dipende dalla velocità della luce e ci permette di misurarla, come fece Rømer. Egli notò che le eclissi delle lune di Giove apparivano con anticipo in quei periodi dell'anno in cui la Terra si stava approssimando all'orbita del pianeta gigante; quando, invece, la Terra si stava allontanando, le eclissi si manifestavano con un crescente ritardo. Rømer si servì allora di queste differenze nella durata degli intervalli tra un'eclisse e l'altra per calcolare la velocità della luce; le sue misurazioni delle variazioni nella distanza fra la Terra e Giove, però, non erano molto precise, e il valore da lui ottenuto per la velocità della luce fu quindi di circa 225.000 chilometri al secondo (mentre oggi sappiamo che questa velocità è pari a circa 300.000 chilometri al secondo). Ciononostante, il risultato conseguito da Rømer – non solo nel dimostrare che la luce si propaga a una velocità finita, ma anche nel misurare questa velocità – fu certo considerevole, tenendo anche conto che giunse ben undici anni prima della pubblicazione dei *Principia mathematica* di Newton.

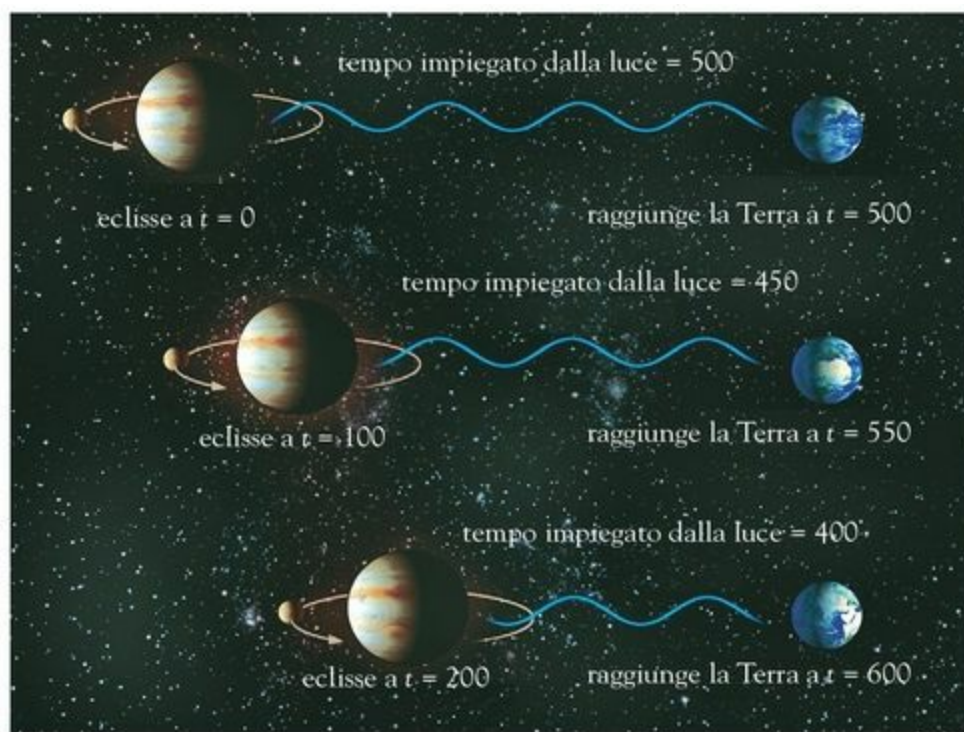


Figura 6. La velocità della luce e gli intervalli tra le eclissi

I momenti in cui le eclissi delle lune di Giove vengono osservate sulla Terra dipendono sia dai momenti in cui questi fenomeni hanno effettivamente luogo, sia dal tempo impiegato dalla luce per coprire la distanza tra Giove e il nostro pianeta. Pertanto, la frequenza delle eclissi sembra aumentare quando Giove si muove verso la Terra, per poi diminuire quando il pianeta gigante si allontana.

Nell'illustrazione la portata reale di questa differenza viene ingigantita per rendere più chiaro il concetto.

Una teoria adeguata della propagazione della luce non si ebbe però fino al 1865, quando il fisico britannico James Clerk Maxwell riuscì a unificare le teorie parziali che fino ad allora erano state usate per descrivere le forze dell'elettricità e del magnetismo. Sia l'elettricità sia il magnetismo erano fenomeni conosciuti fin dai tempi antichi, ma fu solo nel XVIII secolo che il chimico britannico Henry Cavendish e il fisico francese Charles-Augustin de Coulomb stabilirono le leggi quantitative che governano la forza elettrica tra due corpi carichi. Qualche decennio più tardi, agli inizi del XIX secolo, diversi fisici stabilirono leggi analoghe anche per quanto riguarda le forze magnetiche. Maxwell dimostrò matematicamente che queste forze elettriche e magnetiche non sorgono da particelle che agiscono direttamente le une sulle altre; ogni carica e ogni corrente elettrica, invece, creano nello spazio circostante un campo che esercita una forza su tutte le altre cariche e correnti localizzate all'interno di quello spazio. Maxwell scoprì che la forza elettrica e quella magnetica sono portate da un unico campo; pertanto, l'elettricità e il magnetismo sono aspetti inseparabili di una medesima forza. Egli indicò questa forza come «forza elettromagnetica», e il campo che la porta come «campo elettromagnetico».

Le equazioni di Maxwell predicavano che nel «campo elettromagnetico» potevano verificarsi delle perturbazioni simili a onde, le quali si sarebbero propagate a una velocità fissa – come le onde che si muovono sulla superficie di uno stagno. Quando calcolò questa velocità, vide che corrispondeva esattamente alla velocità della luce! Oggi sappiamo che le onde di Maxwell sono visibili all'occhio umano sotto forma di luce nel caso abbiano una lunghezza d'onda compresa all'incirca tra i 40 e gli

80 milionesimi di centimetro. (Un'onda è costituita da una successione di creste e di ventri; la lunghezza di un'onda è data dalla distanza tra due creste o due ventri consecutivi dell'onda stessa.) Le onde con una lunghezza minore di quella della luce visibile vengono oggi indicate come raggi ultravioletti, raggi X e raggi gamma; le onde con una lunghezza maggiore sono invece chiamate onde radio (un metro o più), microonde (qualche centimetro) o raggi infrarossi (meno di un decimillesimo di centimetro, ma più dello spettro visibile).



Figura 7. Lunghezza d'onda

La lunghezza di un'onda è data dalla distanza tra due creste o due ventri consecutivi.

La teoria di Maxwell implicava che le onde radio e le onde luminose avrebbero dovuto viaggiare a una determinata velocità costante; ciò, tuttavia, era difficilmente conciliabile con la teoria di Newton, dato che, mancando un sistema di riferimento assoluto per la quiete, avrebbe dovuto essere impossibile raggiungere un accordo universale (indipendente dai singoli punti di riferimento) sulla velocità di un oggetto. Per comprendere questo aspetto, provate a immaginare nuovamente di trovarvi sul treno, intenti a giocare a ping-pong. Se colpite la pallina lanciandola nella direzione di marcia del treno con una velocità che il vostro avversario misura in 20 chilometri all'ora, un osservatore fermo accanto al binario dovrebbe vederla muoversi a 170 chilometri all'ora (20 della pallina rispetto al treno più 150 del treno rispetto all'osservatore esterno). Quale sarebbe, dunque, la velocità effettiva della pallina, 20 chilometri all'ora oppure 170? Come la potreste determinare? In relazione al treno? Oppure rispetto alla terraferma? Mancando un sistema di riferimento assoluto per la quiete, non è possibile assegnare un valore assoluto nemmeno alla velocità della nostra pallina: a seconda del sistema di riferimento in cui la misuriamo, potremmo con uguale diritto attribuirle una qualunque velocità. Ora, stando alla teoria di Newton, questo stesso principio dovrebbe valere anche per la luce. Dunque, come va interpretato il fatto che, nella teoria di Maxwell, le onde luminose viaggiano a una determinata velocità costante?

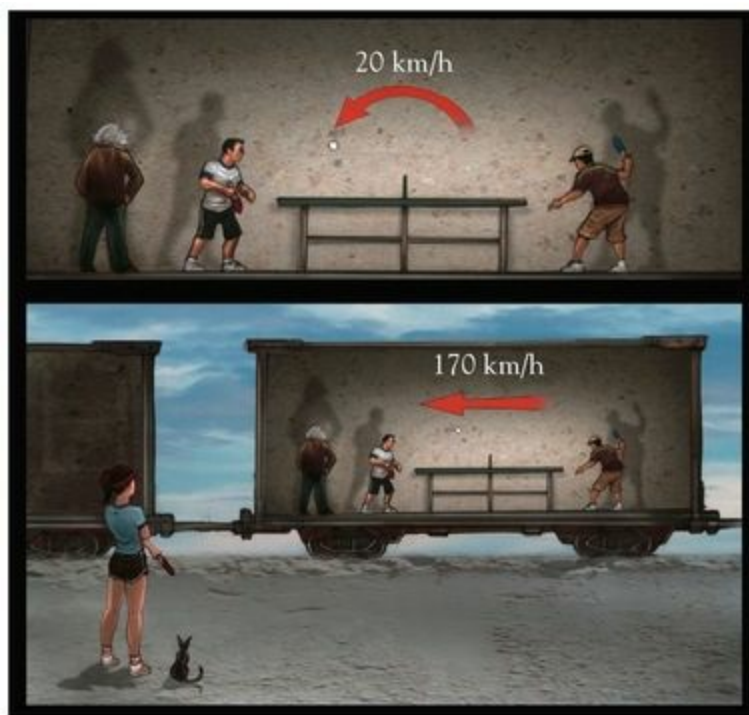


Figura 8. Differenti velocità delle palline da ping-pong

Stando alla teoria della relatività, tutte le misurazioni della velocità di un oggetto effettuate dai diversi osservatori, per quanto possano essere in disaccordo tra loro, sono ugualmente valide.

Al fine di riconciliare la teoria di Maxwell con le leggi di Newton, venne ipotizzata l'esistenza di una sostanza, chiamata «etere», che avrebbe dovuto essere presente in ogni luogo, persino nello spazio «vuoto». L'idea dell'etere esercitava una particolare attrazione sugli scienziati, i quali ritenevano, in ogni caso, che fosse necessaria l'esistenza di un qualche mezzo che trasportasse le onde elettromagnetiche – proprio come le onde marine, per esistere, hanno bisogno dell'acqua, e le onde sonore dell'aria. In questo senso, le onde luminose si dovrebbero propagare attraverso l'etere nello stesso modo in cui le onde sonore viaggiano attraverso l'aria, e la loro «velocità» (nel valore ricavato dalle equazioni di Maxwell) dovrebbe quindi essere intesa come relativa all'etere. Di conseguenza, osservatori diversi vedrebbero la luce muoversi verso di loro a velocità differenti, ma la velocità della luce stessa in rapporto all'etere rimarrebbe comunque costante.

Quest'idea poteva essere messa al vaglio dell'esperienza. Immaginate che ci sia della luce emessa da una qualche sorgente luminosa. Stando alla teoria dell'etere, essa dovrebbe viaggiare attraverso l'etere alla velocità, per l'appunto, della luce. Se ora vi muovete verso la fonte luminosa attraverso l'etere, la velocità alla quale vi avvicinate alla luce sarà data dalla somma della velocità della luce e della velocità con cui voi stessi vi muovete (sempre attraverso l'etere). La velocità con cui la luce si avvicina a voi, quindi, sarà in questo caso più alta di quella che si avrebbe se, per esempio, rimaneste fermi o vi muoveste in qualche altra direzione. Tuttavia, dato che la velocità della luce è incredibilmente più elevata di quella alla quale noi potremmo muoverci verso una sorgente luminosa, era molto difficile misurare in concreto questa differenza di velocità.

Nel 1887 Albert Michelson (che, in seguito, sarebbe stato il primo americano a ricevere il premio Nobel per la fisica) ed Edward Morley eseguirono un esperimento molto preciso e di difficile realizzazione presso la Case School of Applied Science di Cleveland (oggi Case Western Reserve University). Essi compresero che, poiché la Terra orbita intorno al Sole a una velocità di circa 30

chilometri al secondo, anche il loro laboratorio doveva muoversi attraverso l'etere a una velocità relativamente elevata. Naturalmente, nessuno era in grado di dire se l'etere si muovesse rispetto al Sole (e, in caso affermativo, in che direzione e a quale velocità). Tuttavia, ripetendo l'esperimento in diversi momenti dell'anno, quando la Terra si trovava in posizioni differenti sulla propria orbita, era lecito sperare che fosse possibile superare il problema di questo fattore sconosciuto. Michelson e Morley prepararono quindi un esperimento per confrontare la velocità della luce misurata nella direzione del moto della Terra attraverso l'etere (quando ci muoviamo verso la sorgente luminosa) con la velocità della luce che viaggia ad angolo retto rispetto a tale moto (quando, cioè, non ci muoviamo verso la sorgente luminosa). Con loro grande sorpresa, scoprirono che la velocità della luce in entrambe le direzioni era esattamente la stessa.

Fra il 1887 e il 1905 ci furono vari tentativi volti a salvare la teoria dell'etere. Il più importante fu quello condotto dal fisico olandese Hendrik Lorentz, che cercò di spiegare il risultato dell'esperimento di Michelson e Morley nei termini di oggetti che si contraevano e di orologi che rallentavano durante il movimento attraverso l'etere. Tuttavia, in un famoso articolo pubblicato nel 1905, un impiegato (fino ad allora sconosciuto) che lavorava all'Ufficio brevetti svizzero, Albert Einstein, sottolineò che non vi era alcun bisogno di postulare l'esistenza di un etere, a condizione che si fosse disposti ad abbandonare l'idea di un tempo assoluto (tra breve vedremo il perché). Un'osservazione simile venne fatta poche settimane dopo da un autorevole matematico francese, Henri Poincaré. Gli argomenti sviluppati da Einstein erano però più vicini alla fisica di quelli di Poincaré, che aveva affrontato la questione da un punto di vista puramente matematico e che non accettò mai (fino alla fine dei suoi giorni) l'interpretazione einsteiniana della teoria.

Il postulato fondamentale della teoria della relatività (come venne chiamata) di Einstein asseriva che le leggi della scienza dovrebbero essere le stesse per tutti gli osservatori che si muovono liberamente, a prescindere dalla loro velocità. Ciò valeva già per le leggi del moto di Newton, ma ora Einstein estese questa idea fino a includere anche la teoria di Maxwell. In altri termini, dato che la teoria di Maxwell stabilisce che la velocità della luce ha un determinato valore, tutti gli osservatori liberamente in movimento dovranno misurare questo medesimo valore, indipendentemente dalla velocità con cui si avvicinano alla (o si allontanano dalla) sorgente luminosa. Questa semplice idea riusciva certo a spiegare – senza far ricorso all'etere o a un altro sistema preferenziale di riferimento – il significato della velocità della luce nelle equazioni di Maxwell, ma portava con sé anche alcune conseguenze notevoli e spesso controintuitive.

Per esempio, il requisito per cui tutti gli osservatori devono trovarsi d'accordo nella misurazione della velocità della luce ci costringe a cambiare il nostro concetto di tempo. Nel quadro della teoria della relatività, l'osservatore sul treno e quello posto accanto al binario sarebbero in disaccordo riguardo alla distanza percorsa dalla luce, e dato che la velocità è data dalla distanza percorsa divisa per il tempo impiegato a percorrerla, l'unico modo in cui possono trovarsi d'accordo sulla velocità della luce è quello di essere in disaccordo riguardo al tempo da essa impiegato. In altre parole, la teoria della relatività mette fine all'idea di un tempo assoluto! Ogni osservatore deve avere una propria misura del tempo, registrata da un orologio che porta con sé, e gli orologi portati da diversi osservatori, anche qualora siano identici, non segnano necessariamente lo stesso tempo.

Nella relatività non c'è bisogno di introdurre l'idea di un etere, la cui presenza – come ha dimostrato

l'esperimento di Michelson e Morley – non può essere rilevata in alcun modo. La teoria della relatività ci costringe però a modificare radicalmente la nostra concezione dello spazio e del tempo. Dobbiamo cioè accettare l'idea secondo la quale il tempo non è completamente separato dallo spazio e da esso indipendente, ma – al contrario – è congiunto a esso in un'unica entità indicata come «spazio-tempo». Non è certo facile comprendere e assimilare queste idee. Dovettero passare anni prima che la relatività venisse universalmente accettata anche solo all'interno della stessa comunità dei fisici. Il semplice fatto che Einstein sia stato in grado di concepirla testimonia la grandezza del suo genio, così come la fiducia che egli aveva nella propria logica è attestata da come è stato in grado di trarre le conseguenze di tale teoria nonostante le stravaganti conclusioni alle quali sembrava condurre.

È un fatto di comune esperienza che si possa descrivere la posizione di un punto nello spazio per mezzo di tre numeri (o coordinate). Per esempio, possiamo dire che un punto in una stanza si trova a due metri da una parete, a un metro da un'altra e a un metro e mezzo dal pavimento. Oppure possiamo specificare che un punto si trova a una determinata latitudine e longitudine e a una certa altezza sul livello del mare. Si è liberi di scegliere a piacere tre coordinate adatte, anche se occorre tener presente che il loro ambito di validità è comunque limitato. Non sarebbe certo opportuno, ai fini pratici, indicare la posizione della Luna in chilometri a nord e a ovest di Piccadilly Circus e in metri sul livello del mare. La potremmo invece indicare prendendo come coordinate la distanza dal Sole, la distanza dal piano delle orbite dei pianeti e l'angolo formato dalla linea che congiunge la Luna al Sole con la linea che congiunge il Sole a una stella vicina, come Proxima Centauri. Ma anche queste coordinate non ci sarebbero di grande aiuto se volessimo descrivere la posizione del Sole all'interno della nostra galassia, o la posizione della nostra galassia nel gruppo di galassie del quale fa parte. In effetti, si potrebbe descrivere l'intero universo come una serie di settori parzialmente sovrapposti l'uno all'altro: in ognuno di questi settori, potremmo usare un diverso insieme di tre coordinate per specificare la posizione di un punto.

Nello spazio-tempo della relatività, ogni evento (vale a dire, qualunque cosa accada in un particolare punto dello spazio e in un particolare istante del tempo) può essere indicato per mezzo di quattro numeri o coordinate. Anche in questo caso, la scelta delle coordinate è arbitraria: possiamo prendere a piacere tre coordinate spaziali ben definite e una qualunque misura di tempo. Nella relatività, però, non c'è alcuna distinzione reale tra le coordinate spaziali e quella temporale, proprio come non c'è alcuna differenza reale tra due coordinate spaziali qualsiasi. Volendo, potremmo scegliere un nuovo insieme di coordinate in cui, per fare un esempio, la prima coordinata spaziale sia una combinazione della prima e della seconda coordinata spaziale del vecchio insieme. In questo senso, invece di misurare la posizione di un punto sulla Terra in chilometri a nord e a ovest di Piccadilly Circus, si potrebbe parlare di chilometri a nordest di Piccadilly e chilometri a nordovest di Piccadilly. Analogamente, nella teoria della relatività, potremmo usare una nuova coordinata temporale che sia data dalla somma del vecchio tempo (espresso in secondi) e della distanza (in secondi-luce) a nord di Piccadilly.

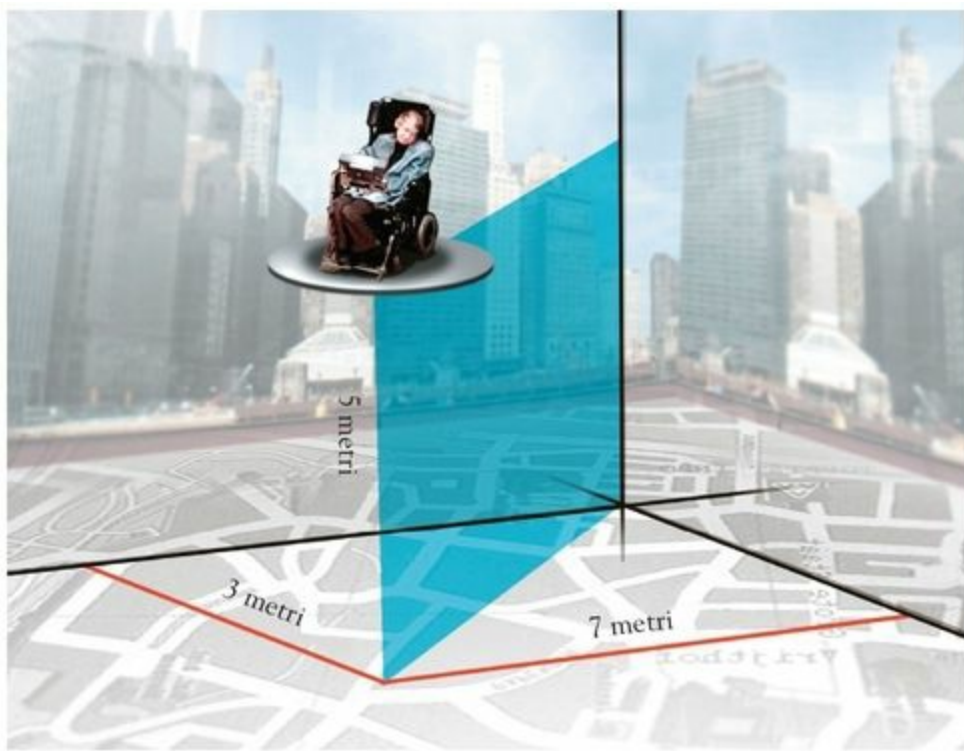


Figura 9. Le coordinate nello spazio

Quando affermiamo che lo spazio ha tre dimensioni, intendiamo dire che occorrono tre numeri, o coordinate, per specificare ogni singolo punto.

Se a questa nostra descrizione aggiungiamo anche il tempo, lo spazio diventa uno spazio-tempo quadridimensionale.

Un'altra conseguenza ben nota della teoria della relatività è l'equivalenza di massa ed energia, compendiata nella celebre equazione di Einstein $E = mc^2$ (dove E è l'energia, m la massa e c la velocità della luce). Spesso le persone si servono di questa equazione per calcolare quanta energia verrebbe prodotta se, diciamo, una piccola quantità di materia fosse convertita in pura radiazione elettromagnetica. (Dato che la velocità della luce è un numero molto grande, la risposta è: tantissima. Per esempio, il peso della materia convertita in energia nella bomba che distrusse la città di Hiroshima era meno di trenta grammi.) Questa equazione ci dice però anche che se l'energia di un oggetto aumenta, aumenta anche la sua massa, ossia la sua resistenza all'accelerazione (o variazione di velocità).

Una delle forme di energia è quella del moto, la cosiddetta energia cinetica. Per far sì che la vostra auto inizi a muoversi, occorre dell'energia; allo stesso modo, c'è bisogno di energia anche per incrementare la velocità di un qualunque altro oggetto. L'energia cinetica posseduta da un oggetto in movimento è pari all'energia che dovete impiegare per far sì che questo oggetto si muova. Pertanto, quanto più è alta la velocità di un corpo, tanto maggiore sarà l'energia cinetica che esso possiede. Ma, per via dell'equivalenza di massa ed energia, l'energia cinetica andrà ad aggiungersi alla massa di questo oggetto; di conseguenza, quanto più un oggetto si muove velocemente, tanto più la sua massa risulterà accresciuta e tanto più sarà difficile aumentare ulteriormente la sua velocità.

Questo effetto, però, diventa davvero rilevante solo per oggetti che si muovano a velocità prossime a quelle della luce. Per esempio, a una velocità pari al 10 per cento di quella della luce, la massa di un oggetto sarà superiore solo dello 0,5 per cento rispetto al normale, mentre al 90 per cento della velocità della luce essa aumenterà a più del doppio. Man mano che un oggetto si avvicina alla

velocità della luce, la sua massa cresce sempre più rapidamente, così che per aumentare ulteriormente la sua velocità occorre una quantità di energia via via maggiore. Stando alla teoria della relatività, un oggetto non può quindi mai raggiungere la velocità della luce, poiché in tal caso la sua massa diventerebbe infinita e pertanto, in forza dell'equivalenza tra massa ed energia, per fargli raggiungere tale velocità si dovrebbe impiegare una quantità infinita di energia. È per questa ragione che tutti gli oggetti normali sono per sempre confinati dalla relatività a muoversi a velocità inferiori a quella della luce: soltanto la luce stessa, o altre onde che non posseggono una massa intrinseca, possono viaggiare a tale velocità limite.

La teoria della relatività formulata da Einstein nel 1905 viene indicata come «relatività speciale». Ciò è dovuto al fatto che essa, anche se ebbe un grande successo nello spiegare come mai la velocità della luce sia la medesima per tutti gli osservatori e nel descrivere ciò che accade quando le cose si muovono a velocità prossime a quelle della luce, era in disaccordo con la teoria newtoniana della gravità. La teoria di Newton ci dice che in un qualunque istante del tempo gli oggetti si attraggono vicendevolmente con una forza che dipende dalla distanza che intercorre tra di loro in quel determinato istante. Ciò significa che qualora spostassimo uno degli oggetti, la forza esercitata sull'altro cambierebbe istantaneamente. Per fare un esempio, la teoria di Maxwell ci dice che se il Sole scomparisse all'improvviso, la Terra non sprofonderebbe nell'oscurità per altri otto minuti circa (dato che è questo il tempo impiegato dalla luce del Sole per giungere fino a noi); tuttavia, stando alla gravità newtoniana, la Terra cesserebbe immediatamente di subire l'attrazione gravitazionale del Sole e abbandonerebbe quindi la propria orbita. L'effetto gravitazionale della scomparsa del Sole ci raggiungerebbe quindi con una velocità infinita, anziché propagarsi a una velocità pari (o inferiore) a quella della luce, come richiedeva la teoria della relatività speciale. Tra il 1908 e il 1914, Einstein fece molteplici tentativi, che non furono però coronati dal successo, per trovare una teoria della gravità che fosse in accordo con la relatività speciale. Infine, nel 1915, egli propose quella teoria ancora più rivoluzionaria che è oggi nota come «teoria della relatività generale».

Lo spazio curvo

La teoria della relatività generale di Einstein si basa sull'idea rivoluzionaria secondo la quale la gravità non è una forza come le altre, bensì una conseguenza del fatto che lo spazio-tempo non è piatto, come si era supposto in precedenza. Nella relatività generale, lo spazio-tempo è incurvato (o «distorto») dalla distribuzione della massa e dell'energia in esso presenti. I corpi come la Terra non sono costretti a muoversi lungo orbite curve dall'azione di una forza chiamata gravità; essi, invece, seguono delle orbite curve perché queste ultime sono la cosa che più si avvicina a una traiettoria rettilinea all'interno di uno spazio curvo, ossia una geodetica. In termini tecnici, una geodetica è definita come la traiettoria più breve (o più lunga) tra due punti vicini.

Un piano geometrico costituisce un esempio di uno spazio bidimensionale piatto, sul quale le geodetiche sono linee rette. La superficie della Terra, invece, è uno spazio bidimensionale curvo. Sulla Terra, una geodetica è indicata con il termine «cerchio massimo». L'equatore è un cerchio massimo, così come ogni altro cerchio tracciato sul globo il cui centro coincida con il centro della Terra. (L'espressione «cerchio massimo» deriva dal fatto che si tratta dei cerchi più grandi che si possano tracciare sulla superficie del globo terrestre.) Dato che la geodetica è la traiettoria più breve tra due aeroporti, essa sarà il percorso che l'ufficiale di rotta dirà al pilota di seguire. Per esempio, per volare da New York a Madrid potreste seguire la vostra bussola viaggiando sempre verso est per 5966 chilometri, seguendo cioè la linea longitudinale che passa per queste due città. Se però decidete di volare lungo un cerchio massimo – facendo dapprima rotta in direzione nordest, quindi girando gradualmente verso est e infine verso sudest –, percorrerete in tutto soltanto 5802 chilometri. La rappresentazione di questi due percorsi su di una mappa – nella quale la superficie del globo viene appiattita e, quindi, distorta – ci può trarre in inganno. Quando viaggiamo «direttamente» (in linea retta) verso est da un punto all'altro della superficie terrestre, in realtà non stiamo procedendo direttamente, almeno non nel senso del tragitto più diretto – la geodetica, appunto.



Figura 10. Le distanze sul globo terrestre

Il percorso più breve che collega due punti sulla Terra si trova lungo un «cerchio massimo», che non corrisponde a una linea retta se lo si osserva su una mappa bidimensionale.

Nella relatività generale, i corpi seguono sempre le geodetiche nello spazio-tempo quadridimensionale. In assenza di materia, queste linee rette nello spazio-tempo quadridimensionale corrispondono a delle linee rette anche nello spazio tridimensionale. In presenza di materia, però, lo spazio-tempo quadridimensionale è distorto, e ciò fa sì che nello spazio tridimensionale i corpi risultino seguire delle traiettorie curve (in un modo che, nella vecchia teoria newtoniana, veniva spiegato tramite gli effetti dell'attrazione gravitazionale). È un po' come osservare un aeroplano che vola sopra una zona collinare. Nello spazio tridimensionale, l'aereo potrebbe anche volare lungo una linea retta, ma provate a togliere la terza dimensione – l'altezza – e vedrete che la sua ombra sulla superficie bidimensionale delle colline segue una traiettoria incurvata. Oppure, potete anche immaginare un'astronave che viaggia in linea retta attraverso lo spazio, passando esattamente sopra il Polo Nord. Provate quindi a proiettare il suo percorso sulla superficie bidimensionale della Terra, e vedrete che si tratta di un semicerchio che traccia una linea longitudinale nell'emisfero settentrionale. Per quanto ciò possa essere più difficile da rappresentare, la massa del Sole incurva lo spazio-tempo in modo tale che anche se in realtà la Terra segue una traiettoria rettilinea nello spazio-tempo quadridimensionale, nello spazio tridimensionale essa ci appare muoversi lungo un'orbita quasi circolare.

In realtà, per quanto vengano calcolate in modi diversi, le orbite dei pianeti predette dalla relatività generale sono quasi esattamente identiche a quelle predette dalla teoria newtoniana della gravità. La maggiore differenza riguarda l'orbita di Mercurio che, essendo il pianeta più vicino al Sole, è soggetto agli effetti gravitazionali più intensi e ha un'orbita ellittica piuttosto allungata. La relatività generale predice che l'asse maggiore di questa ellisse dovrebbe ruotare intorno al Sole spostandosi di circa un grado ogni diecimila anni. Per quanto piccolo possa essere, tale effetto era già stato notato (si veda il capitolo 3) molto tempo prima del 1915, e costituì una delle prime conferme della teoria di Einstein. In anni recenti, gli scarti ancora più piccoli delle orbite degli altri pianeti rispetto alle traiettorie predette da Newton sono stati misurati con il radar e si è visto come siano in accordo con le predizioni della relatività generale.

Anche i raggi di luce devono seguire le geodetiche nello spazio-tempo. E anche in questo caso, il fatto che lo spazio sia incurvato ha come conseguenza che la luce non ci appaia propagarsi nello spazio in linea retta. La relatività generale predice quindi che i campi gravitazionali dovrebbero incurvare i raggi luminosi. Per esempio, la teoria predice che la traiettoria seguita dalla luce in prossimità del Sole dovrebbe essere leggermente incurvata verso l'interno, proprio a causa della presenza della massa solare. Ciò significa che i raggi luminosi provenienti da una stella lontana che si trovassero a passare vicino al Sole verrebbero deviati di un piccolo angolo, così che un osservatore sulla Terra vedrebbe la stella in una posizione diversa da quella reale. Naturalmente, se la luce di questa stella passasse sempre in prossimità del Sole, noi non saremmo in grado di dire se questa luce venga davvero deviata o se invece la stella si trovi realmente dove la vediamo. Tuttavia, mentre la Terra compie la propria orbita intorno al Sole, diverse stelle passano dietro il disco solare

e la loro luce subisce così una deflessione. Di conseguenza, la posizione apparente di queste stelle in rapporto alle altre viene a cambiare.



Figura 11. Il tracciato dell'ombra di un'astronave

Proiettato sulla superficie bidimensionale della Terra, il percorso di un'astronave che viaggia in linea retta attraverso lo spazio apparirà curvo.

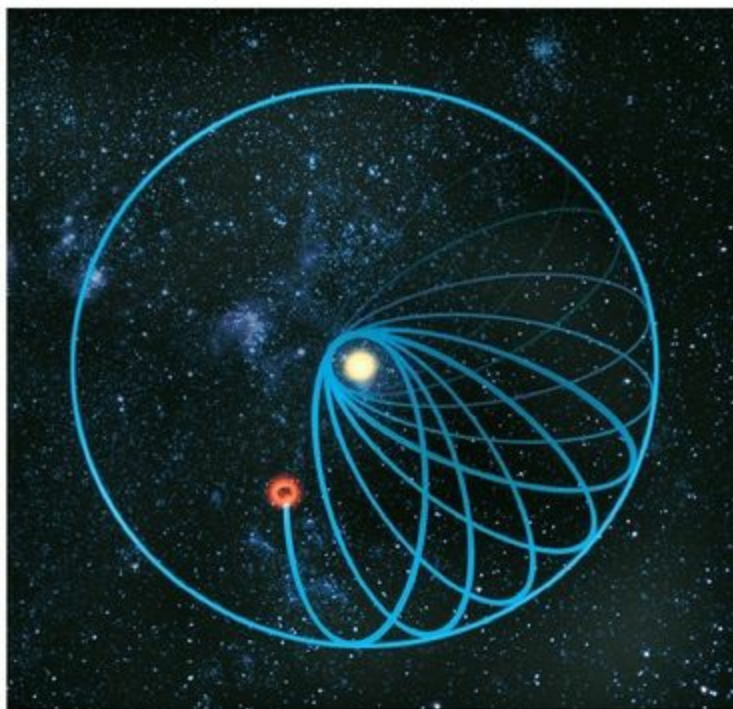


Figura 12. La precessione dell'orbita di Mercurio

Man mano che Mercurio compie le proprie rivoluzioni intorno al Sole, l'asse maggiore della sua orbita ellittica ruota a sua volta – molto più lentamente – intorno alla stella, tornando alla posizione di partenza ogni 360.000 anni circa.

In condizioni normali è molto difficile osservare questo effetto, poiché la luce del Sole rende

impossibile la visione delle stelle che si trovano in prossimità del disco solare stesso. La situazione cambia però radicalmente durante un'eclisse di Sole, quando l'interposizione della Luna impedisce alla luce solare di giungere alla Terra. La predizione fatta da Einstein sulla deflessione della luce non poté essere verificata immediatamente nel 1915, poiché era allora in corso la Prima guerra mondiale. Fu solo nel 1919 che una spedizione britannica, osservando un'eclisse dalle coste dell'Africa occidentale, confermò che la luce veniva effettivamente deflessa dal Sole secondo le previsioni della teoria. Questa prova sperimentale di una teoria tedesca da parte di scienziati britannici fu salutata come un grande gesto di riconciliazione fra i due Paesi dopo la guerra. È pertanto un'ironia della sorte che un successivo esame delle fotografie scattate nel corso di quella spedizione abbia dimostrato la presenza di errori dello stesso ordine di grandezza dell'effetto che si cercava di misurare. La misurazione di questi scienziati era quindi stata un caso di mera fortuna, o magari era stata influenzata dal fatto di conoscere in anticipo i risultati che si volevano ottenere – cosa non rara in ambito scientifico. In seguito, comunque, la deflessione della luce è stata confermata da un gran numero di osservazioni accurate.

