

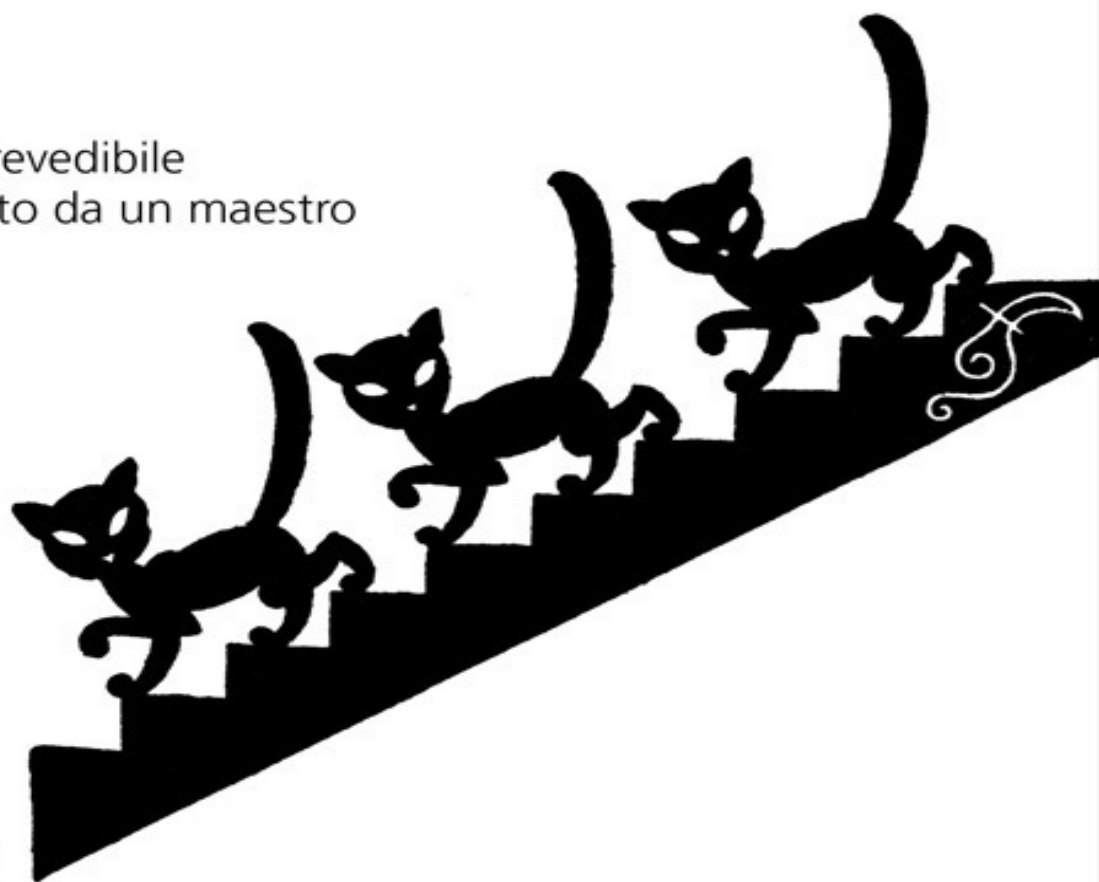


Jim Al-Khalili

# LA FISICA DEL DIAVOLO

MAXWELL,  
SCHRÖDINGER,  
EINSTEIN E I PARADOSSI  
DEL MONDO

Il lato ironico e imprevedibile  
della fisica raccontato da un maestro  
della divulgazione



Bollati Boringhieri

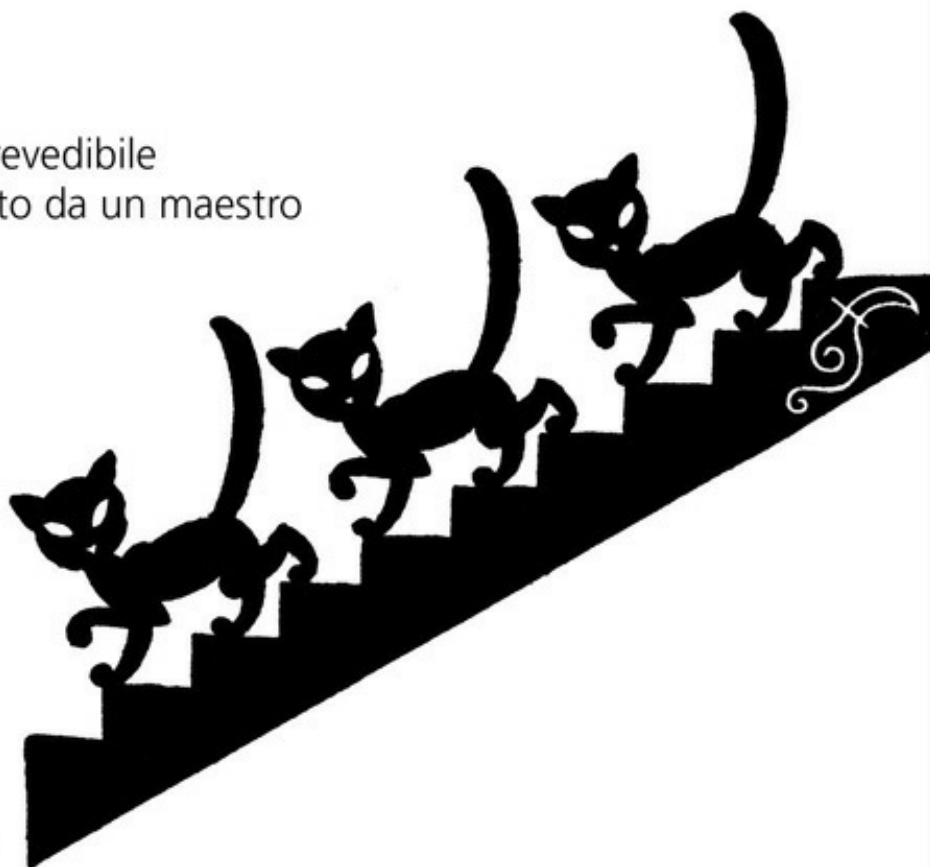


Jim Al-Khalili

# LA FISICA DEL DIAVOLO

MAXWELL,  
SCHRÖDINGER,  
EINSTEIN E I PARADOSSI  
DEL MONDO

Il lato ironico e imprevedibile  
della fisica raccontato da un maestro  
della divulgazione



Bollati Boringhieri

## Presentazione

Jim Al-Khalili è un fisico teorico di eccezionale talento comunicativo. Per lui i paradossi apparentemente insolubili sono un'ottima occasione per spiegare come funziona la scienza. Per questo ne ha scelti nove, tra più e meno noti, e sulla loro traccia ha costruito questo libro, divertente, stimolante, ironico e che ha la capacità di sconcertare con la semplice accumulazione di elementi imprevedibili. Insomma, un libro che non lascia riposare la mente.

Si va dal classico paradosso di Achille e la tartaruga (del quale però scopriamo un insospettabile risvolto quantistico) alla più semplice domanda che l'uomo può farsi guardando la volta stellata: perché di notte fa buio? Sembra incredibile, ma dietro a questa domanda apparentemente banale si nasconde una delle più eclatanti scoperte della fisica contemporanea, che era lì, alla portata degli esseri umani fin dalla preistoria, ma che ha trovato una soluzione plausibile solo pochissimo tempo fa.

Incontreremo anche l'inquietante diavoleto di Maxwell, il povero gatto di Schrödinger, che è contemporaneamente vivo e morto, lo strano caso degli oggetti che si accorciano viaggiando, quello ancor più strano del tempo che si dilata e si contrae a suo capriccio, per non dire del mistero (paradossale anch'esso, grazie a un'intuizione di Enrico Fermi) della vita extraterrestre. Sono i diabolici paradossi della fisica, che danno da pensare, ma alla fine hanno una soluzione insperata. Basta rilassarsi e lasciarsi guidare da Al-Khalili e tutto si chiarirà. Be', quasi tutto.

**Jim Al-Khalili** (Baghdad, 1962) è docente di fisica teorica presso la University of Surrey, dove tiene anche una cattedra di comunicazione scientifica. Vicepresidente della British Science Association, è anche membro onorario della British Association for the Advancement of Science, membro della Royal Society e Ufficiale dell'Ordine dell'Impero Britannico (OBE). Nel corso della sua attività ha ricevuto il Michael Faraday Prize e il Kelvin Prize. Come comunicatore, Al-Khalili è spesso presente nei canali televisivi e radiofonici britannici, oltre a scrivere per il «Guardian» e l'«Observer». Tra i suoi libri, *Quantum. A Guide for the Perplexed* (2003); *Buchi neri, wormholes e macchine del tempo* (2003) e *Pathfinders. The Golden Age of Arabic Science* (2010, di prossima pubblicazione presso Bollati Boringhieri).



Jim Al-Khalili

# La fisica del diavolo

Maxwell, Schrödinger, Einstein e i paradossi del mondo

Traduzione di Laura Servidei

Bollati Boringhieri

© 2012 Jim Al-Khalili

Titolo originale *Paradox. The Nine Greatest Enigmas in Science*

© 2012 Bollati Boringhieri editore  
Torino, corso Vittorio Emanuele II, 86  
Gruppo editoriale Mauri Spagnol

ISBN 978-88-339-7161-2

Illustrazione di copertina: Boris Artzybasheff, Three Cats Walking Down Stairs

© Poodles Rock / Corbis

Schema grafico della copertina di Bosio.Associati

[www.bollatiboringhieri.it](http://www.bollatiboringhieri.it)

Prima edizione digitale settembre 2012

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

## Prefazione

I paradossi si presentano in ogni forma e colore. Alcuni sono tradizionali contraddizioni logiche, in cui c'è poco da indagare, mentre altri sono solo la punta di iceberg che rappresentano intere discipline scientifiche. Molti si possono risolvere con un'attenta considerazione delle ipotesi su cui sono basati, che possono essere fallaci. Questi, a rigor di logica, non si dovrebbero chiamare paradossi, perché una volta risolto, un rompicapo non è più un paradosso.

Un vero paradosso è un'affermazione che porta a un ragionamento circolare e contraddittorio oppure a una situazione logicamente impossibile. Ma generalmente si tende a usare la parola «paradosso» in un significato più ampio, a includere quelli che io preferisco chiamare «paradossi percepiti». Per questi, esiste una via d'uscita: magari il paradosso nasconde un trucco, un gioco di prestigio che deliberatamente porta il lettore fuori strada. Una volta scoperto il trucco, la contraddizione sparisce. Un altro tipo di paradosso percepito è quello in cui la conclusione sembra assurda o perlomeno controintuitiva, fino a che risulta non essere tale dopo attenta disamina, anche se il risultato rimane in qualche modo sorprendente.

E poi abbiamo la categoria dei paradossi nella fisica, che si possono quasi tutti risolvere con un po' di conoscenze fondamentali; su questi si concentra l'attenzione del libro.

Quindi iniziamo a dare un'occhiata a un vero paradosso logico, così che sia chiaro di cosa *non* parlerò. Si tratta di un'affermazione costruita in maniera tale da non aver modo di sfuggire alla contraddizione.

Prendiamo la frase seguente: «Quest'affermazione è falsa». A prima vista, immagino che le parole, una per una, risultino abbastanza sensate. Tuttavia, se si pensa al loro significato, considerando attentamente le implicazioni dell'affermazione, il paradosso logico diventa evidente. Possibile che quattro parole in fila possano farci venire il mal di testa? Se è così, mi viene da pensare che sia un mal di testa divertente (il che è forse un paradosso in se stesso), un mal di testa che ci divertiremo a infliggere ad amici e parenti.

Infatti, l'affermazione «Quest'affermazione è falsa» dice che, essendo essa falsa, deve quindi non essere falsa, e quindi dev'essere vera, cioè l'affermazione è falsa, il che significa che non è falsa, e così via, in un circolo vizioso infinito.

Esistono molti paradossi di questo tipo, e non sono questi l'argomento del libro.

L'argomento del libro sono invece i miei preferiti rompicapi ed enigmi scientifici, tutti definiti paradossi, benché non siano affatto paradossali, una volta considerati attentamente e osservati dal punto di vista corretto. Sono affermazioni fortemente controintuitive, a prima vista, tuttavia nella loro descrizione manca sempre qualche particolare fisico che, una volta considerato, abbatte uno dei pilastri logici su cui il paradosso si basa, e fa crollare la contraddizione. Nonostante la spiegazione, molti vengono ancora chiamati «paradossi», in parte per ragioni storiche, per via della fama raggiunta dopo la loro prima enunciazione (prima che si capisse dove nel ragionamento si annidasse l'errore), e in parte perché, presentati così, diventano utili strumenti per lo scienziato che si trova a dover spiegare un concetto articolato. Oh, e anche perché sono così gustosamente divertenti da sbrogliare.

Molti degli indovinelli che considereremo in questo libro sembrano a prima vista paradossi veri, non solo percepiti. E il punto è proprio questo. Prendiamo una versione semplice del famoso paradosso del viaggio nel tempo: cosa succederebbe se uno tornasse nel passato con una macchina del tempo e uccidesse se stesso bambino? Che cosa accadrebbe all'assassino? Smetterebbe di esistere perché ha impedito al se stesso bambino di diventare adulto? Se fosse così, non sarebbe mai diventato un assassino viaggiatore nel tempo, e allora chi ha ucciso il bambino? L'adulto ha l'alibi perfetto: non è mai esistito! Quindi, se non è arrivato al momento di viaggiare indietro nel tempo e uccidere il bambino, vuol dire che non ha ucciso il bambino, che quindi è diventato adulto crescendo fino al momento in cui ha viaggiato nel tempo, ha ucciso il bambino, e pertanto non è sopravvissuto, e così via. Questo sembra il paradosso logico perfetto. Eppure i fisici non hanno completamente escluso la possibilità, in teoria, dei viaggi a ritroso nel tempo. Come si esce allora da questo circolo vizioso contraddittorio? Lo vedremo nel settimo capitolo.

Non c'è bisogno di conoscenze scientifiche per capire tutti i paradossi percepiti. Per dimostrarlo, ho dedicato il primo capitolo a un paio di paradossi percepiti che si possono risolvere con il senso comune. Per esempio, consideriamo un semplice paradosso statistico, in cui è molto semplice trarre una conclusione sbagliata a partire da una correlazione: si osserva che il crimine è più alto nelle città che hanno più chiese. Questo, a prescindere dalle convinzioni morali e religiose, sembra difficile da credere. Ma la soluzione è



semplicissima: sia una maggiore incidenza criminale, sia un grande numero di chiese sono il risultato di una popolazione più numerosa. Solo perché A implica B e A implica C, non significa che B implichi C, o viceversa.

Ecco un altro giochetto mentale che sembra paradossale, la cui natura contraddittoria però scompare una volta spiegato. Me lo raccontò qualche anno fa un fisico scozzese, mio collega e amico. Lui sostiene che ogni volta che uno scozzese si sposta dalla Scozia in Inghilterra, il quoziente d'intelligenza medio di entrambi i paesi aumenta. La spiegazione è la seguente: poiché gli scozzesi sono più intelligenti degli inglesi, il quoziente d'intelligenza medio dell'Inghilterra aumenta se uno scozzese si trasferisce lì; del resto, lasciare la Scozia e andare a vivere in Inghilterra è una cosa talmente sciocca che solo uno degli scozzesi meno intelligenti può farlo, e quindi, quando se ne va, la media del quoziente d'intelligenza in Scozia sarà leggermente maggiore di prima. Quindi vedete bene che, se a prima vista l'affermazione sembra paradossale, in realtà un semplice ragionamento logico la risolve con eleganza, anche se magari non in maniera molto convincente per gli inglesi, naturalmente.

Dopo esserci divertiti un po' nel primo capitolo con qualche paradosso piuttosto noto, risolvibile senza alcuna conoscenza scientifica, parleremo di nove paradossi in fisica. Per ognuno di essi, dopo la descrizione, metterò a nudo il problema e rivelerò la logica sottostante; vi mostrerò i suoi punti deboli, finché il paradosso evaporerà, dimostrando di non essere affatto una contraddizione. Sono divertenti perché hanno sostanza intellettuale, *e perché c'è modo di uscirne*. Bisogna solo sapere dove guardare, dove trovare il tallone d'Achille, come sfruttarlo, con cautela, e con una più profonda conoscenza scientifica, finché il paradosso non è più paradossale.

I paradossi che descrivo hanno nomi famosi. Il gatto di Schrödinger, per esempio, in cui uno sfortunato felino viene rinchiuso in una scatola ed è contemporaneamente vivo e morto finché non apriamo il coperchio. Meno familiare (ma qualcuno l'avrà sentito nominare) è il diavoletto di Maxwell, entità mitica che custodisce un'altra scatola chiusa e che può verosimilmente violare la seconda legge della termodinamica (il più sacro dei comandamenti scientifici), facendo in modo che il suo contenuto non si mescoli (tenendolo invece separato) e mettendovi ordine. Per comprendere questi paradossi e la loro soluzione è necessario avere qualche conoscenza scientifica, e quindi mi sono posto il difficile compito di spiegare questi concetti senza introdurre nozioni di analisi

matematica o di termodinamica o di meccanica quantistica.

Molti degli altri paradossi che descrivo nel libro li ho scelti dal corso di relatività che ho tenuto all'università negli ultimi quattordici anni. Le idee di Einstein sullo spazio e il tempo, per esempio, forniscono un fertile terreno per giochetti mentali come il paradosso della pertica nel fienile, il paradosso dei gemelli e il paradosso del nonno. Altri, come quello del gatto e del diavoletto, a giudizio di alcuni, non sono ancora stati spiegati del tutto.

Nello scegliere i miei enigmi preferiti in fisica, non mi sono concentrato sui più grandi problemi insoluti, come per esempio la questione di cosa siano la materia oscura e l'energia oscura, che tra loro costituiscono il 95% dell'universo, e che dovrebbero essere fatte di ciò che esisteva prima del Big Bang (ammesso che esistesse qualcosa). Queste sono domande difficili e profonde, a cui la scienza deve ancora trovare una risposta. Ad alcune, come la natura della materia oscura, quella cosa misteriosa che costituisce la maggior parte della massa delle galassie, verrà magari trovata risposta nel prossimo futuro, se gli acceleratori di particelle come il Large Hadron Collider a Ginevra continueranno a fornire nuove e interessanti scoperte; altre, come un'accurata descrizione del tempo prima del Big Bang, resteranno forse senza risposta per sempre.

Quello che ho cercato di fare è una selezione sensata e ampia. Tutti i paradossi discussi nei capitoli seguenti hanno a che fare con questioni profonde sulla natura del tempo e dello spazio e le proprietà dell'universo in scala molto grande e molto piccola. Alcuni rappresentano previsioni di teorie che a prima vista sembrano molto strane, ma che diventano ragionevoli se si analizzano attentamente. Vediamo se riusciamo a risolverli insieme, e magari, nel contempo, imparare cose nuove divertendoci.

# La fisica del diavolo

A Julie, David e Kate

## RINGRAZIAMENTI

Mi sono divertito un mondo a scrivere questo libro. Molto di ciò che vi è scritto è il risultato di un lento accumulo di materiale avvenuto nel corso della mia carriera di docente di fisica: ho usato molti dei paradossi che vengono analizzati e dissezionati nei prossimi capitoli come esempi, nel corso delle lezioni, per identificare e spiegare concetti complessi di relatività e fisica quantistica. Ciò detto, devo ringraziare molte persone per i consigli e gli aiuti ricevuti nell'ultimo anno. Il mio agente letterario, Patrick Walsh, ha elargito come sempre il suo amichevole incoraggiamento, così come il mio editor presso Transworld, Simon Thorogood e Vanessa Mobley presso Crown. Sono anche fortemente in debito col mio copy-editor Gillian Somerscales per i suoi acuti commenti, le correzioni e la costanza che ha dimostrato per convincermi a esporre i miei argomenti nel modo più chiaro possibile. Voglio anche ringraziare le diverse centinaia di studenti ai quali ho insegnato nel corso degli anni presso l'Università del Surrey, per avermi costretto ad essere onesto quando si arrivava agli aspetti più sottili della fisica contemporanea. Infine, voglio ringraziare mia moglie, Julie, per il suo sostegno e per l'incoraggiamento che ne ricevo per ogni cosa.

# 1. Il paradosso del gioco a quiz

## Semplici probabilità che vi faranno impazzire

Prima di inoltrarmi nella fisica, vorrei guidarvi con dolcezza dentro all'argomento con qualche semplice rompicapo, divertente e frustrante insieme. Vi devo però avvertire che, così come tutti gli altri esempi in questo libro, non è una vera contraddizione logica: bisogna solo considerare attentamente i passaggi e trovare il trucco. I paradossi in questo capitolo si possono risolvere senza alcuna conoscenza scientifica, al contrario degli esempi esposti più avanti, che richiedono una buona conoscenza della fisica. L'ultimo ed anche il più gustoso, noto col nome di paradosso di Monty Hall, è talmente sorprendente che ho voluto risolverlo e analizzarlo in modi diversi, così che il lettore possa scegliere la spiegazione che preferisce.

Tutti gli esempi di questo capitolo si possono suddividere in due categorie: i paradossi *veridici* (che dicono la verità) e quelli *fallaci*. Un paradosso veridico giunge a una conclusione che è controintuitiva perché va contro il buon senso, ma è vera, e si può dimostrare mediante l'uso accurato, e spesso falsamente semplice, della logica. Infatti, con questi paradossi la cosa divertente è provare a trovare il modo più convincente di dimostrarne la verità, nonostante quell'antipatica sensazione che ci debba pur essere un inghippo da qualche parte. Il paradosso del compleanno e quello di Monty Hall sono entrambi in questa categoria.

Un paradosso fallace, invece, parte in maniera perfettamente ragionevole, e poi in qualche modo finisce con una conclusione assurda. Però, in questo caso la conclusione assurda è falsa, a causa di qualche passaggio sbagliato o fuorviante nella dimostrazione.

Esempi di paradossi fallaci sono i giochi matematici che, con qualche passaggio di algebra formale, arrivano a conclusioni del tipo  $1 = 2$ . Non c'è logica o filosofia che dovrebbe convincere alcuno della verità di quest'affermazione. Non mi addentrerò in questo tipo di giochetti, principalmente perché non voglio travolgervi con l'algebra (in caso non la trovaste affascinante quanto la trovo io). Vi basti sapere che i calcoli che portano alla conclusione assurda di solito includono un passaggio in cui si divide per zero, un evento che qualunque matematico che si rispetti evita come la peste. Invece, mi concentrerò su alcuni problemi che si possono apprezzare con

un minimo di abilità matematica. Comincerò con due grandi paradossi fallaci: l'enigma del dollaro mancante e il paradosso della scatola di Bertrand.

### *L'enigma del dollaro mancante*

Questo è un brillante indovinello che ho usato qualche anno fa quando ero ospite in un gioco a quiz in Tv chiamato *Mind Games* (Giochi della mente), ma non pretendo di averlo inventato io, naturalmente. Il gioco era basato su una gara tra due squadre che cercavano di risolvere indovinelli posti dal conduttore della trasmissione, il matematico Marcus du Sautoy. Inoltre, ognuno doveva proporre un rompicapo con cui sfidare la squadra avversaria.