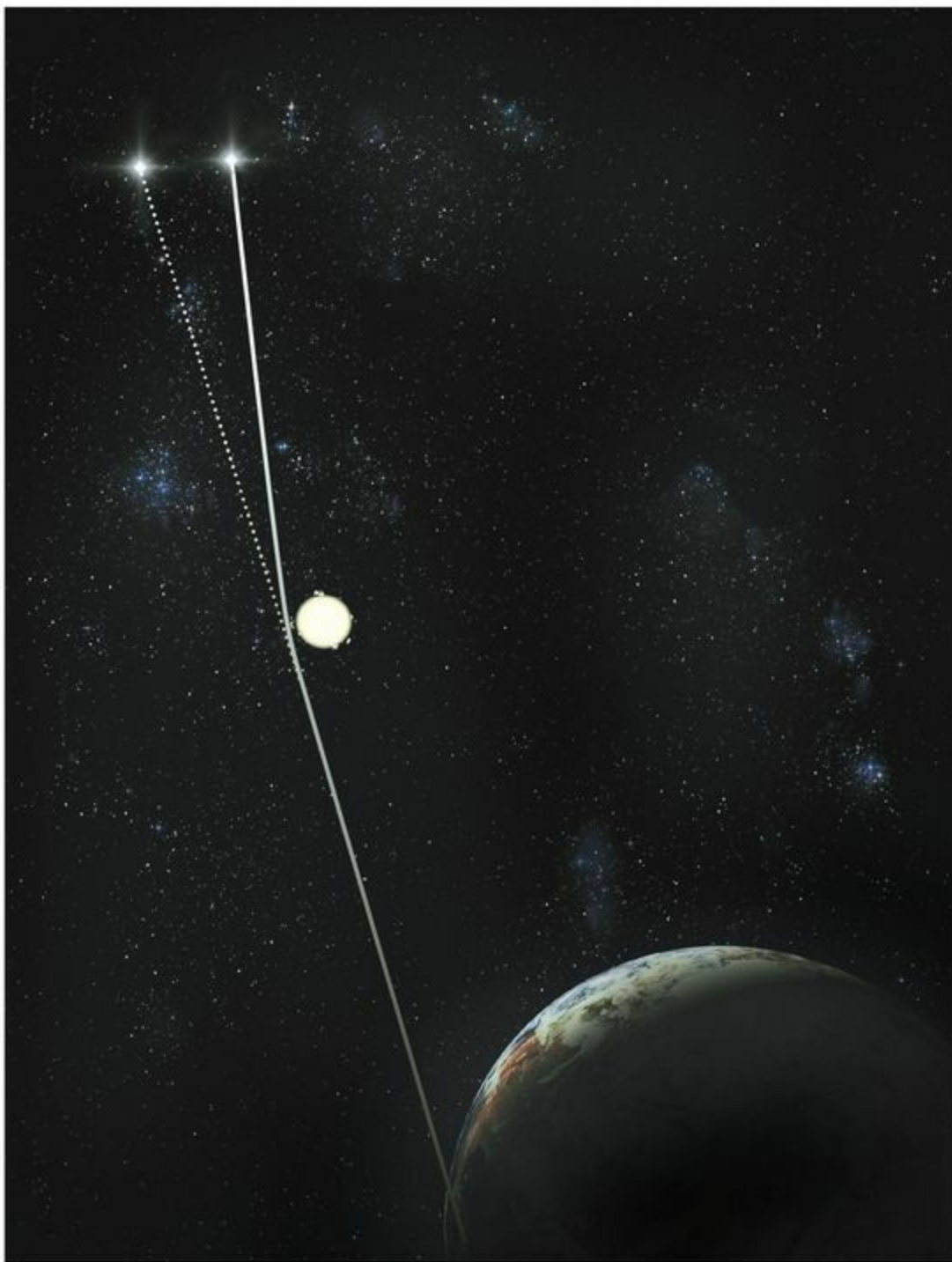


Figura 13. Deflessione della luce in prossimità del Sole

Quando il Sole si trova quasi direttamente interposto tra la Terra e una stella lontana, il suo campo gravitazionale deflette la luce di questa stella, alterandone la posizione apparente.

Un'altra predizione della relatività generale afferma che in prossimità di un corpo di massa elevata, come la Terra, lo scorrere del tempo dovrebbe apparire più lento. Einstein lo comprese già nel 1907, cinque anni prima di capire che la gravità alterava anche la forma dello spazio e otto anni prima di completare la propria teoria. Dedusse questo effetto in base al principio di equivalenza, che nella relatività generale giocò lo stesso ruolo che il postulato fondamentale aveva rivestito nel quadro della relatività speciale.

Il postulato fondamentale, come ricorderete, affermava che le leggi della scienza dovrebbero essere le stesse per tutti gli osservatori che si muovono liberamente, a prescindere dalla loro velocità. Ora,

per dirla in parole semplici, il principio di equivalenza estende questo postulato anche agli osservatori che non si muovono liberamente, ma si trovano sotto l'influenza di un campo gravitazionale. Se volessimo essere precisi, dovremmo tener conto del fatto che nella formulazione di tale principio rientrano anche alcuni aspetti strettamente tecnici – come il fatto che se il campo gravitazionale non è uniforme, bisogna applicare il principio separatamente a una serie di piccoli settori parzialmente sovrapposti l'uno all'altro –, ma noi non ci soffermeremo su questi punti. Per quanto ci riguarda, possiamo formulare il principio in questi termini: in una regione dello spazio sufficientemente piccola, è impossibile dire se un corpo si trovi in uno stato di quiete all'interno di un campo gravitazionale, o se stia accelerando uniformemente nello spazio vuoto.

Immaginate di trovarvi in un ascensore collocato nello spazio vuoto. Non c'è gravità, quindi non ci sono neppure un «alto» e un «basso». State fluttuando liberamente. Ora l'ascensore inizia a muoversi con un'accelerazione costante. Improvvisamente vi sentite pesanti, ossia avvertite una forza che vi attrae verso una delle estremità dell'ascensore, che all'improvviso vi sembra essere diventata il suo pavimento! Se avevate in mano una mela e ora la lasciate andare, essa cadrà sul pavimento. Ora che state accelerando, tutto ciò che avviene all'interno dell'ascensore sarà di fatto indistinguibile da ciò che accadrebbe se l'ascensore fosse immobile all'interno di un campo gravitazionale uniforme. Einstein comprese che proprio come è impossibile dire se il treno in cui ci troviamo sia fermo o se si stia muovendo a velocità uniforme, è anche impossibile stabilire dall'interno se l'ascensore stia accelerando uniformemente o se sia invece fermo in un campo gravitazionale uniforme. Da questa considerazione egli dedusse il suo principio di equivalenza.

Il principio di equivalenza (e, con esso, l'esempio riportato qui sopra) vale soltanto se la massa inerziale (ossia la massa che compare nella seconda legge di Newton, che determina il grado di accelerazione di un corpo in seguito all'applicazione di una determinata forza) e la massa gravitazionale (ossia la massa a cui si fa riferimento nella legge di gravità di Newton, che determina l'intensità dell'attrazione gravitazionale a cui questo corpo è soggetto) sono la stessa cosa (si veda il capitolo 4). Ciò è dovuto al fatto che se i due tipi di massa coincidono, tutti gli oggetti all'interno di un campo gravitazionale cadranno alla stessa velocità, indipendentemente dalle loro masse. Se però questa equivalenza non valesse, sotto l'influenza della gravità alcuni oggetti cadrebbero più velocemente di altri, e sarebbe quindi possibile distinguere l'attrazione gravitazionale dall'accelerazione uniforme (con la quale la velocità di caduta – all'interno dell'ascensore, per rimanere al nostro esempio – resterebbe la stessa per tutti i corpi). Einstein si servì dell'equivalenza di massa inerziale e massa gravitazionale per derivare il proprio principio di equivalenza e, in ultima analisi, l'intera relatività generale: tutto questo suo rigoroso procedimento deduttivo, basato su una ferrea logica, non trova uguali nella storia del pensiero umano.

Ora che conosciamo il principio di equivalenza, possiamo iniziare a seguire il ragionamento di Einstein attraverso un altro esperimento mentale, che ci permette di comprendere perché il tempo deve essere influenzato dalla gravità. Provate a immaginare un razzo nello spazio. Per comodità, supponiamo che la sua lunghezza sia tale che la luce impieghi un secondo per percorrerlo da un estremo all'altro. Infine, supponiamo che in questo razzo ci siano due osservatori, uno nella cupola superiore e l'altro alla base, dotati di due orologi identici che emettono un ticchettio ogni secondo. Immaginiamo ora che l'osservatore nella cupola attenda il rintocco dell'orologio e mandi quindi

immediatamente un segnale luminoso al suo collega situato alla base. Egli ripete poi questa operazione anche al rintocco successivo. Stando alla nostra ipotesi iniziale, ciascun segnale viaggia per un secondo e viene quindi ricevuto dall'osservatore che si trova alla base del razzo. Così, dato che l'osservatore nella cupola invia due segnali luminosi a un secondo di distanza l'uno dall'altro, quello alla base riceverà due segnali, sempre a un secondo di distanza.

Ma se invece che fluttuare liberamente nello spazio il nostro razzo fosse fermo sulla Terra, sotto l'influsso della gravità, che cosa accadrebbe di diverso? Stando alla teoria di Newton, la gravità non influisce in alcun modo su questa situazione: se l'osservatore nella cupola manda i due segnali a un secondo di distanza, quello alla base li riceverà sempre a un secondo di distanza. Il principio di equivalenza, però, non fa questa stessa predizione. Possiamo vedere ciò che accade – ci dice questo principio – prendendo in esame, anziché l'effetto della gravità, l'effetto dell'accelerazione uniforme. Questo è un esempio del modo in cui Einstein ha sfruttato il principio di equivalenza per creare la sua nuova teoria della gravità.

Supponiamo quindi che il nostro razzo stia accelerando. (Immagineremo che stia accelerando lentamente, senza avvicinarsi alla velocità della luce!) Dato che il razzo si muove verso l'alto, il primo segnale dovrà percorrere una distanza più breve rispetto a quella dell'esempio precedente, e pertanto impiegherà meno di un secondo per arrivare a destinazione. Se il razzo si muovesse a velocità costante, il secondo segnale impiegherebbe esattamente questo stesso tempo per giungere all'osservatore posto alla base del razzo, e pertanto l'intervallo tra i due segnali resterebbe sempre di un secondo. A causa dell'accelerazione, però, quando l'osservatore nella cupola invia il secondo segnale, il razzo si starà muovendo più velocemente di quando aveva inviato il primo: di conseguenza, il secondo segnale dovrà percorrere una distanza ancora più ridotta rispetto a quella attraversata dal primo, e arriverà quindi a destinazione in un tempo ancora più breve. L'osservatore posto alla base misurerà pertanto sul proprio orologio meno di un secondo tra i due segnali, trovandosi così in disaccordo con l'osservatore della cupola, che afferma di averli inviati a un secondo esatto di distanza l'uno dall'altro.

Probabilmente, nel caso dell'accelerazione del razzo questo fatto non ci sorprenderà – dopotutto, l'abbiamo appena spiegato! Dobbiamo però tenere a mente come il principio di equivalenza affermi che tali considerazioni possano essere applicate anche a un razzo immobile all'interno di un campo gravitazionale. In altre parole, anche se il razzo non sta accelerando, ma – per esempio – è fermo su una rampa di lancio posta sulla superficie terrestre, se l'osservatore nella cupola manda dei segnali a quello alla base a intervalli di un secondo (stando al suo orologio), l'osservatore alla base (stando al proprio orologio) li riceverà a intervalli più brevi. E *questo sì* che è un fatto sorprendente!

Ci si potrebbe ancora chiedere: ciò significa che la gravità altera il tempo, oppure semplicemente che danneggia gli orologi? Supponiamo che l'osservatore alla base del razzo salga fin nella cupola per confrontare il proprio orologio con quello del suo collega. Si tratta di orologi identici e, com'è prevedibile, gli osservatori vedranno che ora segnano la stessa durata di ogni secondo. L'orologio dell'osservatore alla base, quindi, non è stato danneggiato: in qualunque luogo si trovi, misura lo scorrere del tempo locale. Pertanto, proprio come la relatività speciale ci dice che lo scorrere del tempo è diverso per gli osservatori che si trovano in movimento l'uno rispetto all'altro, la relatività generale indica che il tempo scorre in maniera differente anche per gli osservatori che si trovano in

campi gravitazionali diversi. Stando alla relatività generale, l'osservatore alla base ha misurato un intervallo di tempo più breve tra un segnale e l'altro perché, se ci si trova più vicini alla superficie della Terra, il tempo scorre più lentamente per via della maggiore intensità della gravità. Quanto più forte è il campo gravitazionale, tanto maggiore sarà questo suo effetto. Le leggi del moto di Newton misero fine all'idea di una posizione assoluta nello spazio. Ora, come abbiamo visto, la teoria della relatività si lascia alle spalle anche l'assolutezza del tempo.

Questa predizione venne provata empiricamente nel 1962, usando una coppia di orologi estremamente precisi collocati sulla cima e alla base di una torre serbatoio. L'orologio posto alla base, più vicino alla superficie terrestre, risultò funzionare più lentamente, proprio come prediceva la relatività generale. L'effetto è di per sé piccolo: un orologio collocato sulla superficie del Sole rimarrebbe indietro soltanto di circa un minuto all'anno rispetto a un altro orologio posto sulla superficie della Terra. Ciononostante, la differenza nella velocità degli orologi posti ad altitudini diverse sopra la superficie terrestre ha acquistato oggi – con l'avvento di sistemi di navigazione molto accurati basati sui segnali emessi dai satelliti – un'importanza pratica considerevole. Se si ignorassero le predizioni della relatività generale, le posizioni calcolate risulterebbero sbagliate di diversi chilometri!

Anche i nostri orologi biologici risentono allo stesso modo di queste alterazioni nello scorrere del tempo. Consideriamo una coppia di gemelli. Supponiamo che uno di loro vada a vivere sulla cima di una montagna, mentre l'altro rimanga al livello del mare. Il primo gemello invecchierà più rapidamente del secondo e pertanto, se si rincontrassero, uno dei due sarebbe più vecchio dell'altro. In questo caso, la differenza di età sarebbe molto piccola; essa sarebbe però di gran lunga più grande se uno dei gemelli partisse per un lungo viaggio su un'astronave, accelerando fino a sfiorare la velocità della luce. Al suo ritorno, egli sarebbe molto più giovane del suo gemello rimasto sulla Terra. Questo caso è noto come il paradosso dei gemelli, ma è un paradosso solo se non riusciamo a sbarazzarci dell'idea di un tempo assoluto. Nella teoria della relatività non esiste un unico tempo assoluto, ma ogni singolo individuo ha una propria personale misura del tempo, che dipende da dove si trova e da come si sta muovendo.

Prima del 1915, lo spazio e il tempo erano concepiti come un palcoscenico fisso sul quale gli eventi avevano luogo, ma che non risentiva di ciò che accadeva in esso. Ciò valeva anche per la teoria della relatività speciale. I corpi si muovevano, le forze attraevano e respingevano, ma il tempo e lo spazio continuavano semplicemente la loro esistenza, senza subire alcuna alterazione. Era naturale pensare che spazio e tempo durassero per sempre. Nel quadro della teoria della relatività generale, però, la situazione è completamente diversa. In essa, infatti, lo spazio e il tempo sono quantità dinamiche: quando un corpo si muove o una forza agisce, ciò viene a incidere sulla curvatura dello spazio-tempo; e, a sua volta, la struttura dello spazio-tempo influisce sul modo in cui i corpi si muovono e le forze agiscono. Spazio e tempo non solo influiscono su tutto ciò che accade nell'universo, ma risentono a loro volta di tutto ciò che accade nell'universo. Come non si può parlare di eventi che si verificano nell'universo senza far ricorso alle nozioni di spazio e di tempo, così nella relatività generale non ha più alcun senso parlare di spazio e di tempo al di fuori dei confini dell'universo. Nei decenni successivi al 1915, questa nuova comprensione dello spazio e del tempo avrebbe rivoluzionato la nostra concezione dell'universo. Come vedremo, la vecchia idea di un universo

sostanzialmente immutabile, che potrebbe essere esistito da (e potrebbe continuare a esistere per) sempre, fu sostituita dalla concezione di un universo dinamico, in espansione, che sembrava aver avuto inizio in un determinato momento del passato e che poteva finire in un determinato momento del futuro.

L'universo in espansione

Se osserviamo il cielo in una notte limpida, senza Luna, gli oggetti più luminosi che si presentano al nostro sguardo sono di solito i pianeti Venere, Marte, Giove e Saturno. Ci sarà inoltre un numero grandissimo di stelle, che sono corpi celesti simili al nostro Sole ma molto più distanti. In concomitanza con il moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole, alcune di queste stelle fisse mutano, seppure di pochissimo, la loro posizione le une rispetto alle altre; in realtà, quindi, esse non sono esattamente «fisse»! Ciò è dovuto al loro essere relativamente vicine alla Terra. Mentre il nostro pianeta ruota intorno al Sole, noi vediamo queste stelle più vicine da diverse posizioni, sullo sfondo costituito dalle stelle più lontane. Questo stesso effetto è osservabile anche quando stiamo guidando lungo una strada aperta, e le posizioni relative degli alberi vicini ci sembrano mutare sullo sfondo di ciò che si trova all'orizzonte. Quanto più gli alberi sono vicini, tanto maggiore ci appare il loro spostamento. Questa variazione nella posizione relativa è detta «parallasse». Nel caso delle stelle, si tratta di una fortuna, perché ci permette di misurare direttamente la loro distanza dalla Terra.

Come abbiamo ricordato nel capitolo 1, la stella a noi più vicina, Proxima Centauri, è a circa quattro anni-luce (o 37 milioni di milioni di chilometri) di distanza. La maggior parte delle altre stelle visibili a occhio nudo si trova entro un raggio di qualche centinaio di anni-luce da noi. Il nostro Sole, invece, si trova a soli otto minuti-luce di distanza! Le stelle visibili appaiono distribuite in tutto il cielo notturno, ma sono particolarmente concentrate in una banda che chiamiamo Via Lattea. Già intorno al 1750, alcuni astronomi avevano avanzato l'ipotesi che l'aspetto della Via Lattea si potesse spiegare supponendo che la maggior parte delle stelle visibili si trovasse in una singola configurazione a forma di disco, un esempio di ciò che oggi indichiamo come galassia a spirale. Solo qualche decennio dopo, l'astronomo sir William Herschel confermò quest'idea catalogando minuziosamente le posizioni e le distanze di un gran numero di stelle. Nonostante ciò, tale idea venne però pienamente accettata soltanto all'inizio del XX secolo. Oggi sappiamo che la Via Lattea – la nostra galassia – ha un diametro di circa 100.000 anni-luce e ruota lentamente su se stessa; le stelle che si trovano nelle braccia di questa spirale compiono un'orbita completa intorno al suo centro in diverse centinaia di milioni di anni. Il nostro Sole è soltanto una comune stella gialla, di media grandezza, collocata in prossimità del bordo interno di una delle braccia della spirale. Ne abbiamo fatta di strada dai tempi di Aristotele e Tolomeo, quando gli uomini pensavano che la Terra fosse il centro dell'universo!

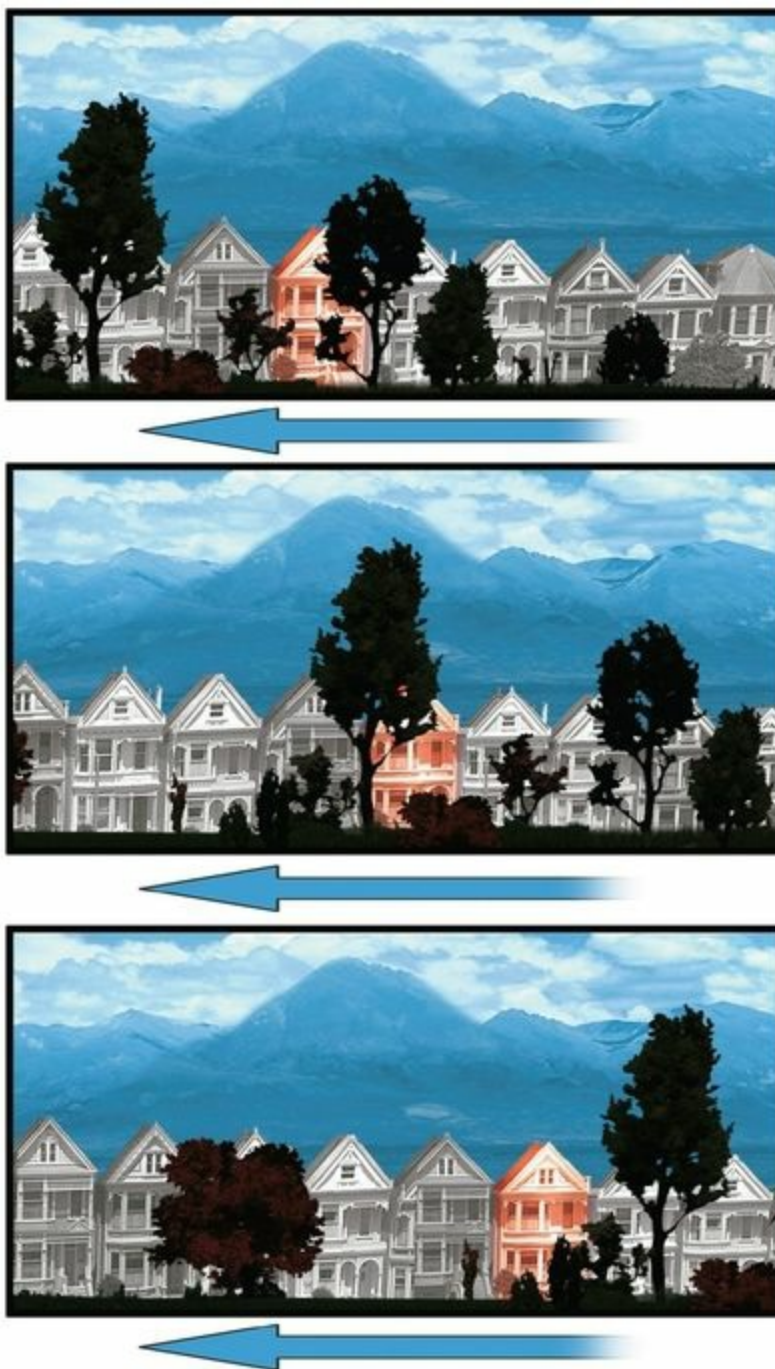


Figura 14. La parallasse

Sia che vi muoviate lungo una strada o attraverso lo spazio, la posizione relativa degli oggetti più vicini e più lontani viene comunque a cambiare man mano che vi spostate. Misurando questa variazione è possibile determinare la distanza relativa degli oggetti.

La nostra immagine moderna dell'universo risale solo al 1924, quando l'astronomo americano Edwin Hubble dimostrò che la Via Lattea non era l'unica galassia esistente. Egli scoprì che ne esistono molte altre, separate da immensi tratti di spazio vuoto. Per poterlo dimostrare, Hubble aveva bisogno di determinare le distanze di queste altre galassie dalla Terra. Esse, però, sono talmente lontane che, a differenza delle stelle vicine, sembrano occupare realmente delle posizioni fisse nella volta celeste. Non potendo quindi misurare le loro distanze sfruttando la parallasse, Hubble fu costretto a ricorrere a metodi indiretti. Una prima, ovvia misura della distanza di una stella è data dalla sua luminosità. Tuttavia, la luminosità apparente di una stella non dipende solo dalla sua distanza, ma

anche dalla quantità di luce che essa irraggia (la sua luminosità reale o assoluta). Una stella dalla luce più fioca, nel caso sia sufficientemente vicina, risplenderà nel nostro cielo più di quanto non faccia la stella più luminosa di una galassia lontana. Pertanto, per poter usare la luminosità apparente di una stella come misura della sua distanza, dobbiamo conoscere prima il valore della sua luminosità assoluta.

La luminosità assoluta delle stelle vicine può essere calcolata a partire dalla loro luminosità apparente, dato che in questo caso conosciamo la loro distanza grazie alla parallasse. Hubble notò che queste stelle vicine potevano essere classificate in determinati tipi in base al genere di luce che emettono. Lo stesso tipo di stelle aveva sempre la stessa luminosità assoluta. Egli concluse quindi che se trovassimo questi tipi di stelle in una galassia lontana, potremmo supporre che esse abbiano la stessa luminosità assoluta delle stelle simili a noi vicine. Sulla base di questo dato, ci sarebbe quindi possibile calcolare la distanza di quella galassia. Se potessimo applicare questo procedimento per un certo numero di stelle appartenenti alla medesima galassia, e i nostri calcoli dessero sempre la stessa distanza, potremmo allora considerare attendibile la nostra stima. In questo modo, Edwin Hubble calcolò le distanze di nove diverse galassie.

Oggi sappiamo che le stelle visibili a occhio nudo costituiscono solo una minuscola frazione della totalità delle stelle. Ne possiamo vedere direttamente circa 5000, un numero che corrisponde ad appena lo 0,0001 per cento circa delle stelle presenti soltanto nella nostra galassia, la Via Lattea. Quest'ultima, poi, è a sua volta soltanto una fra più di un centinaio di miliardi di galassie che possono essere viste attraverso i moderni telescopi, ciascuna delle quali contiene in media qualche centinaio di miliardi di stelle. Se ogni stella fosse un granello di sale, un cucchiaino da tè basterebbe per raccogliere tutte le stelle visibili a occhio nudo, ma tutte le stelle dell'universo riempirebbero una sfera di più di 12 chilometri di diametro.

Le stelle sono talmente lontane che ci appaiono come dei semplici puntini luminosi. Noi non riusciamo a scorgere le loro dimensioni o la loro forma. Tuttavia, come notò Hubble, ci sono molti tipi diversi di stelle, che possiamo distinguere in base al colore della loro luce. Newton scoprì che se la luce del Sole passa attraverso un pezzo di vetro di sezione triangolare (detto prisma), essa si scompone nei propri colori componenti, come in un arcobaleno. Le intensità relative dei diversi colori emessi da una determinata fonte di luce costituiscono il suo spettro. Mettendo a fuoco un telescopio su una singola stella o su una galassia, possiamo osservare lo spettro della sua luce.



Figura 15. Lo spettro stellare

Analizzando i colori componenti della luce di una stella è possibile determinare sia la sua temperatura, sia la composizione della sua atmosfera.

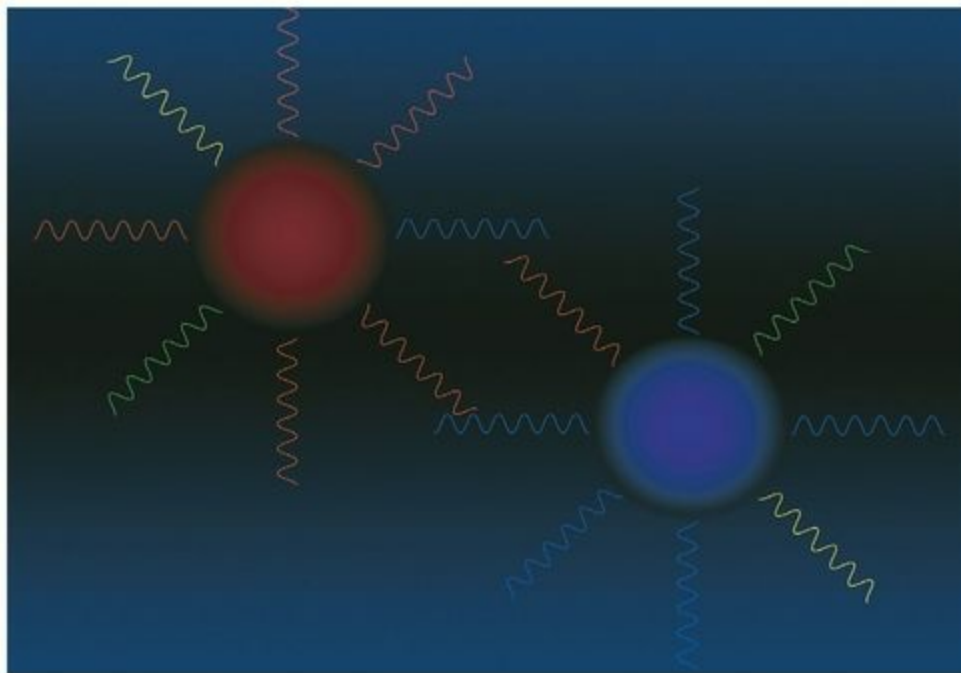


Figura 16. Lo spettro del corpo nero

Tutti gli oggetti – e non solo le stelle – emettono una forma di radiazione causata dal moto termico dei loro microscopici costituenti.

La distribuzione delle frequenze in questa radiazione è legata alla temperatura di un oggetto e ci permette quindi di calcolarla.

Un'informazione che ci viene data da questa luce è quella relativa alla temperatura. Nel 1860, il fisico tedesco Gustav Kirchhoff comprese che ogni corpo materiale (come una stella), quando viene riscaldato, emette della luce o altre forme di radiazioni: per esempio, quando gettiamo nel fuoco i tizzoni di carbone, essi si scaldano fino a diventare incandescenti. La luce emessa da questi oggetti incandescenti è dovuta al moto termico degli atomi in essi presenti. È indicata come radiazione del

corpo nero (anche se gli oggetti incandescenti non sono neri). Lo spettro della radiazione del corpo nero è difficile da confondere: esso, infatti, presenta una forma caratteristica che varia a seconda della temperatura del corpo. La luce emessa da un oggetto incandescente è quindi paragonabile a una lettura termometrica. Lo spettro che osserviamo da stelle differenti si presenta sempre in questa precisa forma: è come una sorta di cartolina che ci comunica lo stato termico di quella determinata stella.

Se guardiamo più attentamente, notiamo come la luce stellare ci dica anche qualcosa in più. Vediamo cioè che certi colori molto specifici non sono presenti, e che questi colori mancanti possono variare da stella a stella. Sapendo che ogni elemento chimico assorbe una serie caratteristica di colori molto specifici, confrontando questi ultimi con quelli che mancano dallo spettro di una stella possiamo determinare con precisione quali elementi sono presenti nella sua atmosfera.

Negli anni Venti, quando gli astronomi iniziarono a osservare gli spettri di stelle appartenenti ad altre galassie, trovarono qualcosa di estremamente peculiare: essi presentavano gli stessi schemi caratteristici di colori mancanti osservabili anche per le stelle della nostra galassia, ma erano tutti spostati di una medesima quantità relativa verso l'estremo rosso dello spettro. I fisici indicano lo spostamento del colore (o della frequenza) come «effetto Doppler». Esso ci è familiare nel campo dei suoni. Proviamo ad ascoltare un'automobile che passa sulla strada: quando il mezzo si avvicina, il suo motore – o la sua sirena – produce un suono più alto, mentre quando ci ha superati e si allontana questo suono diventa più basso. Il suono del suo motore o della sua sirena è un'onda, una successione di creste e di ventri. Quando un'automobile corre verso di noi, mentre emette ogni cresta d'onda successiva si troverà via via più vicina alla nostra posizione, così che la distanza tra le creste d'onda – ossia la lunghezza d'onda del suono – risulterà minore di quanto si avrebbe nel caso l'auto fosse ferma. Quanto più la lunghezza d'onda è ridotta, tanto più è alto il numero di queste fluttuazioni che raggiungono il nostro orecchio ogni secondo, e tanto più elevata sarà quindi la frequenza – o altezza – del suono stesso. Analogamente, se l'auto si sta allontanando da noi, la lunghezza d'onda sarà maggiore e le onde raggiungeranno il nostro orecchio con una frequenza più bassa. E quanto più è alta la velocità con cui l'auto si muove, tanto più grande risulterà essere l'effetto Doppler, di cui è quindi possibile servirsi proprio per misurare le velocità. Anche le onde luminose e le onde radio si comportano in modo simile. Di fatto, la polizia si serve dell'effetto Doppler per determinare la velocità delle automobili misurando la lunghezza d'onda degli impulsi di onde radio che vengono riflessi dalle auto stesse.

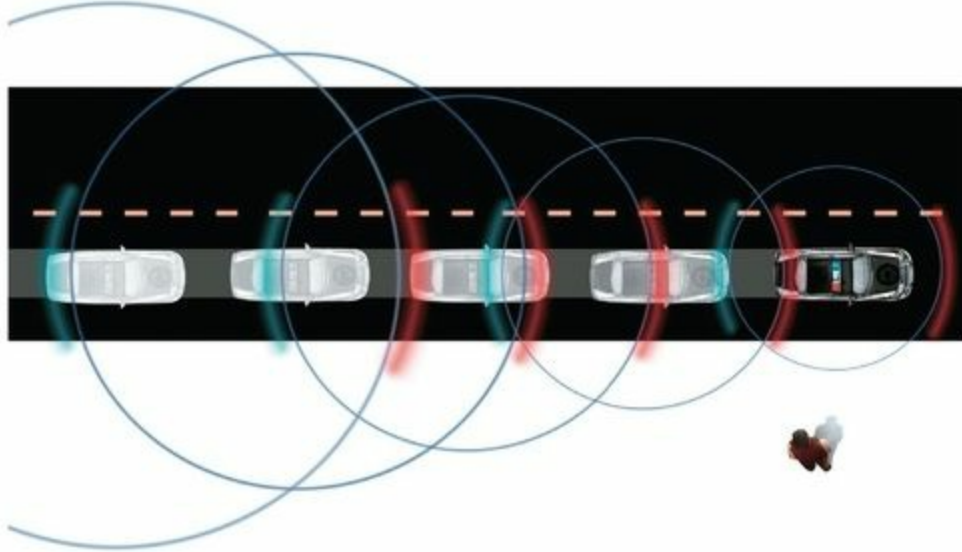


Figura 17. L'effetto Doppler

Quando una sorgente di onde si muove verso un osservatore, la loro lunghezza d'onda gli apparirà più ridotta; se invece la sorgente si allontana, la loro lunghezza d'onda gli apparirà maggiore. Si tratta del cosiddetto «effetto Doppler».

Come abbiamo evidenziato nel capitolo 5, la lunghezza d'onda della luce visibile è estremamente ridotta, andando dai 40 agli 80 milionesimi di centimetro. L'occhio umano percepisce le diverse lunghezze d'onda della luce come colori differenti: le lunghezze d'onda maggiori si collocano all'estremo rosso dello spettro, mentre quelle minori all'estremo blu. Immaginiamo ora una sorgente di luce che si trovi a una distanza fissa da noi, come una stella, e che emetta onde luminose di una lunghezza d'onda costante. La lunghezza d'onda delle onde che riceviamo sarà la stessa alla quale vengono emesse. Supponiamo però ora che questa fonte cominci ad allontanarsi da noi. Come nel caso del suono, ciò significa che la lunghezza d'onda della luce risulterà allungata, e quindi il suo spettro si sposterà verso l'estremo rosso dello spettro luminoso.

Negli anni successivi alla dimostrazione dell'esistenza di altre galassie, Hubble dedicò il proprio tempo a catalogare le loro distanze e a osservare i loro spettri. A quel tempo, la maggior parte delle persone si aspettava che le galassie si muovessero in modo del tutto casuale, così che Hubble si aspettava di trovare un egual numero di spettri spostati verso il rosso e di spettri spostati verso il blu. Fu perciò una sorpresa scoprire che la luce della maggior parte delle galassie appariva spostata verso il rosso: quasi tutte si stavano, cioè, allontanando da noi! Ancora più sorprendente fu la scoperta che Hubble pubblicò nel 1929: anche l'entità dello spostamento verso il rosso (*red shift*) di una galassia non è casuale, bensì è direttamente proporzionale alla distanza che ci separa da questa galassia. In altri termini, quanto più una galassia è distante, tanto più si allontana velocemente! E ciò significava che l'universo non poteva essere statico – o immutabile nelle sue dimensioni –, come tutti avevano precedentemente creduto. In realtà, l'universo si sta espandendo; la distanza tra le diverse galassie continua a crescere.

La scoperta dell'espansione dell'universo fu una delle grandi rivoluzioni intellettuali del XX secolo. Col senno di poi, è facile chiedersi perché mai nessuno ci avesse pensato prima. Newton e altri avrebbero dovuto comprendere che un universo statico sarebbe stato instabile, data l'assenza di una forza repulsiva in grado di controbilanciare l'attrazione gravitazionale che tutte le stelle e le galassie esercitano le une sulle altre. Pertanto, anche se in un certo istante l'universo fosse stato statico, non

avrebbe comunque potuto rimanere tale, poiché la mutua attrazione gravitazionale di tutte le stelle e le galassie avrebbe ben presto iniziato a causarne la contrazione. Di fatto, anche se l'universo si espandesse a una velocità piuttosto ridotta, la forza di gravità riuscirebbe infine a fermare la sua espansione, dopodiché, anche in questo caso, esso inizierebbe a contrarsi. Se però l'universo si espandesse a una velocità superiore a un certo valore critico, la gravità non sarebbe mai abbastanza forte da fermare questa espansione, e l'universo continuerebbe a espandersi per sempre. È un po' come ciò che accade quando, dalla superficie della Terra, lanciamo un razzo verso l'alto. Se la sua velocità è piuttosto bassa, la forza di gravità riuscirà infine a fermarlo ed esso inizierà quindi a ricadere al suolo. Se però la sua velocità supera un certo valore critico (circa 11 chilometri al secondo), la gravità non sarà sufficientemente forte per farlo tornare indietro, ed esso continuerà quindi ad allontanarsi dalla Terra per sempre.

Questo comportamento dell'universo avrebbe potuto essere predetto sulla base della teoria della gravità di Newton in un qualsiasi momento dell'Ottocento, del Settecento o persino alla fine del Seicento. Tuttavia, la fede in un universo statico era talmente forte da persistere fino agli inizi del Novecento. Persino Einstein, quando formulò la teoria generale della relatività nel 1915, era così sicuro che l'universo doveva essere statico che modificò la propria teoria al fine di rendere possibile questa staticità, introducendo nelle proprie equazioni un fattore di correzione, la cosiddetta «costante cosmologica». La costante cosmologica aveva l'effetto di una nuova forza «antigravitazionale» che, a differenza di altre forze, non proveniva da una qualche particolare sorgente, ma era incorporata nel tessuto stesso dello spazio-tempo. A causa di questa nuova forza, lo spazio-tempo aveva una tendenza intrinseca a espandersi. Regolando opportunamente il valore della costante cosmologica, Einstein poteva calibrare la forza di questa tendenza. Egli scoprì che poteva regolarla in modo da controbilanciare esattamente la mutua attrazione di tutta la materia presente nell'universo, così da ottenere un universo statico. In seguito, egli sconfessò la costante cosmologica, definendola come il suo «più grande errore». Come vedremo tra breve, oggi abbiamo dei motivi per credere che, in fin dei conti, potrebbe anche aver avuto ragione a introdurla. Tuttavia, ciò da cui Einstein rimase ferito nel proprio orgoglio fu senza dubbio il fatto di aver permesso che la propria fede in un universo statico avesse la precedenza su ciò che la sua stessa teoria sembrava predire: che, cioè, l'universo è in espansione. Soltanto un uomo, a quanto pare, era disposto a prendere questa predizione della relatività generale nel suo valore letterale. Mentre Einstein e altri fisici cercavano dei modi per evitare l'universo non-statico della relatività generale, il fisico e matematico russo Aleksandr Fridman si propose invece di spiegarlo.

Fridman partì da due assunti molto semplici riguardo all'universo: che esso appare identico in qualunque direzione si guardi, e che ciò varrebbe anche se lo osservassimo da qualunque altra posizione. Sulla base di queste due sole idee, Fridman dimostrò, risolvendo le equazioni della relatività generale, che non dovremmo aspettarci che l'universo sia statico. Di fatto, nel 1922 – diversi anni prima della scoperta di Edwin Hubble – Fridman predisse esattamente ciò che Hubble avrebbe poi trovato.

Ovviamente, l'assunto secondo cui l'universo appare uguale in qualunque direzione si guardi non rispecchia esattamente la realtà. Per esempio, come abbiamo visto, le altre stelle della nostra galassia formano una banda luminosa ben distinta che attraversa il cielo notturno, la Via Lattea. Se

però guardiamo le galassie lontane, esse sembrano essere distribuite in modo più o meno uniforme in ogni direzione. L'universo sembra quindi essere grosso modo identico in qualunque direzione si guardi, purché lo si consideri su una scala abbastanza grande rispetto alla distanza tra le galassie e si ignorino le differenze su scale minori. Immaginate di trovarvi in una foresta nella quale gli alberi crescano in posizioni casuali. Se guardate in una determinata direzione, potreste vedere l'albero più vicino alla distanza di un metro. In un'altra direzione, l'albero più vicino potrebbe essere invece a tre metri. In una terza direzione, potreste vedere un gruppo di alberi a uno, due e tre metri di distanza. Non si direbbe quindi, su piccola scala, che la foresta appaia uguale in qualunque direzione si osservi; se però decidessimo di non tener conto di tutti gli alberi presenti nel raggio di un chilometro, questo genere di differenze verrebbero riassorbite nella media e ci accorgeremmo che la foresta è uguale in qualunque direzione si guardi.

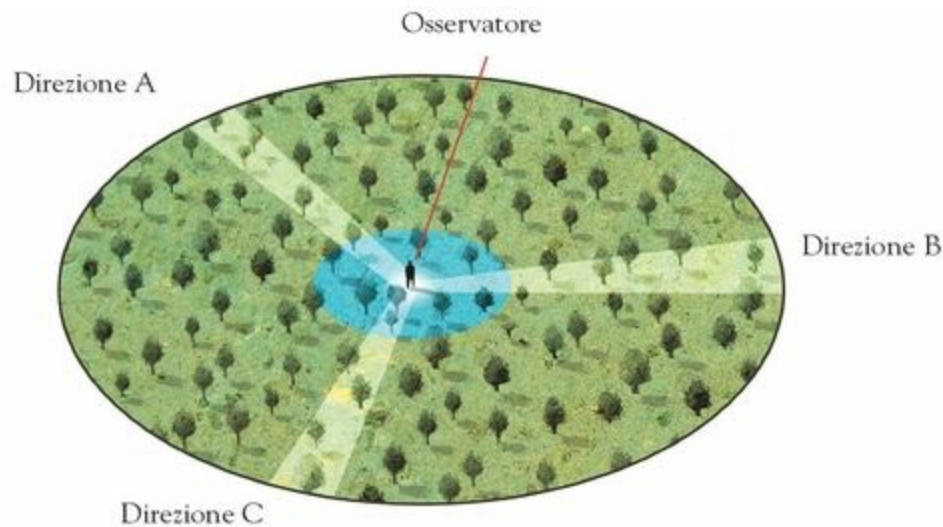


Figura 18. La foresta isotropica

Anche se all'interno di una foresta gli alberi sono distribuiti uniformemente, è comunque possibile che, da vicino, le piante appaiano più o meno raggruppate.

Analogamente, l'universo non sembra uniforme finché ci limitiamo a osservare le nostre immediate vicinanze, tuttavia, su larga scala, esso si mostra identico in qualunque direzione si guardi.

Per molto tempo, la distribuzione uniforme delle stelle costituì una giustificazione sufficiente a garantire l'assunto di Fridman, come una grossolana approssimazione all'universo reale. In seguito, però, un fortunato caso permise di scoprire un altro aspetto per il quale l'assunto di Fridman è di fatto una descrizione notevolmente esatta del nostro universo. Nel 1965, due fisici americani che lavoravano presso i laboratori della Bell Telephone nel New Jersey, Arno Penzias e Robert Wilson, stavano provando un rilevatore di microonde estremamente sensibile. (Come ricorderete, le microonde sono simili alle onde luminose, con la sola differenza che hanno una lunghezza d'onda di qualche centimetro.) Penzias e Wilson, quando si accorsero che il loro rilevatore stava captando più rumore di quanto avrebbe dovuto, si preoccuparono. Scoprirono che nell'apparecchiatura si erano depositati degli escrementi di uccelli e controllarono altri possibili difetti di funzionamento, ma ben presto giunsero a escludere queste eventualità. Il rumore captato dai loro strumenti aveva la peculiarità di essere sempre uguale, di giorno come di notte e in ogni periodo dell'anno, anche se nel

frattempo la Terra continuava a rotare sul proprio asse e a orbitare intorno al Sole. Dato che i movimenti di rotazione e rivoluzione della Terra facevano sì che il rilevatore puntasse continuamente in direzioni diverse, Penzias e Wilson conclusero che il rumore doveva provenire dall'esterno del sistema solare, e persino dall'esterno della galassia. Sembrava provenire in egual misura da tutte le direzioni dello spazio. Oggi sappiamo che, in qualsiasi direzione osserviamo, questo rumore non varia mai più di una minuscola frazione: Penzias e Wilson si erano quindi involontariamente imbattuti in una lampante conferma del primo assunto di Fridman, secondo il quale l'universo appare identico in qualunque direzione si guardi.

Qual è l'origine di questo rumore cosmico di fondo? Più o meno nello stesso tempo in cui Penzias e Wilson stavano indagando sul rumore captato dalle loro apparecchiature, anche due fisici americani della vicina Università di Princeton, Bob Dicke e Jim Peebles, si stavano interessando alle microonde. Essi stavano lavorando su un'ipotesi avanzata da George Gamow (un ex allievo di Aleksandr Fridman), secondo la quale l'universo, nelle sue fasi iniziali, avrebbe dovuto essere estremamente caldo – risplendente al calor bianco – e denso. Dicke e Peebles arguirono che dovremmo poter ancora vedere questi bagliori dell'universo primitivo, dato che la luce proveniente da sue regioni molto remote dovrebbe raggiungerci soltanto ora. Tuttavia, a causa dell'espansione dell'universo e dell'effetto Doppler, questa luce dovrebbe essere talmente spostata verso il rosso da apparirci oggi non come luce visibile, bensì sotto forma di una radiazione a microonde. Dicke e Peebles si stavano preparando a cercare 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, per non parlare di Gamow!).

Tutte queste prove del fatto che l'universo presenta il medesimo aspetto in qualunque direzione si guardi 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 debba allora coincidere con il centro dell'universo. Esiste però una spiegazione alternativa: l'universo potrebbe sembrare identico in qualunque direzione si guardi anche osservandolo da qualsiasi altra galassia. Questo, come abbiamo già avuto modo di vedere, era il secondo assunto di Fridman.

Non abbiamo alcuna prova scientifica pro o contro il secondo assunto di Fridman. Secoli fa, la Chiesa lo avrebbe considerato come un'eresia, dato che la dottrina cattolica affermava che gli uomini occupano un posto speciale al centro dell'universo. Oggi, però, noi accettiamo l'assunto di Fridman praticamente per la ragione opposta, vale a dire per una sorta di modestia: riteniamo, cioè, che sarebbe veramente strano se l'universo avesse lo stesso aspetto in ogni direzione intorno a noi, ma non intorno ad altri punti dell'universo stesso!

Nel modello dell'universo elaborato da Fridman, tutte le galassie si allontanano direttamente le une dalle altre. La situazione è un po' simile a quella di un palloncino su cui siano stati dipinti un certo numero di puntini e che venga quindi gonfiato a ritmo costante. Mentre il palloncino si espande, la distanza tra due puntini qualunque viene ad aumentare, ma ciò non significa che ci sia un qualche puntino particolare che possa essere considerato come il centro dell'espansione. Inoltre, mentre il raggio del palloncino continua a crescere a ritmo costante, quanto più i puntini sono lontani fra di

loro tanto maggiore sarà la loro velocità di allontanamento. Per esempio, supponiamo che il raggio del nostro palloncino raddoppi in un secondo. Due puntini che prima si trovavano a un centimetro di distanza l'uno dall'altro saranno ora a due centimetri di distanza (misurati sulla superficie del palloncino): la loro velocità relativa di allontanamento sarà pertanto di un centimetro al secondo. D'altro lato, due puntini che prima si trovavano a dieci centimetri di distanza saranno ora a venti centimetri l'uno dall'altro: in questo caso, cioè, la loro velocità relativa sarà di dieci centimetri al secondo. Similmente, nel modello di Fridman la velocità di allontanamento di due galassie qualsiasi è proporzionale alla distanza che le separa. Questo modello, quindi, prediceva che lo spostamento verso il rosso della luce di una galassia avrebbe dovuto essere direttamente proporzionale alla sua distanza da noi, proprio come scoprì poi Hubble. Nonostante il successo del suo modello e il fatto di aver previsto le osservazioni di Hubble, l'opera di Fridman rimase in gran parte sconosciuta in Occidente fino a quando, nel 1935, il fisico americano Howard Robertson e il matematico britannico Arthur Walker individuarono dei modelli simili, in seguito alla scoperta – da parte di Hubble – dell'espansione uniforme dell'universo.

Fridman sviluppò soltanto un modello dell'universo ma, se i suoi assunti sono corretti, ci sono in realtà tre possibili tipi di soluzione delle equazioni di Einstein, ossia tre diversi tipi di modello di Fridman – e tre diversi modi in cui l'universo si può comportare.

Nel primo tipo di soluzione (quello effettivamente trovato da Fridman), l'espansione dell'universo è abbastanza lenta da permettere all'attrazione gravitazionale tra le diverse galassie di rallentare e infine fermare l'espansione stessa. Le galassie inizieranno quindi a muoversi l'una verso l'altra e l'universo entrerà in una fase di contrazione. Nel secondo tipo di soluzione, la velocità di espansione dell'universo è talmente elevata che l'attrazione gravitazionale non riuscirà mai a fermarla, anche se la rallenterà un po'. C'è infine un terzo tipo di soluzione, in cui l'universo si espande esattamente alla velocità richiesta per evitare di collassare su se stesso. La velocità alla quale le galassie si allontanano diventa via via più piccola, senza però mai azzerarsi.

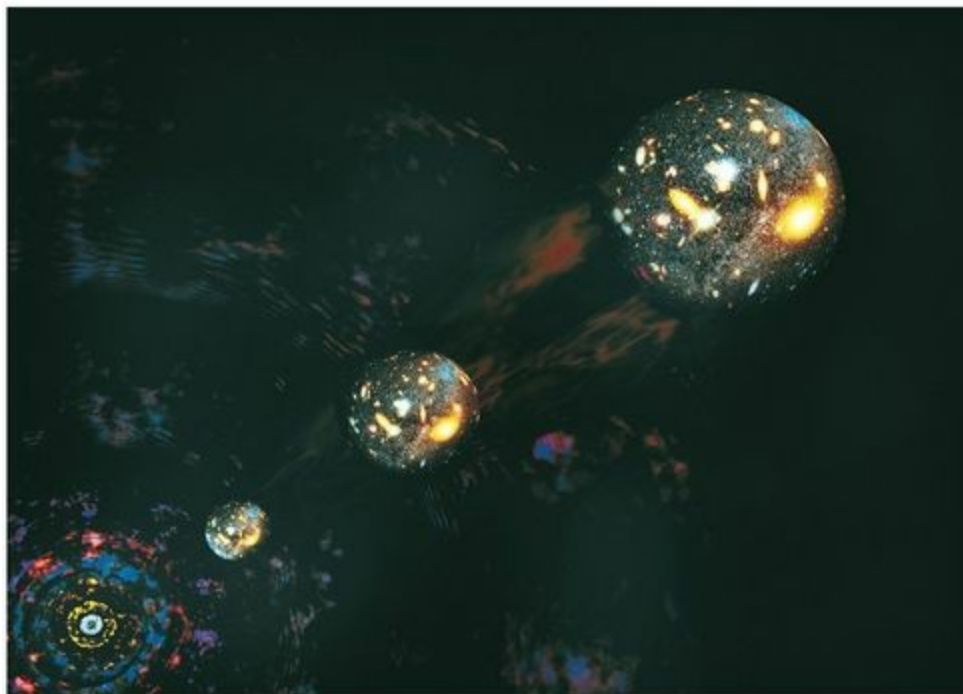


Figura 19. L'universo come un palloncino in espansione

A causa dell'espansione dell'universo, tutte le galassie si allontanano direttamente le une dalle altre. Come accade ai puntini disegnati su un palloncino che viene gonfiato a ritmo costante, col passare del tempo la distanza tra le galassie più lontane cresce più di quanto non faccia quella tra le galassie più vicine.

Di conseguenza, un osservatore posto in una galassia qualsiasi vedrà allontanarsi le altre galassie tanto più rapidamente quanto più sono lontane.

Una caratteristica notevole del primo tipo di modello di Fridman è che in esso l'universo non è infinito nello spazio, e tuttavia lo spazio non ha alcun confine. La gravità è talmente forte che lo spazio si ripiega su se stesso. Questa situazione è alquanto simile a quella della superficie terrestre, che ha un'estensione finita pur non avendo confini. Se una persona continua a viaggiare in una determinata direzione sulla superficie della Terra, non si imbatte mai in una qualche barriera invalicabile né precipiterà da un ipotetico margine esterno, ma finirà invece per ritornare al punto da cui è partita. In questo modello, lo spazio è esattamente così, ma con tre dimensioni anziché le due della superficie terrestre. L'idea secondo la quale si potrebbe percorrere in linea retta l'intero universo per poi ritrovarsi al punto di partenza può servire come un valido spunto per la fantascienza, ma di fatto, dal punto di vista pratico, non ha molta importanza, poiché è possibile dimostrare che l'universo si sarà nuovamente contratto in un punto dalle dimensioni nulle prima che se ne possa fare il giro completo. L'universo è infatti talmente grande che, per poter ritornare al punto di partenza prima che la sua vita abbia termine, occorrerebbe viaggiare a una velocità superiore a quella della luce – e ciò non è consentito! Lo spazio è curvo anche nel secondo modello di Fridman, ma in un modo diverso. Solo il terzo modello di Fridman corrisponde a un universo la cui geometria su larga scala è piatta (anche se lo spazio è comunque incurvato, o distorto, in prossimità di oggetti di grande massa).

Quale dei modelli di Fridman descrive effettivamente il nostro universo? L'universo cesserà infine di espandersi e inizierà a contrarsi, oppure continuerà a espandersi per sempre?

La risposta a questa domanda si rivela più complessa di quanto gli scienziati abbiano creduto in un primo momento. L'analisi più basilare che possiamo fare dipende da due fattori: l'attuale velocità di espansione dell'universo e la sua attuale densità media (la quantità di materia presente in un determinato volume di spazio). Quanto più è alta l'attuale velocità di espansione dell'universo, tanto maggiore sarà la forza gravitazionale necessaria a fermarla e, di conseguenza, tanto maggiore sarà anche la densità di materia richiesta. Se la densità media supera un certo valore critico (determinato dalla velocità di espansione), l'attrazione gravitazionale della materia presente nell'universo riuscirà infine ad arrestare la sua espansione e lo farà collassare su se stesso – secondo quanto ci dice il primo modello di Fridman. Se invece la densità media è inferiore a questo valore critico, l'attrazione gravitazionale non basterà a fermare l'espansione, e l'universo continuerà a espandersi per sempre – in linea con il secondo modello di Fridman. Se poi la densità media dell'universo corrisponde esattamente a questo valore critico, l'universo continuerà per sempre a rallentare la propria espansione, approssimandosi sempre più gradualmente a una situazione statica, ma senza mai raggiungerla – secondo il terzo modello di Fridman.

Qual è, quindi, la risposta corretta? Possiamo determinare l'attuale rapidità di espansione misurando, tramite l'effetto Doppler, la velocità alla quale le altre galassie si stanno allontanando da noi. Ciò

può essere fatto con estrema accuratezza. Tuttavia, non conosciamo molto bene le distanze delle galassie, poiché le possiamo misurare soltanto per via indiretta. Pertanto, tutto ciò che sappiamo è che l'universo si sta espandendo di un valore compreso tra il 5 e il 10 per cento ogni miliardo di anni. La nostra incertezza circa la sua attuale densità media è poi ancora più grande. Se sommiamo la massa di tutte le stelle che possiamo vedere nella nostra galassia e nelle altre, il totale che otteniamo è meno di un centesimo della quantità richiesta per arrestare l'espansione dell'universo, anche adottando la stima più bassa riguardo alla sua velocità di espansione.

Ma non è finita. La nostra e le altre galassie devono contenere anche una grande quantità di «materia oscura» che non riusciamo a vedere direttamente, ma della cui esistenza siamo certi per via dell'influenza che la sua attrazione gravitazionale esercita sulle orbite delle stelle all'interno delle galassie. Forse la prova più evidente di questo fatto ci è data dalle stelle che si trovano ai margini esterni delle galassie a spirale, come la nostra Via Lattea. Queste stelle ruotano intorno al centro delle loro galassie troppo rapidamente per essere tenute in orbita soltanto dall'attrazione gravitazionale delle stelle galattiche di fatto osservate. Inoltre, la maggior parte delle galassie fa parte di ammassi, e possiamo analogamente inferire la presenza di altra materia oscura negli spazi intergalattici all'interno di tali ammassi basandoci sull'effetto che essa esercita sul moto delle galassie stesse. Di fatto, la quantità di materia oscura presente nell'universo supera di gran lunga quella della materia ordinaria. Ma anche quando sommiamo tutta questa materia oscura, otteniamo soltanto circa un decimo della quantità di materia richiesta per fermare l'espansione. Potrebbero però esserci altre forme di materia, distribuite quasi uniformemente attraverso l'intero universo, che noi non abbiamo ancora individuato e che potrebbero far salire la densità media dell'universo stesso. Per esempio, esiste un tipo di particella elementare, il cosiddetto neutrino, che interagisce molto debolmente con la materia e che è estremamente difficile da individuare (per un recente esperimento sui neutrini è stato utilizzato un rilevatore sotterraneo riempito con 50.000 tonnellate d'acqua). Fino a qualche tempo fa si riteneva che il neutrino fosse privo di massa e che pertanto non esercitasse alcuna attrazione gravitazionale, ma gli esperimenti condotti negli ultimi anni mostrano che questa particella ha in realtà una massa, estremamente piccola, che in precedenza non era stata rilevata. Ora, se i neutrini hanno una massa, possono essere una forma di materia oscura. Tuttavia, anche con questa materia oscura, sembra che nell'universo ci sia molta materia in meno di quella che sarebbe necessaria per arrestare la sua espansione, così che – fino a poco tempo fa – la maggior parte dei fisici sarebbero stati d'accordo nel ritenere che il secondo tipo di modello di Fridman era quello che di fatto si applicava al nostro universo.

In seguito, però, sono emerse alcune osservazioni nuove. Negli ultimissimi anni, diversi gruppi di ricercatori hanno studiato delle minuscole increspature nella radiazione di fondo a microonde scoperta da Penzias e Wilson. La dimensione di queste increspature può essere usata come un indicatore della geometria su larga scala dell'universo: esse sembrano indicare che, in fin dei conti, l'universo è piatto (come nel terzo modello di Fridman!). Dato che sembra non esserci una quantità di materia ordinaria e di materia oscura sufficiente a render ragione di questo fatto, per spiegarlo i fisici hanno postulato l'esistenza di un'altra sostanza non ancora individuata: l'energia oscura.

A complicare ulteriormente le cose, altre osservazioni recenti indicano che, in realtà, la velocità di espansione dell'universo non sta affatto diminuendo, bensì sta aumentando. Ciò non è previsto da

nessuno dei modelli di Fridman! Si tratta di un fatto molto strano, poiché l'effetto della materia nello spazio, alta o bassa che sia la sua densità, può essere soltanto quello di rallentare l'espansione. La gravità, dopotutto, è una forza di attrazione. Per rendere l'idea di questa accelerazione dell'espansione cosmica, è come se l'onda d'urto di una bomba, dopo la sua esplosione, acquistasse progressivamente maggiore potenza anziché smorzarsi. Quale forza potrebbe agire nel cosmo spingendo le sue galassie ad allontanarsi sempre più velocemente le une dalle altre? Nessuno ne è ancora sicuro, ma questa potrebbe essere una prova del fatto che Einstein, in fin dei conti, aveva ragione riguardo alla necessità di introdurre la costante cosmologica (e i suoi effetti antigravitazionali).

Con il rapido sviluppo di nuove tecnologie e con la recente costruzione di grandi telescopi installati sui satelliti, stiamo rapidamente apprendendo nuove e sorprendenti cose intorno all'universo. Ora abbiamo una buona idea di che cosa accadrà all'universo in futuro: esso continuerà a espandersi a una velocità via via crescente. Il tempo non avrà mai fine, almeno per quelli che sapranno essere abbastanza prudenti da non cadere in un buco nero. Ma per quanto riguarda i primissimi stadi della sua esistenza? Come ha avuto origine l'universo, e che cosa ha fatto sì che iniziasse a espandersi?

Il big bang, i buchi neri e l'evoluzione dell'universo

Nel modello di universo sviluppato da Fridman la quarta dimensione, quella del tempo, ha un'estensione finita, al pari dello spazio. È come una linea con due estremità, o limiti. Il tempo ha quindi una fine, così come ha un inizio. Di fatto, tutte le soluzioni delle equazioni di Einstein in cui l'universo ha in sé la quantità di materia che noi osserviamo, condividono un carattere molto importante: in un momento del passato (corrispondente a circa 13,7 miliardi di anni fa), la distanza fra le galassie vicine dev'essere stata pari a zero. In altre parole, l'intero universo era compresso in un singolo punto di dimensioni nulle, come una sfera di raggio zero. In quel momento, la densità dell'universo e la curvatura dello spazio-tempo dovrebbero essere state infinite. Si tratta dell'istante che indichiamo con il termine «big bang».

Tutte le nostre teorie cosmologiche sono formulate sulla base dell'assunto secondo cui lo spazio-tempo è regolare e quasi piatto. Ciò significa che in corrispondenza del big bang tutte le nostre teorie cessano di funzionare: sarebbe ben difficile, infatti, considerare quasi piatto uno spazio-tempo con curvatura infinita! Pertanto, anche nel caso ci fossero stati degli eventi prima del big bang, non ce ne potremmo servire per determinare che cosa avrebbe dovuto succedere dopo, dato che in corrispondenza del big bang la predicibilità verrebbe comunque meno.

Analogamente, se – come di fatto stanno le cose – noi conosciamo solo ciò che è accaduto a partire dal big bang, non ci possiamo comunque servire di questi dati per determinare che cosa è accaduto prima. Per quanto ci riguarda, gli eventi anteriori al big bang non possono avere conseguenze, e quindi non dovrebbero far parte di un modello scientifico dell'universo. Dovremmo pertanto escluderli dal modello e dire che il tempo ha avuto inizio con il big bang. Ciò significa che domande come: «Chi ha predisposto le condizioni per il big bang?» non sono problemi di cui la scienza si occupa.

Un altro valore infinito che viene a emergere nel caso l'universo abbia dimensioni nulle è quello della sua temperatura. Nell'istante del big bang, si ritiene che l'universo sia stato infinitamente caldo. In seguito, man mano che l'universo si è espanso, la temperatura della radiazione è andata diminuendo. Dato che la temperatura è semplicemente una misura dell'energia (o velocità) media delle particelle, questo raffreddamento dell'universo dovrebbe avere un effetto di primaria importanza sulla materia in esso contenuta. A temperature estremamente alte, le particelle si muoverebbero così velocemente da poter sfuggire a ogni attrazione reciproca dovuta alle forze nucleari o elettromagnetiche; in seguito al raffreddamento, però, ci aspetteremmo che le particelle predisposte ad attrarsi a vicenda inizino a unirsi le une alle altre. Anche i tipi di particelle che esistono nell'universo dipendono dalla temperatura, e quindi dall'età, dell'universo stesso.

Aristotele non credeva che la materia fosse costituita da particelle. Egli riteneva invece che fosse continua, ossia che fosse possibile suddividere indefinitamente un pezzo di materia in parti via via più piccole, senza mai giungere a un granello di materia tale da non poter più essere ulteriormente suddiviso. Qualche altro pensatore greco, come per esempio Democrito, affermava però che la materia era intrinsecamente discontinua e che tutte le cose erano composte da un gran numero di

atomi di molti tipi diversi. (La parola «atomo», in greco, significa «indivisibile».) Oggi sappiamo che ciò è vero – perlomeno nell'ambiente in cui viviamo e nell'attuale stato dell'universo. Gli atomi del nostro universo, tuttavia, non sono esistiti da sempre, non sono indivisibili e rappresentano soltanto una piccola frazione dei tipi di particelle presenti nel cosmo.

Gli atomi sono costituiti da particelle più piccole: elettroni, protoni e neutroni. I protoni e i neutroni, a loro volta, sono composti da particelle ancora più piccole, i cosiddetti «quark». Inoltre, per ognuna di queste particelle subatomiche c'è poi una corrispettiva antiparticella. Le antiparticelle hanno la stessa massa delle loro rispettive particelle, ma si oppongono a esse per quanto riguarda la carica e altri attributi. Per esempio, l'antiparticella di un elettrone – il positrone – ha una carica positiva, l'opposto della carica dell'elettrone. Potrebbero esistere interi anti-mondi e anti-persone costituiti da antiparticelle. Comunque, quando una particella e la sua antiparticella si incontrano, si annichilano a vicenda. Pertanto, se vi capita di incontrare il vostro anti-io, non dategli la mano – svanireste entrambi in un grande lampo di luce!

L'energia luminosa viaggia sotto forma di un altro tipo di particella, che è priva di massa ed è chiamata fotone. La vicina fornace nucleare del Sole è per la Terra la più grande fonte di fotoni. Il Sole è poi anche un'immensa sorgente di un altro tipo di particelle che abbiamo già menzionato sopra, i neutrini (e gli antineutrini). Queste particelle estremamente leggere, però, non interagiscono quasi mai con la materia, e passano quindi attraverso i nostri corpi, senza sortire alcun effetto, al ritmo di miliardi al secondo. In totale, i fisici hanno scoperto dozzine di queste particelle elementari. Con il passare del tempo, mentre l'universo ha attraversato una complessa evoluzione, anche la composizione di questo zoo di particelle si è a sua volta evoluta. È stata proprio questa evoluzione a rendere possibile l'esistenza di pianeti come la Terra e di esseri viventi come noi.

Un secondo dopo il big bang, l'universo si era espanso abbastanza da far scendere la propria temperatura a circa dieci miliardi di gradi. Questa temperatura è circa un migliaio di volte maggiore di quella che si registra al centro del Sole; temperature di questo livello possono però essere raggiunte nelle esplosioni delle bombe H. In questo momento, l'universo avrebbe dovuto contenere soprattutto fotoni, elettroni e neutrini (con le loro corrispettive antiparticelle), insieme a un piccolo numero di protoni e neutroni. Queste particelle avevano talmente tanta energia che, quando si scontravano, producevano molte coppie differenti di particelle/antiparticelle. Per esempio, la collisione tra due fotoni poteva produrre un elettrone e la sua antiparticella, il positrone. Alcune di queste particelle appena prodotte si saranno probabilmente scontrate con le loro rispettive antiparticelle, annichilandosi. Ogni volta che un elettrone e un positrone si incontrano, si annichilano a vicenda, ma il processo inverso non è altrettanto facile: perché due particelle prive di massa come i fotoni possano creare una coppia di particella/ antiparticella come un elettrone e un positrone, le due particelle senza massa che entrano in collisione devono avere un certo livello minimo di energia. Ciò è dovuto al fatto che un elettrone e un positrone hanno una loro massa, e questa massa appena creata deve essere tratta dall'energia delle particelle che si sono scontrate. Mentre l'universo continuava a espandersi e la sua temperatura a diminuire, le collisioni aventi energia sufficiente a creare le coppie di elettrone/positrone venivano a essere sempre meno frequenti, fino a scendere al di sotto del ritmo al quale queste coppie si distruggevano per annichilazione. Così, la maggior parte degli elettroni e dei positroni finirono per annichilarsi fra loro per produrre ulteriori fotoni,

lasciando solo un numero relativamente piccolo di elettroni. I neutrini e gli antineutrini, d'altro lato, interagiscono fra loro e con altre particelle solo molto debolmente, così da non doversi annichilare a vicenda con altrettanta rapidità. Essi dovrebbero pertanto esistere ancora oggi. Se potessimo osservarli, sarebbe un buon modo per verificare la validità di questa ricostruzione di una fase iniziale estremamente calda dell'universo. Purtroppo, però, le loro energie sono oggi troppo basse per poterli osservare direttamente (anche se potremmo essere in grado di individuarli in modo indiretto).

Circa cento secondi dopo il big bang la temperatura era scesa a un miliardo di gradi, quella che oggi possiamo trovare all'interno delle stelle più calde. A questa temperatura, la cosiddetta «forza forte» ebbe un ruolo di grande rilevanza. La forza forte, di cui parleremo più dettagliatamente nel capitolo 11, è una forza attrattiva che opera a corto raggio e che può far sì che i protoni e i neutroni si leghino insieme formando i nuclei. A temperature sufficientemente elevate, protoni e neutroni hanno abbastanza energia cinetica (si veda il capitolo 5) per poter emergere dalle loro collisioni ancora liberi e indipendenti gli uni dagli altri. Quando la temperatura era ormai scesa a un miliardo di gradi, però, essi non avevano più l'energia sufficiente a vincere l'attrazione della forza nucleare forte, e iniziarono quindi a unirsi per formare i nuclei degli atomi di deuterio (idrogeno pesante), che contengono un protone e un neutrone. I nuclei di deuterio si sarebbero quindi combinati con altri protoni e neutroni per formare i nuclei di elio (che contengono due protoni e due neutroni) e anche piccole quantità di un paio di elementi più pesanti, il litio e il berillio. Si può calcolare che, nel modello del big bang caldo, circa un quarto dei protoni e dei neutroni si sarebbero dovuti convertire in nuclei di elio, insieme a una piccola quantità di idrogeno pesante e altri elementi. I neutroni rimanenti sarebbero decaduti in protoni, che costituiscono i nuclei degli atomi del comune idrogeno.

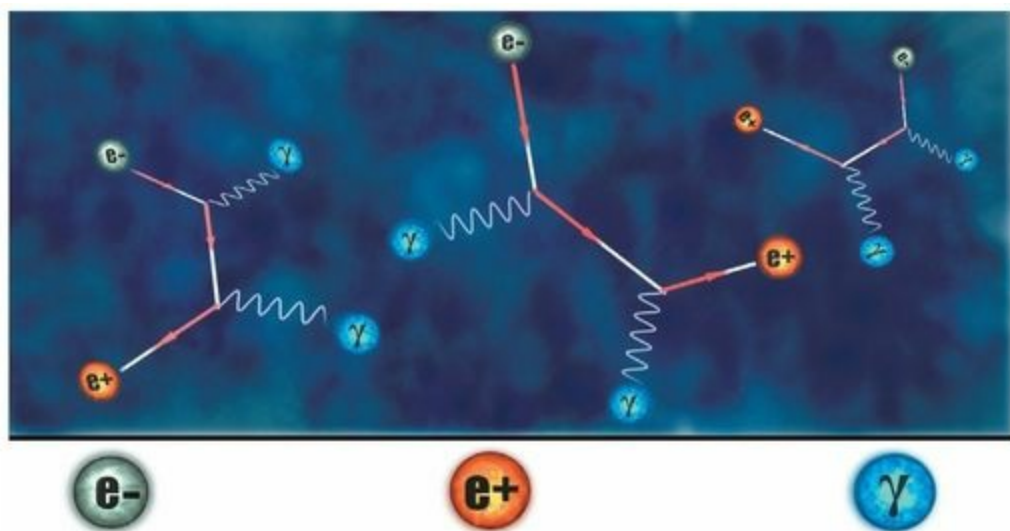


Figura 20. L'equilibrio tra fotoni ed elettroni/positroni

Nell'universo primitivo esisteva un equilibrio tra le coppie di elettroni e positroni che si scontravano creando dei fotoni da una parte, e il processo inverso (di creazione delle coppie elettroni/positroni) dall'altra. Con la diminuzione della temperatura dell'universo, però, questo equilibrio venne ad alterarsi in favore della creazione di fotoni. La maggior parte degli elettroni e dei positroni finirono così per annichilarsi a vicenda, lasciando solo quel numero relativamente piccolo di elettroni che possiamo osservare oggi.

Questa ricostruzione di una prima fase caldissima dell'universo venne avanzata per la prima volta dallo scienziato George Gamow in un celebre articolo scritto nel 1948 con la collaborazione di un suo studente, Ralph Alpher. Gamow aveva un notevole senso dell'umorismo: persuase lo scienziato nucleare Hans Bethe ad aggiungere all'articolo anche il proprio nome, in modo che l'elenco degli autori, «Alpher, Bethe, Gamow», richiamasse le prime tre lettere dell'alfabeto greco, alpha, beta e gamma – cosa particolarmente appropriata per un articolo sull'inizio dell'universo! In questo articolo veniva fatta la predizione, degna di nota, che la radiazione (sotto forma di fotoni) emessa nei primi stadi caldissimi della vita dell'universo avrebbe dovuto esistere ancora, ma con una temperatura ridotta a solo pochi gradi al di sopra dello zero assoluto. (Lo zero assoluto, — 273°C , è la temperatura alla quale le sostanze non hanno energia termica, ed è pertanto la temperatura più bassa possibile.)

Ciò che Penzias e Wilson scoprirono nel 1965 fu proprio questa radiazione a microonde. Al tempo in cui Alpher, Bethe e Gamow scrissero il loro articolo, non si sapeva molto sulle reazioni nucleari di protoni e neutroni. Le predizioni formulate riguardo alle proporzioni dei vari elementi nell'universo primitivo erano quindi piuttosto imprecise; questi calcoli sono però stati rifatti alla luce di conoscenze migliori tanto da essere ora in buon accordo con le osservazioni. Inoltre, è molto difficile trovare una qualunque altra spiegazione del perché circa un quarto della massa dell'universo si presenti sotto forma di elio.

Questa ricostruzione dei primi stadi della vita dell'universo non è però esente da problemi: stando al modello del big bang caldo, nell'universo primordiale non ci fu abbastanza tempo perché il calore potesse fluire da una regione all'altra. Ciò significa che lo stato iniziale dell'universo avrebbe dovuto avere dappertutto esattamente la stessa temperatura per spiegare come mai la radiazione di fondo a microonde abbia oggi la stessa temperatura in qualsiasi direzione si guardi. Anche la velocità iniziale di espansione avrebbe dovuto essere scelta con estrema precisione perché la velocità di espansione attuale sia tuttora così vicina al valore critico necessario per evitare che l'universo collassi nuovamente su se stesso. Sarebbe molto difficile spiegare perché mai l'universo dovrebbe aver avuto proprio questo preciso inizio, a meno di non appellarsi all'atto di un Dio intenzionato a creare degli esseri come noi. In un tentativo di trovare un modello dell'universo nel quale molte configurazioni iniziali diverse avrebbero potuto ugualmente evolversi in qualcosa di simile all'universo attuale, uno scienziato del Massachusetts Institute of Technology, Alan Guth, suggerì che l'universo primitivo potrebbe aver attraversato un periodo di espansione estremamente rapida. Questa espansione è detta «inflazionaria», cosa che significa che un tempo l'universo si è espanso a una velocità esponenziale. Secondo Guth, in una minuscola frazione di secondo il raggio dell'universo crebbe di un milione di milioni di milioni di milioni di milioni (1 seguito da 30 zeri) di volte. Qualunque irregolarità presente nell'universo sarebbe stata semplicemente spianata dall'espansione, così come le grinze di un palloncino si distendono quando lo gonfiamo. In questo modo, la teoria inflazionaria riesce a spiegare come l'attuale stato regolare e uniforme dell'universo sarebbe potuto emergere ugualmente bene da molti stati iniziali non uniformi e diversi l'uno dall'altro. Pertanto, siamo ragionevolmente fiduciosi di aver trovato la rappresentazione corretta dell'universo, almeno per quanto riguarda il tempo a partire da un milionesimo di trilionesimo di trilionesimo di secondo dopo il big bang.