Ecco qui.

Tre viaggiatori una notte si fermano in un albergo. L'impiegato all'accettazione chiede 30 dollari per una camera con tre letti. I viaggiatori decidono di dividere il conto, pagando ognuno dieci dollari, prendono la chiave e si avviano verso la loro stanza. Qualche minuto dopo l'impiegato si accorge di essersi sbagliato, poiché in quel periodo l'albergo faceva un'offerta speciale e il prezzo della camera era solo 25 dollari. Per non trovarsi nei guai col suo capo, prende cinque dollari dalla cassa e corre su per rimediare all'errore. Mentre sta salendo, si rende conto di non poter dividere i cinque dollari in parti uguali per i tre clienti, quindi decide di dare un dollaro a ognuno, e tenersi gli altri due per sé. Così, pensa, siamo tutti contenti. E qui sorge il problema: ognuno dei tre amici avrà pagato nove dollari per la stanza, che fa 27 dollari in tutto, e l'impiegato si è tenuto due dollari, che fa 29. Dov'è finito l'ultimo dollaro dei 30 iniziali?

Magari il lettore riuscirà a vedere la soluzione immediatamente, io certamente non ci sono riuscito quando l'ho sentito la prima volta. Quindi vi lascerò pensare un po' prima di rivelarla.

Ci siete arrivati? Vedete, la storia sembra paradossale per via della maniera fuorviante in cui viene raccontata. L'errore nel ragionamento è sommare i 27 dollari con i due presi dall'impiegato: non c'è ragione di farlo, perché non c'è più un totale di 30 dollari di cui rendere conto. I due dollari dell'impiegato devono essere *sottratti* dai 27 pagati dagli ospiti, il che lascia 25 dollari, cioè l'ammontare nella cassa.

### *Il paradosso della scatola di Bertrand*

Il mio secondo esempio di paradosso fallace è attribuito al matematico francese del XIX secolo Joseph Bertrand (ma non è il suo paradosso più famoso, che è molto più tecnico e matematico).

Ci sono tre scatole, ognuna contenente due monete, e ogni scatola è divisa in due da una partizione, con una moneta in ogni metà. Ogni lato si può aprire separatamente per vedere la moneta che c'è dentro (cioè senza vedere la moneta nell'altra metà). In una delle scatole ci sono due monete d'oro (la chiameremo OO), in un'altra due monete d'argento (AA), e nella terza una d'oro e una d'argento (OA). Qual è la probabilità di scegliere la terza scatola, con una moneta d'oro e una d'argento? La risposta è semplice, naturalmente: una su tre. Non è questo l'indovinello.

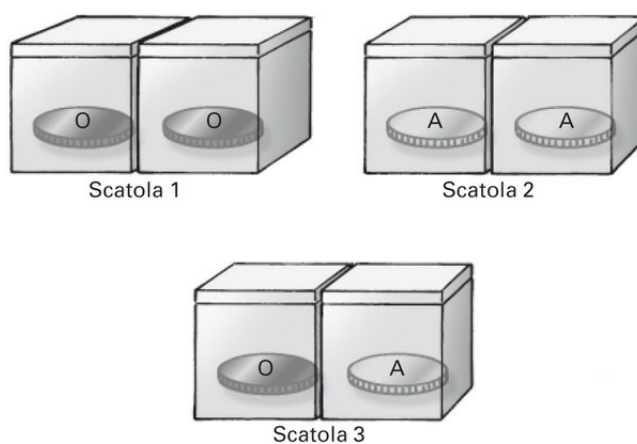


Figura 1.1  
Le scatole di Bertrand.

Ora, scegliamo una scatola a caso, apriamo uno dei lati, e vediamo una moneta d'oro. Qual è ora la probabilità che questa scatola sia OA? Vediamo. Dato che abbiamo trovato una moneta d'oro, sappiamo che la scatola non è AA, quindi ci rimangono due possibilità: o è la scatola OO, o è la scatola OA. Quindi ora la probabilità che sia OA è una su due, giusto?

Se aprendo il primo lato della scatola avessimo trovato una moneta d'argento, invece, avremmo potuto escludere l'opzione OO, e quindi ci rimanevano due possibilità: AA oppure OA, quindi la probabilità che in questo caso la scatola sia OA è di nuovo una su due.

In tutto ci sono tre monete d'oro e tre d'argento, quindi, aprendo il primo lato della scatola, ci sono uguali probabilità di trovare una moneta d'oro o una d'argento, quindi c'è una possibilità su due di trovare la scatola OA, qualunque moneta si veda alzando un lato della scatola. Ma all'inizio la probabilità di

trovare la scatola OA era una su tre, per cui, sbirciando in uno dei lati della scatola, abbiamo cambiato la probabilità di trovare OA da una su tre a una su due. Ma com'è possibile che vedere una delle monete cambi la probabilità in questo modo? Se si sceglie una scatola a caso, prima di aprire uno dei lati la probabilità di aver scelto la scatola OA è una su tre; poi guardiamo in uno dei lati, il che non ci dà nessuna informazione, peraltro, *perché sappiamo già che vedremo o una moneta d'oro o una d'argento*, e questo cambia la probabilità da una su tre a una su due? Com'è possibile? Dove stiamo sbagliando?

La risposta è che la probabilità è sempre una su tre, e mai una su due, sia che guardiamo in uno dei lati sia che non lo facciamo. Consideriamo il caso di trovare una moneta d'oro nel lato che apriamo. Ci sono tre monete d'oro in tutto, chiamiamole O1, O2 e O3, e diciamo che la scatola OO contiene O1 e O2, mentre O3 è nella scatola OA. Se, aprendo uno dei lati, vediamo una moneta d'oro, ci sono due probabilità su tre di aver pescato la scatola OO, perché la moneta che vediamo potrebbe essere O1 oppure O2. C'è solo una possibilità su tre che quella sia la moneta O3, e quindi la scatola sia OA.

### *Il paradosso del compleanno*

Questo è uno dei paradossi veridici più noti. Al contrario dei due esempi precedenti, qui non c'è trucco, non c'è falla nel ragionamento o gioco di prestigio nel modo di raccontare. Potete credere alla soluzione oppure no, ma vi assicuro che è perfettamente corretta e coerente, sia dal punto di vista matematico sia da quello logico. In un certo senso, questa frustrazione rende il paradosso ancora più divertente.

Eccolo qui:

Quante persone ci devono essere in una stanza perché la probabilità che due di loro festeggino il compleanno lo stesso giorno sia maggiore del 50%, ovvero sia più probabile che due di loro condividano lo stesso compleanno piuttosto che tutti siano nati in un giorno diverso dell'anno?

Prima di tutto, applichiamo un po' di ingenuo buon senso (che naturalmente ci condurrà fuori strada). Dato che ci sono 365 giorni in un anno, immaginiamo di avere un'aula magna con 365 posti a sedere. Cento studenti entrano nell'aula e ciascuno si siede in un posto a caso. Alcuni amici si siederanno vicini, altri preferiranno nascondersi nell'ultima fila per schiacciare un pisolino senza essere notati, mentre i più studiosi si siederanno nelle prime file. Ma in ogni



modo, resta il fatto che più dei due terzi dei posti rimarranno vuoti. Ovviamente nessuno studente si siederà in un posto già occupato, ma in ogni caso abbiamo la netta sensazione che non sia tanto probabile che due studenti vogliano esattamente lo stesso posto, visto quanto spazio c'è.

Se ora applichiamo questo ragionamento di buon senso al problema del compleanno, potremmo pensare che la probabilità che due dei cento studenti compiano gli anni lo stesso giorno sia ugualmente piccola, giacché ci sono altrettanti compleanni da scegliere quanti sono i posti a sedere. Magari ci saranno due studenti nati lo stesso giorno, ma intuitivamente pensiamo che la probabilità sia meno del 50%, pensiamo che questo sia meno probabile, rispetto al fatto che tutti siano nati in giorni diversi.

Naturalmente, con 366 persone, non c'è bisogno di spiegare perché siamo sicuri che almeno due siano nate nello stesso giorno. Ma quando il numero di persone si riduce, le cose si fanno interessanti.

In realtà, per quanto sembri incredibile, con sole 57 persone la probabilità che due siano nate lo stesso giorno arriva al 99%. Cioè, con solo 57 persone, siamo quasi certi che due siano nate lo stesso giorno! Questo è già abbastanza difficile da credere. Ma la risposta all'indovinello iniziale: «il numero di persone necessarie perché la probabilità che due festeggino il compleanno lo stesso giorno sia maggiore del 50%» è un numero molto minore di 57. Di fatto ne bastano *ventitré*!

Molti trovano questa risposta sorprendente a prima vista, e continuano a non crederci fino in fondo anche quando sono rassicurati della sua esattezza, perché intuitivamente è molto difficile da credere. Quindi analizziamo con attenzione la matematica, che cercherò di spiegare il più chiaramente possibile.

Prima di tutto, semplifichiamo il problema dimenticandoci degli anni bisestili, supponiamo che tutti i giorni dell'anno abbiano la stessa probabilità di essere il compleanno di qualcuno e che non ci siano gemelli nella stanza.

L'errore commesso da molti è di pensare che bisogna confrontare due numeri: il numero di persone nella stanza e il numero di giorni dell'anno. Quindi, siccome le 23 persone hanno 365 giorni da scegliere per il loro compleanno, sembra molto più probabile che i loro compleanni si eviteranno, piuttosto che il contrario. Ma questo modo di guardare il problema è fuorviante. Per capire se due persone hanno lo stesso compleanno, dobbiamo considerare le persone *a*

*coppie*, non una alla volta, e dobbiamo considerare il numero di possibili coppie presenti. Cominciamo con il caso più semplice; con solo tre persone abbiamo tre possibili coppie: AB, AC e BC. Con quattro persone abbiamo sei coppie: AB, AC, AD, BC, BD e CD. Con 23 persone risultano esserci 253 diverse coppie.<sup>1</sup> Vedete bene come sia più facile pensare che una di queste 253 coppie di persone sia nata lo stesso giorno dell'anno, su 365 possibili.

Il modo per fare i calcoli correttamente è cominciare con una coppia, continuare ad aggiungere gente e vedere come cambia la probabilità. Questo si fa non già calcolando la probabilità di condividere un compleanno, ma piuttosto calcolando la probabilità che ogni nuova persona abbia un compleanno diverso da tutte quelle già presenti. Quindi, la probabilità che la seconda persona eviti il compleanno della prima è  $364/365$ , perché tutti i giorni tranne uno sono buoni. La probabilità che la terza persona eviti il compleanno delle altre due, quindi, è  $363/365$ , ma non dobbiamo dimenticarci del fatto che i primi due sono nati in giorni diversi. Nella teoria della probabilità, quando dobbiamo calcolare la probabilità che due eventi diversi accadano contemporaneamente, dobbiamo moltiplicare la probabilità del primo evento con la probabilità del secondo evento. Quindi, la probabilità che la seconda persona eviti il compleanno della prima, e che la terza persona eviti il compleanno delle prime due, è  $364/365 \times 363/365 = 0,9918$ , cioè il 99,18% circa. Se questa è la probabilità che le tre persone siano nate in tre giorni diversi, allora la probabilità che due di loro abbiano lo stesso compleanno è circa  $1 - 0,9918 = 0,0082$ , cioè lo 0,82%. Quindi la probabilità che su tre persone due di loro abbiano lo stesso compleanno è molto bassa, come si poteva immaginare.

Ora si continua questo processo, aggiungendo una persona alla volta e moltiplicando le frazioni fra loro per calcolare la probabilità che ogni nuova persona eviti il compleanno di tutte le altre, finché questa probabilità diventa minore del 50%. Questo è, ovviamente il punto in cui la probabilità che almeno due persone nel gruppo abbiano lo stesso compleanno diventa maggiore della probabilità che tutte abbiano un compleanno diverso. Risulta che abbiamo bisogno di 23 frazioni, cioè di 23 persone:

$$\frac{364}{365} \times \frac{363}{365} \times \frac{362}{365} \times \frac{361}{365} \times \frac{360}{365} \times \dots = 0,4927\dots$$

← 23 frazioni moltiplicate tra loro →

E quindi la probabilità che due persone su 23 abbiano lo stesso compleanno è circa:

$$1 - 0,4927 = 0,5073 = 50,73\%$$

La soluzione di questo indovinello ha richiesto un po' di teoria della probabilità. Il prossimo, in un certo senso, è più lineare, il che lo rende ancora più incredibile, mi sembra. È il mio paradosso veridico preferito, perché è così semplice da enunciare e da spiegare, eppure è così difficile da credere.

### *Il paradosso di Monty Hall*

Questo rompicapo trae origine dalla scatola di Bertrand, ed è un esempio della potenza di ciò che i matematici chiamano «probabilità condizionale». Si basa su un indovinello più antico, chiamato «dilemma dei tre prigionieri», descritto dal matematico americano Martin Gardner nella rubrica *Mathematical Games* che teneva sulla rivista «Scientific American» nel 1959. Ma il paradosso di Monty Hall risulta essere, credo, una versione superiore e molto più chiara. Si chiama così perché la sua prima formulazione immaginava una situazione tratta dal gioco a quiz televisivo *Let's Make a Deal*, condotto dal carismatico Monte Hall, che una volta entrato nel mondo dello spettacolo cambiò il suo nome in Monty.

Steve Selvin è uno studioso di statistica, professore alla University of California a Berkeley. È un rinomato pedagogo, vincitore di premi per le sue qualità d'insegnante e di mentore. Come accademico, ha applicato le sue conoscenze matematiche alla medicina, in particolare nel campo della biostatistica. La sua fama mondiale, però, non è dovuta a questi notevoli risultati, bensì a un divertente articolo di mezza pagina pubblicato sulla rivista scientifica «The American Statistician» nel febbraio 1975, che trattava del paradosso di Monty Hall.

Selvin non avrebbe mai immaginato che questo articoletto avrebbe avuto un tale impatto (dopo tutto, «The American Statistician» era una rivista specialistica, letta principalmente da accademici e insegnanti), e in effetti ci vollero quindici anni prima che il problema arrivasse al grande pubblico. Nel settembre 1990 un lettore della rivista «Parade», un settimanale con una tiratura di decine di milioni di copie negli Stati Uniti, propose un indovinello nella rubrica *Ask Marilyn* nella quale Marilyn vos Savant rispondeva alle domande dei

lettori risolvendo i loro indovinelli matematici, giochi mentali ed enigmi logici. Vos Savant divenne famosa verso la metà degli anni ottanta, quando si guadagnò un posto nel Guinness dei primati per il quoziente d'intelligenza più alto mai registrato (185). Il lettore che propose questo particolare quesito era Craig F. Whitaker, che essenzialmente pose a Vos Savant una versione rivisitata del paradosso di Monty Hall. Il seguito fu stupefacente.

La pubblicazione del problema sulla rivista «Parade», e la risposta di Marilyn vos Savant, portarono il quesito all'attenzione nazionale e mondiale. La sua risposta, pur essendo completamente anti-intuitiva, era, come la soluzione originale di Selvin, assolutamente corretta, ma scatenò un'immediata valanga di lettere alla rivista, spedite da insigni matematici, impazienti di dimostrare il suo errore. Ecco alcuni estratti:

Da matematico professionista, sono molto preoccupato per la mancanza di conoscenza matematica in generale. Per favore aiutatemi, confessando il vostro errore e cercando di stare più attenti in futuro.

Avete toppato, e alla grande! Sembra che abbiate delle difficoltà a capire il principio alla base del problema... C'è già abbastanza analfabetismo matematico in questo paese, e sicuramente non abbiamo bisogno che il quoziente d'intelligenza più alto del mondo aiuti a diffonderlo ancora di più. Vergogna!

Posso suggerire di procurarvi un libro di testo qualsiasi sulla teoria della probabilità prima di cercare di rispondere a quesiti del genere in futuro?

Sono sconvolto! Dopo che almeno tre matematici vi hanno corretto, ancora non vedete l'errore.

Forse le donne vedono la matematica in maniera diversa dagli uomini.

Mamma mia, che folla inferocita. E, a seguire, lanci di pomodori e uova marce. Vos Savant ripresentò il problema in un numero successivo, continuando a sostenere la sua soluzione, argomentando chiaramente e con sicurezza, proprio come ci si potrebbe aspettare da una persona con quoziente d'intelligenza 185. Alla fine la storia arrivò sul «New York Times», e ancora il dibattito infuriava (come si può vedere cercando su Internet).

Probabilmente state pensando che questo paradosso è talmente difficile che solo un genio possa riuscire a comprenderlo. Ma non è così. In realtà, ci sono molti modi semplici di risolverlo e su Internet si trovano innumerevoli spiegazioni in articoli, blog, perfino video su YouTube.

Comunque, ora basta con le reminiscenze storiche e le allusioni: ecco il problema. Penso sia giusto iniziare con una citazione dal divertente articolo originale del 1975 di Steve Selvin in «The American Statistician».

*Un problema di probabilità*

Siamo a *Let's Make a Deal*, il famoso gioco a quiz televisivo condotto da Monty Hall.

Monty Hall: Una delle tre scatole chiamate A, B e C contiene le chiavi di quella nuova Lincoln Continental. Le altre due sono vuote. Se sceglie la scatola con la chiave, vince la macchina.

Concorrente: Urca!

Monty Hall: Scelga una scatola.

Concorrente: Prendo la B.

Monty Hall: Ora la A e la C sono sul tavolo, ed ecco qui la B (il concorrente la afferra con forza). Magari le chiavi sono proprio lì! Le offro cento dollari per la scatola.

Concorrente: No, grazie.

Monty Hall: Facciamo duecento.

Concorrente: No.

Pubblico: NOOOO!

Monty Hall: Si ricordi che la probabilità che la sua scatola contenga la chiave è una su tre, mentre la probabilità che sia vuota sono due su tre. Le offro 500 dollari.

Pubblico: NOOOO!

Concorrente: No, penso proprio che terrò questa scatola.

Monty Hall: Guardi, le farò un favore e aprirò una delle altre scatole rimaste sul tavolo (apre la A). È vuota! (Pubblico: applauso). Ora o la scatola C o la sua, la B, contiene le chiavi della macchina. Dato che ci sono due scatole, ora la probabilità che la sua scatola contenga la chiave è una su due, le offro mille dollari per la sua scatola.

UN MOMENTO!

Monty ha ragione? Il concorrente sapeva fin dall'inizio che almeno una delle scatole sul tavolo è vuota. Ora sa che è la scatola A. Questo cambia la probabilità che la chiave sia nella scatola B, da una su tre a una su due? Una delle scatole sul tavolo deve pur essere vuota. Monty ha fatto veramente un favore al concorrente mostrandogli quale delle due scatole è vuota? La probabilità di

vincere la macchina è una su due o una su tre?

Concorrente: Scambio la mia scatola B con la scatola C sul tavolo.

Monty Hall: Che stranezza!

SUGGERIMENTO: Il concorrente sa quello che fa!

Steve Selvin  
Scuola di Salute Pubblica  
University of California  
Berkeley, CA 94720

Nell'articolo appena citato, Selvin omette una parte cruciale del problema, la cui rilevanza sarà chiara tra poco. Non dice che Monty Hall *sa* in quale scatola sta la chiave, e quindi può aprire la scatola sul tavolo che è vuota. In realtà, nella descrizione Monty Hall dice: «Le farò un favore e aprirò una delle altre scatole rimaste sul tavolo», e possiamo ipotizzare che questo significhi che Monty Hall sapesse benissimo che la scatola che avrebbe aperto era vuota, ma del resto io il paradosso lo conosco bene. Questo, che può sembrare un particolare irrilevante (d'altra parte, com'è possibile che la probabilità dal punto di vista del concorrente cambi?) risulta invece essere il punto cruciale: tutta la soluzione si basa su cosa sa Monty Hall.

Nel numero di agosto 1975 di «The American Statistician», Selvin dovette chiarire questo punto, perché scoprì, come Marilyn vos Savant quindici anni dopo, che molti altri matematici lo avevano criticato, incapaci di accettare la sua soluzione. Scrisse:

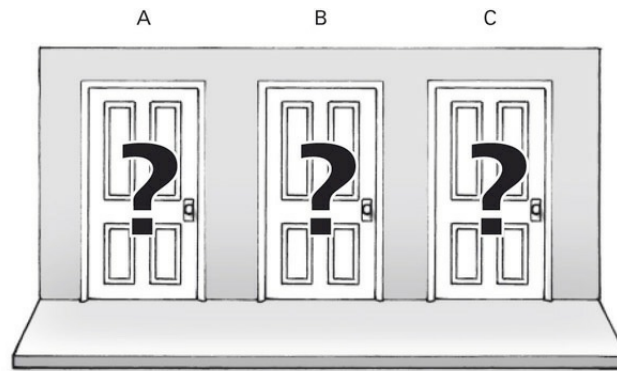
Ho ricevuto un buon numero di lettere sul mio problema di probabilità presentato nel numero di febbraio 1975. Molti lettori sostengono che la mia soluzione sia errata. La soluzione si basa sul fatto che Monty Hall sa in quale scatola si trovano le chiavi.

Per analizzare il problema con più precisione, vi presento (con qualche piccolo cambiamento) la versione più breve, e più famosa, apparsa su «Parade». In questa versione le tre scatole sono sostituite da tre porte.

Supponiamo che vi troviate ospiti di un gioco a quiz e dobbiate scegliere fra tre porte, A, B e C. Dietro a una porta c'è una macchina, dietro a ognuna delle altre due c'è una capra. Voi scegliete una porta, diciamo la A, e il conduttore, che sa dove sta la macchina, apre un'altra porta, la B, e mostra una capra. Volete ora scambiare la vostra porta con la C? È vantaggioso questo scambio?

Naturalmente, il concorrente vorrebbe vincere una macchina molto più di una capra. Questo non viene chiarito, ma l'ipotesi tacita è che il concorrente non sia un ciclista amante delle capre.

Il premio è dietro a una delle tre porte...



Il conduttore del gioco apre la porta B e mostra una capra. Continuate a tenere la porta scelta all'inizio, la A, o la scambiate con la C?

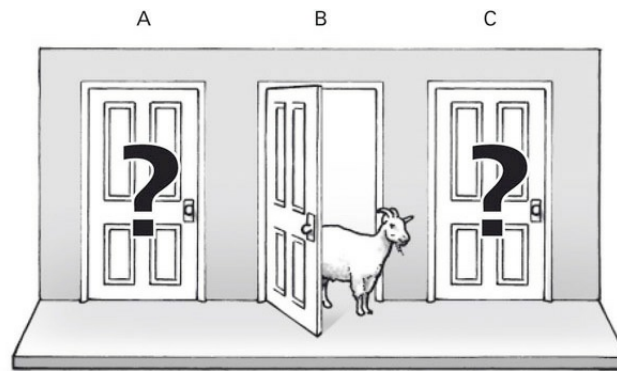
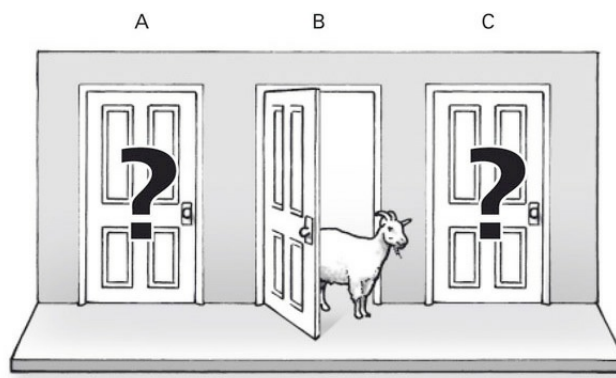


Figura 1.2  
Il paradosso di Monty Hall: il problema.