Dopo tutto questo iniziale trambusto, a solo poche ore di distanza dal big bang la produzione di elio e di alcuni altri elementi come il litio cessò. Da quel momento in avanti, per circa un milione di anni, l'universo non fece altro che continuare a espandersi, senza grandi novità. Infine, quando la temperatura era ormai scesa a poche migliaia di gradi, gli elettroni e i nuclei non avevano più l'energia cinetica necessaria per vincere l'attrazione elettromagnetica fra di loro e iniziarono quindi a combinarsi per formare gli atomi. Nel suo complesso, l'universo continuò a espandersi e a raffreddarsi, ma nelle regioni dove la densità era leggermente superiore alla media, l'espansione risultava rallentata dalla maggiore attrazione gravitazionale.

In alcune regioni, questa attrazione riuscì infine ad arrestare l'espansione e ad avviare una ricontrazione. Nel corso di questo collasso, l'attrazione gravitazionale di materia esterna a queste regioni potrebbe aver dato l'avvio a un lento moto rotatorio. Man mano che la regione che stava collassando diventava più piccola, la sua rotazione si faceva sempre più veloce – proprio come i pattinatori sul ghiaccio, che, quando ritirano le braccia distendendole lungo il corpo, girano più veloci. Una volta che le dimensioni di questa regione si erano sufficientemente ridotte, la forza centrifuga derivante dall'accresciuta velocità di rotazione poté infine controbilanciare la forza centripeta di attrazione gravitazionale; era così nata una galassia discoidale in rotazione su se stessa. Altre regioni, che non erano riuscite ad avviare un moto rotatorio, avrebbero invece assunto la forma di oggetti ovali, noti come galassie ellittiche. In questi casi, la regione cessava di contrarsi in conseguenza dell'inizio di rivoluzioni orbitali di singole parti della galassia intorno al suo centro, senza però che la galassia stessa, nel suo complesso, avesse un proprio moto di rotazione.

Con il passare del tempo, i gas di idrogeno ed elio presenti nelle galassie si frazionarono in nubi più piccole, che iniziarono a loro volta a collassare sotto l'azione della loro stessa gravità. Mentre si contraevano e gli atomi in esse contenuti entravano in collisione gli uni con gli altri, la temperatura del gas saliva fino a diventare abbastanza alta da innescare le reazioni di fusione nucleare, che avrebbero convertito l'idrogeno in altro elio. Il calore liberato durante tale reazione, che è paragonabile all'esplosione controllata di una bomba all'idrogeno, è ciò che fa brillare le stelle. Questo calore addizionale fa anche crescere la pressione del gas fino a portarla a un livello tale da controbilanciare l'attrazione gravitazionale, arrestando quindi la contrazione del gas stesso. Queste nubi si stabilizzano così nella forma di stelle simili al nostro Sole, che bruciano l'idrogeno trasformandolo in elio e irradiando l'energia prodotta in questa reazione sotto forma di calore e di luce. Per rendere l'idea, è un po' come un palloncino – c'è un equilibrio tra la pressione dell'aria all'interno, che cerca di far espandere il palloncino stesso, e la tensione della gomma, che cerca invece di farlo rimpicciolire.

Una volta che le nubi di gas incandescente hanno assunto la forma di stelle, rimarranno stabili per un lungo periodo di tempo, finché il calore prodotto dalle reazioni nucleari riuscirà a controbilanciare la forza di attrazione gravitazionale. Alla fine, però, la stella esaurirà il proprio idrogeno e gli altri combustibili nucleari. Paradossalmente, quanto più è elevata la quantità di combustibile con cui una stella inizia la propria vita, tanto prima essa lo esaurirà. Ciò è dovuto al fatto che quanto più una stella è grande, tanto più la sua temperatura dev'essere elevata per compensare la maggiore attrazione gravitazionale. E quanto più una stella è calda, tanto più la reazione di fusione nucleare sarà veloce: di conseguenza, essa impiegherà meno tempo per dar fondo al proprio combustibile. Il

nostro Sole ha probabilmente una quantità di combustibile nucleare sufficiente per altri cinque miliardi di anni circa, ma le stelle di massa maggiore possono esaurire il loro combustibile in appena un centinaio di milioni di anni, un periodo di tempo di gran lunga inferiore all'età dell'universo. Quando una stella esaurisce il proprio combustibile, inizia a raffreddarsi e la forza di gravità prende quindi il sopravvento, causandone una contrazione. Questa contrazione, a sua volta, spinge gli atomi gli uni contro gli altri, così che la stella diventa nuovamente più calda. Quando il calore cresce ulteriormente, prende il via la conversione dell'elio in elementi più pesanti, come il carbonio o l'ossigeno. Con questo processo, però, non viene prodotta molta più energia, così che si apre una nuova crisi. Quel che accade in seguito non è del tutto chiaro, ma sembra probabile che le regioni centrali della stella si contraggano fino a raggiungere uno stato estremamente denso, come un buco nero. Il termine «buco nero» è di origine molto recente. È stato coniato nel 1969 dallo scienziato americano John Wheeler come una descrizione grafica di un'idea che risaliva ad almeno due secoli prima, un periodo in cui si fronteggiavano due diverse teorie sulla natura della luce: una di esse, quella preferita da Newton, sosteneva che la luce era composta di particelle, mentre l'altra asseriva che era costituita da onde. Oggi sappiamo che, in realtà, entrambe queste teorie sono corrette. Come vedremo nel capitolo 9, in virtù della dualità onda-particella della meccanica quantistica, alcuni comportamenti della luce ci ricordano le onde e altri le particelle. I termini descrittivi «onda» e «particella» sono concetti elaborati dagli uomini, e la natura non è necessariamente obbligata a rispettare questi concetti ripartendo esattamente tutti i fenomeni in una categoria oppure nell'altra! Nel quadro della teoria ondulatoria, non era chiaro in che modo la luce avrebbe dovuto rispondere all'effetto della gravità. Se però pensiamo che la luce sia composta da particelle, ci potremmo aspettare che queste particelle subiscano l'effetto della gravità nello stesso modo in cui ne risentono le palle da cannone, i razzi e i pianeti. In particolare, se spariamo in aria una palla da cannone, essa finirà per ricadere sulla Terra, a meno che la sua velocità iniziale non superi un determinato valore critico, indicato come «velocità di fuga». La velocità di fuga di una determinata stella dipende dalla forza della sua attrazione gravitazionale: quanto più la massa di una stella è grande, tanto più elevata sarà la sua velocità di fuga. In un primo tempo, le persone ritenevano che le particelle di luce viaggiassero a una velocità infinita – così che la gravità non sarebbe comunque stata in grado di rallentarne la corsa –, ma la scoperta di Rømer che la luce si propaga a una velocità finita implicava che la gravità potesse avere un effetto rilevante: infatti, se una stella fosse sufficientemente grande, la velocità della luce potrebbe essere inferiore alla velocità di fuga dalla sua superficie, e tutta la luce emessa dalla stella finirebbe quindi per ricadere su di essa. Sulla base di questo assunto, un professore di Cambridge, John Michell, scrisse nel 1783 un saggio pubblicato nelle «Philosophical Transactions of the Royal Society of London», nel quale 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: ogni raggio luminoso emesso dalla superficie della stella sarebbe stato trascinato indietro dall'attrazione gravitazionale della stella stessa prima di potersi spingere molto lontano. Tali oggetti celesti sono ciò che noi oggi chiamiamo buchi neri, poiché si presentano esattamente in questo modo: come degli spazi vuoti e neri nel cosmo.



Figura 21. Palle da cannone al di sopra e al di sotto della velocità di fuga

Non è detto che tutto ciò che sale debba poi per forza scendere: è sufficiente che venga lanciato verso l'alto a una velocità superiore a quella di fuga.

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 Laplace abbia inserito tali osservazioni soltanto nella prima e nella seconda edizione del suo libro *Esposizione del sistema del mondo*, per poi toglierle dalle edizioni successive. Forse si era convinto che si trattasse di un'idea assurda – nel corso del XIX secolo, la teoria corpuscolare della luce perse i propri sostenitori, poiché sembrava che la teoria ondulatoria fosse in grado di spiegare ogni cosa. Di fatto, nella teoria della gravità di Newton è un po' contraddittorio trattare la luce al pari delle palle da cannone, poiché la velocità della luce è fissa. Una palla da cannone sparata verso l'alto dalla superficie terrestre rallenterà la propria corsa sotto l'effetto della gravità e, alla fine, si fermerà e ricadrà al suolo; un fotone, invece, deve continuare a muoversi verso l'alto a velocità costante. Per avere una teoria coerente degli effetti della gravità sulla luce fu necessario attendere fino al 1915, quando Einstein formulò la relatività generale; il problema di comprendere che cosa dovrebbe accadere, secondo la relatività generale, a una stella di grande massa venne poi risolto nel 1939 da un giovane americano, Robert Oppenheimer.

Il quadro fornitoci dalle ricerche di Oppenheimer è il seguente. Il campo gravitazionale della stella modifica la traiettoria nello spazio-tempo dei raggi di luce di passaggio rispetto a quella che sarebbe stata in assenza della stella stessa. Si tratta dell'effetto che viene osservato nella deflessione della luce proveniente da stelle lontane, che possiamo vedere durante un'eclisse di Sole. In prossimità della superficie della stella, le traiettorie seguite dalla luce nello spazio-tempo vengono leggermente deflesse verso l'interno. Man mano che la stella si contrae, essa diventa più densa, così che il campo gravitazionale alla sua superficie si fa più forte. (Possiamo pensare che il campo gravitazionale venga emanato da un punto collocato al centro della stella; quando la stella si contrae, i punti sulla sua superficie si avvicinano progressivamente al centro e, di conseguenza, sono soggetti a un campo più forte.) La maggiore intensità del campo fa incurvare più marcatamente i raggi luminosi in

prossimità della superficie. Infine, quando la stella si è contratta sino a raggiungere un determinato raggio critico, il campo gravitazionale alla sua superficie diventa così forte – e, di conseguenza, i raggi luminosi sono piegati verso l'interno a un punto tale – che la luce non riesce più a sfuggirne. Stando alla teoria della relatività, nessun oggetto può viaggiare a una velocità superiore a quella della luce. Pertanto, se la luce non riesce a sfuggire da questa stella, non potrà riuscirci nessun'altra cosa: il campo gravitazionale trascinerà indietro qualunque oggetto. La stella collassata ha formato intorno a sé una regione dello spazio-tempo dalla quale non è possibile evadere per raggiungere un osservatore lontano. Questa regione è il cosiddetto buco nero. Il confine esterno di un buco nero è chiamato «orizzonte degli eventi». Oggi, grazie al telescopio spaziale Hubble e ad altri telescopi che, al posto della luce visibile, mettono a fuoco i raggi X e i raggi gamma, sappiamo che i buchi neri sono fenomeni comuni – molto più comuni di quanto si era creduto in un primo momento. Un satellite ha individuato 1500 buchi neri solo in una piccola area del cielo. Al centro della nostra galassia abbiamo poi scoperto un buco nero con una massa più di un milione di volte superiore a quella del nostro Sole. Intorno a questo immane buco nero orbita una stella che si sposta a una velocità pari a circa il 2 per cento della velocità della luce – superando quindi la velocità media di un elettrone che orbita intorno al nucleo di un atomo!

Per comprendere che cosa vedremmo se osservassimo il collasso di una stella fino alla formazione di un buco nero, dobbiamo tener presente che nella teoria della relatività non esiste un tempo assoluto. In altre parole, ogni osservatore ha la sua propria misura del tempo. Per una persona che si trovasse sulla superficie della stella, lo scorrere del tempo sarebbe diverso che per un osservatore lontano, dato che sulla superficie della stella il campo gravitazionale sarebbe più intenso.

Supponiamo che un intrepido astronauta si trovi sulla superficie di una stella che sta collassando e che vi rimanga mentre il collasso procede. A una certa ora sul suo orologio, diciamo alle 11:00, la stella si contrae al di sotto del raggio critico in corrispondenza del quale il campo gravitazionale diventa così forte che nulla può più sfuggirne. Supponiamo ora che le sue istruzioni siano di mandare un segnale ogni secondo, basandosi sul proprio orologio, a un'astronave in orbita a una certa distanza costante dal centro della stella. Egli inizia a trasmettere alle 10:59:58, ossia due secondi prima delle 11:00. Che cosa registreranno i suoi compagni sull'astronave?

I nostri precedenti esperimenti mentali a bordo del razzo spaziale ci hanno insegnato che la gravità rallenta lo scorrere del tempo, e che quanto più la gravità è intensa, tanto più questo effetto sarà grande. L'astronauta sulla superficie della stella si trova in un campo gravitazionale più forte di quello dei suoi compagni in orbita, così che un secondo sul suo orologio corrisponderà a più di un secondo sugli orologi di questi ultimi. E man mano che egli accompagna la superficie stellare nel suo collasso, il campo gravitazionale che lo avvolge diventerà progressivamente più forte, così che l'intervallo tra i suoi segnali apparirà sempre più lungo a coloro che si trovano sull'astronave. Prima delle 10:59:59, questa dilatazione del tempo si manterrà comunque entro limiti molto ridotti: gli astronauti in orbita, quindi, dovranno aspettare solo poco più di un secondo tra il segnale inviato dal loro compagno alle 10:59:58 e quello mandato quando il suo orologio segna le 10:59:59. Dovranno però attendere per sempre il suo segnale delle 11:00.

Tutto ciò che accade sulla superficie della stella tra le 10:59:59 e le 11:00 (stando all'orologio dell'astronauta) si dilaterà in un periodo di tempo infinito (dal punto di vista dell'astronave in

orbita). All'approssimarsi delle 11:00, l'intervallo di tempo tra l'arrivo di creste e ventri successivi delle onde luminose provenienti dalla stella diventerà progressivamente più lungo, proprio come l'intervallo tra i segnali inviati dall'astronauta. Ora, dato che la frequenza della luce è una misura del numero delle sue creste e dei suoi ventri al secondo, coloro che si trovano nell'astronave vedranno la frequenza della luce della stella farsi via via più bassa. La sua luce, pertanto, apparirà sempre più rossa (e sempre più debole). Alla fine, la luce della stella sarà così fioca che dall'astronave non sarà più possibile vederla: rimarrà soltanto un buco nero nello spazio. Tuttavia, la stella continuerà a esercitare la medesima attrazione gravitazionale sull'astronave, che continuerà a orbitarvi intorno.

Il seguente problema, però, fa sì che lo scenario che abbiamo presentato non sia propriamente realistico. La gravità si indebolisce progressivamente man mano che ci si allontana dalla stella, così che la forza gravitazionale esercitata sui piedi del nostro intrepido astronauta sarebbe sempre più intensa di quella esercitata sulla sua testa. La differenza tra queste due forze allungherebbe il nostro astronauta come una fettuccina o lo farebbe a pezzi già prima che la stella si sia contratta al di sotto di quel raggio critico in corrispondenza del quale si forma l'orizzonte degli eventi! Noi crediamo però che nell'universo ci siano anche degli oggetti molto più grandi, come le regioni centrali delle galassie, che possono a loro volta subire il collasso gravitazionale che porta alla formazione dei buchi neri, come nel caso dell'immane buco nero che si trova al centro della nostra galassia. Un astronauta che si trovasse su uno di questi oggetti non verrebbe fatto a pezzi prima della formazione del buco nero. In effetti, egli non avvertirebbe nulla di particolare nel momento della contrazione al di sotto del raggio critico, e potrebbe superare il punto di non ritorno senza neppure accorgersene. Anche in questo caso, però, i suoi segnali giungerebbero agli osservatori esterni con un ritardo sempre maggiore, fino a non arrivare più del tutto. E anche in questo caso, nel giro di poche ore (misurate dall'astronauta), con il procedere del collasso gravitazionale della regione, la differenza tra le forze di attrazione esercitate rispettivamente sui suoi piedi e sulla sua testa diventerebbe così grande da farlo a pezzi.

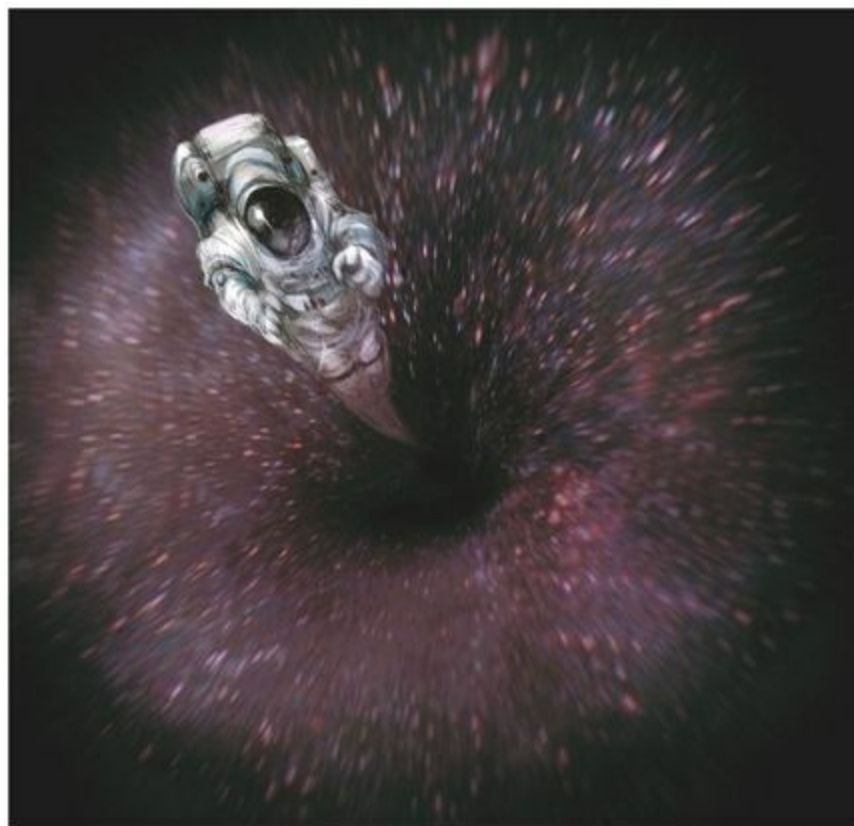


Figura 22. Forze travolgenti

Dato che la gravità diminuisce con l'aumentare della distanza, la forza con cui la Terra attrae la vostra testa è inferiore a quella con cui attrae i vostri piedi, che sono un metro o due più vicini al centro della Terra. In questo caso, la differenza è talmente insignificante che non possiamo nemmeno avvertirla; se però un astronauta si trovasse vicino alla superficie di un buco nero, questa differenza basterebbe a farlo letteralmente a pezzi.

A volte, quando una stella di massa molto grande collassa su se stessa, è possibile che le sue regioni esterne vengano espulse in una tremenda esplosione, indicata con il termine di supernova. L'esplosione di una supernova è così potente che può emettere più luce della somma di tutte le altre stelle della sua galassia. Un esempio ci è dato dalla supernova i cui resti ci appaiono oggi come la Nebulosa Crab. La sua esplosione venne registrata dai cinesi nel 1054. Anche se la stella esplosa si trovava a 5000 anni-luce di distanza, rimase osservabile a occhio nudo per mesi, risplendendo con una luminosità tale da essere visibile persino di giorno, mentre di notte era possibile leggere alla sua luce. Una supernova che si trovasse a 500 anni-luce (un decimo di quella distanza) sarebbe cento volte più luminosa e potrebbe letteralmente trasformare la notte in giorno. Per comprendere la violenza di una tale esplosione, pensate soltanto che la sua luce riuscirebbe a competere con quella del Sole, pur essendo decine di milioni di volte più lontana (il nostro Sole è a otto minuti-luce di distanza dalla Terra). Se l'esplosione di una supernova avvenisse a una distanza sufficientemente ridotta, potrebbe lasciare la Terra intatta, ma emettere una quantità di radiazioni sufficiente a uccidere tutti gli esseri viventi. In effetti, di recente è stata avanzata l'ipotesi che un'estinzione di creature marine avvenuta tra il Pleistocene e il Pliocene, circa due milioni di anni fa, sia stata causata dalle radiazioni cosmiche provenienti da una supernova dell'agglomerato di stelle Scorpione-Centauro. Alcuni scienziati ritengono che le forme di vita più avanzate abbiano concrete probabilità di evolversi unicamente nelle regioni delle galassie dove non ci siano troppe stelle – le cosiddette

«zone di vita» –, poiché nelle regioni più dense i fenomeni come le supernove sarebbero abbastanza comuni da spegnere regolarmente ogni principio di evoluzione. Nell'intero universo esplodono in media centinaia di migliaia di supernove ogni giorno. In una singola galassia, una supernova si verifica circa una volta ogni secolo. Ma questa è soltanto la media. Sfortunatamente – almeno per quanto riguarda gli astronomi – l'ultima supernova registrata nella Via Lattea risale al 1604, prima dell'invenzione del telescopio.

La principale candidata a diventare la prossima supernova nella nostra galassia è una stella chiamata Rho Cassiopeiae. Fortunatamente, si trova a 10.000 anni-luce da noi, una distanza di sicurezza sufficiente a farci restare tranquilli. Essa appartiene a una classe di stelle note come ipergiganti gialle (nella Via Lattea ne sono state individuate in tutto soltanto sette). Un gruppo internazionale di astronomi ha iniziato a studiare questa stella nel 1993. Nel corso degli anni successivi, essi hanno osservato periodiche fluttuazioni – di poche centinaia di gradi – nella sua temperatura, per poi vederla piombare improvvisamente, nell'estate del 2000, da circa 7000 gradi a 4000 gradi. Durante quel periodo, gli astronomi hanno anche rilevato nell'atmosfera stellare la presenza di ossido di titanio, che pensano faccia parte di uno strato esterno espulso dalla stella con un'imponente onda d'urto.

Durante l'esplosione di una supernova, alcuni degli elementi più pesanti prodotti nelle fasi finali della vita della stella vengono rigettati nel gas della galassia, e forniscono parte della materia prima per la successiva generazione di stelle. Il nostro Sole contiene circa il 2 per cento di questi elementi più pesanti. Esso è una stella di seconda – o terza – generazione, formatasi circa cinque miliardi di anni fa da una nube di gas in rotazione che conteneva i detriti di precedenti supernove. La maggior parte del gas di quella nube andò a formare il Sole o si disperse, ma piccole quantità degli elementi più pesanti si raccolsero insieme per formare i corpi che oggi orbitano intorno al Sole, come la Terra e gli altri pianeti. L'oro dei nostri gioielli e l'uranio dei nostri reattori nucleari sono entrambi residui delle supernove che si sono verificate prima della nascita del nostro sistema solare!

Immediatamente dopo la sua formazione, la Terra era molto calda e priva di atmosfera. Nel corso del tempo, si raffreddò e acquistò un'atmosfera in seguito all'emissione di gas dalle rocce. In questa atmosfera primitiva noi non avremmo certo potuto sopravvivere: non conteneva ossigeno, ma una gran quantità di altri gas per noi tossici, come l'acido solfidrico (il gas a cui si deve il caratteristico odore delle uova marce). Ci sono però altre forme primitive di vita che possono prosperare in condizioni simili. Si pensa che esse si siano sviluppate negli oceani, forse in seguito a combinazioni casuali di atomi che dettero origine a strutture più grandi, le cosiddette «macromolecole», le quali erano dotate della capacità di assemblare altri atomi presenti nell'oceano fino a formare strutture simili. In tal modo, esse avrebbero iniziato a riprodursi e a moltiplicarsi. In alcuni casi, durante questa riproduzione si saranno verificati degli errori, la maggior parte dei quali saranno stati tali da far sì che le nuove macromolecole non fossero più in grado di riprodursi, finendo per essere distrutte. Tuttavia, alcuni errori avranno anche portato alla formazione di nuove macromolecole in grado di riprodursi con un'efficacia ancora maggiore. Grazie a tale vantaggio, queste ultime avranno poi tendenzialmente sostituito le macromolecole originarie, dando inizio a quel processo evolutivo che condusse allo sviluppo di organismi autoriproduttivi sempre più complessi. Le forme primitive di vita consumavano diverse materie prime, tra cui l'acido solfidrico, e liberavano ossigeno. Ciò

venne gradualmente a cambiare la composizione dell'atmosfera fino a condurla ai suoi valori attuali, e permise così lo sviluppo di forme di vita superiori come i pesci, i rettili, i mammiferi e, infine, l'uomo.

Il XX secolo ha assistito alla trasformazione della nostra visione dell'universo: abbiamo compreso l'irrelevanza del nostro stesso pianeta nella vastità dell'universo, e abbiamo scoperto come il tempo e lo spazio siano curvi e inseparabili, come l'universo si stia espandendo e abbia avuto un inizio nel tempo.

L'idea secondo la quale l'universo sia stato in origine estremamente caldo e si sia poi progressivamente raffreddato durante l'espansione, si basa sulla teoria della gravità elaborata da Einstein, la relatività generale. Il fatto che questa teoria sia in accordo con tutti i dati d'osservazione di cui disponiamo oggi costituisce certo un suo grande trionfo. Tuttavia, la matematica non è concretamente in grado di lavorare con i numeri infiniti, cosicché, predicendo che l'universo ha avuto inizio con il big bang – cioè con un tempo nel quale la densità dell'universo e la curvatura dello spazio-tempo avrebbero dovuto essere infinite –, la teoria della relatività generale predice l'esistenza di un punto nell'universo in corrispondenza del quale la teoria stessa perde la propria validità, o viene meno. Un tale punto costituisce un esempio di ciò che i matematici definiscono una singolarità. Quando una teoria predice delle singolarità come una densità e una curvatura infinite, è un segno che dev'essere in un qualche modo riveduta. La relatività generale è una teoria incompleta, poiché non è in grado di dirci come l'universo abbia avuto inizio.

Ma oltre alla relatività generale, il XX secolo ha prodotto anche un'altra grande teoria parziale della natura, la meccanica quantistica. Quest'ultima si occupa dei fenomeni che si verificano su scale estremamente ridotte. La nostra ricostruzione del big bang indica che dev'esserci stato un tempo – nei primissimi istanti di vita dell'universo – in cui l'universo stesso era talmente piccolo che per studiarlo, anche dal punto di vista della sua struttura su larga scala, non sarebbe più possibile ignorare gli effetti su piccola scala della meccanica quantistica. Come vedremo nel seguente capitolo, la nostra più grande speranza di raggiungere una comprensione completa dell'universo, dall'inizio alla fine, è riposta in una sintesi di queste due teorie parziali in una singola teoria quantistica della gravità, una teoria nella quale le leggi ordinarie della scienza riescano effettivamente a valere ovunque, anche all'inizio del tempo, senza il bisogno di introdurre alcuna singolarità.

La gravità quantistica

All'inizio del XIX secolo, il successo delle teorie scientifiche – e, in particolare, della teoria della gravità di Newton – spinse uno scienziato francese, il marchese de Laplace, a sostenere che l'universo era completamente deterministico. In altre parole, Laplace credeva che doveva esistere un insieme di leggi scientifiche tale da consentirci – almeno in linea di principio – di predire qualsiasi accadimento futuro che si sarebbe verificato nell'universo. L'unico dato richiesto da queste leggi è la conoscenza completa dello stato dell'universo in un determinato istante. A questo proposito, si parla di una «condizione iniziale» o «condizione al contorno». (Quando parliamo di contorno, possiamo riferirci a un confine esterno nello spazio o nel tempo: una condizione al contorno nello spazio è così lo stato dell'universo al suo confine esterno – se ne ha uno.) Laplace credeva quindi che, disponendo di un insieme completo di leggi e dell'appropriata condizione iniziale (o al contorno), avremmo dovuto essere in grado di calcolare lo stato completo dell'universo in un qualunque istante.

Sul piano intuitivo, la necessità di conoscere le condizioni iniziali è probabilmente ovvia: differenti stati attuali dell'essere condurranno ovviamente a diversi stati futuri. La necessità di condizioni al contorno nello spazio è un po' più sottile, ma il principio rimane il medesimo. Le equazioni sulle quali si basano le teorie fisiche possono generalmente avere diverse soluzioni, e per decidere quali sono le soluzioni di fatto valide dobbiamo basarci sulle condizioni iniziali o al contorno. È un po' come dire che sul nostro conto in banca ci sono grandi transazioni di denaro in entrata e in uscita: per sapere se, alla fine, saremo ricchi oppure in bancarotta, dobbiamo conoscere non solo l'ammontare delle somme che entrano ed escono, ma anche la condizione iniziale (o al contorno), ossia di quanto denaro disponevamo sul conto al principio.

Se Laplace avesse ragione, allora, dato lo stato dell'universo al momento presente, queste leggi ci permetterebbero di calcolare sia lo stato che l'universo avrà in futuro, sia quello che aveva in passato. Per esempio, date le posizioni e le velocità del Sole e dei pianeti, possiamo servirci delle leggi di Newton per calcolare lo stato del sistema solare in un qualsiasi momento precedente o successivo. Nel caso dei pianeti, il determinismo sembra una cosa abbastanza ovvia – in fin dei conti, gli astronomi sono estremamente precisi nelle loro predizioni di eventi come le eclissi. Laplace, però, si spingeva oltre, postulando l'esistenza di leggi simili a queste che governavano anche tutte le altre cose, compreso il comportamento umano.

Ma gli scienziati possono veramente calcolare quali saranno tutte le nostre azioni future? Un bicchiere d'acqua contiene più di dieci alla ventiquattresima (1 seguito da 24 zeri) molecole. Sul piano pratico, non abbiamo nessuna speranza di arrivare a conoscere lo stato di ognuna di esse; tanto meno potremo conoscere lo stato completo dell'universo, o anche solo quello dei nostri corpi. Tuttavia, in linea di principio, affermare che l'universo è deterministico significa dire che, anche se non abbiamo la capacità intellettuale per fare questo calcolo, il nostro futuro resta nondimeno predeterminato.

La dottrina del determinismo scientifico fu fortemente avversata da molte persone, le quali ritenevano che violasse la libertà di Dio di intervenire nel mondo facendolo andare secondo i propri disegni.

Tuttavia rimase l'assunto standard della scienza fino ai primi anni del XX secolo. Una delle prime indicazioni del fatto che questa convinzione avrebbe dovuto essere abbandonata emerse quando gli scienziati britannici lord Rayleigh e sir James Jeans calcolarono l'ammontare della radiazione del corpo nero che dev'essere emessa da un oggetto caldo, come una stella (come ricorderemo dal capitolo 7, qualunque corpo materiale, quando viene riscaldato, sprigiona la cosiddetta radiazione del corpo nero).

Secondo le leggi in cui si credeva a quel tempo, un corpo caldo dovrebbe emettere onde elettromagnetiche ugualmente distribuite su tutte le frequenze. Se ciò fosse vero, esso irradierebbe una stessa quantità di energia in ogni colore dello spettro della luce visibile, oltre che in tutte le frequenze delle microonde, delle onde radio, dei raggi X eccetera. Si ricordi ora che la frequenza di un'onda è data dal numero delle sue oscillazioni complete (da una cresta alla cresta successiva, passando per il ventre) al secondo, vale a dire dal numero di «cicli al secondo». Matematicamente, perché un corpo caldo possa emettere la stessa quantità di energia in onde di tutte le frequenze, esso dovrebbe irradiare in onde con frequenze comprese tra zero e un milione di cicli al secondo la stessa quantità di energia che irradia in onde con frequenze tra uno e due milioni di cicli al secondo, in onde con frequenze tra due e tre milioni di cicli al secondo, e così via, all'infinito. Supponiamo ora che una unità di energia venga irradiata in onde con frequenze tra zero e un milione di cicli al secondo, in onde con frequenze tra uno e due milioni di cicli al secondo, e così via. La quantità complessiva di energia irradiata in tutte le frequenze sarà quindi data dalla somma di 1 più 1 più 1... e così via. E dato che il numero di cicli al secondo che possono trovarsi in un'onda è illimitato, questa somma delle energie emesse è una somma interminabile. Stando a questo ragionamento, l'energia complessiva irradiata dovrebbe quindi essere infinita.

Per evitare questo risultato palesemente ridicolo, nel 1900 il fisico tedesco Max Planck avanzò l'ipotesi che la luce, i raggi X e le altre onde elettromagnetiche potessero essere emessi solo in determinati pacchetti discreti, da lui indicati con il termine di «quanti». Oggi, come abbiamo accennato nel capitolo 8, consideriamo un fotone come un quanto di luce. L'energia contenuta nella luce è direttamente proporzionale alla sua frequenza. Pertanto, anche se i fotoni di qualunque colore o frequenza sono tra loro identici, la teoria di Planck afferma che i fotoni di frequenze diverse differiscono l'uno dall'altro per la quantità di energia da essi trasportata. Ciò significa che nella teoria quantistica la luce più debole di un qualunque colore dato – vale a dire, la luce portata da un singolo fotone – ha un contenuto energetico che dipende dal colore stesso. Per esempio, dato che la luce violetta ha una frequenza doppia rispetto a quella rossa, un quanto di luce violetta avrà un contenuto di energia doppio rispetto a quello di un quanto di luce rossa. In altre parole, la più piccola quantità possibile di energia della luce violetta è grande il doppio rispetto alla più piccola quantità possibile di energia della luce rossa.

Ma in che modo questa teoria ci consente di risolvere il problema del corpo nero? La più piccola quantità di energia elettromagnetica che un corpo nero può emettere in una determinata frequenza è quella trasportata da un fotone di quella specifica frequenza. Ora, a frequenze più alte l'energia di un fotone è più grande. Quindi, a frequenze sufficientemente elevate, la quantità di energia contenuta in un solo, singolo quanto sarà superiore a quella che un corpo ha a propria disposizione; in tal caso, la luce non verrà emessa e la somma interminabile di cui parlavamo sopra avrà termine. Pertanto, nella

teoria di Planck la radiazione ad alte frequenze verrebbe a ridursi e il ritmo al quale il corpo perde energia sarebbe dunque finito, risolvendo così il problema del corpo nero.

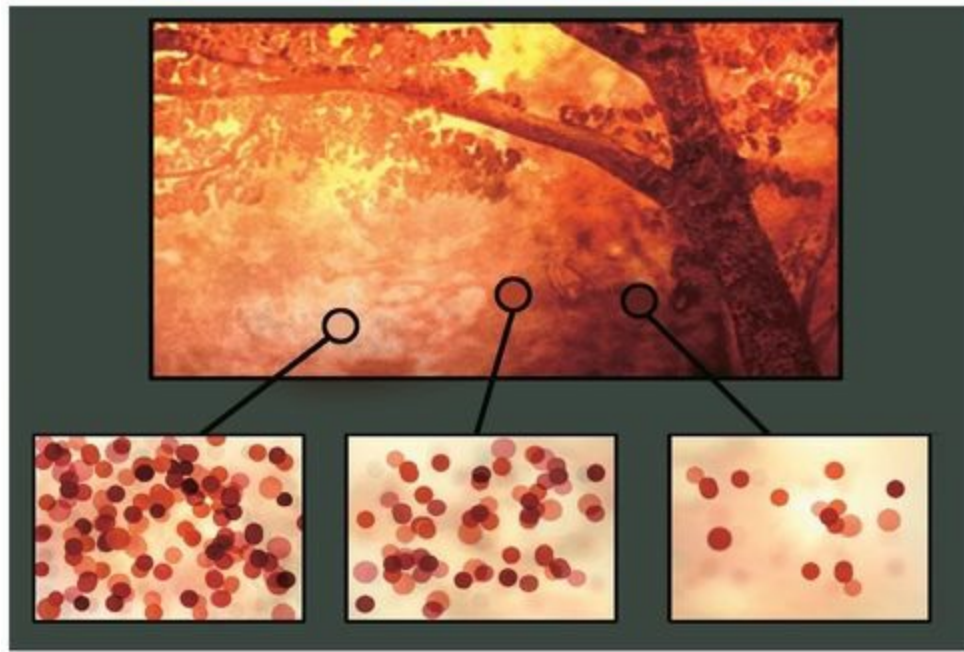


Figura 23. La più debole luce possibile

Una luce più debole significa meno fotoni. La più debole luce possibile di un qualunque colore è quella trasportata da un singolo fotone.

L'ipotesi quantistica spiegava molto bene il ritmo di emissione osservato nella radiazione dei corpi caldi, ma le sue implicazioni rispetto al problema del determinismo non vennero comprese fino al 1926, quando un altro scienziato tedesco, Werner Heisenberg, formulò il suo famoso principio di indeterminazione.

Il principio di indeterminazione ci dice che, contrariamente a quanto credeva Laplace, la natura impone dei limiti alla nostra capacità di predire il futuro tramite le leggi scientifiche. Ciò è dovuto al fatto che, per poter predire la posizione e la velocità future di una particella, dobbiamo essere in grado di misurarne con accuratezza lo stato iniziale – ossia la posizione e la velocità attuali. Il modo più ovvio per farlo consiste nel proiettare un fascio di luce sulla particella. Parte delle onde luminose verranno infatti disperse dalla particella: esse potranno quindi essere rilevate dall'osservatore e ci indicheranno la posizione della particella stessa. Tuttavia, la luce di una determinata lunghezza d'onda ha soltanto una sensibilità limitata: non sarà cioè possibile determinare la posizione della particella con una precisione superiore alla distanza tra le creste dell'onda luminosa da noi impiegata. Pertanto, se vogliamo misurare con esattezza la posizione della particella, dobbiamo usare dei raggi luminosi di breve lunghezza d'onda, ossia di frequenza elevata. Ora, in base all'ipotesi quantistica di Planck, non è però possibile usare una quantità di luce piccola a piacere: occorre infatti usare perlomeno un quanto, la cui energia è maggiore alle frequenze più alte. Così, quanto più esattamente vogliamo misurare la posizione di una particella, tanta più energia dovrà avere il quanto di luce che le indirizziamo contro.

Stando alla teoria quantistica, anche un singolo quanto di luce disturberà la particella, alterando la sua velocità in modo imprevedibile. E quanto più è elevata l'energia del quanto di luce da noi

utilizzato, tanto più grande sarà la perturbazione apportata alla particella. Ciò significa che per misurarne più accuratamente la posizione, dovremo usare un quanto più energetico, ma in tal modo la velocità della particella risulterà maggiormente alterata. Così, più precisamente tentiamo di misurare la posizione della particella, meno esattamente potremo misurarne la velocità, e viceversa. Heisenberg mostrò che il prodotto dell'indeterminazione nella posizione della particella per l'indeterminazione nella sua velocità per la massa della particella stessa non può mai essere inferiore a una certa quantità costante. Ciò significa, per esempio, che se dimezzassimo l'indeterminazione riguardo alla posizione, dovremmo raddoppiare l'indeterminazione riguardo alla velocità, e viceversa. La natura ci obbliga sempre al compromesso.

Ma, di fatto, quanto ci costa questo compromesso? La risposta dipende dal valore numerico di quella «certa quantità costante» che abbiamo menzionato sopra. Tale quantità è nota come «costante di Planck» ed è un numero estremamente piccolo. Dato che la costante di Planck è così piccola, gli effetti di questo compromesso, e della teoria quantistica in generale, non sono direttamente osservabili nella nostra vita quotidiana – come, del resto, non lo sono neppure gli effetti della relatività. (La teoria quantistica influisce però sulle nostre vite, in quanto sta alla base di campi come quello della moderna elettronica.) Per esempio, se determinassimo la velocità di una pallina da ping-pong dalla massa di un grammo con un margine di errore di un centimetro al secondo, potremmo allora individuare la sua posizione con una precisione di gran lunga superiore a quella di cui ci potrebbe mai capitare di aver bisogno. Se però misurassimo la posizione di un elettrone con un'accuratezza grosso modo pari ai confini di un atomo, il margine di errore riguardo alla sua velocità non potrebbe essere inferiore a 1000 chilometri al secondo, in più o in meno – e questa non può certo considerarsi una misura molto precisa.

Il limite imposto dal principio di indeterminazione non dipende dal modo in cui si cerca di misurare la posizione o la velocità della particella, o dal tipo di particella. Il principio di indeterminazione di Heisenberg è una proprietà fondamentale e ineludibile del mondo stesso, e ha avuto profonde implicazioni rispetto al nostro modo di vedere il mondo. Persino a ottant'anni di distanza, queste implicazioni non sono state ancora pienamente comprese da molti filosofi, e sono tuttora oggetto di numerose controversie. Il principio di indeterminazione segnò la fine del tipo di scienza sognato da Laplace, ovvero di un modello dell'universo completamente deterministico: non è certo possibile predire con esattezza gli eventi futuri se non si può misurare con precisione nemmeno lo stato attuale dell'universo!

Potremmo ancora immaginare l'esistenza di un insieme di leggi che determinino completamente gli eventi per un essere soprannaturale, il quale, a differenza di noi, potrebbe osservare lo stato presente dell'universo senza perturbarlo. Tuttavia, simili modelli dell'universo non rivestono un grande interesse per noi comuni mortali. Sembra invece meglio usare quel principio di economia noto come rasoio di Ockham ed eliminare tutti i caratteri della teoria che non siano verificabili tramite l'osservazione. Questo tipo di approccio condusse Heisenberg, Erwin Schrödinger e Paul Dirac a riformulare, negli anni Venti, la meccanica di Newton in una nuova teoria detta meccanica quantistica, fondata sul principio di indeterminazione. In questa teoria le particelle non avevano più posizioni e velocità separate, ben definite. Esse avevano invece uno stato quantico, ovvero una combinazione di posizione e velocità, definito solo all'interno dei limiti del principio di

indeterminazione.

Una delle proprietà rivoluzionarie della meccanica quantistica è data dal fatto che essa non predice un singolo risultato ben definito per una determinata osservazione: predice invece un certo numero di diversi esiti possibili, indicando la probabilità di ciascuno di essi. In altri termini, se si eseguisse la medesima misurazione su un gran numero di sistemi simili (tutti con le stesse condizioni iniziali), si troverebbe che il risultato della misurazione sarebbe A in un certo numero di casi, B in un diverso numero di casi, e così via. Si potrebbe predire il numero approssimativo di volte in cui il risultato sarebbe A oppure B, ma non il risultato specifico di una singola misurazione.

Per fare un esempio, immaginate di lanciare una freccetta verso un bersaglio. Stando alle teorie classiche – ossia, le vecchie teorie non quantistiche – la freccetta o colpirà il centro del bersaglio o lo mancherà. E se conoscete la velocità della freccetta al momento del lancio, l'attrazione di gravità eccetera, sarete in grado di calcolare se lo centerà oppure no. La teoria quantistica indica però che questo ragionamento è sbagliato, che non è possibile sapere con certezza il risultato. Al contrario, c'è una determinata probabilità che la freccetta colpisca il centro del bersaglio, ma anche una certa probabilità, diversa da zero, che essa finisca da qualche altra parte. Per un oggetto grande come la freccetta, se la teoria classica – in questo caso, le leggi di Newton – dice che colpirà il centro del bersaglio, potete dare tranquillamente per scontato che lo farà. Perlomeno, le possibilità che non lo faccia (stando alla teoria quantistica) sono talmente ridotte che anche se continuaste a lanciare la freccetta nello stesso, preciso modo fino alla fine dell'universo, probabilmente non la vedreste comunque mai mancare il proprio obiettivo. Su scala atomica, però, le cose sono diverse. Una freccetta costituita da un singolo atomo potrebbe avere una probabilità di colpire il centro del bersaglio pari al 90 per cento, con un 5 per cento di probabilità di colpire qualche altro punto del bersaglio stesso e un altro 5 per cento di mancarlo completamente. Non è possibile dire in anticipo che cosa accadrà. Tutto ciò che possiamo dire è che, ripetendo l'esperimento parecchie volte, ci si può attendere che, in media, 90 volte su 100 la freccetta colpirà il centro del bersaglio.

La meccanica quantistica introduce quindi nella scienza un inevitabile elemento di imprevedibilità o casualità. Einstein si oppose con molta forza a queste conclusioni, nonostante l'importante ruolo che lui stesso aveva giocato nello sviluppo di tali idee. Di fatto, Einstein ricevette il premio Nobel proprio per il suo contributo alla teoria quantistica. Tuttavia egli non accettò mai che l'universo fosse governato dal caso; il suo pensiero in proposito venne riassunto nella famosa affermazione «Dio non gioca a dadi».

La prova della validità di una teoria scientifica, come abbiamo detto, consiste nella sua capacità di predire i risultati di un esperimento. Ora, la teoria quantistica pone dei limiti alle nostre capacità di predizione. Dobbiamo quindi concludere che essa viene a limitare la scienza? Perché la scienza possa progredire, il modo in cui la portiamo avanti dev'essere dettato dalla natura.



Figura 24. La distribuzione quantistica della posizione

Secondo la teoria quantistica, non è possibile determinare con precisione infinita la posizione e la velocità di un oggetto, così come non è possibile predire esattamente il corso degli eventi futuri.

In questo caso, la natura ci chiede di ridefinire il nostro significato di predizione: anche se non siamo in grado di predire esattamente il risultato di un esperimento, possiamo tuttavia ripeterlo numerose volte e verificare così che i diversi possibili risultati sono in linea con le probabilità predette dalla teoria quantistica. Pertanto, nonostante il principio di indeterminazione, non c'è bisogno di abbandonare la convinzione che il mondo sia governato dalle leggi fisiche. E di fatto, alla fine, la maggior parte degli scienziati hanno accettato di buon grado la meccanica quantistica, proprio perché si accorda perfettamente con i risultati degli esperimenti.

Una delle più importanti implicazioni del principio di indeterminazione di Heisenberg rivela che le particelle, sotto certi aspetti, si comportano come onde. Come abbiamo visto, esse non hanno una posizione ben definita, ma sono «distribuite» secondo valori probabilistici. Allo stesso modo, anche se la luce è costituita da onde, l'ipotesi quantistica di Planck ci dice anche che, per alcuni versi, la luce si comporta come se fosse composta da particelle: può essere emessa o assorbita soltanto in pacchetti, o quanti. In effetti, la teoria della meccanica quantistica si basa su un tipo di matematica del tutto nuovo, che non descrive più il mondo reale nei termini di un'alternativa secca tra onde o particelle. Per alcuni scopi, è utile pensare le particelle come onde, e per altri scopi è meglio pensare le onde come particelle, ma in entrambi i casi si tratta solo di una questione di convenienza. È questo ciò che i fisici intendono dire quando affermano che nella meccanica quantistica esiste una dualità tra onde e particelle.

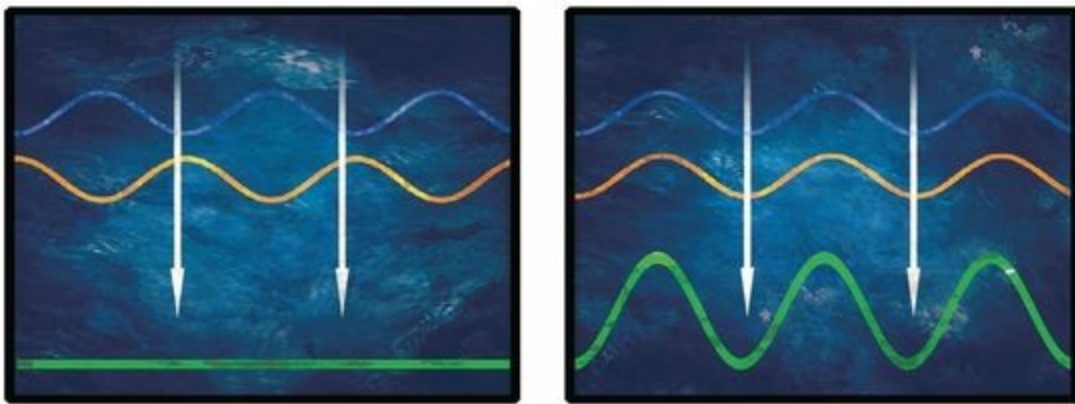


Figura 25. Onde in fase e fuori fase

Se le creste e i ventri di due onde coincidono, il risultato è un'onda più forte; se invece le creste di un'onda coincidono con i ventri di un'altra, le due onde si cancellano a vicenda.

Una conseguenza importante del comportamento simile a quello delle onde previsto dalla meccanica quantistica è la possibilità di osservare la cosiddetta interferenza tra due insiemi di onde o di particelle. Normalmente, l'interferenza è considerata come un fenomeno peculiare delle onde. In altri termini, quando due treni di onde si scontrano, le creste del primo possono coincidere con i ventri del secondo (in questo caso, si dice che le onde sono «fuori fase»). Se ciò avviene, i due treni di onde si cancellano a vicenda anziché sommarsi in un'onda più forte come ci si potrebbe aspettare. Un esempio familiare di interferenza nel caso della luce è dato dai colori che si vedono spesso nelle bolle di sapone. Questi colori sono causati dalla riflessione della luce dai due lati della sottile pellicola d'acqua che forma la bolla. La luce bianca è costituita da onde luminose di tutte le diverse lunghezze d'onda, o colori. Per alcune lunghezze d'onda, le creste delle onde riflesse da un lato della pellicola della bolla coincidono con i ventri riflessi dall'altro lato. I colori corrispondenti a queste lunghezze d'onda sono assenti dalla luce riflessa, che ci appare quindi come colorata.

La teoria quantistica ci dice però che questa interferenza può verificarsi anche con le particelle, a causa della dualità introdotta dalla meccanica quantistica. Un esempio famoso è dato dal cosiddetto esperimento delle due fenditure. Immaginiamo di avere un divisorio (una sottile parete) in cui siano state praticate due strette fenditure parallele. Prima di considerare che cosa succede quando inviamo delle particelle attraverso queste fenditure, esaminiamo che cosa accade quando proiettiamo su di esse un fascio di luce. Da un lato del divisorio poniamo una sorgente di luce di un particolare colore (ossia, di una particolare lunghezza d'onda). La maggior parte della luce colpirà il divisorio, ma una piccola quantità passerà attraverso le fenditure. Supponiamo quindi di sistemare uno schermo al di là del divisorio, dal lato opposto rispetto a quello dove si trova la fonte luminosa. Consideriamo ora un qualunque punto su questo schermo. Esso riceverà onde luminose da entrambe le fenditure. Tuttavia, in generale, la distanza che la luce deve percorrere dalla sorgente luminosa fino al punto sullo schermo passando attraverso una delle fenditure sarà diversa da quella percorsa dalla luce che transita dall'altra fenditura. Dato che le distanze percorse sono differenti, quando arriveranno al punto sullo schermo le onde provenienti dalle due fenditure non saranno in fase l'una con l'altra. In alcuni punti, i ventri di un'onda coincideranno con le creste dell'altra, così che le onde si cancelleranno reciprocamente; in altri punti, le creste e i ventri verranno invece a coincidere, e le onde si rinforzeranno a vicenda; e nella maggior parte dei punti la situazione si collocherà tra questi

due estremi (con una maggiore vicinanza all'uno oppure all'altro). Il risultato è una caratteristica configurazione della luce con frange chiare e scure.

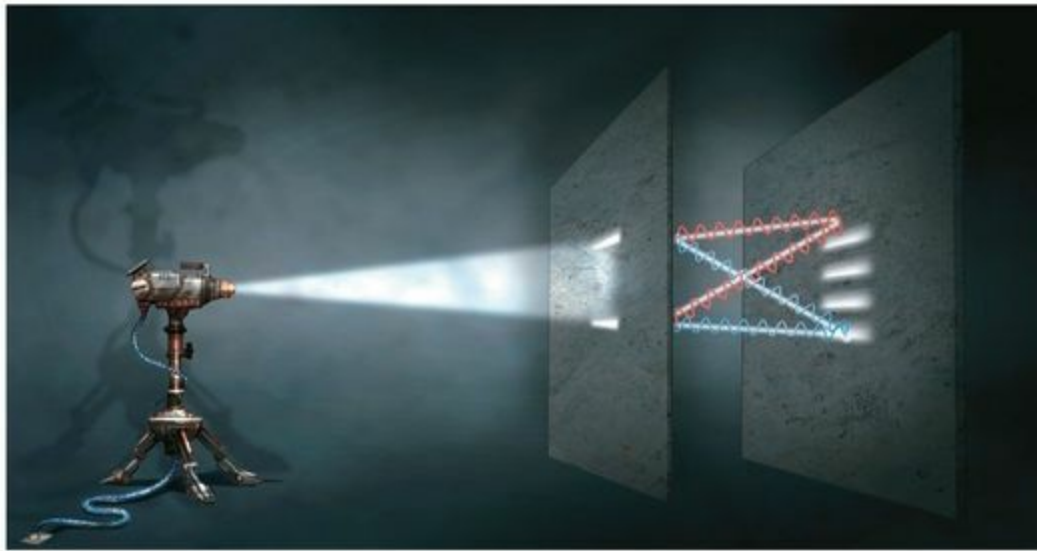


Figura 26. Distanze percorse e interferenza

Nell'esperimento con le due fenditure, la distanza che le onde devono percorrere dalla fessura superiore e da quella inferiore fino allo schermo varia a seconda dell'altezza dei diversi punti dello schermo stesso. Ne consegue che le onde si rafforzano a vicenda in corrispondenza di determinate altezze e si cancellano in corrispondenza di altre, formando così una frangia d'interferenza.

La cosa notevole è che si ottiene esattamente lo stesso tipo di frange anche sostituendo la sorgente luminosa con una sorgente di particelle, per esempio di elettroni, con una velocità ben definita. (Stando alla teoria quantistica, se gli elettroni hanno una velocità ben definita, le onde corrispondenti avranno una lunghezza d'onda altrettanto ben determinata.) Supponiamo ora di avere soltanto una fenditura e di iniziare a sparare gli elettroni verso il divisorio. La maggior parte degli elettroni verrà bloccata dal divisorio, ma alcuni di essi passeranno attraverso la fenditura e raggiungeranno lo schermo posto dall'altra parte. Si potrebbe quindi pensare che aprendo una seconda fenditura nel divisorio non faremmo altro che accrescere il numero di elettroni che colpiscono ciascun punto dello schermo. Quando apriamo questa seconda fenditura, però, il numero di elettroni che colpiscono lo schermo aumenta in alcuni punti e diminuisce in altri, come se gli elettroni, anziché comportarsi come particelle, stessero interferendo tra di loro al pari delle onde.

Immaginiamo ora di sparare gli elettroni attraverso le fenditure uno per volta. C'è ancora l'interferenza? In questo caso, ci si potrebbe aspettare che ciascun elettrone passi attraverso l'una o l'altra fenditura, senza che si formino quindi le frange di interferenza sullo schermo. In realtà, invece, anche quando gli elettroni vengono sparati uno alla volta, appaiono ancora le frange di interferenza. Ciò significa che ogni elettrone viene quindi di fatto a passare attraverso entrambe le fenditure nello stesso tempo, interferendo così con se stesso!

Il fenomeno dell'interferenza tra particelle ha avuto un'importanza cruciale per la nostra comprensione della struttura degli atomi, le unità basilari di cui noi – e ogni cosa che ci circonda – siamo fatti. All'inizio del XX secolo si pensava che gli atomi fossero piuttosto simili al sistema solare, con gli elettroni (particelle con carica elettrica negativa) che orbitavano intorno a un nucleo

centrale (carico di elettricità positiva) come i pianeti intorno al Sole. Si supponeva che l'attrazione fra l'elettricità positiva e quella negativa mantenesse gli elettroni nelle loro orbite nello stesso modo in cui l'attrazione gravitazionale fra il Sole e i pianeti mantiene questi ultimi nelle proprie. Il problema di questa concezione stava nel fatto che, prima dell'avvento della meccanica quantistica, le leggi classiche della meccanica e dell'elettricità predicevano che gli elettroni, orbitando in questo modo, avrebbero emesso una radiazione. Tale emissione avrebbe causato una loro perdita di energia e, di conseguenza, li avrebbe portati a seguire un'orbita di decadimento a spirale fino a precipitare sul nucleo. Ciò significherebbe che gli atomi, e con loro tutta la materia, dovrebbero rapidamente collassare in uno stato di altissima densità, cosa che evidentemente non avviene.

Lo scienziato danese Niels Bohr trovò una soluzione parziale di questo problema nel 1913. Egli ipotizzò che forse gli elettroni non erano in grado di orbitare a una qualunque distanza dal nucleo centrale, ma solo a certe distanze specifiche. Se si supponesse poi anche che a ciascuna di queste distanze specifiche possano orbitare soltanto uno o due elettroni, ciò basterebbe a risolvere il problema del collasso, poiché una volta riempito il numero limitato delle orbite inferiori, gli elettroni non avrebbero più la possibilità di scendere ulteriormente con un moto a spirale. Questo modello spiegava bene la struttura dell'atomo più semplice, l'idrogeno – che ha un solo elettrone in orbita intorno al nucleo –, ma non era chiaro in che modo si potesse estendere la sua applicazione anche ad atomi più complessi. Inoltre, l'idea di un insieme limitato di orbite consentite sembrava un semplice artificio introdotto arbitrariamente. Era un trucco che funzionava sul piano matematico, ma nessuno era in grado di dire perché mai la natura avrebbe dovuto comportarsi proprio in quel modo, o di quale legge più profonda – nel caso ce ne fosse una – esso fosse espressione. La nuova teoria della meccanica quantistica risolse tale difficoltà. Essa rivelò che un elettrone orbitante intorno al nucleo poteva essere concepito come un'onda, con una lunghezza d'onda dipendente dalla sua velocità. Immaginate che l'onda ruoti intorno al nucleo a distanze specifiche, come aveva postulato Bohr. Per determinate orbite, la circonferenza dell'orbita corrisponderebbe a un numero intero (in contrapposizione a un numero frazionario) di volte la lunghezza d'onda dell'elettrone. In queste orbite, a ogni rivoluzione la cresta dell'onda verrebbe a trovarsi nella medesima posizione, così che le onde si rinforzerebbero a vicenda. Tali orbite corrisponderebbero alle orbite consentite di Bohr. Nel caso di orbite la cui circonferenza non sia pari a un numero intero di volte la lunghezza d'onda, durante le successive rivoluzioni ogni cresta dell'onda finirebbe invece per essere cancellata da un ventre. Queste orbite, quindi, non sarebbero consentite. La legge di Bohr, che consentiva e proibiva determinate orbite, aveva quindi trovato una sua spiegazione.

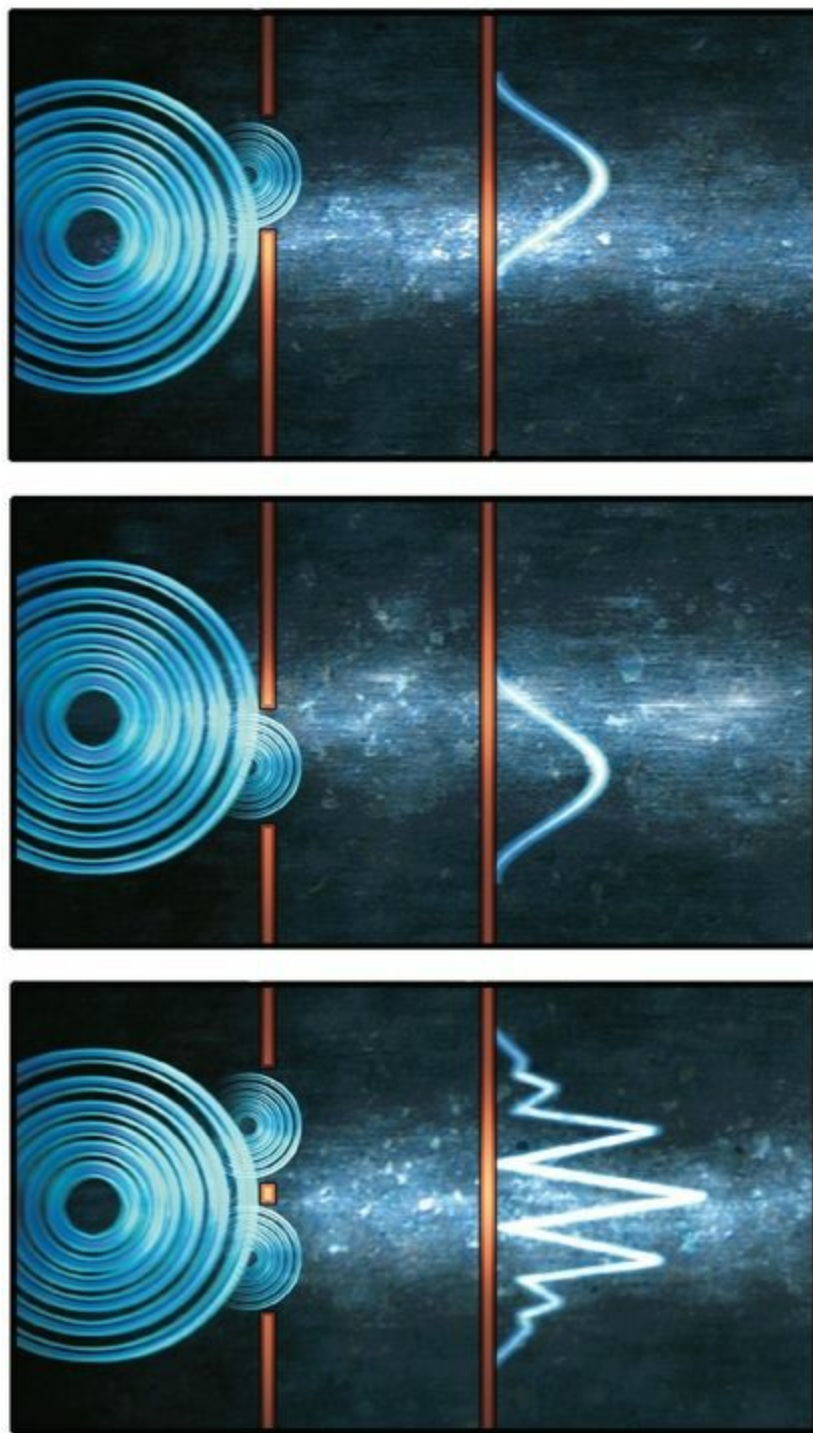


Figura 27. Interferenza tra elettroni

A causa dell'interferenza, il risultato che si ottiene sparando un fascio di elettroni attraverso due fenditure non corrisponde a quello ottenuto sparandoli attraverso ciascuna delle due fessure prese separatamente.

Un bel modo per visualizzare la dualità onda/particella è la cosiddetta «somma sulle storie», introdotta dallo scienziato americano Richard Feynman. Stando a questo approccio, una particella non dovrebbe avere una singola storia (o un'unica traiettoria nello spazio-tempo), come accadrebbe in una teoria classica, non quantistica; essa, invece, dovrebbe andare da A a B percorrendo ogni traiettoria possibile. Feynman associò una coppia di numeri a ogni traiettoria fra A e B. Uno di essi rappresenta l'ampiezza, o dimensione, di un'onda, mentre l'altro rappresenta la sua fase, o posizione nel ciclo (ossia, se si trova in corrispondenza di una cresta o di un ventre). La probabilità che una particella vada da A a B si trova sommando le onde per tutte le traiettorie che collegano A e B. In

generale, se si confronta un insieme di traiettorie vicine, le fasi o posizioni nel ciclo differiranno grandemente le une dalle altre. Ciò significa che le onde associate a queste traiettorie saranno tali da cancellarsi quasi esattamente tra loro. Tuttavia, per alcuni insiemi di traiettorie vicine, la fase non cambierà molto fra una traiettoria e l'altra: le onde, quindi, non si cancelleranno a vicenda. Tali traiettorie corrispondono alle orbite consentite di Bohr.

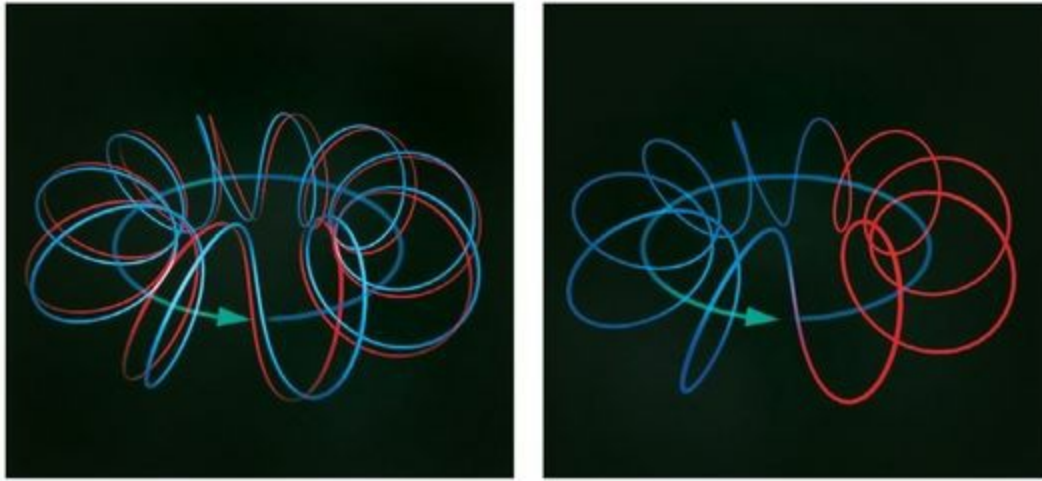


Figura 28. Le onde nelle orbite atomiche

Nel modello ipotizzato da Niels Bohr, gli atomi sono costituiti da elettroni che, sotto forma di onde, ruotano continuamente intorno ai nuclei.

Stando alla sua ipotesi, solo le orbite la cui circonferenza corrisponde a un numero intero di volte la lunghezza d'onda dell'elettrone possono conservarsi senza essere distrutte dal fenomeno dell'interferenza.

Traducendo queste idee in formule propriamente matematiche, era relativamente semplice calcolare le orbite consentite in atomi più complessi e persino nelle molecole, che sono formate da un certo numero di atomi la cui coesione è assicurata da elettroni con orbite che corrono intorno a più nuclei. Dato che la struttura delle molecole e le loro reazioni reciproche stanno alla base di tutta la chimica e la biologia, la meccanica quantistica ci permette, in linea di principio, di predire quasi tutto ciò che vediamo intorno a noi, entro i limiti posti dal principio di indeterminazione. (Da un punto di vista pratico, però, non siamo in grado di risolvere le equazioni per nessun atomo eccetto quello più semplice, l'idrogeno, che ha un solo elettrone, e per analizzare gli atomi più complessi e le molecole ci serviamo dei computer e ricorriamo ad approssimazioni.)

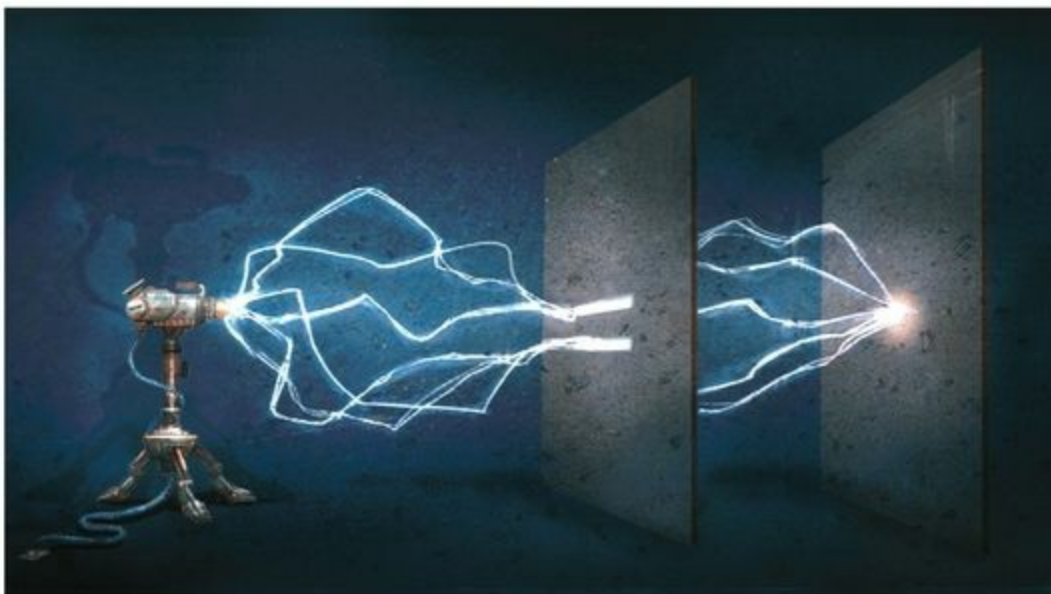


Figura 29. Molteplici traiettorie seguite da un elettrone

Nella formulazione della teoria quantistica avanzata da Richard Feynman, una particella (come questa, che si muove dall'emettitore allo schermo) segue ogni traiettoria possibile.

La teoria quantistica ha avuto un successo straordinario ed è alla base di quasi tutta la scienza e la tecnologia moderne. Essa governa il comportamento dei transistor e dei circuiti integrati, che sono i componenti fondamentali di apparecchi elettronici come i televisori e i computer, ed è anche alla base della chimica e della biologia moderne. Le uniche aree della scienza fisica in cui la meccanica quantistica non è ancora stata propriamente integrata sono la teoria della gravità e lo studio della struttura su larga scala dell'universo: la teoria della relatività generale di Einstein non tiene conto del principio di indeterminazione della meccanica quantistica, come dovrebbe invece fare per coerenza con altre teorie.

Come abbiamo visto nel precedente capitolo, sappiamo già che la teoria della relatività generale dev'essere modificata. Predicendo dei punti di infinita densità – delle singolarità –, la relatività generale (che è una teoria classica, ossia non quantistica) predice il proprio crollo, proprio come la meccanica classica prediceva il proprio crollo suggerendo che i corpi neri avrebbero dovuto irradiare una quantità infinita di energia, o che gli atomi sarebbero dovuti collassare fino a raggiungere una densità infinita. E come abbiamo già fatto con la meccanica classica, la nostra speranza è quella di eliminare queste inaccettabili singolarità trasformando la relatività generale classica in una teoria quantistica, creando cioè una teoria quantistica della gravità.

Ma se la relatività generale è sbagliata, perché fino a oggi tutti gli esperimenti ne hanno confermato la validità? La ragione per cui non abbiamo ancora notato nessuna discrepanza con l'osservazione è che tutti i campi gravitazionali di cui normalmente facciamo esperienza sono molto deboli. Ma, come abbiamo visto, il campo gravitazionale dovrebbe però diventare estremamente forte nel caso in cui tutta la materia e l'energia dell'universo fossero compresse in un piccolo volume, come all'inizio dell'universo stesso. In presenza di campi di una tale intensità, gli effetti della teoria quantistica dovrebbero diventare considerevoli.

Anche se non possediamo ancora una teoria quantistica della gravità, siamo però in grado di indicare un certo numero di caratteristiche che riteniamo dovrebbe avere. La prima è che dovrebbe includere

la proposta di Feynman di formulare la teoria quantistica nei termini di una somma sulle storie. Un secondo tratto che pensiamo dovrebbe far parte di una teoria definitiva è l'idea di Einstein secondo la quale il campo gravitazionale è rappresentato dallo spazio-tempo curvo: le particelle cercano di seguire la cosa che più si avvicina a una traiettoria dritta in uno spazio curvo ma, dato che lo spazio-tempo non è piatto, le loro traiettorie ci appaiono curve, come se fossero incurvate dall'azione di un campo gravitazionale. Quando applichiamo la somma sulle storie di Feynman alla concezione einsteiniana della gravità, l'analogo della storia di una particella diventa ora uno spazio-tempo curvo completo che rappresenta la storia dell'intero universo.

Nella teoria classica della gravità ci sono solo due possibili modi in cui l'universo può comportarsi: o esiste da un tempo infinito, oppure ha avuto inizio da una singolarità in un determinato momento del passato. Per le ragioni che abbiamo precedentemente discusso, noi crediamo che l'universo non sia sempre esistito. Ma se ha avuto un inizio, stando alla teoria classica della relatività generale, per poter sapere quale soluzione delle equazioni di Einstein descrive il nostro universo, dobbiamo conoscere il suo stato iniziale – ossia, dobbiamo sapere esattamente come ha avuto inizio. Dio potrebbe anche aver stabilito in origine le leggi della natura, ma sembra che, dopo quel momento iniziale, Egli abbia lasciato che l'universo si evolvesse secondo queste leggi e che ora si astenga dall'intervenirvi direttamente. Ma Dio come scelse lo stato o configurazione iniziale dell'universo? Quali furono le condizioni al contorno all'inizio del tempo? Nella relatività generale classica, ciò rimane un problema, proprio perché tale teoria perde la sua validità in corrispondenza dell'inizio dell'universo.

Nella teoria quantistica della gravità, però, emerge una nuova possibilità che, qualora fosse vera, potrebbe risolvere la questione. Nella teoria quantistica è possibile che lo spazio-tempo abbia un'estensione finita senza però avere nessuna singolarità che lo delimiti al pari di un confine, di un margine esterno. Lo spazio-tempo sarebbe allora simile alla superficie della Terra, con l'unica differenza di avere due dimensioni in più. Come abbiamo in precedenza evidenziato, se una persona continua a viaggiare in una determinata direzione sulla superficie della Terra, non si imbatte mai in una barriera invalicabile né precipiterà da un ipotetico margine esterno, ma finirà invece per ritornare al punto da cui è partita, senza cadere dal margine e senza finire in qualche singolarità. Così, se questa ipotesi è corretta, la teoria quantistica della gravità ha dischiuso una nuova possibilità, in cui non sarebbero presenti singolarità in corrispondenza delle quali le leggi scientifiche verrebbero a perdere la loro validità.

Se lo spazio-tempo non ha un confine, non c'è bisogno di specificare che cosa avviene in corrispondenza di questo confine – non c'è bisogno di conoscere lo stato iniziale dell'universo. Non esiste un limite esterno dello spazio-tempo in corrispondenza del quale ci dovremmo appellare a Dio o a qualche nuova legge per stabilire le condizioni al contorno dello spazio-tempo. Si potrebbe dire che «La condizione di confine (o al contorno) dell'universo è quella di non avere alcun confine». L'universo sarebbe completamente autonomo e non sarebbe soggetto ad alcuna influenza esterna. Non sarebbe stato creato, e non verrebbe mai distrutto: esso esisterebbe e basta. Finché si crede che l'universo abbia avuto un inizio, il ruolo di un creatore sembrerebbe chiaro. Ma se l'universo è in realtà completamente autonomo, senza un confine o un limite esterno, senza un principio né una fine, la risposta non è più tanto ovvia: che ruolo rimane per un creatore?