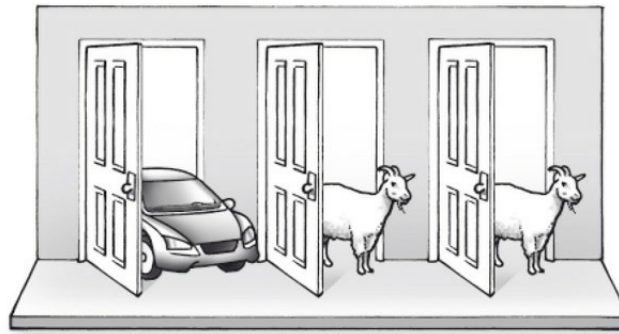
La risposta di Marilyn vos Savant, così come quella di Selvin anni prima, fu che il concorrente avrebbe sempre dovuto scambiare, perché in questo modo avrebbe *raddoppiato* la probabilità di vincere, da una su tre a due su tre. Ma come può essere? Qui sta il punto cruciale del paradosso di Monty Hall.

Naturalmente, molti concorrenti cui viene proposta questa possibilità cominceranno a pensare che c'è un trucco da qualche parte. Dato che il premio ha la stessa probabilità di trovarsi dietro a ogni porta, perché non mantenere la scelta originale, cioè tenere la porta A? Certamente la macchina ha ora la stessa probabilità di stare dietro la porta A o la porta C, e non dovrebbe fare alcuna differenza mantenere la scelta sulla A o cambiarla per la C.

Se Monty Hall, che sa dove si trova la macchina, apre la porta B e mostra una capra, allora avete una probabilità su tre di vincere la macchina se tenete la porta scelta all'inizio, la A, mentre le probabilità salgono a due su tre se passate alla C.



1 probabilità su 3 se tenete la A



2 probabilità su 3 se passata alla C

Figura 1.3  
Il paradosso di Monty Hall: la risposta.

Tutto ciò sembra piuttosto confuso e poco chiaro, e si può capire perché perfino dei matematici professionisti si siano sbagliati. Di seguito trovate diversi modi di spiegare il paradosso.

#### *Contare le probabilità*

Questo è il metodo più accurato, metodico e a prova di bomba per dimostrare che sì, scambiando le porte la probabilità di vincere raddoppia. Ricordate, originariamente il concorrente aveva scelto la porta A; Monty Hall, che sa dove sta la macchina, apre una delle altre porte e mostra una capra, offrendo al concorrente la possibilità di scambiare la sua porta A con la C.

Consideriamo il caso di tenere la porta A.

La macchina aveva la stessa probabilità di trovarsi dietro a ognuna delle tre porte.

- Se è dietro ad A, non importa quale di B o C venga aperta: VINCE.
- Se è dietro a B, la porta C viene aperta, e tenendo A: PERDE.
- Se è dietro a C, la porta B viene aperta, e tenendo A: PERDE.

Quindi c'è una probabilità su tre di vincere la macchina tenendo la porta A. Ora consideriamo l'opzione di cambiare la scelta.



Di nuovo, all'inizio la macchia aveva la stessa probabilità di trovarsi dietro a ognuna delle tre porte.

- Se è dietro ad A, non importa quale di B o C venga aperta: PERDE.
- Se è dietro a B, la porta C viene aperta, e cambiando da A a B: VINCE.
- Se è dietro a C, la porta B viene aperta, e cambiando da A a C: VINCE.

Quindi ci sono due possibilità su tre di vincere scambiando la porta.

*Senza matematica: dimostrazione di buon senso*

Questa non è una dimostrazione in senso stretto, ma piuttosto un modo non matematico di rendere la soluzione più facile da accettare.

Consideriamo il caso in cui si abbiano non solo tre porte ma mille: dietro a una si trova la macchina, e dietro alle altre 999 delle capre. Ne scegliete una a caso, diciamo la numero 777. Naturalmente potete avere scelto proprio quella per un'infinità di ragioni, ma resta il fatto che, in assenza di abilità ultrasensoriali, avete una probabilità su mille di aver scelto la porta giusta. Supponiamo ora che Monty Hall, che sa dov'è la macchina, apra tutte le altre porte, mostrando capre dietro a ognuna di esse, eccetto la numero 238. Eccovi lì, a guardare le 998 capre e due porte chiuse: la vostra porta numero 777 e la 238. A questo punto, tenete la 777 o cambiate?

Non vi viene il dubbio che c'è qualcosa di sospetto nel fatto che il presentatore ha lasciato chiusa proprio quella porta lì, che magari lui ha qualche informazione che non avevate voi quando avete scelto a caso la porta 777? Ricordate, lui sa dov'è la macchina. Vi osserva scegliere a caso una porta che con grandissima probabilità, una su mille, nasconde una capra. Poi apre 998 porte con dietro delle capre. Non vi sentireste irrimediabilmente attirati dalla porta ancora chiusa? Naturalmente sì, e avreste ragione: la macchina è quasi sicuramente dietro alla porta 238, deliberatamente lasciata chiusa da Monty.

Per descrivere questo ragionamento in modo più matematico, possiamo osservare che la scelta iniziale divide le porte in due insiemi. Il primo insieme contiene solo la porta che avete scelto, e la probabilità che la macchina sia lì è una su tre (o una su mille, nella versione estesa). Il secondo insieme contiene tutte le altre porte, e quindi la probabilità che la porta vincente sia tra queste è due su tre (o 999 su 1000). Aprire una (o 998) porte nel secondo insieme, e mostrare la capra, e quindi con probabilità zero di essere la porta vincente, lascia il secondo insieme con una porta sola, ma la probabilità totale che questa

sia la porta giusta è ancora due su tre (o 999 su 1000) perché eredita la probabilità che la macchina sia dietro a una porta qualunque del secondo insieme. Aprire le porte con le capre non cambia la probabilità che la macchina stia dietro a una delle porte nel secondo insieme.

### *Il ruolo della conoscenza a priori*

Di sicuro a questo punto sarete convinti, ma in caso abbiate ancora dei dubbi che vi tormentano, ecco un altro esempio che secondo me sottolinea chiaramente la distinzione chiave tra avere conoscenza a priori o meno.

Supponiamo di voler comprare due gattini. Chiamiamo il negozio di animali e il proprietario ci dice che due gattini fratelli sono appena arrivati in negozio quel giorno, uno nero e uno tigrato. Chiediamo se sono maschi o femmine e consideriamo due possibili risposte del negoziante:

- a) Dice: «Ne ho controllato uno, ed è maschio». Con questa sola informazione, qual è la probabilità che entrambi i gattini siano maschi?
- b) Dice «Ho controllato quello nero, ed è maschio». Qual è in questo caso la probabilità che entrambi siano maschi?

La risposta non è la stessa nei due casi. Sebbene in entrambi i casi sappiamo che almeno uno dei gatti è maschio, è solo nel secondo caso che sappiamo quale. Questa informazione in più cambia le probabilità; vediamo come.

Iniziamo elencando tutti i possibili casi:

	Nero	Tigrato
1	Maschio	Maschio
2	Maschio	Femmina
3	Femmina	Maschio
4	Femmina	Femmina

Consideriamo ora la prima risposta del negoziante: uno dei due è maschio. Questo ci dice che le possibilità sono in tutto tre, le prime tre nella tabella: entrambi maschi, il nero è maschio e il tigrato è femmina, o il nero è femmina e il tigrato è maschio. Quindi c'è una probabilità su tre che siano entrambi maschi.

Però, se la risposta del negoziante è: quello nero è maschio, questa

informazione aggiuntiva elimina le opzioni 3 e 4 nella tabella, lasciando solo due possibilità, o sono entrambi maschi, o il nero è maschio e il tigrato è femmina. Ora la probabilità che siano entrambi maschi è una su due.

Quindi, vedete bene che la probabilità che entrambi i gattini siano maschi cambia da una su tre a una su due non appena sappiamo quale dei due gatti è maschio. Questa è esattamente la stessa situazione del paradosso di Monty Hall.

Ma, un momento, sento lo scettico commentare: con la storia dei gattini, il negoziante vi ha fornito l'informazione in più proprio per permettervi di fare i conti delle probabilità, mentre Monty Hall non ha fatto niente del genere. Questa obiezione ci porta alla parte finale della spiegazione: alla fine, possiamo mettere a nudo la questione che ha confuso così sia i lettori dell'articolo di Selvin in «The American Statistician» nel 1975, sia i lettori della spiegazione di Marilyn vos Savant in «Parade» nel 1990. Dobbiamo, temo, tornare ancora una volta a Monty Hall.

Consideriamo la situazione in cui Monty Hall non sa dove sia la macchina. Ora, se apre la porta B a rivelare una capra, allora in verità la probabilità che la macchina sia dietro alla porta A o alla C è la stessa. Com'è possibile? Immaginiamo di giocare a questo gioco, con le tre porte, 150 volte. Prima di cominciare, ogni volta un giudice indipendente sposta la macchina a caso tra le tre porte, e nemmeno Monty Hall sa dove sia. Ora, se scegliete una porta e Monty Hall ne apre una a caso delle altre due, questa rivelerà la macchina in media un terzo delle volte. Statisticamente, circa 50 delle 150 volte. In ognuno di questi casi, naturalmente, il gioco è finito: avete perso. Quindi restano 100 volte in cui Monty Hall apre la porta e c'è una capra dietro alla porta B. In ognuno di questi casi la probabilità che la macchina sia dietro alla vostra porta è una su due, e non c'è ragione di cambiare. Cioè, in 50 casi la macchina sarà dietro la vostra porta, la A, e negli altri 50 casi sarà dietro alla porta C. Aggiungiamo i 50 casi in cui la macchina è dietro alla porta B, aperta da Monty, e abbiamo tre insiemi di 50, che evidenziano l'eguale probabilità che la macchina sia dietro a ognuna delle tre porte.

Naturalmente, se Monty sa dov'è la macchina, non avrebbe mai aperto la porta giusta. Quindi, diciamo che voi scegliete sempre la porta A. In 50 dei 150 casi, la macchina è proprio dietro alla porta A, e quindi voi avete una possibilità su tre di vincere se non cambiate. Negli altri 100 casi, metà delle volte la macchina è

dietro C, e Monty apre la porta B, e l'altra metà delle volte la macchina è dietro B e Monty apre la porta C. In tutti i 100 casi, Monty apre la porta con la capra, lasciando la macchina dietro l'altra. Quindi, cambiando sempre, si vince la macchina in cento casi su 150: due possibilità su tre.

*Provare per credere*

Nel suo ultimo intervento su questo argomento, Marilyn vos Savant annunciò il risultato di oltre mille esperimenti condotti nelle scuole per verificare la soluzione del problema. In quasi ogni caso i risultati confermarono che cambiare è l'opzione più vantaggiosa. Questo metodo «San Tommaso» di risolvere il paradosso è quello cui sono dovuto ricorrere anch'io una volta che cercavo di spiegarlo a un amico, qualche anno fa. Durante un lungo viaggio in macchina durante la preparazione di un documentario scientifico per la BBC, raccontai il paradosso all'operatore, Andy Jackson. Devo confessare che allora non avevo ancora affinato e limato gli argomenti e le spiegazioni come li ho esposti qui ora, quindi dovetti ricorrere a un mazzo di carte per una dimostrazione pratica. Scelsi tre carte, una rossa e due nere, e le misi a faccia in giù, in fila sul sedile in mezzo a noi. Poi sbirciai per vedere quale fosse quella rossa, chiesi ad Andy di sceglierne una senza guardarla, e girai quella delle altre due che sapevo essere nera, dandogli l'opportunità di tenere la sua, o cambiare. Non ci vollero più di una ventina di tentativi per convincerlo che era circa due volte più probabile indovinare la carta rossa cambiando che non tenendo la carta originale. Non capì esattamente perché, però si convinse che avevo ragione.

Spero che Andy legga questo capitolo e finalmente si renda conto del perché, così come spero anche il lettore.

Ma ora, basta con queste quisquiglie. Ci aspettano un bel po' di problemi di fisica.

## 2. Achille e la tartaruga

### Il moto è illusione

Il primo dei nove paradossi che voglio presentare è vecchio di due millenni e mezzo e, visto quanto tempo abbiamo avuto per rimuginarci su, non è certo sorprendente che ora sia completamente e profondamente spiegato; eppure molti che lo incontrano per la prima volta si grattano la testa sconcertati. È noto come «Paradosso di Achille» (o come il problema di Achille e la tartaruga), ed è solo uno di una serie di problemi sollevati dal filosofo greco Zenone nel V secolo a. C. È difficile pensare a un esempio di pura logica più semplice di così, ma non fatevi trarre in inganno; in questo capitolo considereremo diversi paradossi di Zenone, e finiremo per aggiornare le sue idee con una versione di uno di essi che si può spiegare solo usando la meccanica quantistica. Ehi, non ho mai detto che sarebbe stato facile.

Ma iniziamo dal più famoso paradosso di Zenone. Una tartaruga gareggia contro Achille più veloce e le viene dato un vantaggio in partenza, così che parte da un punto A più avanti della linea di partenza da cui parte Achille. Dato che Achille corre molto più veloce della tartaruga, arriverà ben presto al punto A; ma quando ci arriva, la tartaruga avrà percorso un pezzettino di strada, arrivando a un punto che chiamiamo B. Quando Achille arriva al punto B, la tartaruga sarà arrivata al punto C, e così via. Quindi, mentre Achille sta chiaramente raggiungendo la tartaruga, e il divario tra i due diventa sempre più piccolo, sembra proprio che non arrivi mai a raggiungerla. Dove stiamo sbagliando?

È difficile battere gli antichi Greci nei giochi mentali, i rompicapi logici e gli enigmi, o anche solo nell'arte di ragionare. In effetti questi filosofi erano così intelligenti, la loro logica così profonda, che abbiamo la tendenza a dimenticare che i loro sforzi risalgono a più di duemila anni fa. Perfino oggi, quando vogliamo dare un esempio di genio, insieme al famoso Einstein spesso nominiamo Socrate o Platone o Aristotele per rappresentare il culmine delle capacità intellettuali.

Zenone nacque a Elea, antica città della Magna Grecia nella zona oggi denominata Cilento. Si sa poco della sua vita e del suo lavoro, a parte che era un allievo di un altro filosofo di Elea, Parmenide. Insieme a un terzo filosofo della stessa città, Melisso, formavano la cosiddetta «scuola eleatica». La loro filosofia proponeva di non fidarsi dei sensi e dell'esperienza sensoriale per comprendere

il mondo, ma piuttosto della logica e della matematica. Tutto sommato, è un atteggiamento sensato, ma come vedremo presto, portò Zenone sulla strada sbagliata.

Dal poco che sappiamo del suo pensiero, sembrerebbe che Zenone non avesse molte idee positive, di suo, ma fosse invece fermamente deciso a demolire gli argomenti degli altri. Ciò nonostante Aristotele stesso, che visse un secolo più tardi, lo celebrò come il fondatore della «dialettica». Si tratta di una forma di discussione civile, nella quale gli antichi greci eccellevano, in particolare uomini come Platone e Aristotele, usando la logica e il ragionamento per risolvere i conflitti.

Solo un breve frammento del lavoro originale di Zenone è arrivato fino a noi, quindi ciò che sappiamo del suo pensiero deriva dagli scritti di altri, Platone e Aristotele principalmente. Intorno ai quarant'anni Zenone si recò ad Atene, dove conobbe il giovane Socrate. Più tardi si impegnò attivamente nella politica e alla fine venne imprigionato e torturato a morte per essersi trovato coinvolto in un complotto contro il governatore di Elea. Una storia che lo riguarda racconta che si staccò la lingua a morsi e la sputò in faccia ai suoi torturatori piuttosto che rivelare i nomi dei suoi compagni. Ma la sua fama è dovuta perlopiù a una serie di paradossi riportati da Aristotele nella sua grande opera sulla *Fisica*. Si sospetta che ce ne fossero almeno quaranta, complessivamente, ma solo una manciata sono sopravvissuti.

Tutti i paradossi di Zenone (di cui i quattro più famosi sono noti con il nome dato loro da Aristotele: Achille, la dicotomia, lo stadio, la freccia) sono basati sull'idea che niente cambia, il moto è solo un'illusione e il tempo stesso non esiste. Naturalmente, se c'è una cosa in cui i greci erano bravissimi è filosofare, e affermazioni grandiose come «il moto è un'illusione» sono esattamente il tipo di provocazioni astratte per cui erano famosi. Oggi possiamo scardinare questi paradossi usando la scienza, ma sono così divertenti che vale la pena rivisitarli qui. In questo capitolo li considereremo tutti, a turno, e mostreremo come si possono risolvere mediante un'attenta analisi scientifica. Iniziamo da quello già visto.

### *Achille e la tartaruga*

Questo è il mio paradosso di Zenone preferito, perché a prima vista sembra

perfettamente logico, e in effetti sfida la logica in maniera inaspettata. Achille è il più grande guerriero della mitologia greca, dotato di forza, coraggio e abilità nel combattimento. Parte uomo e parte essere soprannaturale (i suoi genitori erano il re Peleo di Tessaglia e una ninfa marina di nome Teti) appare principalmente nell'*Iliade* di Omero, dove si racconta la storia della guerra di Troia. Si narra che fin da bambino fosse tanto veloce da raggiungere un cervo in corsa e tanto forte da uccidere un leone. Quindi Zenone chiaramente voleva esagerare quando scelse questo eroe mitico per gareggiare contro la goffa tartaruga.

Il paradosso si basa sulla favola, ancora più antica, della lepre e la tartaruga, attribuita a un altro greco di nome Esopo, vissuto circa cent'anni prima di Zenone. Nella favola originale, la tartaruga viene presa in giro dalla lepre, e sfidata a una gara di corsa, gara che la tartaruga puntualmente vince grazie all'arroganza della lepre, che pensa di potersi permettere un pisolino a metà percorso, per poi svegliarsi quando la tartaruga ha già tagliato il traguardo.

Nella versione di Zenone, Achille più veloce prende il posto della lepre; al contrario di quella, Achille è completamente concentrato sulla gara, ma dà alla tartaruga un vantaggio, e questo sembra essere la sua rovina, perché pare proprio che la tartaruga vinca la gara, anche se probabilmente al foto finish, o al suo equivalente nella Grecia antica. Secondo il racconto di Zenone, per quanto Achille corra velocemente e per quanto arranchi lentamente la sua avversaria, l'eroe non la raggiungerà mai. Ma questo non è certo ciò che accade in realtà.

Questo era un vero enigma per i matematici greci, che non conoscevano il concetto di «serie infinita convergente» (che spiegherò tra breve). Aristotele, che certamente non si risparmiava quando doveva rimuginare su cose di questo tipo, considerava i paradossi di Zenone semplicemente «errori». Il problema era che né Aristotele né nessun altro nella Grecia antica capiva una delle formule algebriche di base in fisica: la velocità è uguale alla distanza diviso il tempo. Oggi ne sappiamo di più.

L'affermazione «non raggiungerà mai la tartaruga» è naturalmente sbagliata, perché le distanze sempre più piccole considerate a ogni passo (tra i punti A e B, e poi tra B e C, e così via), riguardano anche intervalli di tempo sempre più piccoli, e quindi un numero infinito di passaggi non implica un tempo infinito. Di fatto i passaggi danno luogo a un tempo finito: il tempo che ci vuole ad Achille per raggiungere la tartaruga! La confusione nasce dal fatto che la maggior

parte delle persone non capisce che sommare infiniti numeri non dà necessariamente un risultato infinito. Per quanto sembri strano, si possono concludere un numero infinito di passaggi in un tempo finito, e la tartaruga sarà raggiunta e sorpassata facilmente, come logica vuole. La soluzione si basa su ciò che i matematici chiamano «serie geometrica».

Consideriamo il seguente esempio:

$$1 + 1/2 + 1/4 + 1/8 + 1/16 + 1/32 \dots$$

È chiaro che si può continuare all'infinito a sommare frazioni sempre più piccole e il totale si avvicinerà sempre più al valore 2. La cosa si può dimostrare prendendo un segmento e dividendolo a metà, poi dividendo a metà la metà di destra e così via finché le frazioni diventano così minuscole che non si riesce più a dividerle con la matita. Se metà segmento è lungo 1 (non importa se 1 centimetro, 1 metro, 1 pollice o 1 miglio marino), allora sommando le frazioni successive, come nella serie scritta sopra, si converge alla lunghezza totale del segmento: 2 unità.

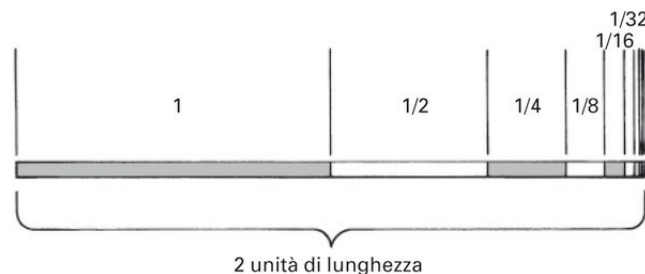


Figura 2.1

*Una serie infinita convergente*

Sommando un numero infinito di segmenti di lunghezza decrescente non è detto che si ottenga una lunghezza infinita, poiché le lunghezze diventano sempre più piccole.

Un buon modo di applicare questo ragionamento al paradosso è considerare non i momenti in cui Achille e la tartaruga hanno raggiunto ognuno un certo punto, ma piuttosto la distanza tra loro, sempre più piccola. Se entrambi corrono a velocità costante, questa distanza diminuisce anch'essa a velocità costante. Per esempio, se Achille dà alla tartaruga un vantaggio di 100 metri e poi procede avvicinandosi a essa alla velocità di 10 metri al secondo, la raggiungerà in 10 secondi, che è il tempo necessario a coprire la distanza del vantaggio iniziale, cento metri. Questo valore di dieci secondi è il numero che otterremmo sommando 5 secondi+2,5 secondi+1,25 secondi+0,625 secondi ... e così via finché i numeri da sommare diventano talmente piccoli che decidiamo



di farla finita. Dopo 10 secondi Achille come un fulmine sorpassa la tartaruga, come ci si sarebbe aspettato (sempre che non decida di fermarsi e bersi una birra per strada, cosa che Zenone non si sente in dovere di precisare nel suo ragionamento).

### *La dicotomia*

Il paradosso successivo di Zenone confuta la realtà del moto stesso ed è una variazione sullo stesso tema di Achille. È molto semplice da enunciare.

Per raggiungere una destinazione bisogna prima coprire metà della distanza, ma per coprire metà della distanza bisogna prima coprire un quarto della distanza, e per coprire un quarto della distanza bisogna prima coprire un ottavo della distanza, e così via. Se si continua a dividere la distanza a metà infinite volte, allora non si riuscirà a raggiungere nemmeno il primo traguardo, e quindi il viaggio non inizia nemmeno. Per di più, questa serie di distanze sempre più brevi è infinita, quindi, per completare il viaggio bisogna compiere un numero infinito di passaggi, e non si arriverà mai alla fine. Se non si può nemmeno partire, non si può arrivare, e quindi il moto stesso è impossibile.

Questo paradosso ci è stato tramandato da Aristotele, che comprende benissimo la sua assurdità, ma cerca il ragionamento logico con cui confutarlo con sicurezza. Del resto, è abbastanza ovvio che il moto esiste; tuttavia, Zenone applica una forma di ragionamento chiamata *reductio ad absurdum*, cioè la dimostrazione dell'assurdità di un'idea, mediante la derivazione inevitabile di una conclusione assurda a partire dall'idea stessa. Dobbiamo anche ricordare che Zenone non era un matematico: argomentava usando la logica pura, e spesso questo non è abbastanza. Altri filosofi greci ricusavano il ragionamento di Zenone affrontandolo in maniera più pragmatica e diretta. Uno di questi era il cinico Diogene.

Il termine moderno «cinismo» trae origine da un movimento filosofico idealista dell'antica Grecia. I cinici greci dovevano essere persone più gradevoli di quanto la connotazione moderna del termine suggerisca: sfuggivano le ricchezze, la fama, il potere, persino la proprietà, e sceglievano invece una vita semplice, libera da tutti i vizi umani. Credevano nell'uguaglianza di tutti gli uomini e che il mondo appartenesse a ognuno nella stessa misura. Probabilmente il cinico più famoso fu Diogene, contemporaneo di Platone, vissuto nel IV secolo a.C. Questo filosofo è responsabile di citazioni fantastiche, come «il rossore è il colore della virtù», «cani e filosofi fanno il bene maggiore e ottengono il minor riconoscimento», «chi si accontenta con meno, ha di più» e «non so nulla, tranne

il fatto della mia ignoranza».

Diogene portò le idee ciniche fino agli estremi logici. Fece della povertà una virtù e passò anni vivendo in una botte nel mercato di Atene. Divenne famoso per il suo essere, be', cinico su tutto, in particolare sulle idee filosofiche del tempo, perfino sugli eminenti Socrate e Platone. Quindi si può ben immaginare cosa pensasse di Zenone e dei suoi paradossi: avendo sentito del paradosso della dicotomia e del fatto che il moto sarebbe un'illusione, si alzò in piedi e si mise a camminare, dimostrando l'assurdità delle conclusioni di Zenone.

Si può certo applaudire Diogene per il suo atteggiamento pratico, ma si deve lo stesso indagare un po' più a fondo per scoprire dove fallisce il ragionamento di Zenone. Non è poi così difficile: dopo tutto abbiamo avuto qualche migliaio di anni per pensarci su. In ogni caso, se si può pensare che il puro buon senso sia sufficiente a rigettare il paradosso di Zenone, per me non lo è. Ho passato quasi tutta la vita lavorando e, cosa ancora più importante, pensando da fisico, e non mi accontento di argomenti di buon senso, filosofici, o puramente logici per ricusare il paradosso della dicotomia: ho bisogno di una fisica a prova di bomba, che, per me, è molto più convincente.

La cosa da fare è trasformare il ragionamento di Zenone sulla distanza in un ragionamento sul tempo. Ipotizziamo di muoverci a velocità costante nel momento in cui ci troviamo al punto di partenza. Con il concetto di velocità, che Zenone non avrebbe compreso del tutto, si intende una certa distanza coperta in un tempo finito. Più breve è la distanza, più piccolo l'intervallo di tempo necessario, ma quando dividiamo il primo numero per il secondo il risultato è sempre lo stesso: la velocità. Considerando distanze sempre più piccole da percorrere per iniziare il nostro viaggio, dobbiamo anche considerare intervalli di tempo sempre più brevi. Ma il tempo va avanti, sempre, indipendentemente da quanto lo suddividiamo artificialmente in intervalli sempre più piccoli. Pensare al tempo, anziché allo spazio, come a una linea statica che si può suddividere indefinitamente, va bene (e spesso ci si raffigura il tempo proprio così, quando si risolvono problemi di fisica), ma il punto cruciale è che il modo di *percepire* il tempo non è come una retta statica, cioè come vediamo le rette nello spazio. Non possiamo guardare il tempo fuori dal suo scorrere: il tempo scorre, e quindi il moto esiste.

Se consideriamo la situazione dal punto di vista di un osservatore che non si sta ancora muovendo, ma si trova fermo al punto di partenza, dobbiamo pensare a

un altro dato fisico. È una cosa che tutti imparano a scuola (e quasi tutti dimenticano immediatamente): si chiama seconda legge del moto di Newton, e dice che per far muovere un oggetto bisogna applicare una forza. Ma una volta che è in moto, si può ragionare come prima, e cioè che, con lo scorrere del tempo, le distanze percorse dipendono dalla velocità dell'oggetto, che non è necessariamente costante. Il paradosso della dicotomia, quindi, è solo un'astrazione irrilevante, che non dice nulla sulla realtà del moto nel mondo fisico.

Vorrei fare un'ultima osservazione, prima di passare oltre. La teoria della relatività insegna che forse non è il caso di congedare il paradosso della dicotomia in maniera tanto arrogante. Secondo Einstein, il tempo in effetti *si può* considerare in modo simile allo spazio: infatti, nella teoria della relatività ci si riferisce al tempo come alla quarta dimensione di quello che viene chiamato spazio-tempo. Questo suggerisce che forse il flusso del tempo alla fin fine è solo un'illusione, e se lo è, il moto sarà anch'esso un'illusione. Ma io sostengo che, nonostante il successo della teoria della relatività, questa conclusione ci porterebbe lontano dalla fisica, nelle acque torbide della metafisica, idee astratte che non hanno il sostegno solido della scienza sperimentale.

Non sto pensando che la teoria della relatività sia sbagliata, naturalmente. È solo che le idee di Einstein diventano manifeste solamente quando ci si avvicina alla velocità della luce; alle velocità normali, di tutti i giorni, siamo perfettamente autorizzati a ignorare gli effetti relativistici e pensare al tempo e allo spazio nel modo solito. Dopo tutto, se portiamo il ragionamento di Zenone agli estremi, allora è effettivamente sbagliato dire che il tempo e lo spazio si possono suddividere in intervalli discreti sempre più piccoli. A un certo punto le cose diventano così piccole che inizia a entrare in gioco la fisica quantistica; il tempo e lo spazio diventano essi stessi confusi e indefinibili, e non ha veramente più senso suddividerli in parti più piccole. In verità, il moto stesso è un po' illusorio nel dominio quantistico degli atomi e delle particelle subatomiche. Ma non è certo ciò che Zenone aveva in mente.

Pensarci in questo contesto è molto divertente, ma né la fisica quantistica né la teoria della relatività hanno a che fare con la spiegazione del paradosso della dicotomia. Usare queste idee della fisica moderna per sostenere che il moto è un'illusione significa non aver capito il punto, e ci porta pericolosamente vicini a

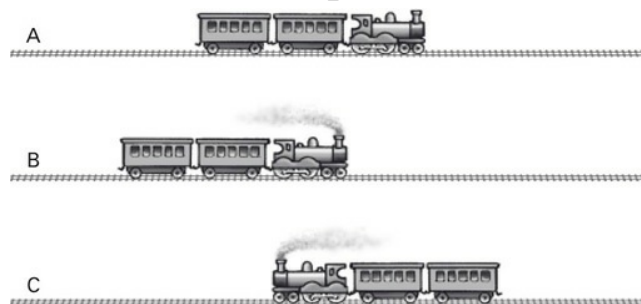
trasformare la fisica in misticismo. Quindi non facciamola più difficile del necessario: ci sarà occasione per queste pazzie più avanti, credetemi.

### *Lo stadio*

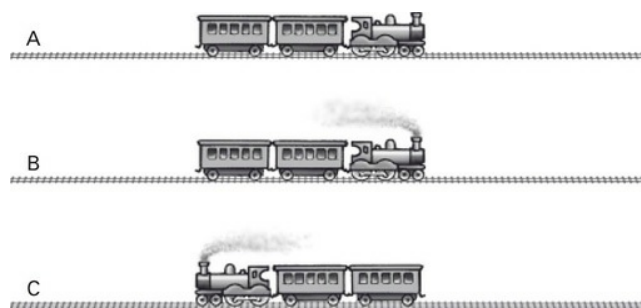
E quindi andiamo avanti, con un altro paradosso di Zenone legato al concetto di velocità. È vagamente oscuro, e ci è giunto attraverso Aristotele, che lo chiamò «Paradosso dello stadio». Cercherò di descriverlo il più sinteticamente possibile.

Supponiamo di avere tre treni, ognuno con una locomotiva e due vagoni. Il primo treno è fermo in stazione, il secondo e il terzo non fermano in quella stazione, ma si muovono a velocità uguale in direzione opposta verso la stazione; il treno B viene da ovest e il treno C da est.

A un certo punto, i treni sono nella posizione mostrata nella figura 2.2a; poi, un secondo più tardi, sono allineati come nella figura 2.2b. Il problema, secondo Zenone, riguarda il moto del treno B: in un secondo, si è spostato della lunghezza di un vagone rispetto al treno A, ma nello stesso intervallo di tempo si è spostato di una lunghezza pari a due vagoni rispetto al treno C. Il paradosso è che il treno B si è spostato di una certa distanza e del doppio nello stesso intervallo di tempo. Zenone sembra avere cognizione che le distanze sono relative, e quindi cerca di formulare il paradosso in termini di tempo. Dividendo ognuna delle due distanze per la velocità costante del treno B, arriviamo a due diversi intervalli di tempo, uno doppio dell'altro. Ma entrambi, paradossalmente, sembrano rappresentare quanto ci vuole per passare dalla situazione del diagramma superiore alla situazione di quello inferiore.



(a) Il treno A è stazionario. Il treno B viaggia da sinistra a destra e il treno C da destra a sinistra alla stessa velocità di B.



(b) Un secondo dopo, i treni sono allineati.

Figura 2.2  
Il paradosso dei treni in moto.

È semplice risolvere questo apparente paradosso: ecco l'errore nel ragionamento. Bisogna considerare il concetto di velocità relativa, naturalmente, quindi non possiamo dire che B si muove alla stessa velocità relativamente a C (che si muove) e relativamente ad A (che sta fermo). Zenone lo sapeva? Sta forse cercando di porre l'accento su un aspetto più sottile della natura illusoria del moto? Non è chiaro, ma, come ogni scolaro dovrebbe essere in grado di capire, qui non c'è nessun paradosso. B si muove rispetto a C a una velocità relativa doppia di quanto si muova rispetto ad A, e quindi naturalmente supererà due vagoni di C nello stesso tempo in cui passa un vagone di A.

### *La freccia*

Come per la dicotomia, questo paradosso si basa sull'idea che il moto è solo un'illusione. Aristotele lo descrive così: «Se ogni cosa, quando occupa uno spazio uguale, è a riposo, e se ciò che è in moto sta occupando lo stesso spazio in ogni istante, allora la freccia in volo è immobile».

Eh? Un momento, cerchiamo di spiegare più chiaramente.

Una freccia in volo in ogni dato istante occupa una certa posizione fissa, così come la vedremmo in una fotografia. Ma se la vediamo solo in quell'istante, sarà indistinguibile da una freccia immobile nella stessa posizione. Quindi, come possiamo dire che una freccia si sta effettivamente muovendo? In verità, siccome il tempo è fatto di una successione di istanti consecutivi, in ognuno dei quali la freccia è immobile, allora la freccia non si muove.

Il paradosso è che invece il moto esiste: la freccia, ovviamente, si muove. Quindi, dov'è l'errore nel ragionamento di Zenone?

Il tempo si può considerare come una successione di «istanti» infinitamente piccoli, li possiamo pensare come gli intervalli di tempo più brevi possibile,

indivisibili. Da fisico, vedo chiaramente il fallo nel ragionamento di Zenone. Se questi momenti indivisibili non hanno durata esattamente zero, allora la freccia sarà in una posizione leggermente diversa all'inizio e alla fine del momento, e quindi non si può dire che sia a riposo. D'altra parte, se questi istanti sono veramente di durata pari a zero, allora non importa quanti ne mettiamo uno a fianco all'altro, l'intervallo di tempo totale non avrà mai durata diversa da zero: ne possiamo mettere insieme quanti vogliamo e la somma farà sempre zero. Quindi l'idea di Zenone che un intervallo di tempo finito si possa pensare come la giustapposizione di istanti di durata uguale a zero è sbagliata.

Ci vollero considerevoli passi avanti sia nella matematica sia nella fisica per seppellire finalmente questo paradosso. Più specificamente, bisogna usare l'analisi matematica, l'area sviluppata da Isaac Newton e altri nel XVII secolo, che descrive come si sommano quantità microscopiche per descrivere correttamente il concetto di variazione, per mettere finalmente una pietra sopra alle ingenuie idee di Zenone.

O quasi. Nel 1977 due fisici della University of Texas pubblicarono un sorprendente articolo scientifico che sembrava suggerire che il paradosso della freccia era stato forse messo a riposo troppo in fretta. Si chiamavano Baidaynaith Misra e George Sudarshan, e il titolo del loro articolo era *Il paradosso di Zenone in meccanica quantistica*. I fisici di tutto il mondo si interessarono alla faccenda. Alcuni pensarono che il lavoro fosse piuttosto sciocco, mentre altri si affrettarono a verificarne l'idea. Ma prima di addentrarci nei particolari, lasciate che vi racconti il poco che mi posso permettere a questo punto, all'inizio del libro, sullo strano e meraviglioso mondo di idee che è la meccanica quantistica.

### *Il paradosso di Zenone e la meccanica quantistica*

La meccanica quantistica è la teoria che descrive il funzionamento del mondo microscopico, e con questo non si intende il mondo che si vede al microscopio, ma piuttosto il mondo infinitamente più piccolo degli atomi, delle molecole e delle particelle subatomiche che li costituiscono (elettroni, protoni e neutroni). In verità, la meccanica quantistica è il corpo di idee matematiche più importante, potente e fondamentale di tutta la scienza. È notevole per due ragioni apparentemente contraddittorie (quasi un paradosso!): da una parte, è

così fondamentale per la nostra comprensione del funzionamento del mondo che la ritroviamo alla base di gran parte dei progressi tecnologici dell'ultimo mezzo secolo, e d'altra parte, nessuno sembra essere in grado di capire cosa significhi.

Devo chiarire in partenza che la teoria della meccanica quantistica non è in se stessa bizzarra o illogica; al contrario, è una costruzione logica elegante e precisa che descrive la natura in maniera ineccepibile. Senza di essa non saremmo in grado di capire le basi della chimica moderna, o dell'elettronica, o della scienza dei materiali; non avremmo inventato il microprocessore di silicio o il laser; non ci sarebbero i televisori, i calcolatori, i forni a microonde, i lettori CD e DVD o i telefoni cellulari, per non parlare di tutto il resto che diamo per scontato nella nostra era tecnologica.

La meccanica quantistica fornisce previsioni e spiegazioni del comportamento dei mattoni fondamentali della materia con un'accuratezza straordinaria. Ci ha portato a una precisissima e quasi completa conoscenza di come si comporta il mondo subatomico, e come la miriade di particelle interagiscono e si collegano tra loro a formare il mondo che vediamo attorno a noi, e del quale siamo parte. In fin dei conti, siamo solo un insieme di miliardi di miliardi di atomi che obbediscono alle leggi della meccanica quantistica, organizzati in maniera altamente complessa.

Queste strane regole matematiche furono scoperte negli anni venti del secolo scorso. Risultano essere molto diverse dalle regole che governano il mondo di tutti i giorni, quello a noi familiare, quello degli oggetti che ci circondano. Verso la fine del libro esamineremo quanto siano strane queste regole, con il paradosso del gatto di Schrödinger. Per ora, voglio concentrarmi su una caratteristica particolarmente strana del mondo quantistico, e cioè il fatto che un atomo si comporta diversamente se lasciato in pace rispetto a quando viene «osservato», e con questo termine si intende che viene monitorato in qualche modo: pungolato, spinto, spostato, elettrizzato. Ancora non si comprende appieno questa caratteristica del mondo quantistico, in parte perché solo ora si comincia a capire cosa esattamente significhi «osservare», in questo contesto. Il problema è noto col nome di «problema della misura», ed è un'area di ricerca molto attiva in questo periodo.

Il mondo quantistico è governato dalla probabilità. È un luogo dove niente è come sembra. Se lasciato a se stesso, un atomo radioattivo emetterà una particella, ma è impossibile prevedere quando questo succederà. Il meglio che

possiamo fare è calcolare un numero chiamato «tempo di dimezzamento», cioè il tempo necessario affinché la metà di un gran numero di atomi radioattivi identici «decadano» radioattivamente. Più il numero è grande, più la stima tempo di dimezzamento è precisa, ma non potremo mai prevedere in anticipo quale atomo del gruppo sarà il prossimo a decadere. È molto simile alla probabilità legata al lancio di una moneta: sappiamo che se lanciamo una moneta molte volte, circa metà delle volte uscirà testa e l'altra metà croce. Più volte la lanciamo, più la previsione statistica sarà accurata, ma non potremo mai prevedere il risultato del prossimo lancio.

Il mondo quantistico è di natura probabilistica non perché la meccanica quantistica sia una teoria incompleta o approssimata, ma piuttosto perché l'atomo stesso non «sa» quando accadrà questo evento casuale. Questo è un esempio di ciò che viene chiamato «indeterminazione» o «imprevedibilità».

L'articolo di Misra e Sudarshan, pubblicato nel «Journal of Mathematical Physics», descrive la situazione incredibile in cui un atomo radioattivo, osservato con attenzione e da vicino, non decade mai! L'idea si può riassumere perfettamente con il vecchio adagio «il latte, se lo guardi, non bolle», usato per la prima volta (a quanto mi risulta) in lingua inglese dalla scrittrice vittoriana Elizabeth Gaskell, nel 1848, nel romanzo *Mary Barton*, anche se il motto probabilmente era molto più antico. Il concetto trae origine, naturalmente, nel paradosso della freccia di Zenone e nella nostra incapacità di percepire il moto considerando solo il fotogramma di un oggetto in movimento in un istante di tempo.

Ma come, e perché, questo può succedere nella realtà? Chiaramente il detto sul latte è solo una lezione di pazienza: non si può far bollire il latte più velocemente guardandolo con intensità. Tuttavia, Misra e Sudarshan sembrano suggerire che nel caso degli atomi, invece, si può influenzare il loro comportamento guardandoli. E inoltre, questa interferenza è inevitabile: l'atto del guardare inesorabilmente cambierà lo stato delle cose che stiamo osservando.

La loro idea va alla radice di come la meccanica quantistica descrive il mondo microscopico: una realtà confusa, ectoplasmica, in cui accade regolarmente ogni sorta di stranezza che non riusciremo mai a rilevare (un'idea che riprenderemo nel nono capitolo). Quindi un atomo che, lasciato a se stesso, emetterebbe



spontaneamente una particella in un certo momento, rimarrà invece bloccato dalla timidezza se qualcuno lo osserva, e di conseguenza non riusciremo mai a coglierlo nell'atto di decadere. È come se l'atomo avesse una sorta di consapevolezza, il che è una follia. Ma allora il mondo quantistico è una follia. Uno dei padri fondatori della teoria quantistica fu il fisico danese Niels Bohr, che nel 1920 creò un istituto di ricerca a Copenaghen dove giunsero tutti i più grandi geni del tempo, uomini come Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli e Erwin Schrödinger, per cercare di scoprire i segreti dei più piccoli elementi fondanti della natura. Una delle citazioni più famose di Bohr è: «Se non rimanete sconvolti dalle conclusioni della meccanica quantistica, vuol dire che non l'avete capita».

L'articolo di Misra e Sudarshan si intitolava *Il paradosso di Zenone in meccanica quantistica* a causa delle sue assonanze col paradosso della freccia. Tuttavia ora, in tutta onestà, si può dire che, seppure le sue conclusioni rimangano in qualche modo controverse, per moltissimi fisici quantistici non è più un paradosso. Nella letteratura oggi è citato col nome di «effetto quantistico di Zenone», e si è scoperto che si applica a molte più situazioni di quelle descritte da Misra e Sudarshan. Un fisico quantistico forse vi racconterà con soddisfazione di come si possa spiegare l'effetto mediante «il collasso costante della funzione d'onda nello stato iniziale non decaduto», che è esattamente la sorta di bofonchiamento incomprensibile che ci si può aspettare da questa gente (lo saprò bene io che sono uno di loro). Ma non credo di perseguire questa linea di ragionamento nei particolari, qui, in caso vi stiate nervosamente chiedendo in che razza di pasticcio vi siete cacciati.

Questa recente scoperta del fatto che l'effetto quantistico di Zenone è pressoché onnipresente si riduce a una migliore comprensione di come un atomo risponda al suo ambiente circostante. Un passo avanti decisivo fu fatto quando, in uno dei più prestigiosi laboratori del mondo, il National Institute of Standards and Technology in Colorado, alcuni scienziati confermarono l'effetto quantistico di Zenone in un famoso esperimento nel 1990. L'esperimento si fece nella Divisione del Tempo e della Frequenza (nome splendido), che è nota per stabilire le regole delle più accurate misurazioni temporali. In verità, gli scienziati del Colorado hanno recentemente costruito l'orologio atomico più preciso del mondo, che ha un errore di meno di un secondo su tre *miliardi* e mezzo di anni, un tempo vicino all'età della Terra.

Uno dei fisici che lavora a questi orologi incredibilmente precisi è Wayne Itano, che con la sua équipe progettò l'esperimento per verificare e rilevare gli effetti dell'effetto quantistico di Zenone. L'esperimento consisteva nell'intrappolare diverse migliaia di atomi in un campo magnetico e poi illuminarli delicatamente con dei laser, costringendoli a rivelare i loro segreti. E infatti i ricercatori trovarono prove dell'effetto quantistico di Zenone: se osservati costantemente, gli atomi si comportavano molto diversamente rispetto a come gli scienziati si aspettavano.

Colpo di scena finale: ora ci sono prove che esista anche l'effetto opposto, una cosa chiamata «anti-effetto di Zenone», che a livello quantistico è come se ci si mettesse a guardare una pentola sul fuoco per far bollire il latte più in fretta. Questi risultati sono ancora delle congetture, in qualche modo, e arrivano al cuore di aree importantissime e molto profonde della scienza del XXI secolo, come la progettazione e realizzazione dei cosiddetti computer quantistici. Si tratterebbe di dispositivi che usano direttamente lo strano comportamento del mondo quantistico per completare i calcoli in maniera molto efficiente.

Non mi è chiaro cosa Zenone di Elea penserebbe di questa reminiscenza dei suoi paradossi, o del fatto che il suo nome sarebbe stato nel futuro legato a fenomeni sorprendenti propri della fisica di circa duemilacinquecento anni dopo la sua morte. Qui, il paradosso non ha nulla a che fare con i trucchi logici, ma molto a che fare con i trucchi ancora più strani che la natura sembra impiegare alla microscopica scala degli atomi: trucchi che solo ora iniziamo a comprendere.