Tunnel spazio-temporali e viaggi nel tempo

Nei capitoli precedenti abbiamo visto come le nostre concezioni della natura del tempo siano cambiate nel corso degli anni. Fino agli inizi del XX secolo, gli uomini credevano nell'esistenza di un tempo assoluto: essi, cioè, ritenevano che ciascun evento potesse essere etichettato in modo univoco con un numero chiamato «tempo», e che tutti gli orologi correttamente funzionanti avrebbero segnato lo stesso intervallo di tempo tra due eventi. La scoperta del fatto che la velocità della luce appariva la stessa a ogni osservatore, indipendentemente dal suo movimento, condusse però alla teoria della relatività – e all'abbandono dell'idea che esistesse un unico tempo assoluto. Il tempo degli eventi non poteva più essere etichettato in modo univoco. Al contrario, ogni osservatore veniva ad avere una propria misura del tempo, registrata dall'orologio che portava con sé, e gli orologi portati da osservatori diversi non avrebbero necessariamente segnato il medesimo tempo. Il tempo divenne quindi un concetto più personale, relativo all'osservatore che lo misurava. Tuttavia, esso veniva ancora trattato come se fosse una sorta di linea ferroviaria rettilinea sulla quale era possibile muoversi soltanto in un senso oppure nell'altro. Ma che cosa accadrebbe se questa linea ferroviaria avesse invece delle diramazioni e dei circuiti chiusi, così che un treno potrebbe anche continuare ad andare avanti tornando però di fatto indietro a una stazione che aveva già superato in precedenza? Nella *Macchina del tempo* H.G. Wells esplorò queste possibilità, così come hanno fatto innumerevoli altri scrittori di fantascienza. Tuttavia, dobbiamo tenere presente che molte delle idee nate in ambito fantascientifico, come i sottomarini e i viaggi sulla Luna, sono poi state di fatto realizzate dalla scienza. Quali prospettive ci sono, quindi, per i viaggi nel tempo?



Figura 30. La macchina del tempo Gli autori in una macchina del tempo.

Sappiamo che è possibile viaggiare nel futuro. La teoria della relatività, cioè, dimostra che potete creare una macchina che vi proietti avanti nel tempo. Entrate in questa macchina, attendete un po' e, quando ne uscirete, vedrete che sulla Terra è passato molto più tempo di quello che è trascorso per voi. Oggi non possediamo ancora la tecnologia necessaria per realizzare questo genere di cose, ma è soltanto una questione di ingegneria: in linea teorica, sappiamo che possono essere fatte. Un metodo per costruire una macchina di questo genere consisterebbe nello sfruttare la situazione di cui abbiamo parlato nel capitolo 6 a proposito del paradosso dei gemelli. Mentre siete seduti all'interno della macchina del tempo, essa decolla, accelera fino ad avvicinarsi alla velocità della luce, prosegue per un certo tratto (più o meno lungo a seconda di quanto volete andare avanti nel tempo) e quindi ritorna. Non vi dovrebbe sorprendere il fatto che questa macchina del tempo sia anche una nave spaziale, dato che, stando alla relatività, il tempo e lo spazio sono correlati. In ogni caso, per quel che vi riguarda, l'unico «luogo» in cui rimarrete durante l'intero processo è l'abitacolo della macchina del tempo. E, quando ne uscirete, vi accorgerete che sulla Terra è trascorso più tempo di quello che è passato per voi. Avete viaggiato nel futuro. Ma potrete poi anche ritornare indietro? Possiamo creare le condizioni necessarie per viaggiare indietro nel tempo?

Il primo indizio del fatto che le leggi della fisica potrebbero realmente permettere alle persone di viaggiare indietro nel tempo emerse nel 1949, quando Kurt Gödel scoprì una nuova soluzione delle equazioni di Einstein, ossia un nuovo spazio-tempo consentito dalla teoria della relatività generale. Molti modelli matematici diversi dell'universo soddisfano le equazioni di Einstein, ma ciò non significa che corrispondano all'universo in cui di fatto viviamo. Essi differiscono l'uno dall'altro, per esempio, nelle loro condizioni iniziali o al contorno. Per stabilire se, di fatto, possano o meno corrispondere all'universo in cui viviamo, dobbiamo controllare le loro predizioni fisiche. Gödel era un matematico, e divenne famoso per aver dimostrato che è impossibile dimostrare tutte le affermazioni vere, anche se ci limitiamo alle affermazioni vere di una materia apparentemente sintetica e arida come l'aritmetica. Al pari del principio di indeterminazione, anche il teorema di incompletezza di Gödel può essere visto come una restrizione fondamentale alla nostra capacità di comprendere e predire l'universo. Gödel venne a sapere della relatività generale quando lui ed Einstein trascorsero i loro ultimi anni lavorando presso l'Institute for Advanced Study di Princeton. Lo spazio-tempo di Gödel aveva una proprietà curiosa: stando a esso, l'intero universo stava ruotando.

Ma che cosa significa dire che l'*intero* universo sta ruotando? Ruotare significa continuare a girare in tondo, ma ciò non implica forse l'esistenza di un punto di riferimento stazionario? Ci si potrebbe quindi chiedere: sta ruotando rispetto a che cosa? La risposta è un po' tecnica, ma sostanzialmente è che la materia distante starebbe ruotando rispetto alle direzioni in cui puntano delle piccole trottole o giroscopi all'interno dell'universo. Nello spazio-tempo di Gödel, un effetto collaterale matematico di questa rotazione è che se percorreste una grandissima distanza allontanandovi dalla Terra per poi farvi ritorno, potreste anche tornare sulla Terra prima della vostra stessa partenza.

Il fatto che le sue equazioni potessero permettere una cosa del genere turbò profondamente Einstein, che fino ad allora aveva ritenuto che la relatività generale non avrebbe mai consentito la possibilità dei viaggi nel tempo. Tuttavia, pur soddisfacendo le equazioni di Einstein, la soluzione trovata da Gödel non corrisponde all'universo in cui viviamo, poiché le nostre osservazioni ci mostrano che

esso non sta affatto ruotando – perlomeno non in modo evidente. Inoltre, l'universo di Gödel, al contrario del nostro, non si espande. Successivamente, comunque, gli scienziati che hanno studiato le equazioni di Einstein hanno trovato altri spazi-tempi consentiti dalla relatività generale che permettono i viaggi nel passato. Ciononostante, le osservazioni della radiazione di fondo a microonde e dell'abbondanza di elementi come l'idrogeno e l'elio indicano che l'universo primitivo non aveva il tipo di curvatura richiesto da questi modelli per consentire i viaggi nel tempo. Alla stessa conclusione è possibile giungere su basi teoriche nel caso l'ipotesi dell'assenza di confini sia corretta. La domanda è quindi la seguente: se l'universo inizia la propria esistenza senza il tipo di curvatura richiesto per viaggiare nel tempo, possiamo comunque distorcere in un momento successivo determinate regioni dello spazio-tempo in misura sufficiente per permettere questi viaggi? Anche in questo caso, dato il legame tra spazio e tempo, non ci dovremmo sorprendere di come un problema strettamente correlato alla questione dei viaggi indietro nel tempo sia quello della possibilità o meno di viaggiare a una velocità superiore a quella della luce. È facile rendersi conto di come la possibilità di viaggiare nel tempo implichi la possibilità di viaggiare più veloci della luce: se infatti l'ultima fase del vostro viaggio fosse uno spostamento indietro nel tempo, potreste ridurre a piacere il tempo impiegato dal vostro viaggio complessivo, così che sareste di fatto in grado di viaggiare a una velocità illimitata! Ma ciò, come vedremo, funziona anche nel senso opposto: se potete viaggiare a una velocità illimitata, allora potete anche tornare indietro nel tempo ovvero le due possibilità si implicano necessariamente a vicenda.

La questione dei viaggi a una velocità superiore a quella della luce riveste un grande interesse per gli scrittori di fantascienza. Il loro problema è che, stando alla relatività, se mandiamo un'astronave fino alla stella più vicina al sistema solare, Proxima Centauri (che dista circa quattro anni-luce), saranno necessari come minimo otto anni prima che gli astronauti possano ritornare sulla Terra a raccontarci quello che hanno trovato. Se poi la spedizione fosse invece diretta al centro della nostra galassia, prima del loro ritorno dovrebbero passare almeno un centinaio di migliaia di anni. Effettivamente, non si tratta di una situazione ottimale per chi vuole scrivere di guerre intergalattiche! La teoria della relatività ci offre però una consolazione, anche in questo caso sulle linee della nostra discussione del paradosso dei gemelli: è cioè possibile che per gli astronauti questo viaggio sembri molto più breve che per coloro che rimangono sulla Terra. Tuttavia, non sarebbe molto bello ritornare da un viaggio spaziale durato per noi solo pochi anni per trovare tutte le persone che abbiamo lasciato sulla Terra morte e sepolte da migliaia di anni. Così, per rendere umanamente interessanti le loro storie, gli scrittori di fantascienza devono ipotizzare che un giorno scopriremo il modo per viaggiare più veloci della luce. La maggior parte di questi autori, però, sembra non aver compreso il fatto che se una persona può viaggiare più veloce della luce, essa – secondo la teoria della relatività – potrà anche tornare indietro nel tempo, come dice la seguente filastrocca:

Una strana signora di Dublino
della luce più veloce viaggiava.
Da Dublino partì un bel mattino
e, viaggiando in maniera relativa,

arrivò la sera prima.

La chiave di questa connessione è che la teoria della relatività non indica solo che non esiste un'unica misura del tempo sulla quale tutti gli osservatori saranno d'accordo, ma rivela anche che, in determinate circostanze, non è neppure necessario che gli osservatori siano d'accordo sull'ordine stesso degli eventi. In particolare, se due eventi A e B sono talmente distanti nello spazio che un razzo deve viaggiare più veloce della luce per giungere dall'evento A all'evento B, allora due osservatori che si muovono a velocità differenti possono trovarsi in disaccordo anche riguardo al problema se sia stato l'evento A a verificarsi prima di B, oppure l'evento B a verificarsi prima di A. Supponiamo, per esempio, che l'evento A sia l'arrivo alla finale dei cento metri piani delle Olimpiadi del 2012, e l'evento B sia l'apertura del 100.004° Congresso di Proxima Centauri. Supponiamo che per un osservatore della Terra sia avvenuto prima l'evento A e poi l'evento B. Diciamo, per esempio, che B è accaduto un anno dopo – nel 2013, stando al tempo terrestre. Dato che la Terra e Proxima Centauri si trovano a circa quattro anni-luce di distanza, questi due eventi soddisfano il criterio che abbiamo posto sopra: anche se A avviene prima di B (stando alla misura terrestre), per andare dall'evento A all'evento B bisognerebbe viaggiare più veloci della luce. Quindi, a un osservatore di Proxima Centauri che si stia allontanando dalla Terra a una velocità vicina a quella della luce, l'ordine degli eventi apparirebbe invertito: dal suo punto di vista, l'evento B si sarebbe cioè verificato *prima* dell'evento A. Questo osservatore direbbe dunque che sarebbe possibile, a patto di potersi muovere più veloci della luce, spostarsi dall'evento B all'evento A. E quindi, se viaggiate a una velocità davvero molto elevata, potreste anche tornare indietro da B ad A prima della gara e fare la vostra scommessa con la certezza di conoscere già il vincitore!

Chi volesse superare la barriera della velocità della luce, dovrebbe però fare i conti con un problema. La teoria della relatività afferma che l'energia necessaria per accelerare un'astronave diventa via via più grande quanto più ci si avvicina alla velocità della luce. Ciò è confermato dai risultati degli esperimenti condotti (non sulle navi spaziali, ma su particelle elementari) negli acceleratori di particelle come quelli del Fermilab di Chicago o del CERN (Centro Europeo per la Ricerca Nucleare). Possiamo accelerare le particelle fino al 99,99 per cento della velocità della luce ma, per quanta energia immettiamo, non siamo in grado di portarle oltre questa barriera. La stessa cosa vale anche per le navi spaziali: per quanto sia grande la potenza dei loro razzi, non possono comunque accelerare oltre la velocità della luce. E, dato che i viaggi indietro nel tempo sono possibili soltanto se è possibile viaggiare più veloci della luce, ciò sembrerebbe escludere tanto i viaggi spaziali ultrarapidi, quanto i viaggi nel passato.

C'è comunque una possibile via d'uscita. Forse, cioè, si potrebbe distorcere lo spazio-tempo in modo da creare una scorciatoia tra A e B. Un modo per raggiungere questo risultato consisterebbe nel creare un tunnel spazio-temporale (*wormhole*) tra A e B. Come suggerisce il nome, si tratta di un piccolo cunicolo dello spazio-tempo che può collegare due regioni quasi piatte molto distanti l'una dall'altra. È un po' come trovarsi alla base di un'alta catena montuosa. Per arrivare dall'altra parte, normalmente bisogna fare prima molta strada in salita e quindi ridiscendere a valle. Ciò non sarebbe però necessario nel caso ci fosse un tunnel scavato orizzontalmente da una parte all'altra della

montagna, attraverso la roccia. Analogamente, possiamo immaginare di creare (o di scoprire) un tunnel spazio-temporale che vada dai pressi del nostro sistema solare fino a Proxima Centauri. Anche se nello spazio ordinario la distanza che separa la Terra da Proxima Centauri è di circa 40 milioni di milioni di chilometri, attraverso questo tunnel la distanza da percorrere potrebbe essere di solo qualche milione di chilometri. Se quindi trasmettiamo la notizia della gara dei cento metri piani attraverso il tunnel spazio-temporale, potrebbe arrivare con largo anticipo rispetto all'apertura del Congresso. Ma allora un osservatore in viaggio verso la Terra dovrebbe a sua volta essere in grado di trovare un altro tunnel tale da consentirgli di tornare sulla Terra dall'apertura del Congresso di Proxima Centauri prima dell'inizio della gara. I tunnel spazio-temporali, come ogni altra possibile forma di spostamento a una velocità superiore a quella della luce, ci permetterebbero così di viaggiare indietro nel tempo.

L'idea dei tunnel spazio-temporali che collegano tra loro differenti regioni dello spazio-tempo non è un'invenzione degli scrittori di fantascienza, ma ha un'origine molto seria. Nel 1935, Einstein e Nathan Rosen scrissero un articolo in cui mostravano come la relatività generale permettesse l'esistenza degli oggetti che loro indicavano con il termine di «ponti», ma che oggi vengono chiamati tunnel spazio-temporali. I ponti di Einstein-Rosen non rimanevano aperti abbastanza a lungo perché un'astronave potesse attraversarli: e, con il richiudersi del ponte, la nave sarebbe finita in una singolarità. Tuttavia, è stata avanzata l'ipotesi che una civiltà avanzata potrebbe essere in grado di tenere aperto un tunnel spazio-temporale. È possibile dimostrare che per farlo – o per distorcere in qualunque altro modo lo spazio-tempo al fine di consentire i viaggi temporali – occorrerebbe una regione dello spazio-tempo con curvatura negativa, come la superficie di una sella. La materia comune, che ha energia positiva, dà allo spazio-tempo una curvatura positiva, come la superficie di una sfera. Pertanto, ciò di cui abbiamo bisogno per distorcere lo spazio-tempo in modo da poter viaggiare nel passato è della materia con densità d'energia negativa.



Figura 31. Tunnel spazio-temporali Nel caso esistano, i tunnel spazio-temporali potrebbero costituire delle scorciatoie fra punti dello spazio molto distanti tra loro.

Ma che cosa significa avere densità d'energia negativa? L'energia è un po' come il denaro: se avete un bilancio positivo, potete distribuirlo in vari modi, ma stando alle leggi classiche in cui si credeva all'inizio del XX secolo, non avreste comunque potuto ritirare più denaro di quello presente, così da mandare in rosso il vostro conto in banca. Pertanto, queste leggi classiche avrebbero escluso la

possibilità dell'energia negativa, e con essa qualunque possibilità di viaggiare indietro nel tempo. Nonostante ciò, come abbiamo visto nei capitoli precedenti, le leggi classiche sono state superate dalle leggi quantistiche, basate sul principio di indeterminazione. Le leggi quantistiche sono più tolleranti e ci consentono di andare in rosso su uno o due conti, purché il bilancio totale sia positivo. In altri termini, la teoria quantistica consente che in alcuni luoghi ci sia una densità d'energia negativa, purché sia compensata da densità d'energia positive in altri luoghi, così che l'energia totale rimanga comunque positiva. Abbiamo quindi un motivo per credere che sia possibile distorcere lo spazio-tempo e incurvarlo nel modo richiesto per consentire i viaggi temporali.

Stando alla somma sulle storie di Feynman, i viaggi nel passato si verificano effettivamente, in un certo senso, al livello delle singole particelle. Nel metodo di Feynman, una particella ordinaria che si muove in avanti nel tempo è equivalente a un'antiparticella che si muove all'indietro nel tempo. Secondo la sua matematica, è possibile considerare una coppia di particella /antiparticella che vengono create insieme e che quindi si annichilano a vicenda come una singola particella che si muove lungo un circuito chiuso nello spazio-tempo. Per rappresentare questo processo, proviamo prima a raffigurarcelo nel modo tradizionale. A un certo momento, diciamo nell'istante A, vengono create una particella e la sua antiparticella. Entrambe si muovono in avanti nel tempo. Quindi, in un momento successivo – l'istante B –, esse interagiscono nuovamente e si annichilano a vicenda. Prima di A, e dopo B, non esiste nessuna delle due particelle. Secondo Feynman, però, possiamo vedere le cose in un altro modo. Nell'istante A, viene creata una singola particella. Essa si muove in avanti nel tempo fino a B, e quindi – muovendosi all'indietro nel tempo – ritorna ad A. Anziché avere una particella e un'antiparticella che si muovono insieme in avanti nel tempo, abbiamo così soltanto un singolo oggetto che si muove in un «circuito» da A fino a B e ritorno. Quando quest'oggetto si muove in avanti nel tempo (da A a B), si dice che è una particella. Quando invece lo stesso oggetto sta tornando indietro nel tempo (da B ad A), esso appare come un'antiparticella che si muove in avanti nel tempo.

Questo tipo di viaggio nel tempo può produrre effetti osservabili. Per esempio, supponiamo che un membro della coppia di particella/antiparticella (mettiamo che sia l'antiparticella) cada in un buco nero, lasciando l'altro membro privo di un partner con cui annichilarsi. La particella abbandonata potrebbe a sua volta precipitare nel buco nero, ma potrebbe anche riuscire a fuggire e ad allontanarsi. In questo caso, un osservatore distante avrà l'impressione che si tratti di una particella emessa dal buco nero stesso. È però possibile rappresentarsi intuitivamente questo meccanismo dell'emissione di radiazione da parte dei buchi neri in un altro modo equivalente, anche se diverso. Possiamo cioè considerare il membro della coppia che cade nel buco nero (l'antiparticella, stando al nostro esempio) come una particella che, viaggiando indietro nel tempo, esce dal buco. Quando raggiunge il punto in cui particella e antiparticella sono apparse insieme come una coppia, il campo gravitazionale del buco nero ne causa la dispersione: abbiamo così ora una particella che viaggia in avanti nel tempo e fugge dal buco nero stesso. Nel caso invece sia stata la particella della coppia a cadere nel buco, potremmo considerarla come un'antiparticella che viaggia indietro nel tempo e viene fuori dal buco nero. Pertanto, la radiazione dei buchi neri dimostra che la teoria quantistica permette, su scala microscopica, di tornare indietro nel tempo.

Ci possiamo quindi chiedere se la teoria quantistica consenta anche i viaggi nel tempo su scala

macroscopica. Nel caso la risposta sia affermativa, è lecito supporre che, progredendo negli ambiti della scienza e della tecnologia, potremmo infine riuscire a costruire una macchina del tempo? A prima vista, sembra essere possibile. La proposta della somma sulle storie di Feynman dovrebbe essere una somma su tutte le storie, e dovrebbe quindi includere anche le storie in cui lo spaziotempo è talmente distorto da rendere possibili i viaggi nel passato. Tuttavia, anche se le leggi della fisica a noi note non sembrano escludere la possibilità dei viaggi nel tempo, ci sono altre ragioni che ci spingono a chiederci se essi siano veramente possibili.

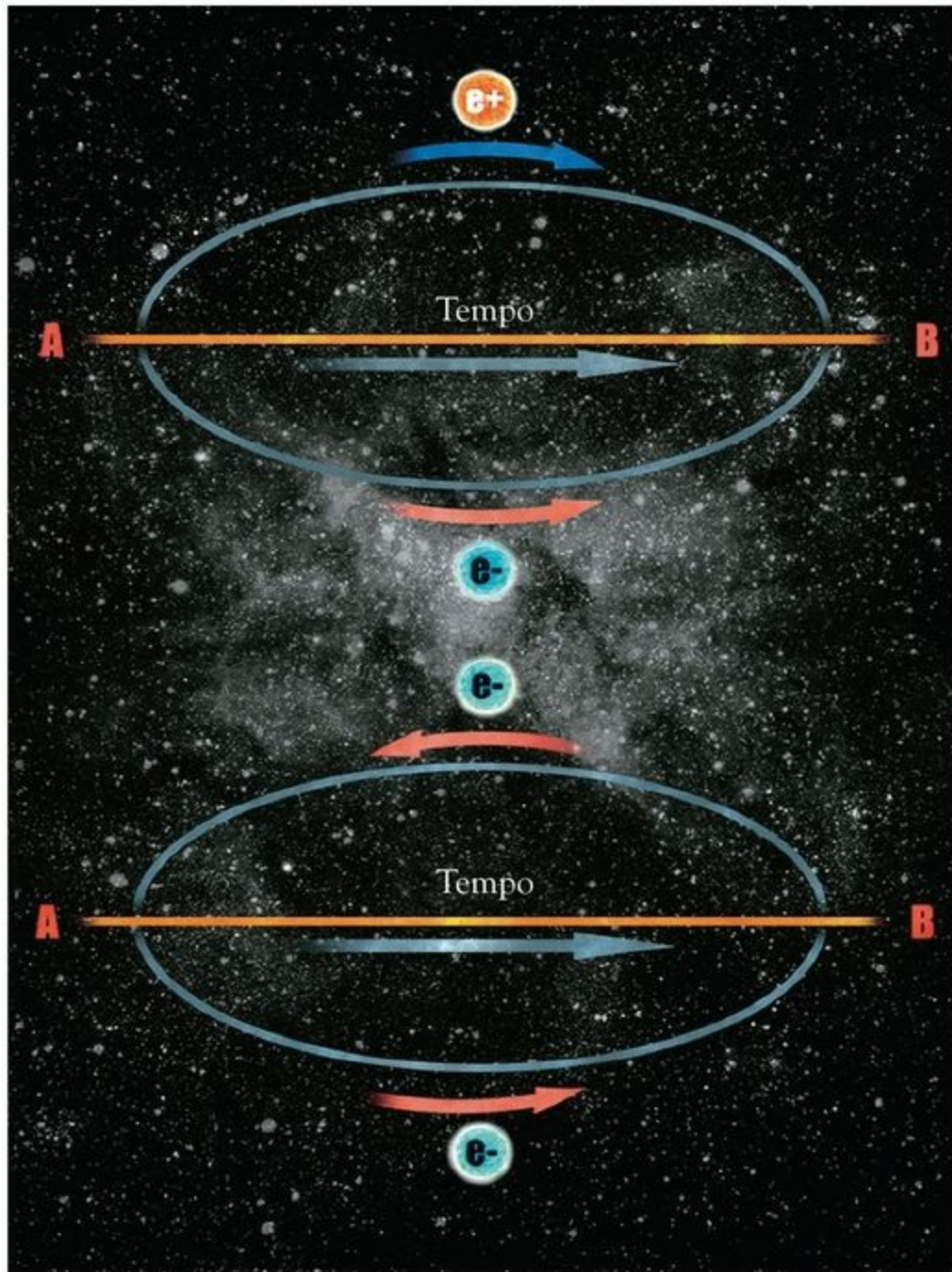


Figura 32. Antiparticella secondo Feynman Un'antiparticella può essere considerata come una particella che viaggia all'indietro nel tempo.

Una coppia virtuale di particella/antiparticella può quindi essere concepita come una particella che si muove seguendo un percorso circolare chiuso nello spaziotempo.

Un primo problema che emerge è questo: se è davvero possibile viaggiare nel passato, perché nessuno è mai tornato dal futuro per insegnarci come si fa? Ci potrebbero certo essere delle buone ragioni in base alle quali non sarebbe saggio consegnarci il segreto dei viaggi temporali al nostro odierno stadio di sviluppo, ancora primitivo; ma, a meno che la natura umana non cambi radicalmente, è difficile credere che qualche visitatore dal futuro non finirebbe prima o poi per lasciarsi sfuggire la verità. Naturalmente, alcune persone affermeranno che gli avvistamenti di UFO costituiscono la prova del fatto che veniamo visitati da alieni o da uomini provenienti dal futuro. (Data l'enorme distanza delle altre stelle, per giungere fino a noi in un tempo ragionevole gli alieni dovrebbero poter viaggiare a velocità superiori a quella della luce, così che queste due possibilità potrebbero essere di fatto equivalenti.) Una spiegazione plausibile dell'assenza di visitatori provenienti dal futuro consisterebbe nel dire che il passato è immutabile perché l'abbiamo osservato e abbiamo visto che non ha il tipo di distorsione necessaria a permettere i viaggi all'indietro dal futuro. D'altro lato, il futuro è sconosciuto e aperto, così che potrebbe anche avere la curvatura richiesta. Ciò significherebbe che ogni viaggio temporale sarebbe confinato al futuro. In altri termini, il capitano Kirk e l'astronave *Enterprise* non avrebbero alcuna possibilità di fare capolino sulla Terra ai giorni nostri.

Ciò potrebbe spiegare perché non siamo ancora stati sommersi da torme di turisti provenienti dal futuro, ma non basterebbe comunque a evitare un altro tipo di problema, che emerge nel caso qualcuno fosse in grado di tornare indietro nel tempo e cambiare la storia. Come andrebbero affrontati, cioè, i paradossi che scaturiscono dai viaggi nel tempo? Supponiamo, per esempio, che qualcuno torni indietro nel tempo e dia ai nazisti il segreto della bomba atomica. O che una persona torni indietro e uccida il proprio trisnonno prima che quest'ultimo abbia avuto dei figli. Tale paradosso è stato sviluppato in molte versioni, le quali però sono tutte sostanzialmente equivalenti: se fossimo liberi di cambiare il passato, finiremmo per imbatterci in diverse possibili contraddizioni. Sembrano esserci due soluzioni plausibili ai paradossi posti dai viaggi temporali. La prima potrebbe essere indicata come l'approccio delle storie coerenti: anche se lo spazio-tempo è distorto così da consentire i viaggi nel passato, ciò che accade nello spazio-tempo deve comunque essere coerente con le leggi della fisica. In altre parole, secondo questo punto di vista, una persona non potrebbe tornare indietro nel tempo a meno che la storia non abbia già assistito a questo suo ritorno e al fatto che, una volta giunta nel passato, non abbia ucciso il proprio trisnonno e non abbia commesso qualche altro atto che sarebbe stato in contraddizione con la storia di come questa persona è arrivata alla sua attuale situazione nel presente. Inoltre, qualora tornaste nel passato, non sareste in grado di cambiare la storia documentata; potreste soltanto limitarvi a seguirla. In questa concezione, il passato e il futuro sono preordinati: non avreste cioè il libero arbitrio per fare ciò che volete.

Naturalmente, si potrebbe obiettare che il libero arbitrio è in ogni caso un'illusione. Se esiste veramente una teoria completa della fisica che governa ogni cosa, è presumibile che determini anche le nostre azioni. Essa lo fa però in un modo che è impossibile da calcolare concretamente quando abbiamo a che fare con un organismo complesso come un essere umano, e racchiude inoltre un certo grado di casualità dovuta agli effetti della meccanica quantistica. Pertanto, potremmo dire che gli esseri umani ci appaiono dotati di libero arbitrio perché non siamo in grado di predire come si comporteranno. Comunque, se un uomo partisse a bordo di un'astronave e tornasse indietro nel tempo

prima di questa sua stessa partenza, noi saremmo in grado di predire le sue azioni, poiché esse farebbero parte della storia documentata. Quindi, a tali condizioni, il nostro viaggiatore del tempo non sarebbe dotato di libero arbitrio in nessun senso.

L'altro possibile modo per risolvere i paradossi dei viaggi nel tempo potrebbe essere indicato come l'ipotesi delle storie alternative. In questo caso, l'idea è che quando i viaggiatori del tempo tornano indietro nel passato, entrino in storie alternative diverse dalla storia documentata. Essi possono quindi agire liberamente, senza i vincoli della coerenza con la loro storia precedente. Steven Spielberg si è divertito con questo concetto nei suoi film della serie *Ritorno al futuro*: Marty McFly è stato in grado di tornare indietro e cambiare le relazioni sentimentali dei suoi genitori in una storia più soddisfacente.

L'ipotesi delle storie alternative suona piuttosto simile al modo in cui Richard Feynman ha espresso la teoria quantistica come una somma sulle storie (secondo quanto abbiamo visto nel capitolo 9). Quest'ultima afferma che l'universo non ha solo una singola storia, ma ha invece ogni storia possibile, ciascuna con un proprio grado di probabilità. Sembra però esserci un'importante differenza tra la proposta di Feynman e l'ipotesi delle storie alternative. Nella somma di Feynman, ogni storia comprende uno spazio-tempo completo e tutto ciò che si trova in esso. Lo spazio-tempo potrebbe essere così distorto da consentire la possibilità di viaggiare nel passato a bordo di un razzo spaziale, ma questo razzo rimarrebbe comunque nel medesimo spazio-tempo e quindi nella stessa storia, che dovrebbe mantenere la propria coerenza. Pertanto, la somma sulle storie di Feynman sembra supportare l'ipotesi delle storie coerenti piuttosto che quella delle storie alternative.

Sarebbe possibile evitare questi problemi adottando ciò che potremmo indicare come la congettura della protezione cronologica. Essa afferma che le leggi della fisica concorrono per impedire che i corpi macroscopici portino informazioni nel passato. Questa congettura non è stata dimostrata, ma ci sono delle ragioni per credere che sia vera. Esistono infatti calcoli basati sulla teoria quantistica che mostrano che quando lo spazio-tempo viene distorto in misura sufficiente per consentire un viaggio nel passato, le coppie di particelle/antiparticelle, muovendosi lungo circoli chiusi, possono creare densità di energia abbastanza grandi da dare allo spazio-tempo una curvatura positiva, controbilanciando così la distorsione che rende possibile questo viaggio nel tempo. Non è ancora chiaro se ciò sia soltanto possibile o se avvenga effettivamente, e la possibilità dei viaggi temporali rimane dunque aperta. Ma non scommetteteci. Il vostro avversario potrebbe essere slealmente avvantaggiato dal fatto di conoscere il futuro.

Le forze della natura e l'unificazione della fisica

Come abbiamo spiegato nel capitolo 3, sarebbe molto difficile costruire di getto una teoria unificata completa di tutto ciò che è presente nell'universo. Gli uomini hanno quindi fatto una serie di successivi progressi trovando teorie parziali che descrivono un ambito limitato di accadimenti e trascurando altri effetti o approssimandoli per mezzo di determinati valori numerici. Le leggi della scienza, come le conosciamo oggi, contengono molti numeri – come la misura della carica elettrica dell'elettrone e il rapporto fra la massa del protone e quella dell'elettrone – che non possiamo, almeno per il momento, ricavare dalla teoria. Dobbiamo invece trovarli attraverso l'osservazione e quindi inserirli nelle equazioni. Qualcuno chiama questi numeri «costanti fondamentali», mentre altri li vedono come semplici fattori di correzione.

Qualunque sia il vostro punto di vista, il fatto degno di nota è che i valori di questi numeri sembrano essere stati regolati con estrema precisione al fine di rendere possibile lo sviluppo della vita. Per esempio, se la carica elettrica dell'elettrone fosse stata anche solo leggermente diversa, ciò avrebbe deteriorato l'equilibrio della forza elettromagnetica e gravitazionale nelle stelle, le quali o non sarebbero state in grado di bruciare l'idrogeno e l'elio, o non sarebbero esplose. Alla fine, si spera che troveremo una teoria unificata, completa e coerente, che includa tutte queste teorie parziali come approssimazioni, e che non abbia bisogno di essere corretta in modo da adattarsi ai fatti con l'inserimento di valori numerici arbitrari, come l'intensità della carica dell'elettrone.

La ricerca di una tale teoria è nota come «unificazione della fisica». Einstein spese la maggior parte dei suoi ultimi anni nell'infruttuosa ricerca di una teoria unificata, ma i tempi non erano ancora maturi: c'erano teorie parziali per la gravità e le forze elettromagnetiche, ma si sapeva ancora molto poco sulle forze nucleari. Inoltre, come abbiamo detto nel capitolo 9, Einstein si rifiutava di credere nella realtà della meccanica quantistica. Tuttavia, sembra che il principio di indeterminazione costituisca un carattere 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 tale teoria sembrano essere notevolmente migliorate, poiché conosciamo molte più cose intorno all'universo. Dobbiamo comunque guardarci da un eccesso di fiducia – 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 del principio di indeterminazione posero clamorosamente fine a queste illusioni. Poi, di nuovo, nel 1928, il fisico e premio Nobel Max Born disse a un gruppo di persone in visita all'Università di Gottinga 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, ci sono comunque motivi di cauto ottimismo per sperare che oggi potremmo

essere vicini alla fine della ricerca delle leggi ultime della natura.

Nella meccanica quantistica si ritiene che le forze o interazioni tra le particelle materiali siano tutte trasportate da particelle. Una particella materiale, come un elettrone o un quark, emette cioè una particella portatrice di forza. Il rinculo dovuto a questa emissione altera la velocità della particella materiale, per lo stesso motivo per cui un cannone si ritrae indietro dopo aver sparato. La particella portatrice di forza entra quindi in collisione con un'altra particella materiale e ne viene assorbita, modificando così il moto di quest'ultima particella. Il risultato netto di questo processo di emissione e assorbimento è lo stesso che si avrebbe se tra le due particelle materiali fosse stata esercitata direttamente una forza.

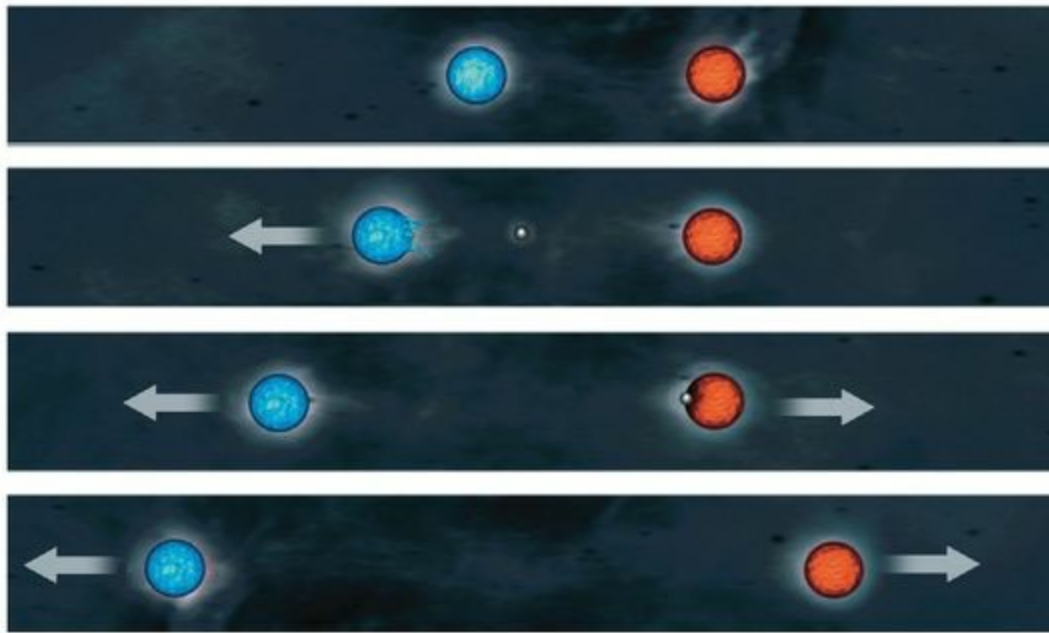


Figura 33. Scambio di particelle Secondo la teoria quantistica, le forze hanno origine dallo scambio di particelle portatrici di forza.

Ciascuna forza viene trasmessa da un proprio particolare tipo di particelle portatrici di forza. Se le particelle portatrici di forza hanno una massa elevata, sarà difficile produrle e scambiarle su grande distanza: le forze da esse trasportate avranno quindi solo un breve raggio d'azione. Dal lato opposto, se particelle portatrici di forza non hanno una massa propria, le forze corrispondenti avranno un lungo raggio d'azione. Le particelle portatrici di forza scambiate tra particelle materiali vengono chiamate «particelle virtuali» poiché, a differenza delle particelle reali, non possono essere individuate direttamente da un rilevatore di particelle. Sappiamo comunque che esistono perché hanno un effetto che possiamo misurare: esse danno cioè origine alle forze che agiscono tra le particelle materiali.