I paradossi di Zenone ci hanno portato dalla nascita della fisica alle idee più avanzate di questo secolo; tutti gli altri paradossi in questo libro per un verso o per un altro stanno nel mezzo. Nel risolverli, dovremo viaggiare fino al limite dell'universo ed esplorare la natura stessa dello spazio e del tempo. Allacciate le cinture.

### 3. Il paradosso di Olbers

#### Perché la notte è buia?

Diversi anni fa ero in vacanza con la mia famiglia e un gruppo di amici in Francia. Ci trovavamo in un'idilliaca casa di campagna nella regione Limousin, nel Massiccio Centrale, una delle aree meno popolate del paese. Una sera, era tardi, i bambini dormivano, e noi adulti stavamo seduti fuori a goderci un bicchiere (o due, o tre) di buon vino rosso locale, guardando il cielo notturno, senza nuvole, brillante di stelle. Commentavamo come la Francia sia abbastanza grande da potersi permettere aree di campagna quasi disabitata, con poco inquinamento, e quanto fossimo poco abituati, vivendo nel popoloso sud-est dell'Inghilterra, a vedere così tante stelle. La cosa più impressionante era la larga striscia di luce debole e diffusa che striava il cielo come una nuvola rarefatta.

Ma una nuvola avrebbe oscurato le stelle alla nostra vista, e invece riuscivamo chiaramente a vedere tante stelle su questa striscia nebulosa come in qualunque altra parte del cielo. Sembrava una cosa *dietro* alle stelle, pur così lontane. In qualità di scienziato ufficiale del gruppo, mi premurai di spiegare che si trattava del disco centrale della nostra galassia, la Via Lattea, visto di taglio, e che questa striscia di luce era molto più lontana di qualunque altra stella nel cielo. Molti dei miei amici, con mio grande stupore, confessarono di osservarla per la prima volta, ed erano affascinati di scoprire che consisteva dei miliardi di stelle che formano il nucleo della nostra galassia, troppo lontane e con una luce troppo debole per riuscire a distinguerle come singoli puntini.

Naturalmente, non tutti i singoli puntini di luce che vediamo nel cielo notturno rappresentano delle stelle. Gli oggetti più luminosi di tutti (a parte la Luna, naturalmente) sono i nostri vicini planetari: Venere, Giove e Marte. Risplendono perché riflettono la luce del Sole, che si nasconde alla nostra vista, dall'altra parte della Terra, durante la notte. Le stelle più vicine a noi fuori dal sistema solare stanno a diversi anni luce di distanza. Vi rammento che, tanto per confondere le idee, l'anno luce è una misura di distanza, non di tempo. È la distanza che la luce attraversa in un anno, e ammonta a circa diecimila miliardi di chilometri. Per dare un'idea di quanto sia grande questa distanza, i 150 milioni di chilometri che ci separano dal sole ammontano a solo 0,000016 di un anno luce. Si può dire che la distanza tra la Terra e il Sole è di 8,3 minuti luce,

poiché questo è il tempo (poco più di otto minuti) che la luce impiega per attraversarla.

La stella più vicina a noi dopo il Sole si trova nella galassia Proxima Centauri, a poco più di quattro anni luce di distanza, ma non è la stella più luminosa nel cielo. Questo primato spetta a Sirio, che è due volte più lontana. Solo la Luna, Giove e Venere sono costantemente più luminosi di Sirio, che si può osservare in qualunque punto del pianeta, a meno di trovarsi diverse centinaia di chilometri a nord del circolo polare artico. Insieme a Betelgeuse e Procione, forma uno dei tre vertici del Triangolo Invernale, come si osserva dall'emisfero boreale. Per trovarlo, individuate le tre stelle che formano la cintura di Orione, e seguite verso il basso la retta che esse definiscono, fino a trovare Sirio. Betelgeuse è una delle spalle di Orione, e Procione completa il triangolo, quasi perfettamente equilatero. È difficile mancarlo.

Altre stelle luminose sono Rigel, molto distante ma grandissima, una supergigante blu, grossa 78 volte il Sole e 85000 volte più luminosa, che rappresenta la stella più luminosa nella nostra regione di galassia. Non la vediamo brillare come altre stelle, tipo Sirio, perché è veramente molto distante (tra 700 e 900 anni-luce dalla Terra). Più o meno alla stessa distanza, ma ancora più grande di Rigel, troviamo una supergigante rossa appena meno splendente: Betelgeuse. Questa stella imponente è 13000 volte più luminosa del Sole e mille volte più grande: così grossa che se la mettessimo al centro del sistema solare ingloberebbe le orbite di Mercurio, Venere, la Terra, Marte e Giove!

Quando gli astronomi iniziarono a usare i telescopi, che permettevano loro di vedere molto più distante di quanto potessero fare a occhio nudo, si resero conto che le stelle non sono distribuite uniformemente nell'universo, ma sono piuttosto raggruppate in galassie, ognuna delle quali è come un'immensa città di stelle; queste galassie sono separate tra loro da tratti di spazio vuoto inimmaginabilmente vasti. Tutte le stelle che vediamo nel cielo (comprese Sirio, Rigel e Betelgeuse) sono nella nostra galassia, la Via Lattea. Anzi, stanno tutte nel nostro piccolo quartiere della Via Lattea.

In condizioni perfette (nel punto giusto della Terra, nel momento giusto dell'anno), si dovrebbero riuscire a vedere a occhio nudo molte migliaia di stelle e centinaia di migliaia con un telescopio decente. Eppure anche questo numero è

solo una minuscola frazione (meno dell'uno per cento) di tutte le stelle nella Via Lattea, che contiene da 200 a 400 miliardi di astri, cioè circa cinquanta stelle per ogni essere umano vivente.

Ecco perché il disco della Via Lattea appare come una macchia continua di luce fioca che attraversa il cielo notturno. Il nucleo della galassia si trova a circa 25000 anni luce dalla Terra, mentre l'intera galassia ha un diametro di 100000 anni luce. A tali distanze, le singole stelle sono troppo flebili per riuscire a distinguerle chiaramente come punti di luce, e quindi riusciamo a vedere solo la luce cumulativa emessa da miliardi di loro.

Le stelle non sono distribuite uniformemente nella galassia. Al contrario del Sole, che se ne sta da solo, la maggior parte si trovano in coppia o in gruppo, e orbitano l'una attorno alle altre. Alcune stelle giovani si ritrovano a centinaia in gruppi aperti e non ben definiti, mentre gruppi più grandi, che ne contano migliaia, si trovano in oggetti chiamati «ammassi globulari».

Ovviamente non riusciamo a distinguere singole stelle in altre galassie. Di fatto, è quasi impossibile vedere un'altra galassia senza ricorrere all'aiuto di un potente telescopio. Perfino le galassie più vicine, Andromeda e le Nubi di Magellano, si vedono appena a occhio nudo, e appaiono come macchie diffuse di luce molto debole.

La galassia Andromeda, un po' più grande della nostra, si trova a due milioni di anni luce. Rimpicciolendo la Via Lattea alle dimensioni della Terra, Andromeda sarebbe lontana quanto la Luna. Contiene circa 500 milioni di stelle. Ricordo ancora l'emozione nel vederla attraverso un telescopio, come una fioca spirale confusa. La cosa più sorprendente per me fu che non stavo guardando Andromeda com'era in quel momento, ma com'era due milioni di anni prima. Era la luce emessa allora, molto prima che gli umani popolassero la Terra, che ora entrava nel mio occhio, completando il suo lungo viaggio. Curiosamente, mi sembrava un privilegio, di essere lì in quel momento a catturare i fotoni di luce che colpivano la mia retina, scatenando segnali elettrici verso i neuroni del mio cervello, e rendendomi cosciente di ciò che osservavo.

I fisici a volte fanno pensieri strani.

Non solo le stelle formano ammassi all'interno delle galassie, ma le galassie stesse si raggruppano in ammassi. La nostra galassia si trova assieme a circa altre 40, conosciute col nome di Gruppo Locale, e comprendono la Grande e la Piccola Nube di Magellano e Andromeda. Le misurazioni astronomiche hanno

oggi raggiunto una tale precisione, con nuovi telescopi sempre più potenti, che ora sappiamo anche come questi gruppi di galassie siano essi stessi ammassati nei cosiddetti superammassi. Il nostro Gruppo Locale è parte del Superammasso Locale, chiamato anche Superammasso della Vergine. Fin dove arriva il nostro universo? È davvero infinito? Non lo sappiamo. Ma la domanda ha tormentato gli astronomi per secoli e ci porta al nostro prossimo paradosso.

Guardando il cielo notturno, ci facciamo una domanda molto profonda:

*Perché la notte è buia?*

Potreste pensare che questa domanda sia banale. In fondo, anche i bambini sanno che la notte viene quando il Sole tramonta dietro l'orizzonte, e siccome non c'è niente in cielo nemmeno lontanamente luminoso quanto il Sole, dobbiamo accontentarci della flebile luce della Luna, e di quella ancora più flebile che emanano le stelle lontane e i pianeti.

Eppure questa domanda è molto più rilevante di quanto possa apparire a prima vista. In effetti gli astronomi si sono lambiccati il cervello per secoli prima di trovare la risposta corretta. Oggi è nota come «paradosso di Olbers».

Ecco quindi il problema. Abbiamo buone ragioni di credere che anche se l'universo non fosse infinito (e potrebbe invece esserlo), è così grande che dal punto di vista pratico possiamo assumere che si estende all'infinito. Quindi, in qualunque direzione si guardi, si dovrebbe vedere una stella e il cielo dovrebbe essere più luminoso la notte di quanto il Sole lo renda di giorno; dovrebbe addirittura essere così luminoso, giorno e notte, da rendere irrilevante la presenza del Sole.

Consideriamo la cosa da un altro punto di vista. Immaginiamo di trovarci nel mezzo di una foresta enorme, così grande da poter ipotizzare che sia infinita in ogni direzione. Ora immaginiamo di scoccare una freccia orizzontalmente in una direzione qualsiasi. In questa situazione idealizzata, se ipotizziamo che la freccia continui a volare in linea retta senza mai cadere, prima o poi colpirà un albero. Siccome la foresta è infinita, ci sarà sempre un albero sulla traiettoria della freccia, per quanto lontano sia.

Ora pensiamo al nostro universo grandissimo, con un'infinità di stelle distribuite uniformemente. La luce emessa da queste stelle è l'analogo della freccia, alla rovescia. In qualunque direzione guardiamo nel cielo, dovrebbe

sempre esserci una stella nella direzione del nostro sguardo; non dovrebbero esserci spazi vuoti in cui non è presente nessuna stella, e il cielo intero dovrebbe essere splendente come la superficie del Sole, giorno e notte.

La prima volta che si pensa a questo problema vengono in mente due obiezioni, entrambe già menzionate nella presentazione del paradosso. Prima di tutto, potremmo obiettare: «Sicuramente le stelle molto distanti appariranno troppo fioche perché possiamo vederle». E poi, potremmo chiederci: «Ma le stelle non sono distribuite uniformemente, giusto? Sono raggruppate in ammassi, e questi ammassi raggruppati in galassie». La verità è che entrambe queste obiezioni sono irrilevanti. Riguardo alla prima, è certamente vero che le stelle molto distanti appaiono più fioche di quelle vicine, ma l'area del cielo corrispondente a queste stelle lontane, proprio perché sono lontane, rappresenta un volume di universo molto più grande, e quindi conterrà molte più stelle. Basta un ragionamento geometrico relativamente semplice, che presenterò più avanti in questo capitolo, per dimostrare che questi due effetti si bilanciano esattamente: per ogni area del cielo, le stelle vicine, meno numerose, dovrebbero avere una luminosità totale uguale a quelle più numerose e più distanti. Considerando la seconda obiezione, è sicuramente vero che le stelle non sono uniformemente distribuite ma si raggruppano in galassie, come foglie d'autunno ammucchiate compostamente. Al di là della nostra galassia, i punti di luce che vediamo attraverso i telescopi rappresentano intere galassie. Quindi il ragionamento è lo stesso, solo che questa volta consideriamo le galassie anziché le singole stelle: sicuramente il cielo notturno dovrebbe essere luminoso come una galassia, in media, magari non splendente come la superficie di una stella, ma lo stesso, dovrebbe essere accecante!

Be', non è così. E, come vedremo, la ragione per cui non lo è risulta essere una delle verità più profonde sul nostro universo mai scoperta. Ma per risolvere il paradosso in maniera soddisfacente, dobbiamo prima esaminare come si è evoluto negli anni.

### *Un'infinità di stelle*

Se consideriamo da quanto tempo gli astronomi sono a conoscenza di questo paradosso, è sorprendente che la sua attribuzione sia avvenuta solo negli anni cinquanta del secolo scorso, quando fu chiamato appunto «paradosso di Olbers»,

dal medico e astronomo dilettante Heinrich Wilhelm Olbers, vissuto a Brema, in Germania, nel secolo XIX. In realtà, ben pochi astronomi sembravano interessati a questo paradosso prima di allora.

Nel 1952 il grande cosmologo Hermann Bondi pubblicò un testo di grande impatto, in cui venne usato per la prima volta il termine «paradosso di Olbers». Ma, come vedremo, l'attribuzione era sbagliata, perché Olbers non fu certo il primo a porre il problema, e il suo contributo alla risoluzione non era né particolarmente originale né illuminante. Un secolo prima di Olbers, Edmond Halley aveva posto lo stesso quesito e un secolo ancora *prima*, nel 1610, l'aveva fatto Johannes Kepler. Ma nemmeno Keplero era stato il primo a farne menzione: per questo, dobbiamo risalire fino al 1576, alla prima traduzione in inglese del *De revolutionibus*, il grande lavoro di Copernico, scritto qualche decennio addietro.

Qualunque storia, nell'astronomia, inizia con un individuo chiave in veste di personaggio principale, che appartiene a un gruppetto molto ristretto. Il primo è Tolomeo, il greco del II secolo che, nonostante abbia scritto uno dei testi scientifici più importanti nella storia (*l'Almagesto*), credeva erroneamente che il Sole girasse attorno alla Terra. Sviluppò un modello dell'universo, con la Terra al centro, che rimase in voga tra gli astronomi per più di mille anni. Poi viene il polacco Copernico, un genio del secolo XVI che, confutando l'idea geocentrica di Tolomeo, e scambiando il ruolo di Terra e Sole, viene considerato il padre dell'astronomia moderna. E non dobbiamo dimenticare Galileo, il primo astronomo che puntò un telescopio verso il cielo, nel 1609, e dimostrò la validità del modello eliocentrico di Copernico: la Terra gira intorno al Sole, così come gli altri pianeti.

Ma Copernico non aveva completamente ragione. La sua idea di rimuovere la Terra dalla posizione privilegiata al centro dell'universo era corretta, ma sbagliò a rimpiazzarla col Sole. Copernico credeva che il sistema solare fosse l'intero universo. Nel suo *De revolutionibus*, uno dei testi considerati alla base della rivoluzione scientifica in Europa, mostra un diagramma del sistema solare, diventato un'icona. In esso la Terra è, correttamente, al terzo posto dopo Mercurio e Venere, e la Luna è l'unico oggetto celeste a orbitarle attorno, poi vengono Marte, Giove e Saturno. Fin qua, tutto bene (i pianeti esterni a Saturno non erano ancora stati scoperti), ma a questo punto Copernico fece una cosa interessante: mise tutte le stelle su un'orbita fissa attorno al Sole. Quindi il Sole



si veniva a trovare al centro dell'intero universo, non solo del suo sistema di pianeti.

Ora naturalmente sappiamo che il Sole non occupa certo una posizione così speciale. Sappiamo che in realtà il Sole è su un braccio esterno di un'ordinaria galassia a spirale, in una zona non particolarmente interessante dell'universo. Sappiamo, grazie a secoli di dati astronomici sempre più accurati e completi, che l'universo non ha centro, e potrebbe anche estendersi all'infinito in ogni direzione. Ma ovviamente il povero Copernico, senza telescopio, non poteva immaginare tutto questo.

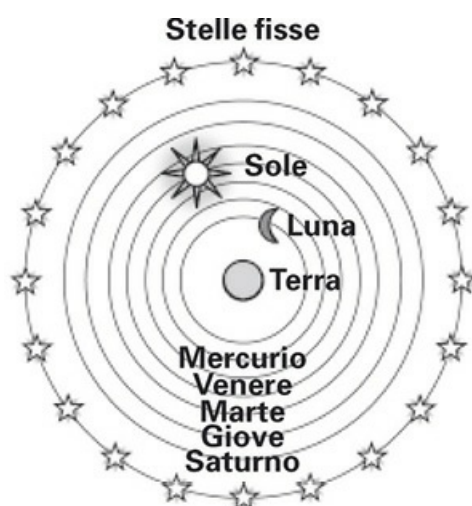
Ci volle un astronomo relativamente sconosciuto nella sonnacchiosa città mercantile di Wallingford, vicino a Oxford, in Inghilterra, per fare il passo successivo. Si chiamava Thomas Digges ed era nato nel 1546, pochi anni prima della morte di Copernico. Suo padre, Leonard Digges, era anch'egli uno scienziato, cui si attribuisce l'invenzione del teodolite, uno strumento per misurare con grande precisione gli angoli verticali e orizzontali (oggi usato principalmente dai geometri). Nel 1576 Thomas pubblicò una nuova edizione dell'almanacco di suo padre, *A Prognostication Everlasting*, molto popolare al tempo, aggiungendo nuovo materiale nelle appendici al testo. La più importante era la prima traduzione in inglese del grande lavoro di Copernico. È affascinante pensare che il libro fu allegato a un volume di astronomia che non aderiva alla teoria copernicana. Ciò nonostante, Thomas Digges fece ben più di una semplice promozione pubblicitaria di questa visione ancora controversa dell'universo, per quanto importante. La portò oltre, in un modo che, per me, è un progresso in astronomia importante tanto quanto quello di Copernico, ma molto meno famoso.

Digges modificò la famosa immagine del sistema solare fatta da Copernico, con il suo strato esterno di stelle fisse su una superficie sferica con il Sole al centro, e sparpagliò le stelle nello spazio vuoto, sconfinato e senza limiti. Fu quindi il primo astronomo a considerare seriamente la nozione di un universo infinito che contiene infinite stelle (anche se Democrito, nell'antica Grecia, aveva suggerito un'idea simile).

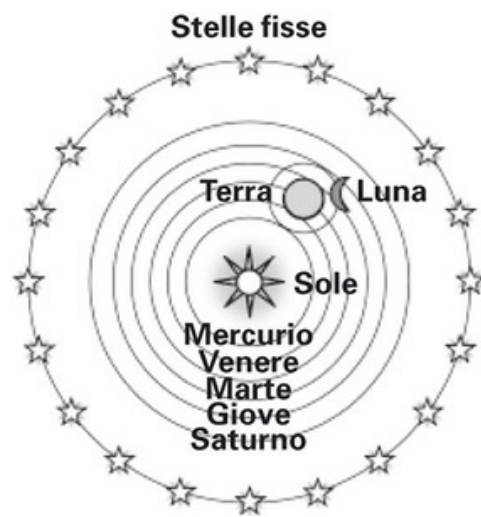
Non fu una sparata da parte di Digges. Si era persuaso di questa nuova visione dell'universo a seguito di un evento accaduto nel 1572. Come molti altri astronomi nel mondo era rimasto sconvolto dalla scoperta di una nuova stella

molto luminosa, apparsa nel cielo quell'anno. Oggi sappiamo che si trattava di una supernova: una stella che, alla fine della sua vita, avendo finito il carburante nucleare, collassa drammaticamente su se stessa. Questo processo crea onde d'urto attraverso la stella stessa, provocando l'esplosione degli strati esterni, e l'energia viene rilasciata in un cataclisma finale. Così tanta energia, che l'esplosione risulta più luminosa di tutta la galassia. Ma nel secolo XVI questi particolari di astrofisica non erano noti; in effetti si pensava che la struttura dell'universo, al di là della Luna, fosse fissa e stabile, e quindi un oggetto che brillava così intensamente nel cielo doveva necessariamente essere molto vicino alla Terra, all'interno dell'orbita lunare.

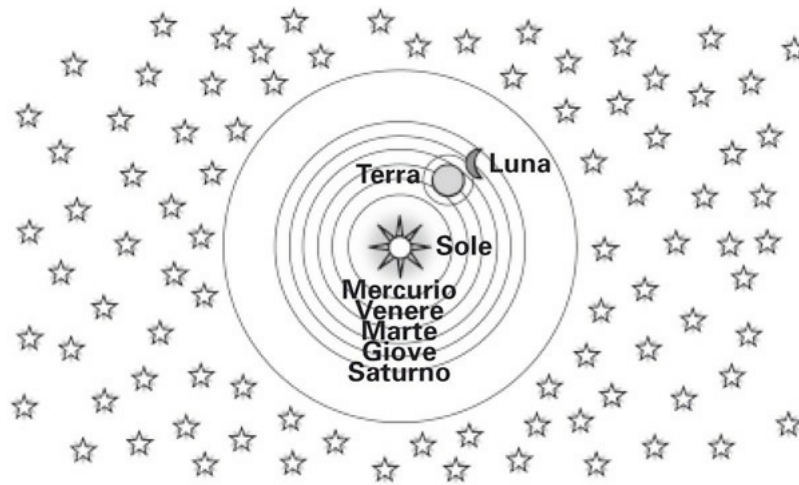
Digges, insieme ad altri astronomi, tra cui il grande Tycho Brahe, arrivò alla conclusione che la supernova del 1572 doveva essere molto, molto lontana. Siccome non si osservava alcuna «parallasse» (cioè alcun movimento rispetto alle altre stelle), gli astronomi furono costretti a concludere che l'oggetto luminoso si trovava più lontano della Luna e dei pianeti. La cosa causò grande sconcerto, perché allora si credeva che di là dalla Luna e dei pianeti l'universo fosse fisso e immobile; eppure ecco qui un corpo celeste apparso dal nulla. Lo si chiamò «nuova stella», e la sua comparsa portò Digges alla conclusione che le stelle non sono tutte alla stessa distanza da noi: forse (oggi ci sembra così ovvio) le stelle più luminose sono vicine e quelle più fioche molto più lontane. Al tempo, quest'idea era letteralmente rivoluzionaria.



L'universo secondo Tolomeo.



L'universo secondo Copernico.



L'universo secondo Thomas Digges.

Figura 3.1  
Tre modelli dell'universo.

Nella sua esplorazione dell'idea di spazio infinito con infinite stelle, Digges inevitabilmente si pose la domanda cruciale: perché di notte fa buio? Per Digges, però, non c'era alcun paradosso. Semplicemente, ipotizzò che le stelle lontane apparivano troppo deboli per illuminare il cielo.

Quello che mancava a Digges era il calcolo matematico cruciale che gli avrebbe mostrato l'errore nel suo ragionamento sulla mancanza di luce nel cielo notturno. Sarebbe arrivato più tardi. Nel 1610 Johannes Kepler riesaminò il problema, sostenendo che il motivo del buio notturno era semplicemente dovuto al fatto che l'universo è finito: il buio tra una stella e l'altra era fatto dalle mura oscure che circondano l'universo. Più di un secolo dopo un altro astronomo, Edmond Halley, analizzò il problema di nuovo, e arrivò alla stessa conclusione di Digges: l'universo è infinito, ma la luce delle stelle lontane è troppo flebile.