Le particelle portatrici di forza possono essere raggruppate in quattro categorie. Occorrerebbe però sottolineare che questa divisione in quattro classi è qualcosa di artificiale; essa risulta utile per la costruzione di teorie parziali, ma potrebbe non corrispondere a una realtà più profonda. In definitiva, la maggior parte dei fisici spera di trovare una teoria unificata che spieghi tutte le quattro forze come diversi aspetti di una singola forza. In effetti, molti direbbero che questo è oggi l'obiettivo principale della fisica.

La prima categoria è la forza gravitazionale. Questa forza è universale: ogni particella, cioè, risente della forza di gravità, a seconda della sua massa o energia. L'attrazione gravitazionale è attribuita allo scambio di particelle virtuali dette gravitoni. La gravità è di gran lunga la più debole tra le quattro forze; è talmente debole che non ci renderemmo neppure conto della sua esistenza se non fosse per due proprietà speciali da essa possedute: può agire su grandi distanze ed è sempre attrattiva. Ciò significa che le debolissime forze gravitazionali tra le singole particelle di due corpi di grande massa, come la Terra e il Sole, possono sommarsi fino a produrre una forza significativa. Le altre tre forze, invece, o hanno un breve raggio d'azione, o sono a volte attrattive e a volte repulsive, così che tendono a cancellarsi.

La categoria successiva è quella della forza elettromagnetica, che interagisce con le particelle dotate di carica elettrica, come gli elettroni e i quark, ma non con quelle prive di carica, come i neutrini. Essa è molto più forte della forza gravitazionale: la forza elettromagnetica tra due elettroni è circa un milione di milioni di milioni di milioni di milioni di milioni (1 seguito da 42 zeri) di volte superiore alla forza gravitazionale. Esistono però due tipi di carica elettrica: quella positiva e quella negativa. La forza esercitata tra due cariche positive è repulsiva, così come la forza tra due cariche negative, mentre quella tra una carica positiva e una negativa è attrattiva.

Un corpo di grandi dimensioni, come la Terra o il Sole, contiene grosso modo lo stesso numero di cariche positive e negative. Pertanto, le forze attrattive e repulsive esercitate tra le singole particelle si cancellano quasi totalmente a vicenda, e la forza elettromagnetica netta è quindi estremamente bassa. Le forze elettromagnetiche dominano però sulle piccole scale, a livello di atomi e molecole. L'attrazione elettromagnetica tra gli elettroni (che hanno carica negativa) e i protoni del nucleo (dotati di carica positiva) fa sì che gli elettroni orbitino intorno al nucleo dell'atomo, così come l'attrazione gravitazionale fa sì che la Terra orbiti intorno al Sole. L'attrazione elettromagnetica è attribuita allo scambio di un gran numero di particelle virtuali dette fotoni. Anche in questo caso, i fotoni che vengono scambiati sono particelle virtuali. Tuttavia, quando un elettrone passa da un'orbita più esterna a una più vicina al nucleo, viene liberata una certa quantità di energia e viene emesso un fotone reale, che può essere osservato dall'occhio umano sotto forma di luce visibile, se ha la giusta lunghezza d'onda, o da un rivelatore di fotoni, come una pellicola fotografica. Analogamente, se un fotone reale si scontra con un atomo, può far spostare un elettrone da un'orbita più vicina al nucleo a una più esterna. Questo spostamento consuma l'energia del fotone, che viene così assorbito.

La terza categoria è costituita dalla cosiddetta forza nucleare debole. Nella nostra vita quotidiana, noi non entriamo direttamente in contatto con questa forza. Essa, comunque, è responsabile della radioattività, cioè del decadimento dei nuclei atomici. La forza nucleare debole non fu chiaramente compresa fino al 1967, quando Abdus Salam (dell'Imperial College di Londra) e Steven Weinberg (di Harvard) proposero due teorie che unificavano questa interazione con la forza elettromagnetica, così come – circa un secolo prima – Maxwell aveva unificato l'elettricità e il magnetismo. Le predizioni della teoria concordavano così bene con gli esperimenti che, nel 1979, Salam e Weinberg ricevettero il premio Nobel per la fisica, insieme a Sheldon Glashow (anche lui di Harvard), che aveva a sua volta proposto simili teorie unificate delle forze elettromagnetica e nucleare debole.

La quarta categoria, quella della forza nucleare forte, è la più forte tra le quattro interazioni

fondamentali. Si tratta di un'altra forza con cui non abbiamo diretto contatto, ma è quella che garantisce la coesione della maggior parte del mondo in cui viviamo. Essa è responsabile del legame che unisce i quark all'interno del protone e del neutrone, e di quello fra i protoni e i neutroni nel nucleo di un atomo. Senza la forza nucleare forte, la repulsione elettrica fra i protoni (carichi positivamente) farebbe esplodere tutti i nuclei atomici presenti nell'universo – tranne quelli dell'idrogeno, i cui nuclei sono formati da un singolo protone. Si ritiene che questa forza sia trasportata da una particella, chiamata gluone, che interagisce solo con se stessa e con i quark.

Il successo dell'unificazione delle forze elettromagnetica e nucleare debole condusse a una serie di tentativi volti a combinare queste ultime con la forza nucleare forte in una cosiddetta «grande teoria unificata» (GTU). Questo appellativo, però, è un po' esagerato: le teorie nate da tali sforzi, infatti, non sono poi così grandi, né sono pienamente unificate, dato che non includono la gravità. Esse, inoltre, non si possono propriamente considerare come teorie complete, poiché contengono un numero di parametri i cui valori non possono essere ricavati dalla teoria stessa ma devono essere scelti appositamente in modo da ottenere una concordanza con gli esperimenti. Ciononostante, queste teorie potrebbero rappresentare un passo avanti verso una teoria completa, pienamente unificata.

La principale difficoltà nell'individuazione di una teoria che unifichi la gravità con le altre forze consiste nel fatto che la teoria della gravità – la relatività generale – è l'unica a non essere una teoria quantistica: essa, cioè, non tiene conto del principio di indeterminazione. Dunque, dato che le teorie parziali delle altre forze dipendono sostanzialmente dalla meccanica quantistica, per unificare la gravità con le altre teorie occorrerà trovare un modo per incorporare questo principio nella relatività generale; in altre parole, bisognerà trovare una teoria quantistica della gravità, un compito che finora nessuno è stato in grado di portare a termine.

Il motivo per cui l'elaborazione di una teoria quantistica della gravità si è dimostrata un compito tanto arduo ha a che vedere con il fatto che il principio di indeterminazione implica che persino lo spazio «vuoto» sia pieno di coppie di particelle e antiparticelle virtuali. Se non ci fossero – se cioè lo spazio «vuoto» fosse davvero completamente vuoto –, significherebbe che tutti i campi, come il campo gravitazionale e quello elettromagnetico, dovrebbero avere un valore pari esattamente a zero. Il valore di un campo e la sua velocità di variazione nel tempo sono però simili alla posizione e alla velocità (ossia, alla variazione di posizione) di una particella. Ora, il principio di indeterminazione implica che quanto più è alta la precisione con cui conosciamo una di queste quantità, tanto più è bassa l'accuratezza con cui possiamo conoscere l'altra. Pertanto, qualora un campo nello spazio vuoto avesse un valore fisso pari esattamente a zero, avremmo allora sia un valore preciso (zero, appunto), sia una velocità di variazione altrettanto precisa (zero anche in questo caso, visto che il valore sarebbe fisso), in violazione del suddetto principio. Nel valore del campo deve quindi esserci una certa quantità minima di indeterminazione, le cosiddette fluttuazioni quantistiche.

Possiamo concepire queste fluttuazioni come coppie di particelle che appaiono insieme in un determinato istante, quindi si separano e infine tornano a unirsi e si annichilano a vicenda. Si tratta di particelle virtuali, come le particelle che trasportano la forza: a differenza delle particelle reali, non è possibile osservarle direttamente con un rivelatore di particelle. È però possibile misurare i loro effetti indiretti, per esempio piccole variazioni nell'energia delle orbite degli elettroni, e tali effetti risultano in accordo, con un notevole grado di precisione, con le predizioni teoriche. Nel caso di

fluttuazioni del campo elettromagnetico, queste particelle sono fotoni virtuali, e nel caso di fluttuazioni del campo gravitazionale, esse sono gravitoni virtuali. Nel caso di fluttuazioni dei campi della forza debole e di quella forte, invece, queste coppie virtuali sono coppie di particelle materiali, come elettroni o quark, e delle loro rispettive antiparticelle.

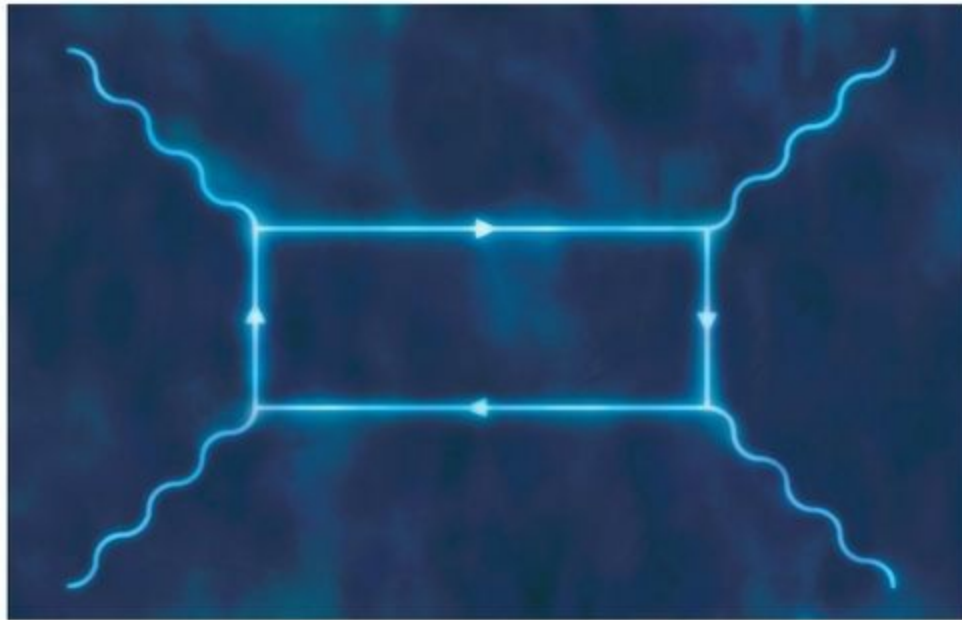


Figura 34. Diagramma di Feynman di una coppia virtuale di particella/antiparticella

Applicato all'elettromagnetismo, il principio di indeterminazione ci dice che anche nello spazio vuoto appaiono continuamente coppie virtuali di particelle/antiparticelle, che si annichilano poi a vicenda.

Il problema è che le particelle virtuali hanno una loro energia. Di fatto, poiché esistono un numero infinito di coppie virtuali di particelle, esse dovrebbero avere una quantità infinita di energia e quindi, secondo la famosa equazione di Einstein $E = mc^2$ (si veda il capitolo 5), dovrebbero avere una quantità infinita di massa. Stando alla relatività generale, ciò significa che la loro gravità dovrebbe incurvare l'universo riducendolo a dimensioni infinitamente piccole. Ma questo, come possiamo ben vedere, non accade! Simili quantità infinite apparentemente assurde compaiono anche nelle altre teorie parziali – quelle delle forze elettromagnetica, nucleare debole e nucleare forte –, ma in tutti questi casi è possibile rimuovere le infinità attraverso un procedimento chiamato «rinormalizzazione», così che per tali forze siamo riusciti a creare le rispettive teorie quantistiche. Con la rinormalizzazione vengono introdotte nuove quantità infinite che hanno l'effetto di cancellare le infinità che emergono nella teoria. Non è però necessario che le cancellino esattamente: è possibile scegliere le nuove infinità in modo tale da lasciare alcuni piccoli resti, che vengono indicati come le quantità rinormalizzate presenti nella teoria.

Anche se questa tecnica è alquanto dubbia sotto il profilo matematico, in pratica essa sembra comunque funzionare, ed è stata usata con le teorie della forza forte, di quella debole e di quella elettromagnetica per fare delle predizioni che si accordano, con uno straordinario grado di precisione, con le osservazioni empiriche. Dal punto di vista del tentativo di trovare una teoria completa, la rinormalizzazione presenta però un grave inconveniente, poiché di fatto essa prevede che i valori reali delle masse e delle intensità delle forze non possano essere ricavati dalla teoria

stessa, ma debbano essere scelti in modo da adeguarsi alle osservazioni. Quando si cerca di usare la rinormalizzazione per rimuovere le quantità infinite dalla relatività generale, sono soltanto due quantità che possono essere corrette: la forza di gravità e il valore della costante cosmologica, il termine che Einstein introdusse nelle sue equazioni mosso dalla convinzione che l'universo non si stesse espandendo (si veda il capitolo 7). È emerso però che la correzione di questi valori non è sufficiente a rimuovere tutte le infinità. Ci resta quindi in mano una teoria quantistica della gravità che sembra predire che certe quantità, come la curvatura dello spazio-tempo, siano realmente infinite, mentre possiamo osservare e misurare che esse sono perfettamente finite.

Si sospettava da tempo che sarebbe emerso questo problema nel combinare la relatività generale e il principio di indeterminazione, ma tali sospetti vennero infine confermati nel 1972 da calcoli dettagliati. Quattro anni dopo fu avanzata l'ipotesi di una possibile soluzione, chiamata «supergravità». Sfortunatamente, i calcoli richiesti per scoprire se nella supergravità rimanesse o meno qualche infinità non cancellata erano talmente lunghi e difficili che nessuno era preparato ad affrontarli. Si stimava che anche con un computer ci sarebbero voluti anni, e le possibilità di compiere almeno un errore – e probabilmente anche più di uno – erano altissime. In sostanza, si avrebbe avuto la certezza di essere giunti alla risposta corretta solo se qualcun altro avesse ripetuto i calcoli attendendo la stessa risposta: una prospettiva che non sembrava davvero molto promettente. Nonostante questi problemi, e nonostante il fatto che le particelle delle teorie della supergravità non sembravano corrispondere alle particelle effettivamente osservate, la maggior parte degli scienziati credeva che la teoria potesse essere migliorata e che costituisse probabilmente la risposta giusta al problema dell'unificazione della gravità con le altre forze. Nel 1984, però, ci fu un notevole cambiamento d'opinione in favore delle cosiddette teorie delle stringhe (o corde).

Prima dell'avvento della teoria delle stringhe, si pensava che ogni particella fondamentale occupasse un singolo punto dello spazio. Nelle teorie delle stringhe, invece, gli oggetti fondamentali non sono particelle puntiformi, bensì entità che hanno una lunghezza ma nessun'altra dimensione, come un pezzo di filo infinitamente sottile. Queste stringhe possono avere dei capi (le cosiddette stringhe aperte) o possono congiungersi con se stesse in anelli chiusi (stringhe chiuse). Una particella occupa un determinato punto dello spazio in ogni istante del tempo. Una stringa, invece, occupa una linea nello spazio in ogni istante del tempo. Due stringhe possono unirsi insieme per formare una singola stringa; nel caso delle stringhe aperte, esse si uniscono semplicemente alle estremità, mentre nel caso delle stringhe chiuse si ha una struttura simile a quella delle due gambe di un paio di pantaloni. Analogamente, una singola stringa può dividersi in due stringhe.

Ma se gli oggetti fondamentali dell'universo sono stringhe, che cosa sono allora le particelle puntiformi che ci sembra di osservare nei nostri esperimenti? Nelle teorie delle stringhe, quelle che prima erano concepite come differenti particelle puntiformi sono ora rappresentate come diverse onde che si propagano sulla stringa stessa, come le onde sul filo vibrante di un aquilone. Tuttavia le stringhe, e le vibrazioni che si propagano su di esse, sono talmente sottili che nemmeno con le nostre migliori tecnologie siamo in grado di definire la loro forma; e così, in tutti i nostri esperimenti, esse si comportano come minuscoli punti privi di caratteri distintivi. Immaginate di osservare un granello di polvere: guardandolo molto da vicino, o sotto una lente d'ingrandimento, potreste scoprire che ha una forma irregolare, o magari anche simile a quella di una corda, ma da una certa distanza esso

sembra un semplice punto privo di tratti distintivi.

Nella teoria delle stringhe, l'emissione o l'assorbimento di una particella da parte di un'altra corrisponde alla divisione o al congiungimento delle stringhe. Per esempio, nelle teorie delle particelle la forza gravitazionale che il Sole esercita sulla Terra veniva rappresentata come causata dall'emissione delle particelle portatrici di forza dette gravitoni da parte di una particella materiale situata nel Sole e dal loro assorbimento da una particella materiale situata nella Terra. Nella teoria delle stringhe, invece, questo processo corrisponde a un tubo o a un condotto a forma di H (in un certo senso, la teoria delle stringhe assomiglia un po' all'idraulica). I due trattini verticali dell'H corrispondono alle particelle nel Sole e nella Terra, mentre la barretta orizzontale corrisponde al gravitone che viaggia tra di loro.

La teoria delle stringhe ha una storia curiosa. Essa venne inventata sul finire degli anni Sessanta nel tentativo di trovare una teoria per descrivere la forza forte. L'idea di fondo era che le particelle come il protone e il neutrone potessero essere considerate come onde in movimento lungo una corda. Le forze forti tra le particelle corrisponderebbero così a pezzi di corda che verrebbero a sistemarsi tra altri pezzi di corda, un po' come in una ragnatela. Perché questa teoria potesse dare il valore effettivamente osservato della forza forte tra le particelle, tali corde – o stringhe – dovevano essere simili a elastici con un potenziale di trazione di circa dieci tonnellate.

Nel 1974, Joël Scherk (dell'École Normale Supérieure di Parigi) e John Schwarz (del California Institute of Technology) pubblicarono un articolo in cui dimostravano che la teoria delle stringhe potrebbe descrivere la natura della forza gravitazionale, ma solo se la tensione nella stringa fosse di circa un migliaio di milioni di milioni di milioni di milioni di milioni di milioni di tonnellate (1 seguito da 39 zeri). Su scale di lunghezza ordinarie, le predizioni della teoria delle stringhe coinciderebbero esattamente con quelle della relatività generale, differenziandosi però da queste ultime su distanze estremamente piccole, minori di un millesimo di milionesimo di milionesimo di milionesimo di milionesimo di centimetro (vale a dire, un centimetro diviso per 1 seguito da 33 zeri). Il loro lavoro, tuttavia, non ricevette molta attenzione, poiché proprio intorno a quel periodo la maggior parte degli scienziati abbandonò la teoria originaria delle stringhe sulla forza forte a favore della teoria basata su quark e gluoni, che sembrava accordarsi meglio con i dati delle osservazioni. Scherk morì in circostanze tragiche (soffriva di diabete, e cadde in coma mentre vicino a lui non c'era nessuno 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.

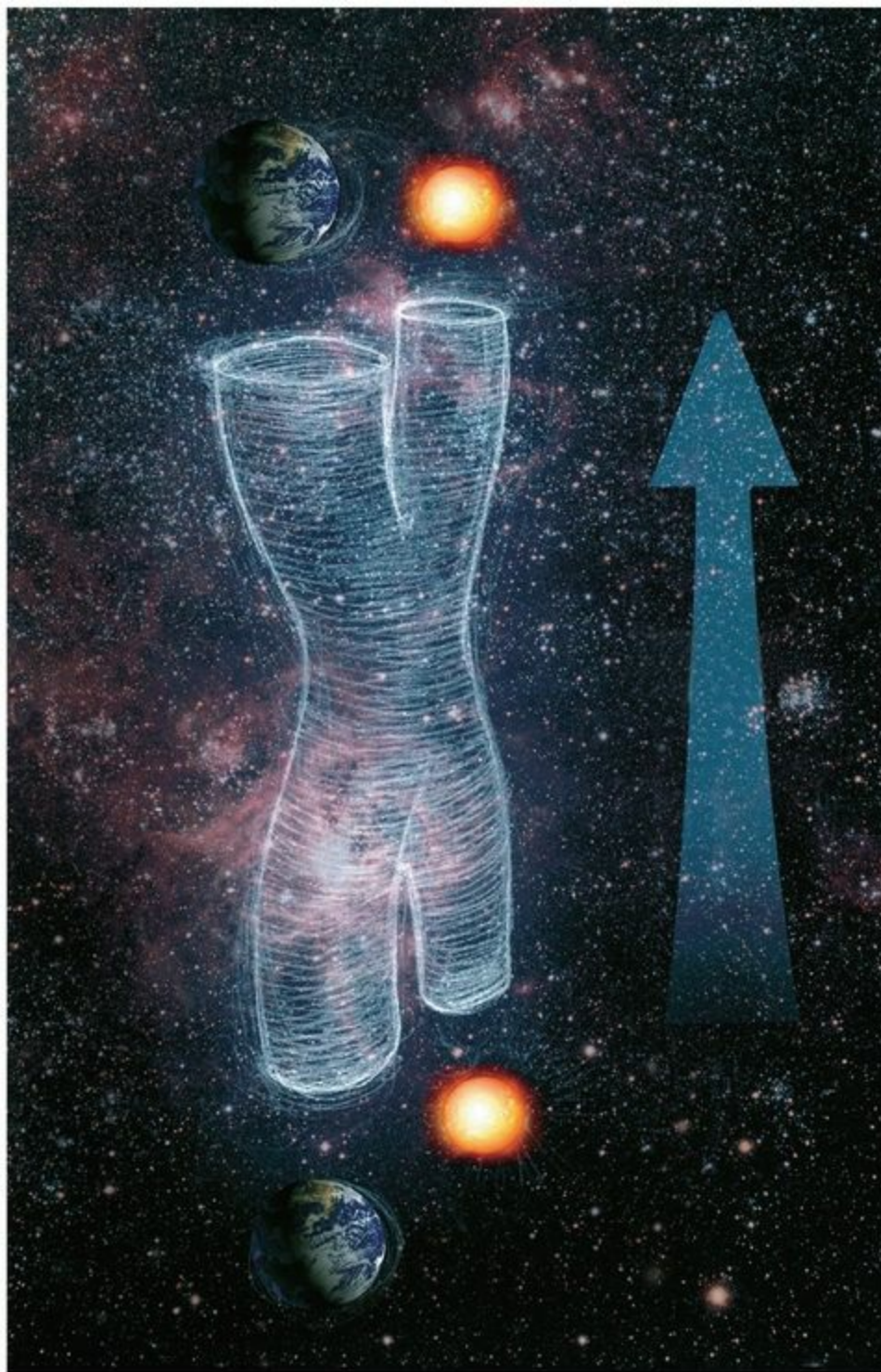


Figura 35. Diagramma di Feynman nella teoria delle stringhe Nella teoria delle stringhe, l'origine delle forze a lungo raggio non è vista in uno scambio di particelle portatrici di forza, quanto piuttosto in una connessione di tubi.

Nel 1984 l'interesse per le stringhe si riaccese all'improvviso, a quanto pare per due ragioni. Una era che, in realtà, non si stavano facendo molti progressi sulla strada della dimostrazione che la supergravità garantisse valori finiti o che potesse spiegare i tipi di particelle che di fatto osserviamo. L'altra fu la pubblicazione di un ulteriore articolo di John Schwarz, questa volta insieme a Mike Green, del Queen Mary College di Londra. L'articolo dimostrava che la teoria delle stringhe potrebbe essere in grado di spiegare l'esistenza di particelle dotate di chiralità sinistrorsa intrinseca, come alcune delle particelle che osserviamo nella realtà, reciprocamente speculari ma non direttamente sovrapponibili. (Il comportamento della maggior parte delle particelle rimarrebbe lo

stesso anche se cambiassimo la configurazione dell'esperimento riflettendo il tutto in uno specchio; il comportamento di queste particelle, però, verrebbe a cambiare. È un po' come se fossero mancine – o destrorse – anziché essere ambidestre.) Quali che fossero le ragioni, un gran numero di persone iniziarono comunque ben presto a lavorare sulla teoria delle stringhe e ne venne sviluppata una nuova versione, che sembrava in grado di spiegare i tipi di particelle che osserviamo.

Anche le teorie delle stringhe conducono a certe quantità infinite, ma si pensa che, nella versione corretta, queste infinità verranno eliminate (benché la cosa non sia ancora del tutto certa). Le teorie delle stringhe, però, presentano un problema più grande: sembrano cioè essere consistenti solo a condizione che lo spazio-tempo abbia o dieci o 26 dimensioni, al posto delle solite quattro! Naturalmente, le ulteriori dimensioni spazio-temporali sono un luogo comune nella fantascienza. In effetti, esse offrono un modo ideale per superare la normale restrizione imposta dalla relatività generale, per la quale non è possibile viaggiare indietro nel tempo o a una velocità superiore a quella della luce (si veda il capitolo 10). L'idea è quella di prendere una scorciatoia passando per le ulteriori dimensioni. Possiamo raffigurarci questo concetto nel modo seguente. Immaginiamo che lo spazio in cui viviamo abbia soltanto due dimensioni e sia incurvato come la superficie di un anello dell'ancora o di una ciambella. Se ci trovassimo sul bordo interno dell'anello e volessimo raggiungere un punto sul lato opposto, dovremmo muoverci in cerchio lungo il bordo interno dell'anello stesso fino a raggiungere la nostra destinazione. Se però fossimo in grado di viaggiare in una terza dimensione, potremmo abbandonare la superficie dell'anello e tagliare passando dritti per il buco.

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 non siano come quelle alle quali siamo abituati. Esse sarebbero cioè arrotolate in uno spazio estremamente ridotto, dell'ordine di un milionesimo di milionesimo di milionesimo di milionesimo di milionesimo di centimetro. Si tratta di uno spazio talmente piccolo che semplicemente non lo percepiamo; vediamo soltanto le tre dimensioni spaziali e quella temporale, nelle quali lo spazio-tempo è quasi piatto. Per visualizzare questo concetto, pensate alla superficie di un filo di paglia. Se la guardate da vicino, vedete che la superficie è bidimensionale. In altre parole, la posizione di un punto sul filo di paglia è descritta da due numeri, uno misurato sulla lunghezza del filo e l'altro sulla sua circonferenza. Quest'ultima, però, è di gran lunga più piccola della sua lunghezza. Così, se guardiamo il filo di paglia da lontano, non vediamo il suo spessore e ci sembra essere unidimensionale: in altri termini, ci sembra che per specificare la posizione di un punto ci sia bisogno soltanto di indicare la misura presa sulla lunghezza del filo. Secondo i teorici delle stringhe, lo stesso discorso vale anche per lo spazio-tempo: su una scala estremamente ridotta è decadimensionale e altamente incurvato, ma su scale maggiori noi non ne vediamo la curvatura o le ulteriori dimensioni.

Se questo quadro è corretto, esso porta 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 emerge anche un altro problema considerevole, questa volta per gli scienziati: perché alcune delle dimensioni, ma non tutte, dovrebbero essere arrotolate in una piccola palla? Presumibilmente, nei primissimi stadi della vita dell'universo, tutte le dimensioni saranno state molto

incurvate. Ma perché, allora, una dimensione temporale e tre spaziali si sono poi spianate, mentre le altre dimensioni sono rimaste saldamente arrotolate?

Una possibile risposta è data dal principio antropico, che si può parafrasare dicendo: vediamo che l'universo è fatto in questo particolare modo perché, se esso fosse diverso, non potremmo essere qui a contemplarlo. Ci sono due versioni del principio antropico, quella debole e quella forte. Il principio antropico debole afferma che in un universo molto grande o infinito nello spazio e/o nel tempo, le condizioni necessarie per lo sviluppo della vita intelligente si troveranno solo in certe regioni delimitate nello spazio e nel tempo. Gli esseri intelligenti presenti in tali regioni non dovrebbero pertanto stupirsi nel constatare che la regione dell'universo in cui essi vivono soddisfa le condizioni necessarie per la loro esistenza. È un po' come nel caso di una persona facoltosa che viva in un quartiere ricco senza vedere alcuna traccia di povertà.

Alcuni si spingono molto oltre e propongono una versione forte di questo principio. Secondo questa teoria, esistono o molti universi differenti, o molte regioni differenti di un singolo universo, ciascuna con una propria configurazione iniziale e, forse, con un proprio peculiare insieme di leggi scientifiche. Nella maggior parte di questi universi le condizioni non sarebbero idonee allo sviluppo di organismi complessi; solo nei pochi universi simili al nostro si potrebbero sviluppare degli esseri intelligenti in grado di chiedersi: perché l'universo è fatto proprio in questo particolare modo in cui lo vediamo? La risposta è allora semplice: se fosse stato differente, noi non saremmo qui oggi a porci una tale domanda!

Poche persone contesterebbero la validità o l'utilità del principio antropico debole, mentre ci sono numerose obiezioni che si possono sollevare contro il principio antropico forte come spiegazione dello stato osservato dell'universo. Per esempio, in che senso potremmo dire che tutti questi universi differenti esistono? Se sono veramente separati l'uno dall'altro, ciò che accade in un altro universo non può avere conseguenze osservabili nel nostro. Dovremmo quindi ricorrere al principio di economia ed escludere questi ulteriori universi dalle nostre teorie. Se poi, d'altro lato, essi fossero invece soltanto regioni differenti di un singolo universo, le leggi della scienza dovrebbero essere identiche in ogni regione, dato che altrimenti non sarebbe possibile muoversi senza soluzione di continuità da una regione a un'altra. In questo caso, l'unica differenza tra le regioni sarebbe data dalle loro diverse configurazioni iniziali, così che il principio antropico forte si ridurrebbe di fatto a quello debole.

Il principio antropico ci offre una possibile risposta alla domanda sul perché le ulteriori dimensioni previste dalla teoria delle stringhe sono arrotolate su se stesse. Due dimensioni spaziali non sembrano sufficienti per consentire lo sviluppo di esseri complessi come noi. Per esempio, degli animali 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 resti per la stessa via attraverso cui li ha ingeriti, perché se avesse un canale digerente tale da attraversare tutto il suo corpo da una parte all'altra, esso verrebbe di fatto a dividerla in due metà separate: il nostro essere bidimensionale cadrebbe così a pezzi. Similmente, è difficile immaginare come in una creatura bidimensionale potrebbe esistere una forma di circolazione sanguigna.

Ci sarebbero però dei problemi anche nel caso in cui le dimensioni spaziali fossero più di tre.

L'attrazione gravitazionale fra due corpi diminuirebbe con l'aumentare della distanza più rapidamente di quanto non faccia in tre dimensioni. (In tre dimensioni, al raddoppiare della distanza la forza gravitazionale si riduce a un quarto. In quattro dimensioni, essa si ridurrebbe a un ottavo, in cinque dimensioni a un sedicesimo e così via.) Di conseguenza, le orbite dei pianeti che, come la Terra, si muovono intorno al Sole, sarebbero instabili: basterebbe la più piccola deviazione da un'orbita perfettamente circolare (come quelle che sarebbero causate dall'attrazione gravitazionale di altri pianeti) per far immettere la Terra su una traiettoria a spirale che la porterebbe ad allontanarsi sempre di più dal Sole o a precipitare in esso. In altre parole, il genere umano finirebbe o congelato o incenerito. Di fatto, poi, a causa di questo comportamento della gravità in relazione alla distanza in più di tre dimensioni spaziali, nemmeno lo stesso Sole potrebbe esistere in uno stato stabile, con un equilibrio tra la pressione interna e la gravità. Esso finirebbe o per andare in pezzi, o per collassare su se stesso fino a formare un buco nero – e, in un caso come nell'altro, non potrebbe più essere molto utile come fonte di luce e di calore per la vita sulla Terra. Su una scala più piccola, le forze elettriche che causano il movimento orbitale degli elettroni intorno al nucleo di un atomo si comporterebbero nello stesso modo delle forze gravitazionali. Di conseguenza, gli elettroni o sfuggirebbero completamente dall'atomo, oppure cadrebbero nel suo 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 una dimensione temporale ed esattamente tre dimensioni spaziali non siano fortemente arrotolate su se stesse. Ciò significa che ci potremmo appellare al principio antropico debole, ammesso che sia possibile dimostrare che la teoria delle stringhe perlomeno permetta l'esistenza di tali regioni dell'universo – e, in effetti, sembra che la teoria delle stringhe la permetta. Potrebbero benissimo esistere anche altre regioni dell'universo (o altri universi, qualunque cosa possa significare quest'espressione) in cui tutte le dimensioni siano fortemente arrotolate su se stesse, o in cui le dimensioni quasi piatte siano più di quattro; tuttavia, in tali regioni non ci sarebbero esseri intelligenti in grado di osservare questa differenza nel numero delle dimensioni effettive.

Un altro problema legato alla teoria delle stringhe è che ce ne sono almeno cinque varianti diverse (due delle stringhe aperte e tre teorie differenti delle stringhe chiuse) e milioni di modi in cui le ulteriori dimensioni previste dalla teoria delle stringhe potrebbero arrotolarsi su se stesse. Perché dovremmo scegliere proprio una determinata teoria delle stringhe e un particolare tipo di arrotolamento? Per un certo tempo sembrò che non ci fossero risposte a questa domanda, così che i progressi rimasero fermi. Poi, a partire dal 1994 circa, i ricercatori iniziarono a scoprire le cosiddette dualità: differenti teorie delle stringhe e diversi tipi di arrotolamento delle dimensioni extra potevano condurre ai medesimi risultati sul piano delle nostre quattro dimensioni standard. Inoltre, a fianco delle particelle (che occupano un singolo punto dello spazio) e delle stringhe (che sono delle linee), i ricercatori scoprirono anche altri oggetti chiamati «p-brane», che si estendevano in due o più dimensioni nello spazio. (Una particella può essere considerata come una 0-brana e una stringa come una 1-brana, ma c'erano anche p-brane con p compreso tra 2 e 9. Una 2-brana può essere pensata come qualcosa di simile a una membrana bidimensionale. È però più difficile rappresentarsi visivamente le p-brane che si sviluppano in un numero più alto di dimensioni.) Ciò

che queste scoperte sembrano indicare è che c'è una sorta di democrazia (nel senso di avere uguali voci in capitolo) tra le teorie della supergravità, delle stringhe e delle p-brane: esse, cioè, sembrano essere in accordo le une con le altre, ma nessuna di loro può essere ritenuta più basilare delle altre. Pare piuttosto che tutte queste teorie siano delle differenti approssimazioni, valide in diverse situazioni, di una teoria più fondamentale.



Figura 36. L'importanza di essere tridimensionali In uno spazio con più di tre dimensioni, le orbite planetarie sarebbero instabili e i pianeti finirebbero o per precipitare sul Sole, o per sfuggire completamente al suo campo di attrazione gravitazionale.

Gli uomini hanno cercato di scoprire questa teoria fondamentale ma, fino a oggi, i loro sforzi non sono stati coronati dal successo. Può anche darsi che non ci sia una singola formulazione della teoria fondamentale, così come – secondo quanto ha dimostrato Gödel – non è possibile formulare l'aritmetica nei termini di un singolo insieme di assiomi. Forse la situazione potrebbe essere simile a quella che si ha con le mappe – non possiamo usare una singola mappa piana per descrivere la superficie rotonda della Terra o la superficie di un anello dell'ancora: per coprire ogni punto, ci servono almeno due mappe nel caso della Terra e quattro per l'anello dell'ancora. Ciascuna mappa è valida solo in una regione limitata, ma mappe differenti avranno comunque una zona in cui si sovrappongono e dove sono quindi valide entrambe. L'intera serie delle diverse mappe ci offre una descrizione completa della superficie. Analogamente, in fisica potrebbe essere necessario usare differenti formulazioni nell'ambito delle diverse situazioni, ma due formulazioni differenti verrebbero comunque a trovarsi in accordo in quelle situazioni dove possono essere entrambe applicate.

Se ciò è vero, l'intera serie di differenti formulazioni potrebbe essere considerata come una teoria unificata completa, anche se sarebbe una teoria unificata che non potrebbe essere espressa nei termini di un singolo insieme di postulati. Ma anche questo potrebbe essere più di quanto la natura consenta. È possibile che non esista nessuna teoria unificata? Stiamo forse solo inseguendo un miraggio? Pare

che le possibilità siano tre:

1. Esiste realmente una teoria unificata completa (o una serie di formulazioni in parte sovrapposte), che un giorno, se saremo abbastanza intelligenti, riusciremo a scoprire.
2. Non esiste una teoria definitiva dell'universo, ma solo un'infinita sequenza di teorie che lo descrivono in modo sempre più accurato, senza però mai raggiungere l'esattezza.
3. Non esiste alcuna teoria dell'universo: gli eventi non possono essere predetti al di là di un certo limite, ma si verificano in modo casuale e arbitrario.

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. Tuttavia, dato che Dio è onnipotente, non potrebbe forse limitare Egli stesso la propria libertà, qualora volesse farlo? È un po' come il vecchio paradosso: Dio potrebbe creare una pietra così pesante da non essere in grado di sollevarla? In verità, però, 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 è una proprietà che si riferisce esclusivamente all'universo che Dio ha creato. E presumibilmente, quando lo creò, Egli sapeva ciò che voleva fare!