Fu un astronomo svizzero chiamato Jean Philippe de Chéseaux a mostrare,

qualche anno dopo ancora, che questo non risolve il problema. De Chéseaux dimostrò, usando la geometria in maniera molto elegante, che se immaginiamo tutte le stelle sistemate su gusci sferici concentrici attorno a noi, come gli strati di una cipolla, estesi all'infinito, e se ipotizziamo che in media le stelle abbiano tutte la stessa luminosità<sup>1</sup> e siano distribuite uniformemente nell'universo (cosa che ora sappiamo non essere vera, ma è lo stesso un'ipotesi accettabile ai fini di questa dimostrazione), allora le stelle sui gusci più interni saranno più luminose, ma i gusci esterni, più grandi, conterranno molte più stelle, ancorché più fioche, e la luminosità totale rimane dunque invariata su ogni guscio sferico. In altre parole, il numero maggiore di stelle lontane e deboli contribuisce alla stessa quantità di luce totale delle poche stelle più luminose a noi vicine. Siamo quindi di nuovo al punto di partenza, con l'ipotesi di Keplero secondo cui l'universo dev'essere finito, altrimenti il cielo non sarebbe buio.

A questo punto fa la sua entrata Heinrich Olbers, che pone di nuovo il problema del buio notturno in un articolo pubblicato nel 1823. Olbers offrì una soluzione diversa: sapeva, grazie a De Chéseaux, che la poca luminosità delle stelle distanti non aiuta a risolvere il problema, e propose l'ipotesi che lo spazio non è vuoto, ma pieno di polvere e gas interstellare, che blocca la luce delle stelle (o delle galassie, come sappiamo oggi) più distanti. Quello che non riuscì a comprendere è che, data l'età dell'universo, questo materiale interstellare si sarebbe surriscaldato lentamente a causa della luce assorbita, e ora brillerebbe di luce propria con la stessa intensità delle stelle (o galassie) che nasconde alla nostra vista.

In ogni caso, il problema posto da Olbers e la sua possibile soluzione furono pressoché ignorate dagli altri astronomi fino alla fine del secolo XIX. Ma forse possiamo perdonare a Olbers il suo errore. Vedete, fino a qui, non solo gli astronomi non sapevano quanto fosse grande l'universo, ma non avevano nemmeno sentore del fatto che le stelle si raggruppano in galassie e che la nostra Via Lattea è solo una tra miliardi di galassie distribuite su distanze enormi. Tutto ciò sarebbe cambiato nei primi decenni del XX secolo, quando un uomo diede alla scienza una nuova visione della natura dello spazio e del tempo.

### *L'universo in espansione*

Nel 1915 Einstein pubblicò il suo lavoro più importante. Non era la famosa

equazione  $E=mc^2$ , e nemmeno il suo articolo sulla luce, che gli valse il premio Nobel. Si chiama Teoria della Relatività Generale, e descrive come la forza di gravità influenzi lo spazio e il tempo. A scuola si insegna la versione della forza di gravità data da Isaac Newton: una forza invisibile che attrae i corpi tra loro. Naturalmente questo è giusto e viviamo tutta la nostra vita sotto l'influenza della forza di gravità della Terra che ci tiene ancorati alla sua superficie. La legge di gravitazione di Newton spiega anche come la Luna orbiti intorno alla Terra e come la sua attrazione gravitazionale causi le maree, e spiega anche come la Terra orbiti intorno al Sole, confermando il modello eliocentrico di Copernico del Sistema solare. Gli scienziati della NASA hanno usato proprio le leggi di gravitazione di Newton per mandare l'Apollo sulla Luna. Non c'è alcun dubbio che questa legge universale funzioni; ma non è precisissima.

La teoria della relatività generale descrive la gravità in modo radicalmente diverso e molto più accurato. Dice che la gravità non è una forza, in se stessa (come un elastico invisibile che attrae la materia) ma piuttosto una misura della forma stessa dello spazio attorno alle masse. Ora, se non avete alcuna conoscenza di fisica, queste parole vi diranno ben poco. Non preoccupatevi, quando Einstein pubblicò la sua teoria per la prima volta, si disse che c'erano forse due scienziati in tutto il mondo che la capivano. Oggi, è stata verificata e messa alla prova così rigorosamente che tutti crediamo alla sua correttezza.

Poiché il nostro universo è, in fondo, uno spazio pieno di roba, e questa roba è governata principalmente dalla gravità, Einstein e altri si resero conto che dovrebbe essere possibile usare la teoria della relatività generale per descrivere le proprietà dell'intero universo. Ma Einstein ben presto incontrò un problema molto serio. Se, in un dato istante, tutte le galassie nell'universo sono ferme le une rispetto alle altre, allora, se l'universo è finito, l'attrazione gravitazionale dovrebbe farle avvicinare tra loro, dando inizio a un gigantesco collasso. La visione generalmente accettata all'epoca era che l'universo, a livello delle galassie, e più in grande, fosse statico e immobile: l'idea di un universo dinamico, in evoluzione su scale così grandi, sembrava al contempo bizzarra e inutile. Quindi, quando le equazioni della relatività generale indicarono che l'universo dovrebbe collassare su se stesso, Einstein decise di far tornare i conti invece che re-inventare radicalmente la sua visione complessiva. Sostenne che per bilanciare la forza gravitazionale, che tende a far collassare

L'universo, ci deve essere una forza uguale e contraria, chiamata «repulsione cosmica», che bilancia l'attrazione gravitazionale e mantiene le galassie alla stessa distanza in un universo stabile. Il suggerimento di Einstein non era però altro che un trucco matematico per riconciliare la sua teoria con il modello prevalente di un universo statico.

Poi arrivò una sorpresa. Nel 1922 un cosmologo russo, Aleksandr Friedmann, arrivò a una conclusione diversa. Considerò la possibilità che Einstein si fosse sbagliato e che non c'è alcuna forza di repulsione a controbilanciare la gravità e mantenere l'universo in equilibrio stabile. Friedmann si rese conto che la cosa non avrebbe necessariamente implicato il collasso dell'universo su se stesso a causa della forza di gravità. Forse, voleva dire che l'universo sta facendo esattamente il contrario: si sta espandendo. Come poteva essere? Certamente, senza una forza di repulsione cosmica, l'universo deve collassare, non espandersi! Ecco la spiegazione.

Immaginiamo che qualcosa abbia messo l'universo in moto all'inizio, provocando un'espansione, una cosa come un'esplosione iniziale. La forza gravitazionale di tutta la materia nell'universo avrebbe quindi avuto l'effetto di rallentare l'esplosione. Quindi, se non ci fosse alcuna forza di repulsione cosmica a bilanciare la forza di gravità, e se l'universo avesse iniziato a espandersi (per qualche ragione), allora in questo momento sarebbe o nel mezzo di un'espansione, o nel mezzo di una contrazione. Quello che proprio non può succedere è che sia statico, immobile tra l'espansione e il collasso, perché quest'opzione è instabile.

Esiste una semplice dimostrazione di tutto ciò. Consideriamo una palla su un piano inclinato levigato: se la mettiamo a metà della discesa, rotolerà giù. Ma immaginiamo ora di guardare un filmato della palla e di fermare l'immagine su un fotogramma nel quale la palla è a metà del piano inclinato; ora potremmo chiedere a qualcuno di prevedere cosa farà la palla quando facciamo ripartire il film, e dopo averci pensato su, il nostro interlocutore potrebbe rispondere o che la palla rotolerà in su verso la cima (il che corrisponde a un universo in espansione), o che rotolerà giù (universo in contrazione); ma certo non dirà che starà ferma. Naturalmente, l'unico modo che la palla ha di rotolare in su è che qualcuno l'abbia spinta all'inizio. In quel caso, il moto verso l'alto sarà progressivamente rallentato e alla fine la palla si fermerà e comincerà a rotolare verso il basso.

Nessuno, nemmeno Einstein, era disposto a credere alla teoria di Friedmann: almeno finché non si fossero trovate prove sperimentali, che puntualmente arrivarono qualche anno dopo. L'astronomo Edwin Hubble fu il primo a dimostrare l'esistenza di galassie al di là della Via Lattea. Fino ad allora si credeva che le piccole macchie di luce osservate col telescopio fossero nuvole di polvere, chiamate «nebulae», all'interno della nostra galassia. Ma con il suo potente telescopio, Hubble scoprì che queste nebulae erano troppo lontane per trovarsi all'interno della Via Lattea e quindi dovevano essere galassie esse stesse. Ancor più sorprendente fu la sua osservazione secondo la quale le galassie più lontane si allontanano da noi a una velocità che dipende dalla loro distanza dalla Terra. Questo comportamento sembrava accadere per ogni direzione in cui si puntasse il telescopio. Hubble aveva dimostrato che l'idea di Friedmann di un universo in espansione era corretta.

Hubble affermò, correttamente, che essendo l'universo in espansione, nel passato doveva quindi essere più piccolo. Sicché se si va abbastanza indietro nel tempo, dovremmo arrivare a un momento in cui tutte le galassie si trovavano una sopra l'altra e l'universo doveva essere molto affollato. Se si va ancora più indietro nel tempo, la materia si accatasta sempre più su se stessa finché arriviamo al momento della nascita dell'universo, l'esplosione, il grande botto, il Big Bang (termine coniato per la prima volta dall'astrofisico Fred Hoyle negli anni cinquanta del secolo scorso).

Vale la pena ricordare qui che un comune fraintendimento è che l'espansione dell'universo si realizza nel fatto che tutte le galassie si allontanano dalla nostra. Non è vero: in effetti è lo spazio tra le galassie che si espande. Vale anche la pena di sottolineare un altro punto interessante: cioè che la galassia più vicina a noi, Andromeda, si sta in realtà avvicinando! Secondo le stime più recenti sulla velocità di espansione dell'universo, Andromeda dovrebbe allontanarsi a circa 50 chilometri al secondo e invece si avvicina a circa 300 chilometri al secondo! La ragione è che, così come le stelle non sono uniformemente distribuite all'interno delle galassie, così anche le galassie non sono uniformemente distribuite nell'universo. Le osservazioni di Hubble riguardavano galassie molto distanti, in allontanamento, e non i movimenti di quelle vicine, nel nostro ammasso locale.

La velocità a cui Andromeda e la Via Lattea si avvicinano è pari a quella che

impiegheremmo per circumnavigare il globo in due minuti, o coprire la distanza tra la Terra e il Sole in meno di una settimana. Effettivamente siamo in rotta di collisione, ma ci vorranno diversi miliardi di anni perché la collisione avvenga.

Una considerazione finale sull'espansione dell'universo: sembra che la velocità di espansione stia aumentando. Pare che, nonostante la gravità cerchi di rallentare la corsa, qualcosa di ancora più forte stia spingendo le galassie ad allontanarsi sempre più velocemente. Sembrerebbe quasi che qualche misteriosa forza di anti-gravità, chiamata banalmente «energia oscura», sia al lavoro. E quindi l'idea di Einstein di una forza di repulsione cosmica non era poi così folle: però ora, invece di tenere l'universo in equilibrio, sembra lo stia sgretolando.

I cosmologi oggi credono che l'universo abbia iniziato la sua espansione con il Big Bang quasi 14 miliardi di anni fa, ma, mentre per i primi 7 miliardi di anni la velocità di espansione rallentava, a causa dell'attrazione gravitazionale della materia, in seguito, nei successivi 7 miliardi di anni, la materia (cioè le galassie) era così rarefatta che la gravità ha perso la presa. A questo punto l'energia oscura iniziò a prendere il controllo, estendendo lo spazio sempre più velocemente. Questo significa che oggi pensiamo che l'universo non collasserà mai su se stesso (come si riteneva possibile fino al 1998, quando si scoprì l'accelerazione dell'espansione), ma morirà di «morte termica», mentre tutto si allontana da tutto per sempre. Un pensiero in qualche modo deprimente (non che saremo lì a dovercene preoccupare, ovviamente).

### *Prove del Big Bang*

Il fatto che l'universo sia in espansione è sufficiente a spiegare il paradosso di Olbers; ma facciamo un passo avanti e dimostriamo che si sta espandendo perché ci dev'essere stato il Big Bang. A parte la prova incontestabile data dall'espansione dello spazio, la teoria del Big Bang oggi è sostenuta anche da altre due prove cruciali. La prima riguarda le proporzioni relative dei diversi elementi chimici nell'universo, quel che si dice «abbondanza cosmica». Risulta che la gran parte degli atomi esistenti sono idrogeno ed elio, gli elementi più leggeri, e solo una percentuale piccolissima di materia è costituita da tutti gli altri messi insieme (ossigeno, ferro, azoto, carbonio, e così via). Il solo modo di spiegare questo fatto in maniera soddisfacente è ipotizzare un universo



inizialmente molto caldo e molto denso, che poi si raffredda rapidamente mentre si espande.

Al momento del Big Bang, molto prima che le stelle e le galassie potessero formarsi, tutta la materia dell'universo era compressa e non esisteva spazio vuoto. Immediatamente dopo il Big Bang (molto meno di un secondo), iniziarono a formarsi particelle subatomiche e, mentre l'universo si espandeva e si raffreddava, queste particelle si riunirono assieme a formare degli atomi. Solo sotto ben precise condizioni di temperatura e di pressione potevano formarsi tali atomi. Se la temperatura fosse stata troppo alta, gli atomi non sarebbero riusciti a rimanere integri e si sarebbero frantumati in un vortice frenetico di particelle ad alta velocità unite a radiazioni. D'altra parte, una volta che l'universo è diventato un po' più grande, la temperatura e la pressione sono diminuite troppo per comprimere gli atomi di idrogeno e di elio tra loro dando origine a elementi diversi e più pesanti. Ecco perché nei primi minuti dell'universo si sono formati principalmente atomi di idrogeno e di elio. Quasi tutti gli altri elementi dovettero aspettare di essere prodotti all'interno delle stelle, dove si ricreano le condizioni di altissima temperatura e pressione e si scatenarono i processi di fusione termonucleare che comprimono gli atomi più leggeri e così facendo ne creano di più pesanti.

Quindi la teoria del Big Bang è l'unica a fornire una spiegazione soddisfacente delle proporzioni di atomi di idrogeno e di elio osservate dagli astronomi.

L'altra prova a sostegno del Big Bang fu dedotta teoricamente prima della sua conferma sperimentale, così come l'espansione dell'universo. Oggi sappiamo che la gran parte della luce che vediamo in giro per lo spazio non è luce stellare, perché l'universo è inondato di luce antica che esiste da molto prima che stelle e galassie si formassero. Meno di un milione di anni dopo il Big Bang, quando l'universo era vecchio solo duecento millesimi rispetto a ora, iniziarono a formarsi i primi atomi. In quel momento lo spazio si rese trasparente alla luce, e le radiazioni iniziarono a viaggiare, coprendo enormi distanze. Questa luce, il bagliore dell'alba universale, si è allungata, mentre lo spazio in cui si muove si è esteso. I calcoli dicono che la sua lunghezza d'onda oggi dovrebbe essere al di là dello spettro visibile; infatti, si colloca nella regione delle microonde. Si chiama «radiazione cosmica di fondo».

Questa radiazione, che inonda l'intero universo, si può catturare con i radiotelescopi come un debole segnale dallo spazio profondo. Fu sentita per la

prima volta negli anni sessanta del secolo scorso, e da allora è stata captata molte volte, con sensibilità sempre maggiori. Sembra incredibile, ma il fruscio di queste flebili onde si coglie nella radio e nella televisione.

Quindi, il fatto che l'universo abbia avuto un inizio ben preciso non è più in dubbio. Le nostre tre prove sono: la radiazione di fondo (il bagliore del Big Bang, con la lunghezza d'onda giusta), le proporzioni relative dei diversi elementi chimici e l'espansione dello spazio che si vede chiaramente col telescopio. E tutte e tre indicano il momento della creazione.

Ora possiamo finalmente mettere a tacere il paradosso di Olbers.

### *La soluzione definitiva*

Ricapitoliamo. Il motivo per cui il cielo di notte è buio non risiede nella finitezza dell'universo: per quanto ne sappiamo, l'universo potrebbe estendersi all'infinito. Non è che le stelle lontane siano troppo fioche: più si guarda lontano, più stelle e galassie si dovrebbero vedere, e la loro luce cumulativa dovrebbe riempire di luce gli spazi tra una stella e l'altra. E non è nemmeno che la luce proveniente da molto lontano è bloccata da polvere o gas che la assorbono: nel tempo, questa materia si sarebbe riscaldata, assorbendo energia dalla luce, e ora risplenderebbe di luce propria. No, la ragione dell'oscurità è più semplice e più profonda di tutte queste spiegazioni errate: il cielo è buio perché l'universo ha avuto un inizio.

La luce viaggia all'incredibile velocità di più di un miliardo di chilometri l'ora, che corrisponde a fare il giro della Terra sette volte in un secondo. Questa velocità rappresenta il limite cosmico dell'universo, perché niente può viaggiare più velocemente della luce. Non è la luce a essere speciale, è piuttosto quella particolare velocità a far parte della struttura stessa dello spazio e del tempo. La luce non pesa e quindi riesce a viaggiare al limite di velocità cosmico. Einstein mostrò questo concetto in maniera molto elegante, nella prima delle sue teorie della relatività, nota col nome di «relatività ristretta» (la incontreremo ancora nei capitoli seguenti), nel 1905. Se proprio lo volete sapere, sì, questa è la teoria che porta all'equazione  $E=mc^2$ .

Eppure, su scala cosmica la velocità della luce non è poi così impressionante. La distanza che ci separa dalle stelle della nostra galassia (per non parlare della distanza tra le galassie) è così grande che la luce ci mette anni a raggiungerci,

anche dalle stelle più vicine.

Il fatto stesso che la velocità della luce sia *finita* ci aiuta a risolvere il paradosso di Olbers. Avendo l'universo circa 14 miliardi di anni, possiamo vedere solo le galassie abbastanza vicine, tanto che la loro luce ha avuto tempo sufficiente per arrivare a noi. L'espansione dello spazio complica le cose, ovviamente: la luce di una galassia lontana dieci miliardi di anni luce sta viaggiando verso di noi da dieci miliardi di anni, ma in questo tempo lo spazio tra noi e la galassia si è dilatato e quindi la galassia è in realtà molto più lontana. Ma in ogni caso, una galassia che sia anche solo due volte più distante è inevitabilmente fuori portata: la sua luce è ancora in viaggio e non la possiamo vedere. Quindi non porta alcuna luminosità al cielo notturno: possiamo vedere solo quel tanto che l'età dell'universo ci permette.

Perciò gli oggetti che vediamo nel cielo sono solo una piccola frazione dell'intero cosmo, chiamata «universo visibile», e anche con i più potenti telescopi non riusciremo mai a vedere al di là di questo orizzonte spaziale. La ragione è che si tratta di un orizzonte anche temporale. Più guardiamo lontano, più vediamo cose lontane nel tempo, perché vediamo la luce che ha lasciato la sua fonte miliardi di anni fa, e quindi vediamo ciò che era allora, non ciò che è adesso. Il limite dell'universo visibile è quindi per noi anche il momento più antico che riusciamo a vedere. Ed ecco ora il trucco finale dovuto all'espansione dello spazio. Se un universo infinito e *statico* (cioè non in espansione) si fosse creato all'improvviso 14 miliardi di anni fa, certamente non riusciremmo a vedere niente che sia più distante di 14 miliardi di anni, quindi non è l'espansione in se stessa che ci impedisce di vedere tutto fino all'infinito. Ma in un universo statico, aspettando un tempo sufficiente, prima o poi la luce delle galassie più lontane arriverebbe a noi. Nel nostro caso, la luce non riesce ad agguantare l'espansione dell'universo, come uno che scende troppo lentamente giù per una scala mobile che intanto sale più in fretta: non arriverà mai in fondo.

Nel capitolo precedente abbiamo stabilito che per risolvere i paradossi di Zenone si deve ricorrere alla scienza più rigorosa e che non basta la pura logica. Con il paradosso di Olbers invece la prima soluzione corretta non arrivò dalla scienza, bensì dalla pura logica intuitiva, e venne da una fonte veramente inaspettata: Edgar Allan Poe, scrittore e poeta americano del secolo XIX.

A trentanove anni, l'anno prima di morire, Poe pubblicò quello che viene considerato il suo lavoro più autorevole: un saggio chiamato *Eureka: un poema*

*in prosa*, uscito nel 1848. Si tratta dell'adattamento di un seminario che ha come sottotitolo *Saggio sull'universo materiale e spirituale*; è un esempio notevole di letteratura. Non ha alcuna credibilità scientifica: ha più a che fare con le intuizioni di Poe sulle leggi naturali. In un certo senso è un trattato di cosmologia in cui Poe indaga sulle origini dell'universo, la sua evoluzione e la sua fine, ed è basato su un misto di logica e ragionamenti azzardati, più che su idee basate su solide fondamenta scientifiche. Per esempio, Poe sviluppa autonomamente il concetto di come si possano applicare le leggi di Newton alla formazione e al moto dei pianeti, ma sbagliando clamorosamente. Ciò nonostante, nascosto nel lavoro, si trova il seguente, famoso, passaggio:

Se la successione delle stelle fosse infinita, lo sfondo del cielo avrebbe una luminosità uniforme, come quella della nostra Galassia, perché non potrebbe esserci assolutamente nessun punto, in tutto lo sfondo, privo di una stella. Il solo modo, perciò, in cui potremmo comprendere i vuoti osservati dai nostri telescopi in tutte le direzioni, sarebbe di supporre che la distanza dello sfondo è così grande che nessun raggio luminoso possa aver ancora avuto il tempo di raggiungerci.

Ecco qui. Il primo a risolvere il paradosso di Olbers non fu uno scienziato, ma un poeta. Alcuni storici sostengono che la descrizione di Poe sia solo un tirare a indovinare, e che solo dopo i calcoli di Lord Kelvin, uno degli scienziati più grandi dell'Ottocento, si può dire che il paradosso sia stato spiegato. Ma Kelvin in sostanza non ha fatto altro che dimostrare matematicamente l'idea di Poe. Ci piaccia o no, Poe ci aveva preso.

Quindi, per rispondere alla nostra domanda iniziale, *perché la notte è buia?* Perché l'universo è iniziato con un grande botto.

### *Risoluzione finale e dimostrazione del Big Bang*

Agli scienziati viene spesso chiesto quali siano le prove del fatto che il Big Bang sia effettivamente avvenuto. Di solito la risposta corretta prevede le tre prove standard discusse in precedenza. Ma non è più facile, e a mio avviso più convincente, rivoltare il paradosso di Olbers? Invece di dire che la ragione per cui la notte è buia è che l'universo ha avuto un inizio esplosivo, e che la luce non ha ancora avuto abbastanza tempo per arrivare fino a noi, non potremmo rivoltare il ragionamento? Per convincersi che il Big Bang è effettivamente avvenuto, basta uscire la notte e ammirare il cielo buio.

Il vero enigma è come mai gli astronomi ci abbiano messo così tanto a capirlo.

## 4. Il diavoletto di Maxwell

### È possibile il moto perpetuo?

Se vi capitasse di incontrare un gruppo di fisici e chiedere loro di scegliere quale sia l'idea scientifica più importante secondo loro, vi potreste aspettare una grande varietà di risposte: il fatto che tutto è costituito da atomi, la teoria evolucionistica di Darwin, la struttura del DNA, il Big Bang. In realtà c'è una buona probabilità che tutti sceglierebbero una cosa chiamata «secondo principio della termodinamica». In questo capitolo esploriamo quest'importante idea e il paradosso che, per più di cent'anni, l'ha portata quasi al punto di rottura.

Il paradosso del diavoletto di Maxwell è un'idea semplice, eppure ha messo alla prova i nomi più grandi della scienza e ha addirittura dato luogo a intere nuove aree di ricerca. E questo perché sfida la più sacrosanta legge della natura: il secondo principio della termodinamica, una regola semplice e profonda sul trasferimento del calore e dell'energia.

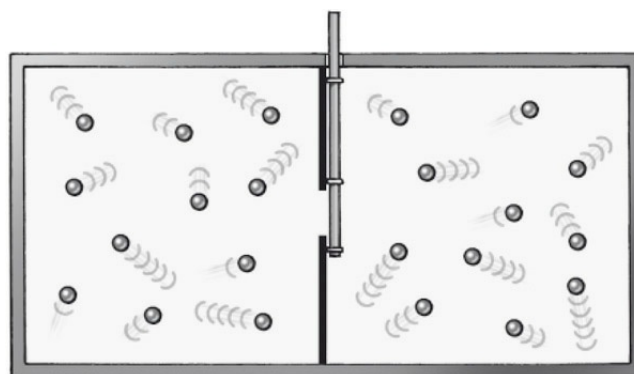
Il secondo principio della termodinamica dice, per fare un esempio, che se mettiamo un pollo congelato sopra una borsa dell'acqua calda (questo è l'esempio che è venuto in mente alla mia famiglia quando cercavo di spiegar loro la cosa) ci si aspetta che il pollo si scongeli un po' e che l'acqua si raffreddi. Non succederà *mai* che il calore vada in senso inverso, rendendo la borsa dell'acqua ancora più calda e il pollo ancora più freddo. Il calore si trasferisce sempre dal corpo più caldo a quello più freddo, mai al contrario, e continua finché non si raggiunge l'equilibrio, cioè non c'è più differenza di temperatura tra i due. Niente di strano, fin qui, si può pensare.

Ora affrontiamo il diavoletto di Maxwell. Immaginiamo una scatola isolata, contenente dell'aria, e divisa in due da una parete isolante. Nel mezzo di questa partizione c'è una porticina che si apre e si chiude molto velocemente quando una molecola d'aria si avvicina da uno dei due lati, lasciando passare la molecola nell'altra metà. La pressione nelle due metà della scatola rimane la stessa, perché se il numero di molecole da una parte aumenta, sarà molto più probabile che da quella parte le molecole si avvicinino alla porta e passino nell'altra metà, riequilibrando la pressione.

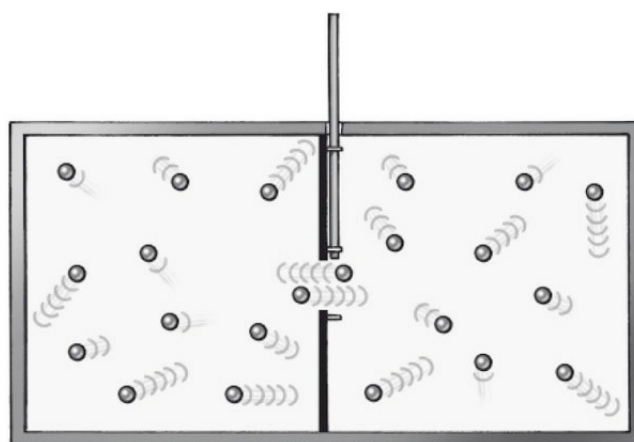
Questo processo potrebbe andare avanti all'infinito e non ci sarebbe mai differenza di temperatura tra i due lati. Per spiegare la cosa bisogna definire il

concetto di «temperatura» di un gas a livello molecolare. In sostanza, più le molecole rimbalzano velocemente, più caldo è il gas. Tutti i gas, compresa l'aria, hanno miliardi e miliardi di molecole che si muovono a caso, a velocità diverse: alcune più lente, altre più veloci, ma la loro velocità media corrisponde a una certa temperatura. Dentro la scatola, alcune molecole che passano attraverso la porta saranno veloci, altre lente. In media, ci dovrebbero essere tante molecole veloci quante sono quelle lente che attraversano la porta da una parte all'altra, e quindi non si dovrebbe creare alcuna differenza di temperatura. Se vi viene in mente che magari le molecole più veloci riusciranno a passare più spesso di quelle lente, potreste avere ragione, ma questo non influenza il nostro ragionamento, perché tante molecole veloci passeranno da una parte all'altra, quante ne passeranno nella direzione opposta.

Se mi avete seguito finora, sono pronto a scatenare il diavolelto.



(a) Prima

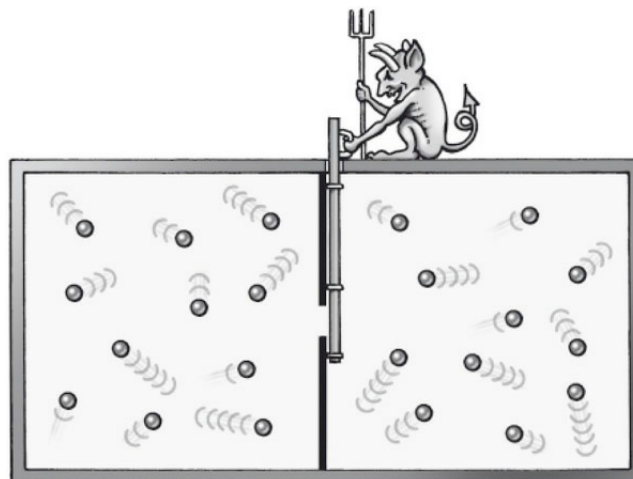


(b) Dopo

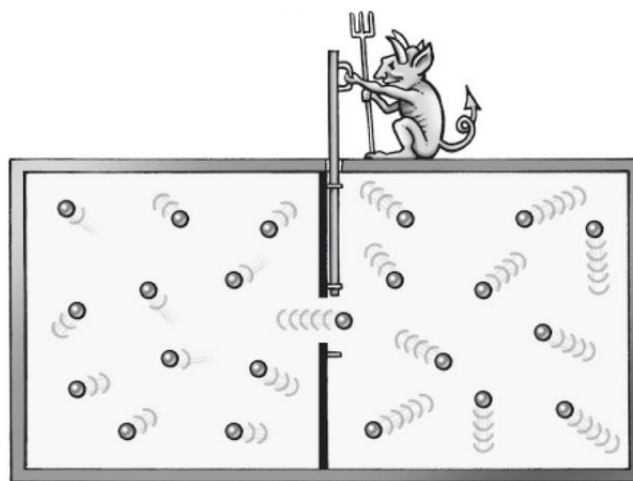
Figura 4.1  
La scatola d'aria di Maxwell.

Il diavolelto di Maxwell è un'ipotetica, minuscola creatura, con una vista tanto acuta da riuscire a vedere le singole molecole d'aria e la loro velocità. Invece di lasciare che la porta si apra e si chiuda a caso, ora la facciamo controllare dal

diavoletto, che lascerà passare tante molecole come prima, ma, basandosi sulle sue osservazioni, adesso farà passare solo le molecole più veloci da sinistra a destra, e solo molecole più lente da destra a sinistra. Con un diavoletto a guardia della porta, equipaggiato dalla sua conoscenza, e senza alcuno sforzo, o dispendio di energia (ricordiamo che la porta si apriva e chiudeva a caso comunque), abbiamo ora un risultato completamente diverso.



(a) Prima



(b) Dopo

Figura 4.2  
Il diavoletto di Maxwell.

A questo punto, potrebbe venire la tentazione di fare un parallelo con il ruolo del presentatore nel paradosso di Monty Hall, che abbiamo considerato nel primo capitolo. Non cadete in tentazione. La conoscenza del presentatore, il fatto che lui sappia quale porta nasconde il premio, influenza solo il modo di calcolare le probabilità e niente di più. La conoscenza del diavoletto di Maxwell gioca un ruolo molto più importante e, come vedremo, è una componente fondamentale del processo fisico generale che dovremo analizzare per risolvere questo paradosso.

Con il diavoletto a guardia della porta, il lato destro della scatola si riempie di molecole più veloci e diventa più caldo, mentre il lato sinistro raccoglie quelle più lente e quindi risulta più freddo. Usando il solo sapere del diavoletto, sembra che siamo riusciti a creare una differenza di temperatura tra le due metà, il che viola il secondo principio della termodinamica.

Quindi, usando niente di più che l'informazione, le azioni del diavoletto di Maxwell sembrano riuscire a rovesciare un processo governato dal secondo principio della termodinamica. Come può essere? Molti grandi scienziati, per più di un secolo, si sono cimentati con questo paradosso, e il lettore sta per scoprire come risolverlo: del resto, come tutti gli altri paradossi apparenti di questo libro, *si può* risolvere, e il secondo principio della termodinamica è salvo.

La ragione per cui questo argomento è ancora così affascinante è il suo collegamento con le macchine del moto perpetuo, ovvero dispositivi che sembrano poter funzionare indefinitamente senza consumare energia. Se infatti il diavoletto di Maxwell riuscisse a violare il secondo principio della termodinamica, dovrebbe essere possibile costruire un congegno meccanico che fa la stessa cosa. Più avanti nel capitolo considereremo alcuni tipi di macchine del genere. A quel punto, spero, sarete convinti della loro impossibilità.

### *Molle, zucchero e ghiaccio*

Ci sono in tutto quattro principi della termodinamica, e tutti hanno a che fare con il modo in cui il calore e l'energia si possono trasformare l'uno nell'altro, ma il più importante è il secondo. Trovo molto divertente il fatto che una delle leggi più importanti di tutta la fisica non è nemmeno riuscita a guadagnarsi il primo posto nella lista dei principi.

Il primo principio della termodinamica è semplice e chiaro: dice che l'energia può cambiare forma, ma non si può distruggere né creare. Di solito viene enunciato in maniera un po' più tecnica, in questo modo: «La variazione di energia interna di un sistema è uguale alla quantità di calore fornita al sistema meno il lavoro compiuto dal sistema sull'ambiente». Questo significa praticamente che «ci vuole energia per fare qualunque cosa»: una macchina ha bisogno di benzina, un computer di elettricità, noi consumiamo energia semplicemente per restare vivi e per questo abbiamo bisogno di cibo: sono tutti esempi di come diverse forme di energia devono essere fornite a un sistema



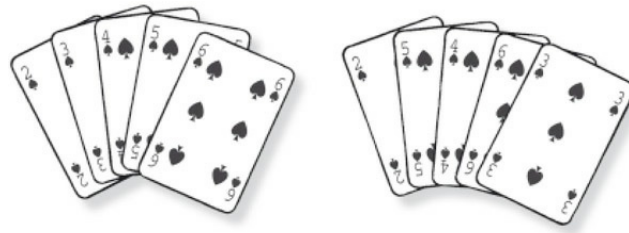
affinché riesca a produrre «lavoro utile». La parola «utile» in questo contesto è importante, perché rende conto del fatto che alcune forme di energia non si possono mettere a frutto: per esempio, il calore dovuto all'attrito o il rumore di un motore semplicemente sono dissipati nell'ambiente circostante. Il primo principio quindi getta semplicemente le basi per il secondo, e più importante. Questo afferma che tutto si degrada, si raffredda, si rovina, invecchia e decade. Spiega perché lo zucchero si scioglie nell'acqua calda, ma non si ricompone mai. Spiega perché un cubetto di ghiaccio si scioglierà inevitabilmente in un bicchiere d'acqua, perché il calore si trasferirà sempre dall'acqua, più calda, al ghiaccio, più freddo, e mai viceversa.

Ma perché dev'essere così? Se riuscissimo a guardare il mondo in termini di collisioni e interazioni individuali di atomi e molecole, non riusciremmo a capire in che direzione sta andando il tempo (con questo voglio dire che se guardassimo il processo in un film, non riusciremmo a capire se è riprodotto nel verso giusto o al contrario). Su scala atomica, tutti i processi fisici sono reversibili. Se un neutrino interagisce con un neutrone, al loro posto si creano un protone e un elettrone che si allontanano tra loro, ma allo stesso modo, un protone e un elettrone potrebbero entrare in collisione e creare un neutrone e un neutrino che si allontanano. Le leggi della fisica permettono entrambi i processi, in avanti o all'indietro nel tempo.

Ma questo è in netto contrasto con ciò che accade intorno a noi nella vita di tutti i giorni, dove non c'è alcun dubbio su quale sia la direzione nella quale scorre il tempo. Per esempio non vedremo mai il fumo convergere dentro un camino e venire risucchiato compostamente all'interno della casa. Allo stesso modo, non si può ricomporre lo zucchero in una tazza di caffè una volta che si è sciolto, e non si vedrà mai un mucchietto di cenere nel camino «sbruciare» e ridiventare un ciocco di legno. Che cosa distingue questi eventi da quelli a scala atomica, che pure formano tutto ciò che esiste? Com'è possibile che quasi tutti i fenomeni attorno a noi non possano accadere alla rovescia? In quale punto, nel passaggio dagli atomi al fumo del camino, il processo diventa irreversibile?

A un esame più accurato, si osserva che i processi descritti sopra non sono tanto impossibili, quanto in realtà estremamente improbabili da rovesciare. È assolutamente possibile, e in accordo con le leggi della fisica, che lo zucchero sciolto si ricomponga in un cubetto nella tazza di caffè. Ma se osservassimo questo fenomeno, avremmo ragione di sospettare qualche tipo di trucco, perché

la probabilità di un avvenimento del genere è così bassa da poter essere trascurata.



Le cinque carte a sinistra sono in uno stato a entropia più bassa di quello delle carte a destra.

Figura 4.3  
Entropia come disordine.

Per aiutarvi a capire un po' meglio il secondo principio della termodinamica, devo introdurre il concetto di «entropia». Apparirà spesso in questo capitolo, quindi è importante averne un'idea chiara. Devo avvertirvi però che per quanto io tenti di spiegarlo chiaramente, probabilmente vi resterà un senso di incompiutezza.

L'entropia è un concetto complicato da definire, perché rappresenta cose diverse a seconda della situazione. Ecco un paio di esempi per illustrarlo. Una definizione di entropia è la misura del disordine, di quanto le cose sono mescolate. Un mazzo di carte nuovo, con tutti i semi separati e le carte in ordine crescente in ogni seme, ha entropia bassa. Se meschiamo il mazzo un po', l'ordine si perde e l'entropia del mazzo aumenta. Ora ci chiediamo, cosa succede alle carte quando le mescoliamo ancora? La risposta è ovvia: è infinitamente più probabile che le carte risultino ancora più scompigliate piuttosto che ritornino alla loro configurazione ordinata iniziale. Quindi, continuando a mescolare, l'entropia aumenta. Quando le carte sono completamente disordinate, si dice che l'entropia è massima, e mescolarle ancora non aumenta il suo valore. Il mazzo originale è una configurazione unica delle carte, mentre ci sono moltissimi modi per le carte di essere scompaginate, per cui è estremamente più probabile che l'atto di mescolarle vada in una direzione sola: da ordinate a disordinate, da entropia bassa a entropia alta. Questo è lo stesso tipo di irreversibilità che riguarda un cubetto di zucchero parzialmente dissolto nel tè: continuando a rimestare si dissolverà sempre di più.

Il secondo principio della termodinamica è quindi di natura statistica e non si basa su qualche proprietà specifica del mondo fisico. È solo incredibilmente più

probabile che stati a bassa entropia si evolvano in stati ad alta entropia piuttosto che il contrario.

Per darvi un'idea delle probabilità di cui stiamo parlando, partendo da un mazzo di carte completamente scompigliato, la probabilità che mescolandole si ritrovino divise per seme è circa la stessa di vincere alla lotteria, non una o due volte, ma nove volte consecutive!

D'altra parte, l'entropia si può anche considerare come la misura della capacità che ha un sistema di consumare energia per portare a termine un compito. In questo caso, più alta la capacità di consumare energia, più bassa è l'entropia. Per esempio, una batteria carica ha entropia bassa, che aumenta man mano che la batteria si scarica. Quindi, se prendiamo un giocattolo a molla, non si viola il secondo principio della termodinamica quando si carica la molla, perché il sistema (il giocattolo) non è più isolato dall'ambiente circostante (noi). L'entropia del giocattolo diminuisce, ma noi compiamo del lavoro per caricare la molla e la nostra entropia aumenta di una quantità che compensa ed eccede la diminuzione dell'entropia del giocattolo. Quindi, sommando tutto, l'entropia totale del sistema «noi+giocattolo» aumenta.

Il secondo principio della termodinamica definisce pertanto la direzione del tempo. Potrebbe apparire un'affermazione banale: certamente il tempo scorre dal passato verso il futuro, ma «scorre dal passato verso il futuro» è una descrizione soggettiva del processo. Per arrivare a una definizione più scientifica, immaginiamo un universo senza vita, così da evitare la nostra soggettiva distinzione tra il passato (ciò che ricordiamo, che è già successo) e il futuro (quello che deve ancora succedere). È più significativo e più utile, dal punto di vista scientifico, dire che il tempo scorre nella direzione in cui l'entropia cresce, perché in questo modo si rimuove la soggettività del nostro cervello dal contesto, definendo la direzione del tempo in termini di un processo fisico. Questa definizione si applica non solo a sistemi singoli, ma anche all'intero universo. Quindi, se qualcuno trovasse un sistema isolato in cui l'entropia diminuisce, allora si potrebbe dire che il tempo stesso ha cambiato direzione, e questo è troppo sconvolgente anche solo da prendere in considerazione (in questo capitolo, in ogni caso!)

Ecco cosa dice l'astronomo inglese Arthur Eddington sull'importanza del secondo principio della termodinamica:

La legge secondo cui l'entropia cresce sempre, il secondo principio della termodinamica, detiene a mio avviso il primato tra le leggi della Natura... Se scoprite una teoria che contraddice il secondo principio della termodinamica, per voi non c'è speranza: sprofonderete nell'umiliazione più nera.

A volte si trovano esempi in cui sembra che l'entropia diminuisca. Per esempio, un orologio è un sistema altamente ordinato e complesso che scaturisce da un insieme di pezzetti di metallo. Questo viola il secondo principio? Certamente no: è solo un caso più complicato del giocattolo a molla. L'orologiaio deve compiere del lavoro per costruire l'orologio, e questo aumenta la sua entropia. Inoltre, fondere il metallo e fabbricare i meccanismi produce una certa quantità di scarti che compensa ed eccede la diminuzione di entropia dovuta alla creazione dell'orologio.

Ecco perché il diavoletto di Maxwell si presenta come un bel rompicapo: sembra riuscire a compiere un'azione simile a quella dell'orologiaio, cioè fa diminuire l'entropia della scatola, organizzando e ordinando le molecole d'aria, ma senza spostarle in prima persona. In generale, se l'entropia sembra diminuire, si scopre sempre che in realtà il sistema considerato non è isolato dall'ambiente circostante, e, allargando lo sguardo, si vede che l'entropia totale in realtà aumenta. Si possono osservare molti processi sulla Terra che sembrano ridurre l'entropia sul pianeta, dall'evoluzione della vita alla costruzione di strutture molto complesse. Tutto, dalle macchine, ai gatti, ai calcolatori, ai cavoli, ha entropia minore del materiale grezzo di cui è fatto. Nonostante ciò, non c'è violazione del secondo principio: non dobbiamo dimenticare che nemmeno l'intero pianeta è isolato dall'ambiente circostante. Dopo tutto, quasi tutta la vita sulla Terra, e quindi tutte le strutture a bassa entropia, esistono grazie alla luce del Sole. Se si considera il sistema combinato «Terra+Sole», si vede che l'entropia totale aumenta, perché le radiazioni che il Sole dissemina nello spazio (parte delle quali sono assorbite dalla Terra), contribuiscono ad aumentare l'entropia del sistema molto più della corrispondente diminuzione di entropia che avviene sulla Terra, dove le radiazioni sono usate come carburante per la vita. Un cavolo, per esempio, prende l'energia proveniente dal Sole attraverso la fotosintesi e la usa per svilupparsi, moltiplicando il numero di cellule altamente organizzate che lo costituiscono, diminuendo il proprio stato di entropia.

È chiaro allora perché, nel corso degli anni, gli scienziati si siano cimentati alla ricerca di situazioni in cui sembrasse che il secondo principio della

termodinamica venisse violato. Il più insigne fra questi fu il fisico scozzese James Clerk Maxwell, famoso per aver scoperto che la luce consiste di campi magnetici ed elettrici oscillanti. Durante un seminario, tenuto in pubblico nel 1867, descrisse il suo famoso esperimento teorico nel quale il diavoleto immaginario parte in missione per sconfiggere il secondo principio della termodinamica, controllando la porticina tra i due lati della scatola. La sua azione sulla porticina corrisponde a quella di una valvola che lascia passare le particelle con più energia, più calde, da una parte, e quelle più lente e fredde dall'altra. Così facendo, mette ordine tra le molecole, e rende una parte della scatola più calda e l'altra più fredda. La cosa è in completa violazione del secondo principio, perché apparentemente il diavoleto non fa alcun lavoro per aprire e chiudere la porta, che si sarebbe aperta e chiusa a caso comunque. Eppure l'entropia sembra diminuire.

### *La valvola*

Come si risolve questo paradosso? In che modo l'entropia totale della scatola non diminuisce? E se diminuisce, cosa ne facciamo del secondo principio della termodinamica? Affrontiamo la questione da fisici: rimuoviamo tutti i particolari che non sono essenziali per il ragionamento, in questo caso sostituendo il diavoleto con un meccanismo che agisce nello stesso modo. Possiamo ora chiederci se esiste un processo meccanico che si comporti come il diavoleto, e la risposta è sì: il diavoleto, in un certo senso, funziona come una valvola. Possiamo quindi indagare se sia possibile usare una valvola per creare uno squilibrio tra le due parti della scatola, diminuendo l'entropia, e fornendo un modo per produrre energia. Anche solo a prima vista, la faccenda puzza. Dopo tutto, se fosse possibile, allora il problema mondiale del rifornimento di energia sarebbe risolto; questa considerazione, da sola, dovrebbe convincerci che l'eventualità di successo sia remota.

Come possiamo essere sicuri, però, che una valvola non possa in nessun modo creare energia a partire da uno stato di equilibrio? Forse il secondo principio non è poi così sacrosanto; del resto, credevamo tutti che la legge di gravitazione di Newton fosse perfetta, finché non arrivò Einstein e la sostituì con una legge completamente diversa e più accurata: la teoria della relatività generale. Forse c'è qualche scappatoia ingegnosa e magari qualcuno sufficientemente

intelligente, coraggioso e visionario può sfruttarla per sostituire il secondo principio della termodinamica con una teoria più veritiera.

Sfortunatamente non è così. La teoria di Newton si basa sulla scoperta di una formula matematica che descrive ciò che si osserva in natura, cioè il modo in cui gli oggetti si attraggono in funzione della loro massa e della loro distanza. Einstein scoprì che questa formula non è sbagliata, solo approssimata, e che esiste un modo più profondo e più corretto per descrivere la gravità in termini di curvatura dello spazio e del tempo, e, ahinoi, per mezzo di una matematica molto più complicata.