Con l'avvento della meccanica quantistica, siamo giunti a riconoscere 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. Si tratterebbe però di un tipo di intervento alquanto strano: non c'è infatti prova che sia diretto a un qualche fine. Anzi, se così fosse, non sarebbe più – per definizione – qualcosa di casuale. 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 entro il limite stabilito dal principio di indeterminazione.

La seconda possibilità, che è quella di una sequenza 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 effettuato una nuova classe di osservazioni solo per poi scoprire nuovi fenomeni che non erano predetti dalla teoria esistente, e per spiegare questi nuovi fenomeni abbiamo dovuto sviluppare una teoria più avanzata. Attraverso lo studio di particelle che interagiscono con quantità di energia sempre più elevate, potremmo in effetti aspettarci di trovare nuovi livelli di struttura più basilari dei quark e degli elettroni, che oggi consideriamo come particelle «elementari».

La gravità potrebbe porre un limite a questa sequenza di «scatole cinesi». Se avessimo una particella con un'energia superiore alla cosiddetta energia di Planck, la sua massa sarebbe talmente 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, così che dovrebbe esistere una teoria definitiva dell'universo. Tuttavia, l'energia di Planck è qualcosa di incredibilmente lontano dalle energie che possiamo attualmente produrre in laboratorio, e gli acceleratori di particelle che potremo costruire nel futuro prevedibile non ci permetteranno certo di colmare questa immensa distanza. Energie di questo livello, però, devono essersi dispiegate nei primissimi stadi della vita dell'universo. Ci sono buone probabilità

che lo studio dell'universo primordiale e i requisiti di coerenza matematica ci possano condurre a una teoria unificata completa quando qualcuno di noi sarà ancora vivo, sempre ammesso che non facciamo in modo di estinguerci prima!

Che significato avrebbe questa nostra eventuale scoperta della teoria ultima dell'universo?

Come abbiamo spiegato nel capitolo 3, non potremo mai essere del tutto sicuri di aver effettivamente trovato la teoria corretta, poiché le teorie non possono essere dimostrate. Ma se questa teoria fosse matematicamente coerente e fornisse sempre predizioni in accordo con le osservazioni, potremmo essere ragionevolmente fiduciosi di aver trovato la teoria giusta. Essa metterebbe fine a un lungo e glorioso capitolo nella storia dello sforzo intellettuale condotto dall'umanità al fine di comprendere l'universo, ma rivoluzionerebbe anche la comprensione che la gente comune ha delle leggi che lo governano.

Ai tempi di Newton, una persona istruita poteva ancora conoscere, almeno per sommi capi, l'intero ambito del sapere umano. In seguito, però, il ritmo dello sviluppo della scienza ha reso impossibile una simile impresa. Dato che le teorie vengono continuamente modificate per tener conto di nuove osservazioni, non vengono mai debitamente assimilate o semplificate in modo che anche la gente comune possa capirle. Per comprenderle occorre essere degli specialisti, e anche in questo caso tutto ciò che si può sperare di raggiungere è una comprensione adeguata di una piccola parte delle teorie scientifiche. Inoltre, il ritmo del progresso è talmente rapido che ciò che si impara a scuola o all'università è sempre un po' superato. Solo poche persone possono tenersi al passo con la rapida avanzata della frontiera del sapere, e per farlo devono dedicarvi tutto il loro tempo e specializzarsi in una ristretta area tematica. Il resto della popolazione sa ben poco dei progressi che vengono compiuti o dell'entusiasmo che essi suscitano. D'altro lato, se dobbiamo credere a quanto disse Eddington, settant'anni fa solo due persone capivano la teoria della relatività generale. Oggi invece la comprendono decine di migliaia di laureati, e molti milioni di persone hanno perlomeno acquisito una certa familiarità con la sua idea di fondo. Se scoprissimo una teoria unificata completa, anch'essa verrebbe assimilata e semplificata allo stesso modo e, almeno a grandi linee, verrebbe insegnata nelle scuole; sarebbe solo questione di tempo. Tutti noi potremmo allora avere una certa comprensione delle leggi che governano l'universo e dalle quali dipende la nostra esistenza.

Tuttavia, quand'anche scoprissimo una teoria unificata completa, ciò non significherebbe acquisire una capacità di predizione generale degli eventi, per due ragioni. La prima è la restrizione che il principio di indeterminazione della meccanica quantistica pone alla nostra capacità di predizione. Non c'è nulla che possiamo fare per aggirare questo limite. Dal punto di vista pratico, però, questa prima limitazione è meno restrittiva della seconda, che deriva dal fatto di non poter quasi certamente risolvere le equazioni di una tale teoria, tranne che per situazioni molto semplici. Come abbiamo detto, nessuno è in grado di risolvere esattamente le equazioni quantistiche per un atomo formato da un nucleo con più di un singolo elettrone che gli orbita intorno. Non riusciamo nemmeno a risolvere esattamente le equazioni per il moto di tre corpi in una teoria semplice come la teoria della gravità di Newton, e la difficoltà cresce con l'aumentare del numero dei corpi e della complessità della teoria. Di solito, le soluzioni approssimative sono sufficienti ai fini pratici, ma è ben difficile dire che siano all'altezza delle grandi aspettative suscitate dall'espressione «teoria unificata del tutto».

Oggi conosciamo già le leggi che governano il comportamento della materia in tutte le condizioni

tranne quelle più estreme. In particolare, conosciamo le leggi fondamentali che stanno alla base di tutta la chimica e la biologia. Ciononostante, non abbiamo certamente ridotto queste discipline allo status di problemi risolti. E, finora, abbiamo avuto ben poco successo nel predire il comportamento umano a partire da equazioni matematiche! Così, anche se scoprissimo un insieme completo di leggi fondamentali, ci resterebbe ancora, negli anni a venire, la sfida intellettuale di sviluppare metodi di approssimazione migliori, così da poter fare utili predizioni dei probabili risultati in situazioni complesse e realistiche. Una teoria unificata, completa e coerente costituisce solo il primo passo: il nostro obiettivo è quello di una comprensione completa degli eventi che ci circondano e della nostra stessa esistenza.

Conclusione

Noi viviamo in un mondo stupefacente. Vogliamo comprendere ciò che vediamo intorno a noi e chiederci: qual è la natura dell'universo? Qual è il nostro posto nel cosmo? Da dove ha avuto origine, e da dove veniamo noi? Perché l'universo è fatto in questo modo?

Nel tentativo di rispondere a tali domande, adottiamo una certa rappresentazione del mondo. Una torre infinita di tartarughe che sostengono una Terra piatta è una rappresentazione di questo genere, così come lo è la teoria delle superstringhe. Sono entrambe teorie dell'universo, anche se la seconda è molto più matematica e precisa della prima. Peraltro nessuna di queste due teorie è fondata su dati di osservazione: nessuno ha mai visto una tartaruga gigante con la Terra sul proprio dorso, ma nessuno ha mai visto neppure una superstringa. Tuttavia, la teoria delle tartarughe non è una buona teoria scientifica, poiché predice che gli uomini dovrebbero precipitare dai confini del mondo e ciò è risultato essere in disaccordo con l'esperienza, a meno di non scoprire che si tratti della spiegazione del fenomeno delle persone che si ritiene siano scomparse nel Triangolo delle Bermuda!

I primi tentativi teorici di descrivere e spiegare l'universo facevano perno sull'idea che gli eventi e i fenomeni naturali fossero controllati da spiriti dotati di emozioni umane che agivano in un modo imprevedibile, molto simile a quello degli uomini. Questi spiriti risiedevano in oggetti naturali, come i fiumi, le montagne o anche i corpi celesti, come il Sole e la Luna. Era necessario placare le loro ire e propiziarsi i loro favori allo scopo di garantire la fertilità del suolo e l'avvicinarsi delle stagioni. Gradualmente, però, gli uomini devono aver notato l'esistenza di alcune regolarità: il Sole sorgeva sempre a est e tramontava sempre a ovest, indipendentemente dal fatto che fosse stato offerto o meno un sacrificio al dio Sole. Inoltre, il Sole, la Luna e i pianeti seguivano precise traiettorie attraverso il cielo, le quali potevano essere predette in anticipo con notevole precisione. Il Sole e la Luna potevano ancora essere considerati come divinità, ma erano comunque divinità che obbedivano a leggi rigorose, apparentemente senza alcuna eccezione – a meno che non si voglia dar credito a delle storie come quella del Sole che si sarebbe fermato per Giosuè.



Figura 37. Dalle tartarughe allo spazio curvo Antiche e moderne visioni dell'universo.

Dapprima queste regolarità e queste leggi emersero con chiarezza solo nel campo dell'astronomia e in poche altre situazioni. Tuttavia, con il progresso della civiltà – e in particolare negli ultimi trecento anni – venne scoperto un numero sempre maggiore di regolarità e di leggi. All'inizio del XIX secolo, il successo di queste leggi spinse Laplace a postulare il determinismo scientifico; egli, cioè, sostenne l'esistenza di un insieme di leggi tali da determinare con esattezza l'evoluzione dell'universo, data la sua configurazione completa in un determinato istante.

Il determinismo di Laplace era incompleto a due riguardi: non diceva come dovevano essere scelte queste leggi e non specificava la configurazione iniziale dell'universo. Questi aspetti venivano lasciati nelle mani di Dio. Dio avrebbe così scelto le condizioni iniziali dell'universo e le leggi alle quali avrebbe dovuto obbedire ma, dopo questo momento iniziale, non sarebbe più intervenuto nel cosmo. Di fatto, Dio veniva così confinato in quelle aree che la scienza del XIX secolo non comprendeva.

Oggi sappiamo che le speranze deterministiche di Laplace non sono realizzabili, perlomeno nei termini in cui egli le concepiva. Il principio di indeterminazione della meccanica quantistica implica che certe coppie di quantità, come la posizione e la velocità di una particella, non possono essere predette entrambe con piena accuratezza. La meccanica quantistica affronta questa situazione con una classe di teorie quantistiche nelle quali le particelle non hanno posizioni e velocità ben definite, ma sono rappresentate da un'onda. Queste teorie quantistiche sono deterministiche nel senso che forniscono delle leggi per l'evoluzione dell'onda nel tempo: conoscendo l'onda in un dato istante, la si può cioè calcolare per qualsiasi altro istante. L'elemento imprevedibile, casuale, emerge solo quando cerchiamo di interpretare l'onda in termini di posizione e velocità di particelle. Ma forse è proprio questo il nostro errore: forse non ci sono posizioni e velocità di particelle, ma soltanto onde. Il cattivo assortimento che ne risulta è la causa dell'apparente imprevedibilità.

In effetti, noi abbiamo ridefinito il compito della scienza come la scoperta di leggi che ci consentiranno di predire gli eventi entro i limiti stabiliti dal principio di indeterminazione. Rimane comunque aperta una questione: come o perché furono scelti le leggi e lo stato iniziale dell'universo? Questo libro ha dato un particolare rilievo alle leggi che governano la gravità, poiché è la gravità a plasmare la struttura su larga scala dell'universo, pur essendo la più debole delle quattro categorie di forze. Le leggi della gravità erano incompatibili con la concezione, accettata fino a non molto tempo fa, che l'universo fosse immutabile nel tempo: il fatto che la gravità è sempre attrattiva implica che l'universo deve espandersi oppure contrarsi. Secondo la teoria della relatività generale, in passato dev'esserci stato un momento in cui la densità dell'universo era infinita, il *big bang*, che ha segnato l'inizio effettivo del tempo. Analogamente, se l'intero universo ricollassasse su se stesso, in futuro dovrebbe esserci un altro stato di densità infinita, il *big crunch*, che segnerebbe la fine del tempo. E anche se non fosse l'intero universo a ricollassare, ci sarebbero comunque delle singolarità in tutte quelle regioni limitate che si fossero contratte fino a formare dei buchi neri. Queste singolarità segnerebbero la fine del tempo per chiunque cadesse nel buco nero. In corrispondenza del *big bang* e delle altre singolarità, tutte le leggi perderebbero il loro valore, così che Dio sarebbe stato ancora completamente libero di scegliere che cosa sarebbe dovuto accadere e in che modo l'universo avrebbe dovuto iniziare la propria esistenza.

Quando combiniamo la meccanica quantistica con la relatività generale, sembra però affacciarsi una

nuova possibilità mai emersa prima: che lo spazio e il tempo possano formare insieme uno spazio-tempo quadridimensionale finito, senza singolarità o confini, simile alla superficie della Terra ma con un maggior numero di dimensioni. Pare che questa idea potrebbe spiegare molti dei caratteri osservati dell'universo, come la sua uniformità su larga scala e anche le deviazioni dall'omogeneità che si riscontrano su scala più ridotta, come le galassie, le stelle e persino gli esseri umani. Ma se l'universo è completamente autonomo, senza singolarità o confini, e completamente descritto da una teoria unificata, ciò ha profonde implicazioni per quanto riguarda il ruolo di Dio come creatore.

Una volta Einstein si chiese: «Quanta libertà di scelta ha avuto Dio nella creazione dell'universo?». Se l'ipotesi della condizione dell'assenza di confini è corretta, Egli non ha avuto alcuna libertà nella scelta delle condizioni iniziali. Naturalmente, Dio avrebbe ancora avuto la libertà di scegliere le leggi alle quali l'universo avrebbe dovuto obbedire, ma questa – in realtà – non sembra essere stata una gran scelta: ci potrebbero infatti essere soltanto poche (e forse solo una) teorie complete unificate, come la teoria delle stringhe, tali da non essere autocontraddittorie e da permettere l'esistenza di strutture complesse come gli esseri umani, capaci di investigare le leggi dell'universo e di porsi delle domande sulla natura di Dio.

Ma anche se ci fosse una sola teoria unificata possibile, essa sarebbe semplicemente un insieme di regole e di 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 un modello matematico, non può rispondere alle domande sul perché dovrebbe esistere un universo descrivibile da quel modello. Perché mai l'universo si dà la pena di esistere? La teoria unificata ha una forza tale da darsi da sola la propria esistenza? O ha invece bisogno di un creatore? E, in tal caso, questo creatore esercita qualche altro effetto sull'universo? E chi ha creato questo creatore?

Fino a oggi, la maggior parte degli scienziati è stata troppo occupata a elaborare nuove teorie che descrivono che cos'è l'universo per porsi la domanda sul perché. Dall'altro lato, le persone il cui lavoro consiste proprio nel chiedersi il perché delle cose – ossia i filosofi – non sono riusciti a tenere il passo con il progresso delle teorie scientifiche. Nel XVIII secolo, i filosofi 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 pochi specialisti. I filosofi hanno quindi a tal punto ridotto l'ambito delle proprie ricerche che Wittgenstein – il filosofo più famoso del XX secolo – è giunto ad affermare che «L'unico compito che resta alla filosofia è l'analisi del linguaggio». Che declino rispetto alla grande tradizione della filosofia da Aristotele 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. Tutti noi – filosofi, scienziati e gente comune – saremmo allora in grado di prender parte alla discussione del perché noi e l'universo esistiamo. E, se trovassimo la risposta a quest'ultima domanda, decreteremmo il definitivo trionfo della ragione umana, arrivando a conoscere il pensiero stesso di Dio.

Galileo Galilei

A Galileo, forse più che a qualsiasi altra singola persona, va attribuito il merito della nascita della scienza moderna. Il suo famoso conflitto con la Chiesa cattolica ebbe un ruolo centrale nel quadro della sua filosofia, poiché egli fu uno dei primi a sostenere che gli uomini potevano sperare di comprendere il funzionamento del mondo e, inoltre, che ciò sarebbe stato possibile attraverso l'osservazione del mondo reale. Galileo aveva aderito molto presto all'ipotesi copernicana secondo la quale i pianeti orbitavano intorno al Sole, ma iniziò a difenderla pubblicamente solo dopo aver trovato le prove necessarie a sostenerla. Scrisse sulla teoria di Copernico in italiano (anziché in latino, la lingua che veniva solitamente usata in ambito accademico), e ben presto le sue idee trovarono un ampio sostegno al di fuori del mondo universitario. La cosa risultò però sgradita ai professori aristotelici, che si coalizzarono contro di lui cercando di convincere la Chiesa cattolica a mettere al bando il copernicanesimo.

Galileo, preoccupato da questi fatti, si recò a Roma per parlare alle autorità ecclesiastiche. Egli sostenne che lo scopo della Bibbia non era quello di insegnarci qualcosa sulle teorie scientifiche, e che si doveva supporre che i passi della Bibbia in contrasto con il buonsenso andassero letti in chiave allegorica.

La Chiesa, però, temeva uno scandalo che potesse pregiudicare la sua lotta contro il protestantesimo, e adottò quindi delle misure repressive. Nel 1616, essa dichiarò che la dottrina copernicana era «falsa ed erronea» e ordinò a Galileo di non «difendere o tenere» mai più questa dottrina. Galileo accondiscese.

Nel 1623 divenne però papa un vecchio amico di Galileo, e lo scienziato cercò immediatamente di far revocare il decreto del 1616. Questo suo tentativo non ebbe successo, ma egli riuscì comunque a ottenere il permesso di scrivere un libro in cui venissero discusse sia la teoria aristotelica sia quella copernicana, a due condizioni: di non schierarsi a favore di una teoria e di giungere alla conclusione che l'uomo non avrebbe in ogni caso potuto determinare come funzionasse il mondo, poiché Dio avrebbe potuto raggiungere i medesimi effetti in modi inimmaginabili per gli uomini, che non potevano porre delle restrizioni all'onnipotenza divina.

Il libro in questione, *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, fu completato e pubblicato nel 1632 con il pieno consenso dei censori, e venne immediatamente salutato in tutta Europa come un capolavoro letterario e filosofico. Ben presto il papa, rendendosi conto che la gente vedeva il libro come un convincente argomento a sostegno della dottrina copernicana, si pentì di averne permesso la pubblicazione. Il papa sostenne che, benché il libro avesse ricevuto l'*imprimatur* ufficiale dei censori, Galileo non aveva comunque ottemperato al decreto del 1616. Fece quindi condurre Galileo di fronte all'Inquisizione, che lo condannò agli arresti domiciliari a vita e gli ordinò di abiurare pubblicamente il copernicanesimo. Per la seconda volta, Galileo accondiscese.

Galileo rimase un fedele cattolico, ma la sua fede nell'autonomia della scienza non era stata soffocata. Quattro anni prima della sua morte, avvenuta nel 1642, mentre si trovava ancora agli arresti domiciliari, il manoscritto della sua seconda grande opera venne portato clandestinamente in Olanda e consegnato a un editore. Fu proprio quest'ultima opera, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, ancor più del suo sostegno al copernicanesimo, a segnare

la nascita della fisica moderna.

Isaac Newton

Isaac Newton non era un uomo dal carattere facile. I suoi rapporti con gli altri accademici erano notoriamente burrascosi, e spese la maggior parte dei suoi ultimi anni di vita tra accese controversie. Dopo la pubblicazione dei *Principia mathematica* – senza dubbio l'opera che ha esercitato la maggior influenza nell'ambito della fisica –, Newton aveva rapidamente conquistato una grande importanza pubblica. Venne nominato presidente della Royal Society e fu il primo scienziato a ricevere il titolo di cavaliere.

Newton si scontrò ben presto con l'astronomo reale, John Flamsteed, che in precedenza gli aveva fornito una serie di dati preziosi per i *Principia*, ma che ora si rifiutava di dargli le informazioni da lui cercate. Newton non era il tipo d'uomo disposto a sentirsi dire di no: si fece nominare nel consiglio direttivo del Royal Observatory e cercò quindi di imporre la pubblicazione immediata di questi dati. Alla fine, riuscì a far sì che il lavoro di Flamsteed venisse confiscato e preparato per la pubblicazione da un nemico mortale dello stesso Flamsteed, Edmond Halley. Flamsteed portò però il caso in tribunale e riuscì a ottenere appena in tempo un'ordinanza della corte che impediva la distribuzione dell'opera trafugata. Newton, infuriato, si vendicò cancellando sistematicamente ogni riferimento a Flamsteed nelle successive edizioni dei *Principia*.

Una disputa più importante fu poi quella con il filosofo tedesco Gottfried Leibniz. Sia Leibniz sia Newton, indipendentemente, avevano sviluppato una branca della matematica nota come calcolo infinitesimale, che sta alla base della maggior parte della fisica moderna. Anche se oggi sappiamo che Newton scoprì il calcolo infinitesimale diversi anni prima di Leibniz, egli pubblicò però il proprio lavoro molto tempo dopo.

Ne seguì un'aspra controversia sulla priorità della scoperta, e diversi scienziati vi presero parte sostenendo energicamente l'uno o l'altro contendente. È comunque degno di nota il fatto che la maggior parte degli articoli apparsi in difesa di Newton, per quanto pubblicati sotto i nomi di alcuni suoi amici, siano stati in realtà scritti da lui stesso! Mentre la controversia si faceva più accesa, Leibniz commise l'errore di appellarsi alla Royal Society perché la resolvesse. Newton, nelle vesti di presidente, nominò un comitato «imparziale» per indagare sulla questione e, guarda caso, i membri di questo comitato erano tutti suoi amici! Ma non solo: fu poi lo stesso Newton a stilare il rapporto del comitato e a farlo pubblicare dalla Royal Society, accusando ufficialmente Leibniz di plagio. Non ancora soddisfatto, scrisse una recensione anonima di questo rapporto e la pubblicò nel periodico della Royal Society. Dopo la morte di Leibniz, si dice che Newton abbia dichiarato di aver provato una grande soddisfazione nello «spezzare il cuore di Leibniz».

Nel periodo in cui si svolsero queste due dispute, Newton aveva già lasciato Cambridge e il mondo accademico. Era stato attivo nel campo della politica anticattolica già a Cambridge e portò poi avanti tale impegno anche in Parlamento, venendo infine ricompensato con la carica particolarmente remunerativa di direttore della Zecca reale. Qui mise a frutto il proprio naturale talento per la tortuosità e le critiche corrosive in un modo più socialmente accettabile, conducendo con successo una grande campagna contro la contraffazione nel corso della quale condannò diversi uomini a morire sulla forca.

Albert Einstein

Il rapporto di Einstein con gli aspetti politici legati alla bomba nucleare è ben noto: egli firmò la famosa lettera al presidente Franklin Roosevelt che persuase gli Stati Uniti a prendere sul serio l'idea della sua creazione, e dopo la guerra si impegnò negli sforzi volti a prevenire un conflitto nucleare. Queste non furono però soltanto delle azioni isolate di uno scienziato trascinato nel mondo della politica. La vita di Einstein, per riprendere le sue stesse parole, fu di fatto «divisa tra politica ed equazioni».

Gli inizi dell'attività politica di Einstein si collocano negli anni della Prima guerra mondiale, quand'era professore a Berlino. Disgustato da quello che considerava come uno spreco di vite umane, partecipò a una serie di dimostrazioni contro la guerra. Il suo appoggio alla disobbedienza civile e il pubblico incoraggiamento che rivolgeva ai giovani perché rifiutassero la coscrizione non lo misero certo in buona luce davanti agli occhi dei suoi colleghi. Poi, dopo la guerra, egli diresse i propri sforzi verso la riconciliazione e il miglioramento dei rapporti internazionali. Anche questo comportamento non lo rese popolare, e ben presto le sue scelte politiche gli resero difficile recarsi in visita negli Stati Uniti, anche solo per tenervi delle conferenze.

La seconda grande causa abbracciata da Einstein fu il sionismo. Pur essendo ebreo di nascita, Einstein rifiutò l'idea biblica di Dio. Tuttavia, una crescente consapevolezza del diffondersi dell'antisemitismo, sia prima sia durante la Prima guerra mondiale, lo condusse gradualmente a identificarsi con la comunità ebraica e, in seguito, a divenire un aperto sostenitore del sionismo. Anche in questo caso, l'impopolarità della sua posizione non lo trattenne dall'esprimere il proprio pensiero. Le sue teorie furono attaccate, e venne addirittura fondata un'organizzazione anti-Einstein. Un uomo fu riconosciuto colpevole di aver incitato altre persone a ucciderlo (e se la cavò pagando un'ammenda di soli sei dollari). Ma Einstein non era il tipo da scomporsi facilmente. Quando venne pubblicato un libro intitolato *100 Authors Against Einstein* (Cento autori contro Einstein), egli commentò: «Se io avessi torto, ne sarebbe bastato uno solo!».

Nel 1933, Hitler salì al potere. Einstein, che al momento si trovava in America, dichiarò che non avrebbe fatto ritorno in Germania. Quindi, mentre i miliziani nazisti saccheggiavano la sua casa e gli confiscavano il conto in banca, un quotidiano di Berlino uscì con il titolo «Buone notizie da Einstein: non tornerà». Di fronte alla minaccia nazista, Einstein mise da parte il proprio pacifismo e alla fine, temendo che gli scienziati tedeschi riuscissero a costruire una bomba nucleare, suggerì agli Stati Uniti di svilupparla essi stessi. Ma ancor prima che venisse fatto esplodere il primo ordigno atomico, egli si stava già impegnando per mettere in guardia l'opinione pubblica contro i pericoli della guerra nucleare, e proponeva l'istituzione di un controllo internazionale sulle armi atomiche.

Gli sforzi che Einstein portò avanti per tutta la sua vita al servizio della causa della pace conseguirono probabilmente ben pochi risultati duraturi – e di certo gli procurarono pochi amici. Il suo aperto sostegno alla causa sionista, però, fu debitamente riconosciuto nel 1952, quando gli venne offerta la presidenza dello Stato di Israele. Einstein declinò questa offerta, poiché riteneva di essere troppo ingenuo sul piano politico. Ma forse la ragione vera di questo suo rifiuto era un'altra: citando nuovamente le sue parole, «Per me le equazioni sono più importanti, perché la politica è rivolta al presente, mentre un'equazione è per l'eternità».

Glossario

Acceleratore di particelle Una macchina che, usando degli elettromagneti, può accelerare particelle cariche in movimento, dando loro maggiore energia.

Accelerazione Il ritmo a cui varia la velocità di un oggetto.

Anno-luce La distanza percorsa dalla luce in un anno ($9,4605 \times 10^{12}$ km).

Antiparticella Ogni tipo di particella materiale ha una sua corrispettiva antiparticella. Quando una particella si scontra con la sua antiparticella, esse si annichilano a vicenda e rimane soltanto energia.

Atomo L'unità di base della materia ordinaria, composta da un minuscolo nucleo (formato da protoni e neutroni) circondato da elettroni orbitanti.

Big bang La singolarità all'origine dell'universo.

Big crunch La singolarità alla fine dell'universo.

Buco nero Una regione dello spazio-tempo dalla quale non può sfuggire nulla, neppure la luce, a causa della fortissima gravità che vi domina.

Campo magnetico Il campo responsabile delle forze magnetiche, ora incorporato, insieme al campo elettrico, nel campo elettromagnetico.

Campo Qualcosa che ha un'estensione nello spazio e nel tempo (a differenza di una particella, che si trova solo in un determinato punto per volta).

Carica elettrica Proprietà di una particella grazie alla quale essa può respingere (o attrarre) altre particelle aventi una carica di segno simile (od opposto).

Chiralità La proprietà, posseduta da due oggetti, di essere l'uno l'immagine speculare, non direttamente sovrapponibile, dell'altro. Come nel caso della mano destra e sinistra.

Confini, condizione dell'assenza di L'idea secondo la quale l'universo è finito ma non ha confini.

Coordinate Numeri che specificano la posizione di un punto nello spazio e nel tempo.

Cosmologia Lo studio dell'universo nella sua totalità.

Costante cosmologica Espediente matematico usato da Einstein per dare allo spazio-tempo una tendenza intrinseca a espandersi.

Dimensione spaziale Ciascuna delle tre dimensioni dello spazio (vale a dire, ogni dimensione dello spazio-tempo eccetto quella del tempo).

Dualità Una corrispondenza fra teorie che, pur in apparenza differenti, conducono ai medesimi risultati fisici.

Dualità onda-particella Nella meccanica quantistica, il concetto per il quale non c'è distinzione tra onde e particelle; le particelle possono a volte comportarsi come onde, e le onde come particelle.

Elettrone Particella di carica elettrica negativa che orbita intorno al nucleo di un atomo.

Energia dell'unificazione elettrodebole L'energia (di circa 100 GeV) al di sopra della quale la distinzione tra la forza elettromagnetica e la forza debole viene a scomparire.

Evento Un punto nello spazio-tempo, specificato dal suo tempo e luogo.

Fase Per un'onda, la posizione nel suo ciclo in un determinato momento: una misura che ci dice se si trova in corrispondenza di una cresta, di un ventre, o in un punto intermedio.

Forza debole Dopo la gravità, è la più debole delle quattro forze fondamentali e ha un raggio d'azione molto ridotto. Agisce su tutte le particelle materiali, ma non sulle particelle portatrici di forze.

Forza elettromagnetica La forza che si genera fra particelle dotate di carica elettrica; tra le quattro forze fondamentali, essa è al secondo posto in ordine di intensità.

Forza forte La più forte delle quattro interazioni fondamentali, nonché quella con il raggio d'azione più limitato. Essa tiene legati i quark all'interno dei protoni e dei neutroni, e tiene insieme i protoni e i neutroni a formare gli atomi.

Fotone Un quanto di luce.

Frequenza Per un'onda, il numero di cicli completi al secondo.

Fusione nucleare Il processo nel quale due nuclei collidono e si fondono in un unico nucleo più pesante.

Geodetica La via più breve (o più lunga) tra due punti.

Grande teoria unificata (GTU) Teoria che unifica le forze elettromagnetica, forte e debole.

Indeterminazione, principio di Il principio, formulato da Heisenberg, secondo il quale non possiamo mai conoscere con esattezza sia la posizione sia la velocità di una particella; quanto è maggiore la precisione con cui conosciamo l'una, tanto meno accuratamente potremo conoscere l'altra.

Lunghezza d'onda La distanza tra due creste o due ventri consecutivi di un'onda.

Massa La quantità di materia in un corpo; la sua inerzia, o resistenza all'accelerazione.

Materia oscura La materia contenuta all'interno delle singole galassie, nei gruppi di galassie e forse anche negli spazi che separano i diversi gruppi, che non può essere osservata direttamente, ma la cui presenza può essere rilevata per via dei suoi effetti gravitazionali. Circa il 90 per cento della massa complessiva dell'universo potrebbe essere costituito dalla materia oscura.

Meccanica quantistica La teoria sviluppata a partire dal principio quantistico di Planck e dal principio di indeterminazione di Heisenberg.

Neutrino Particella estremamente leggera che è soggetta solo alla forza debole e alla gravità.

Neutrone Particella molto simile al protone, ma priva di carica; i neutroni costituiscono grosso modo la metà delle particelle presenti nel nucleo di un atomo.

Neutroni, stella di La stella fredda che a volte rimane dopo l'esplosione di una supernova, quando il nucleo di materiale al centro di una stella collassa in una densa massa di neutroni.

Nucleo La parte centrale di un atomo, formata solo da protoni e neutroni tenuti insieme dalla forza forte.

Orizzonte degli eventi Il confine di un buco nero.

Particella elementare Una particella che si ritiene non possa essere ulteriormente suddivisa.

Particella virtuale Nella meccanica quantistica, una particella che non può mai essere individuata direttamente, ma dalla cui esistenza dipendono comunque effetti misurabili.

Peso La forza che un campo gravitazionale esercita su un corpo. È proporzionale alla massa, ma non si identifica con essa.

Ponte di Einstein-Rosen Un piccolo tunnel dello spazio-tempo che collega fra loro due buchi neri. Si veda anche *Tunnel spazio-temporale*.

Positrone L'antiparticella (di carica positiva) dell'elettrone.

Principio antropico L'idea secondo la quale vediamo che l'universo è fatto in questo particolare modo perché, se esso fosse diverso, non potremmo essere qui a contemplarlo.

Principio quantistico di Planck L'idea secondo cui la luce (o qualsiasi altra onda classica) può essere emessa o assorbita solo in quanti discreti, la cui energia è proporzionale alla loro lunghezza d'onda.

Proporzionale «X è proporzionale a Y» significa che quando Y viene moltiplicato per un numero qualsiasi, lo stesso avviene anche per X. «X è inversamente proporzionale a Y» significa invece che quando Y viene moltiplicato per un numero, X viene diviso per quello stesso numero.

Protone Particella molto simile al neutrone, ma di carica positiva; i protoni costituiscono grosso modo la metà delle particelle presenti nel nucleo della maggior parte degli atomi.

Quark Particella elementare, dotata di carica, soggetta alla forza forte. Sia i protoni sia i neutroni sono composti ciascuno da tre quark.

Radar Sistema che utilizza impulsi di onde radio per scoprire la posizione degli oggetti, misurando il tempo impiegato da un singolo impulso per raggiungere l'oggetto, esserne riflesso e ritornare all'apparecchiatura.

Radiazione di fondo a microonde La radiazione emessa durante i primi istanti di vita dell'universo, quando la sua temperatura era incredibilmente elevata; oggi è a tal punto spostata verso il rosso che non ci appare più sotto forma di luce, bensì come microonde (onde radio con una lunghezza d'onda di pochi centimetri).

Radioattività Il decadimento spontaneo di un tipo di nucleo atomico in un altro.

Raggi gamma Raggi elettromagnetici di lunghezza d'onda estremamente ridotta, prodotti nel decadimento radioattivo o da collisioni di particelle elementari.

Red shift Si veda *Spostamento verso il rosso*.

Relatività generale La teoria di Einstein basata sull'idea che le leggi della scienza dovrebbero essere le stesse per tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro movimento. Questa teoria spiega la forza di gravità nei termini della curvatura di uno spazio-tempo quadridimensionale.

Relatività speciale La teoria di Einstein basata sull'idea che le leggi della scienza dovrebbero essere le stesse per tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro movimento, in assenza di fenomeni gravitazionali.

Secondo-luce La distanza percorsa dalla luce in un secondo (300.000 chilometri).

Singularità Un punto nello spazio-tempo in corrispondenza del quale la curvatura spazio-temporale (o un altro valore fisico) diventa infinita.

Spazio-tempo Lo spazio quadridimensionale i cui punti sono gli eventi.

Spettro Le frequenze componenti che costituiscono un'onda. La parte visibile dello spettro del Sole può essere osservata in un arcobaleno.

Spostamento verso il rosso (*red shift*) L'arrossamento, dovuto all'effetto Doppler, della luce proveniente da una stella che si sta allontanando da noi.

Stringhe, teoria delle Una teoria fisica nella quale le particelle vengono descritte come onde che si muovono lungo stringhe (o corde). Le stringhe hanno una lunghezza, ma nessun'altra dimensione.

Tunnel spazio-temporale (*wormhole*) Un piccolo cunicolo dello spazio-tempo che collega fra loro regioni distanti dell'universo. I tunnel spazio-temporali potrebbero anche collegare il nostro universo con altri universi paralleli o neonati, e potrebbero offrirci la possibilità di compiere dei viaggi nel tempo.

Wormhole Si veda *Tunnel spazio-temporale*.

Zero assoluto La temperatura più bassa possibile, alla quale le sostanze non hanno energia termica.

Ringraziamenti

I ringraziamenti degli autori vanno ad Ann Harris, la nostra editor alla Bantam, per averci assistito con la sua notevole esperienza e il suo talento nei nostri sforzi volti a perfezionare il manoscritto. A Glen Edelstein, direttore artistico della Bantam, per il suo instancabile impegno e la sua pazienza. Ai membri del nostro team artistico – Philip Dunn, James Zhang e Kees Veenenbos – che si sono presi la briga di studiare un po' di fisica e sono così riusciti a rendere questo libro favoloso sotto il profilo grafico senza sacrificare i contenuti scientifici. Ai nostri agenti Al Zuckerman e Susan Ginsburg, della Writer's House, per la loro intelligenza, la loro dedizione e il loro sostegno. A Monica Guy, per aver corretto le bozze. E a coloro che si sono gentilmente prestati a leggere le varie bozze del manoscritto, aiutandoci nella nostra ricerca dei passi che potevano essere migliorati dal punto di vista della chiarezza espositiva: Donna Scott, Alexei Mlodinow, Nicolai Mlodinow, Joshna Webman, Robert Barkovitz, Mark Hillery, Stephen Youra, Martha Lowther, Katherine Ball, Amanda Bergen, Jeffrey Boehmer, Kimberly Comer, Peter Cook, Matthew Dickinson, Drew Donovanik, David Fralinger, Eleanor Grewal, Alicia Kingston, Victor Lamond, Michael Melton, Mychael Mulhern, Matthew Richards, Michelle Rose, Sarah Schmitt, Curtis Simmons, Christine Webb e Christopher Wright.

Indice

[Introduzione](#)

[1 — Pensare l'universo](#)

[2 — L'evoluzione della nostra immagine dell'universo](#)

[3 — La natura di una teoria scientifica](#)

[4 — L'universo di Newton](#)

[5 — La relatività](#)

[6 — Lo spazio curvo](#)

[7 — L'universo in espansione](#)

[8 — Il big bang, i buchi neri e l'evoluzione dell'universo](#)

[9 — La gravità quantistica](#)

[10 — Tunnel spazio-temporali e viaggi nel tempo](#)

[11 — Le forze della natura e l'unificazione della fisica](#)

[12 — Conclusione](#)

[Galileo Galilei](#)

[Isaac Newton](#)

[Albert Einstein](#)

[Glossario](#)

[Ringraziamenti](#)