Il secondo principio della termodinamica è diverso. Sebbene la sua origine risieda nelle osservazioni, la sua spiegazione è puramente logica e statistica e oggi il principio è supportato da fondamenta più forti e più precise delle sole osservazioni. Einstein stesso scrisse che «è l'unica teoria fisica di contenuto universale che sono convinto non verrà mai confutata».

Quindi immaginiamo la versione semplificata del diavoleto di Maxwell e vediamo cosa succede. Se accettiamo che qualunque «squilibrio» spontaneo creato tra i due lati della scatola corrisponda a un calo di entropia, allora possiamo sostituire la differenza di temperatura tra i due lati con una differenza di pressione. In effetti, anche una differenza di pressione si può usare per produrre lavoro utile (come vedremo in un momento), e anch'essa corrisponde a uno stato di minore entropia rispetto alla situazione in cui entrambi i lati hanno la stessa pressione. Ora, però, stiamo considerando una situazione in cui, invece di avere molecole più veloci da una parte e più lente dall'altra, abbiamo semplicemente più molecole da una parte e meno dall'altra, il che produce una differenza di pressione. A livello molecolare, la pressione si descrive infatti come il numero di molecole che rimbalzano contro le pareti.

Per convincerci che una differenza di pressione si può usare per produrre lavoro utile, consideriamo l'operazione manuale di aprire la partizione tra i due lati. Se uno contiene aria a pressione più alta, l'aria fluirà verso l'altro lato per riequilibrare la situazione (con corrispondente aumento di entropia). Questo flusso d'aria si potrebbe usare per produrre lavoro utile; per esempio potrebbe azionare una turbina a vento e generare un pochino di elettricità. Chiaramente, creare uno squilibrio di pressione del genere equivarrebbe a immagazzinare energia, come caricare una molla o una batteria. E questo può accadere spontaneamente solo in violazione del secondo principio della termodinamica.

Il tipo più semplice di valvola che potremmo usare a questo scopo è una porticina che si apre solo in una direzione, e che permette ad alcune molecole d'aria di passare da sinistra a destra quando le sbattono contro, aprendola, ma con una molla che la richiuda molto velocemente subito dopo. Le molecole che la colpiscono da destra tenderanno a tenerla chiusa. Sfortunatamente, un meccanismo del genere non funzionerà mai, perché non appena si crea la minima differenza di pressione tra i due lati, la pressione delle molecole che colpiscono la porta da sinistra non riuscirà mai a superare la pressione (maggiore) delle molecole di destra, che la tengono chiusa.

A questo punto si potrebbe pensare che il meccanismo smetterà di funzionare solo quando la differenza di pressione è tale che il lato destro (a pressione maggiore) riuscirà a fermare le molecole da sinistra, impedendo loro di aprire la porta, ma sicuramente il processo riuscirà perlomeno a iniziare, e a creare una piccola differenza di pressione, quando le prime molecole riescono a passare da sinistra a destra, e perfino una piccolissima differenza di pressione viola il secondo principio della termodinamica. Una piccolissima differenza di pressione potrebbe azionare una micro-turbina e creare una minuscola quantità di elettricità. Il processo si potrebbe ripetere moltissime volte, portando a immagazzinare sempre maggiori quantità di elettricità, e quindi alla fine saremmo nei guai. Dobbiamo capire perché non si riesce a creare nemmeno un'infinitesima differenza di pressione, altrimenti il secondo principio è a rischio.

Fino a ora abbiamo lavorato ipotizzando che singole molecole riescano ad aprire una porta fatta di miliardi di miliardi di molecole (di qualche materiale). In realtà, se osserviamo su scala molecolare, allora anche la porta dev'essere in quella scala, e a quel livello le molecole della porticina si muovono e vibrano anch'esse, in maniera casuale. Perfino una sola molecola d'aria che le colpisca da sinistra, cercando di aprire la porta, cederà parte della propria energia alle molecole della porta, facendole muovere un po' di più, e quindi il risultato sarà che la porticina si aprirà e chiuderà a caso, facendo passare alcune molecole per il verso opposto. Naturalmente, non ci sarà esattamente una molecola che entra per ognuna che esce, però quando moltissime molecole bombardano la porta da entrambi i lati, la porta inizierà a vibrare costantemente, a livello molecolare, e quindi non funzionerà mai come una valvola.

Lo stesso ragionamento si applica se si considera la possibile differenza di

temperatura, anziché di pressione. Il calore non è altro che la vibrazione delle molecole e si può trasferire mediante collisione, quindi si applica alle molecole della porta tanto quanto a quelle d'aria. Perciò, ogni volta che una molecola veloce colpisce la porta da sinistra e la apre, trasferisce energia alle molecole della porta, facendole muovere un po' di più. Questa energia (calore) sarà trasferita alle molecole d'aria circostanti, quindi parte dell'energia della molecola veloce tornerà all'interno del lato della scatola da cui proveniva. L'energia rimanente sarà trasferita al lato destro, e alla fine sarà dissipata durante il costante bombardamento della porticina da destra, e questa energia finirà anch'essa prima o poi nel lato sinistro. Alla fine ci saranno tante molecole veloci a destra come a sinistra.

La lezione è la seguente: la porticina, che dovrebbe funzionare come una valvola, reagendo solo alle collisioni provenienti da una parte della scatola non si può essa stessa separare dal processo di trasferimento di energia. Se è abbastanza sensibile da reagire all'azione di singole molecole, allora è abbastanza sensibile da venirne influenzata, e quindi non potrà mai agire da isolante tra i due lati.

*Ma il diavoletto è più intelligente di così...*

Voglio presentarvi uno scienziato e inventore ungherese di nome Leo Szilárd. Durante un intenso periodo di lavoro, tra il 1928 e il 1932, quando aveva poco più di trent'anni, Szilárd inventò alcune tra le macchine più importanti della storia, usate ancora oggi nella ricerca scientifica: l'acceleratore di particelle nel 1928, il microscopio elettronico nel 1931 e il ciclotrone nel 1932. Incredibilmente, in tutti e tre i casi, non si prese la briga di pubblicare i suoi lavori, di registrare un brevetto o almeno di costruire dei prototipi. Tutte e tre le invenzioni furono sviluppate da altri sulla base delle sue idee; poi, due di questi sviluppatori vinsero il premio Nobel proprio grazie a queste invenzioni (Ernest Lawrence per lo sviluppo del ciclotrone ed Ernst Ruska per la costruzione del primo microscopio elettronico).

Fu proprio durante questo periodo di intensa creatività, nel 1929, che Szilárd pubblicò un lavoro fondamentale che avrebbe suscitato molto scalpore. S'intitolava *Sulla diminuzione di entropia in un sistema termodinamico per intervento di un essere intelligente*, e in esso propose una versione del



diavoletto di Maxwell che divenne nota come «macchina di Szilárd». In questa versione non si ha un puro processo fisico al cuore del paradosso: piuttosto, Szilárd sostenne che erano proprio l'intelligenza e le conoscenze del diavoletto sullo stato delle molecole a fare la differenza, esattamente come temeva Maxwell. Il paradosso non si può risolvere con un dispositivo meccanico, per quanto ingegnoso sia.

Ricordiamo in cosa consiste il paradosso. Pensare che le molecole d'aria, rimbalzando nella scatola, creino spontaneamente uno squilibrio di pressione o temperatura tra i due lati della scatola semplicemente non funziona, per quanto la valvola o la porticina operi in maniera ingegnosa: ci sarà sempre bisogno di aiuto esterno. La cosa notevole è che quest'aiuto può arrivare, sembra, sotto forma di pura informazione.

A quanto pare siamo d'accordo: cerchiamo di incorporare un concetto astratto come l'informazione, o forse perfino la coscienza, nel mondo incosciente e senza pensiero delle leggi fisiche. Forse saremo costretti a concludere che il secondo principio della termodinamica vale solo in un universo senza vita? Che c'è qualcosa di magico riguardo alla vita, impossibile da racchiudere nelle leggi della materia? Al contrario: la soluzione di Szilárd alla fine fu una brillante conferma dell'universalità del secondo principio della termodinamica e della crescita dell'entropia.

Immaginiamo che ci siano solo cento molecole nella scatola, cinquanta a destra e cinquanta a sinistra, distribuite in maniera casuale, cioè tante veloci quante lente da ciascuna parte, così che la temperatura media sia la stessa nelle due metà. (Naturalmente, nella realtà ci saranno miliardi di molecole, ma semplifichiamo le cose). Il diavoletto, controllando con cura quando aprire la porta, trasferisce le venticinque molecole più veloci da una parte all'altra e le venticinque molecole più lente nella direzione opposta. Questo richiede che la porticina venga aperta cinquanta volte. Si potrebbe pensare che l'energia necessaria per aprire e chiudere la porta, per quanto piccola, sia il modo con cui il bilancio dell'entropia viene ristabilito. Quest'energia esterna equivarrebbe a caricare un giocattolo a molla, cioè: si riduce l'entropia di una cosa facendo del lavoro che ha l'effetto di aumentare l'entropia da qualche altra parte. Ma se il diavoletto non ha alcuna informazione sullo stato delle molecole (cioè non sa quali vanno più lente e quali più veloci), e semplicemente apre e chiude la porticina cinquanta volte a caso, lasciando passare molecole da destra a sinistra

e viceversa, allora i due lati resteranno, in media, alla stessa temperatura, dal momento che si scambieranno tante molecole veloci quante lente. Quindi, senza informazione (o se scegliamo di non usarla), non vedremo alcuna riduzione nell'entropia. Eppure il diavoletto ha usato lo stesso ammontare di energia per chiudere e aprire la porta cinquanta volte. Chiaramente, lo sforzo richiesto per aprire la porta non ha niente a che fare con il processo di selezione.

L'intuizione di Szilárd fu quella di trovare un modo di incorporare l'informazione nel sistema. Il suo ragionamento fu che il diavoletto deve consumare energia non tanto per aprire la porta ma nell'azione di misurare la velocità delle molecole. Quindi, raccogliere informazioni ha sempre un costo energetico, e quest'energia viene dissipata per organizzare l'informazione nel cervello. In fondo l'informazione non è altro che uno stato ordinato del cervello, o dei blocchi di memoria in un calcolatore, cioè uno stato a bassa entropia. Più informazione si immagazzina, più strutturato e organizzato diventa il cervello, e più bassa risulta la sua entropia.

Questo stato a bassa entropia, in cui l'informazione è immagazzinata, ci dà la possibilità di compiere lavoro utile. Quindi, l'informazione è un po' come una batteria che immagazzina energia potenziale, che si può usare per diminuire l'entropia da qualche altra parte.

Ovviamente, il diavoletto di Maxwell non sarà mai completamente efficiente: userà energia per ottenere le necessarie informazioni sulla posizione di tutte le molecole e sulla temperatura, e potrà quindi dissipare altra energia per usare quell'informazione al fine di separare le molecole. Quindi l'energia usata all'inizio per arrivare alle informazioni giuste aumenta l'entropia dell'ambiente circostante; altra energia usata dal diavoletto avrà aumentato l'entropia da qualche altra parte.

In conclusione possiamo considerare un calcolatore (o un cervello) come una macchina che riceve energia utile, a bassa entropia, come l'elettricità (o il cibo), e la trasforma in informazione (al contrario di energia inutile, ad alta entropia come il calore o il rumore di un motore). Questa informazione si può usare, o trasferire, in un sistema fisico per diminuire la sua entropia, organizzando il sistema, per esempio, restituendo in cambio l'abilità di compiere lavoro utile. Siccome nessun passaggio in questo processo sarà efficiente al 100%, una certa quantità di calore si perderà per strada. Quest'aumento di entropia, associato

alla perdita di energia sprecata nel processo, si somma all'aumento di entropia dell'ambiente circostante dovuto all'energia necessaria al diavoleto per sostenersi, durante lo sforzo di accumulare l'informazione fin dall'inizio. Insieme compensano ed eccedono la diminuzione di entropia che risulta dall'uso dell'informazione. Il secondo principio della termodinamica è salvo.

*Ma che cosa vuol dire «casuale»?*

Diamo un'occhiata più attenta al secondo principio della termodinamica e alla questione dell'ordine e del disordine per arrivare a capire l'entropia fino in fondo. Nell'esempio delle carte mescolate non sembravano esserci dubbi sul fatto che l'entropia di un mazzo ordinato, con tutte le carte divise per seme e in ordine ascendente, è bassa, e che un mazzo mescolato a caso ha entropia più alta. Ma se ci sono solo due carte? Poiché ci sono solo due modi di sistemare le carte, non ha nessun senso cercare di distinguere tra una configurazione più ordinata e una meno ordinata. E se le carte sono tre, per esempio il due, il tre e il quattro di cuori? Be', si potrebbe pensare che la configurazione «due, tre, quattro» sia più ordinata, e quindi a entropia più bassa, di, per dire, «quattro, due, tre». La prima configurazione è in ordine ascendente, dopo tutto. Ma se le tre carte fossero tutti due, uno di cuori, uno di denari e uno di picche? Esiste una configurazione più ordinata delle altre? L'unica differenza tra le tre carte è il seme, e non il valore in questo caso. Come può l'entropia dipendere dall'«etichetta» che mettiamo sulle carte? La sequenza «due di cuori, due di denari, due di picche» non ha né più né meno entropia di qualunque altra.

Sembrerebbe che la nostra definizione di entropia come «quantità di disordine» non sia completamente adeguata, perché non abbiamo una soddisfacente definizione di «disordine». In certi casi è ovvia, ma non in altri. Portiamo questo ragionamento all'estremo: ecco un gioco di carte che dimostra cosa voglio dire. Prendiamo un mazzo di carte e mescoliamolo finché non ci appare completamente disordinato. Ora, attenti, lo mescolo ancora un po'. Però a questo punto, dichiaro di aver messo le carte in una configurazione molto speciale. È un'affermazione notevole, perché sembra proprio che io abbia solo mescolato ancora un po' le carte nello stesso modo di prima. Le giro e le dispongo sul tavolo, e voi rimanete delusi nel constatare che sembra una disposizione assolutamente casuale, tanto quanto prima. Questo non è certo

quello che chiamereste «configurazione speciale».

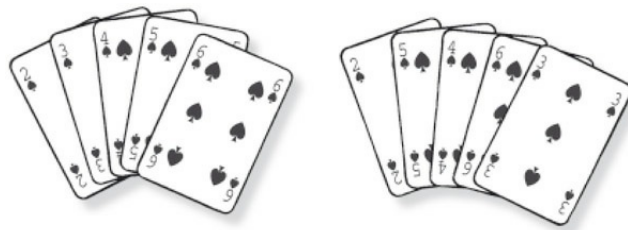
E invece lo è. Vedete, potrei scommettere qualunque somma che non riuscireste mai a mescolarlo in modo da ottenere esattamente lo stesso ordinamento. Le probabilità di riuscire a farlo sono ovviamente tante quante quelle di mescolare un mazzo di carte fino a riprodurre l'ordinamento iniziale, diviso per semi, in ordine ascendente, cioè circa una su  $10^{80}$ , che significa 1 seguito da 80 zeri. In pratica, lasciate perdere. Quindi, se guardiamo la cosa da questo punto di vista, vediamo che la mia sequenza «casuale» di carte è tanto speciale quanto la configurazione originale del mazzo nuovo, non mescolato. E l'entropia? Sembra che non sia possibile sostenere che l'entropia aumenta mescolando il mazzo, perché la configurazione finale delle carte è tanto improbabile quanto quella originale, per quanto sembri completamente casuale.

Sono sicuro che avete il sospetto che vi stia prendendo in giro, e in realtà c'è ovviamente qualcosa di speciale nel mazzo ordinato rispetto a qualunque configurazione «speciale» di carte distribuite casualmente. Il fatto è che l'entropia è una misura della *casualità* e non del disordine. Può sembrare solo un gioco di parole, ma in realtà ci dà una definizione più precisa. Tecnicamente, il termine usato per misurare livelli relativi di «specialità» è «casualità algoritmica».

La parola «algoritmo» si usa in informatica per indicare una sequenza di istruzioni in un programma e la casualità algoritmica si definisce come la lunghezza del programma più breve che ha come risultato una data sequenza di carte da gioco (o di numeri). Quindi, con l'esempio precedente di tre carte, chiaramente per ottenere «due, tre, quattro» le istruzioni più brevi sono: «metti le carte in ordine ascendente», mentre per avere «quattro, due, tre» ci vuole qualcosa come «inizia con il numero più alto e poi in ordine ascendente», ma forse a quel punto è più breve la descrizione diretta: «prima il quattro, poi il due, poi il tre». In ogni caso, queste istruzioni hanno una casualità algoritmica leggermente più alta delle prime, e quindi la sequenza «quattro, due, tre» ha entropia leggermente più alta di «due, tre, quattro».

Tutto ciò diventa più chiaro se consideriamo l'intero mazzo di 52 carte. È relativamente semplice istruire un calcolatore a riprodurre il mazzo ordinato: «inizia con i cuori e metti le carte in ordine ascendente, l'asso in cima, poi fai lo stesso con i quadri, i fiori e le picche». Ma come si fa a scrivere un programma

che riproduca la sequenza speciale di carte mescolate? Non ci sono scorciatoie: le istruzioni devono essere esplicite, carta per carta: «prima il re di fiori, poi il due di denari, poi il sette di cuori, ...» fino alla fine. Se il mazzo non è completamente disordinato, può darsi che nel mezzo ci saranno brevi successioni di carte non mischiate in cui si ritrova l'ordine originale, che ci forniranno una scorciatoia per rendere il programma un po' più breve. Per esempio se il due, il tre, il quattro, il cinque e il sei di picche sono ancora in fila, allora si può scrivere l'istruzione «inizia con il due di picche e sistema le quattro carte successive dello stesso seme in ordine ascendente», invece di elencare le quattro carte una per una.



Le cinque carte a sinistra sono in uno stato a più bassa entropia di quelle a destra *perché ci vuole meno informazione per descrivere la loro configurazione*, non perché questa sia più speciale.

Figura 4.4  
Entropia come casualità.

La lunghezza del programma magari non vi dice molto, ma si può aggirare questo modo di definire la casualità algoritmica. Dato che il nostro cervello, come quello del diavoletto di Maxwell, è in fondo simile a un calcolatore che macina istruzioni, possiamo sostituire il concetto di algoritmo computazionale con la nostra capacità di memorizzazione. Se vi presentassi un mazzo di carte mischiato e vi chiedessi di metterlo nella configurazione iniziale e ordinata, riuscireste a farlo senza fatica. Ma se vi mostrassi la mia configurazione «speciale», ottenuta dopo aver ben mescolato le carte, e poi vi dessi un altro mazzo e vi chiedessi di riprodurla, senza guardare sarebbe quasi impossibile. In pratica, ci vuole molta più informazione per riprodurre la configurazione disordinata che la configurazione ordinata. Più informazioni si hanno su un sistema, più si riesce a ordinarlo e diminuirne l'entropia.

### *Macchine per il moto perpetuo*

Nel corso della storia molti spiriti intraprendenti hanno cercato di inventare una macchina del moto perpetuo che potesse funzionare e produrre lavoro utile

indefinitamente, o, per dirla più semplicemente, che producesse più energia di quella che consumava, anche solo per continuare a girare. Questo è impossibile.

Prima di tutto vorrei chiarire che bisogna sempre stare molto attenti quando si sostiene che una certa cosa è scientificamente impossibile. D'altra parte, la natura statistica del secondo principio della termodinamica ci ha insegnato che non è completamente impossibile per un cubetto di ghiaccio ricostituirsi spontaneamente in una tazza di acqua calda. Però è così incredibilmente improbabile che ci vorrebbe un tempo molto più lungo dell'età dell'universo perché accada e quindi lo possiamo escludere. Di solito, quando diciamo che un evento è impossibile, vogliamo dire «impossibile secondo la nostra comprensione di come funziona la natura e secondo le teorie fisiche attualmente accettate». Naturalmente, potremmo sbagliarci, ed è lì il briciolo di speranza che incoraggia alcuni inventori a progettare macchine del moto perpetuo sempre più ingegnose.

Queste macchine si possono dividere in due categorie. Le prime tentano di produrre lavoro senza apporto di energia, cioè tentano di violare il primo principio della termodinamica, una legge sulla conservazione di energia che asserisce che in un sistema chiuso non si può creare nuova energia. Una macchina che sembra creare energia dal nulla sarà del primo tipo.

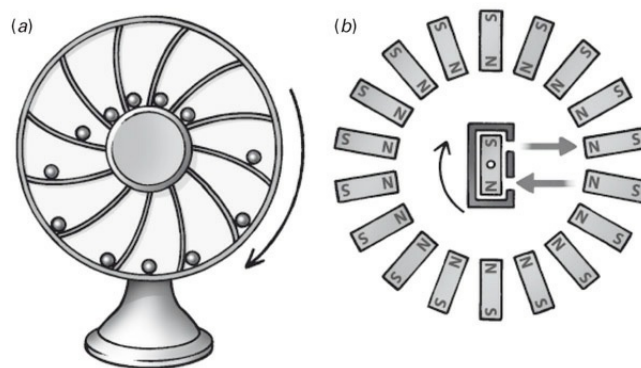
Una macchina del moto perpetuo del secondo tipo, invece, senza violare il primo principio della termodinamica, converte energia termica in lavoro meccanico senza diminuire l'entropia, e così facendo viola il secondo principio della termodinamica. La sottigliezza qui è che il calore è convertito in lavoro senza che l'entropia aumenti in qualche altro posto. Come abbiamo osservato prima, una maniera di enunciare il secondo principio della termodinamica è che il calore fluisce dalle cose più calde verso quelle più fredde; così facendo, l'entropia aumenta e si può ricavare lavoro utile da questo processo per diminuire l'entropia da qualche altra parte, a patto che la diminuzione non sia maggiore dell'aumento causato dal trasferimento di calore. Una macchina che estrae energia dal calore, senza che il calore fluisca verso un oggetto più freddo, come nel caso del diavoleto di Maxwell, è una macchina del moto perpetuo del secondo tipo.

Ci sono naturalmente molti dispositivi che obbediscono alle leggi della termodinamica prendendo energia da qualche fonte esterna, oscura e difficile da individuare, come la pressione o l'umidità dell'aria o le correnti oceaniche. Non

sono però macchine del moto perpetuo, perché non violano alcuna legge della fisica: bisogna solo individuare l'origine dell'energia che le mantiene in moto.

Alcune macchine, con ruote che girano, o pendoli, sembrano a prima vista riuscire ad andare avanti all'infinito senza alcuna fonte di energia, ma non è così. Sono semplicemente molto efficienti a non disperdere l'energia iniziale che le ha messe in moto. Inevitabilmente, alla fine rallenteranno, perché nessuna macchina può essere efficiente al 100%: ci sarà sempre una dispersione a causa dell'attrito con l'aria, o tra le parti in moto, per quanto siano ben lubrificate.

In linea di principio, quindi, il moto perpetuo è possibile a patto che non si disperda energia nell'ambiente circostante. Naturalmente, qualunque tentativo di estrarre energia da un dispositivo simile lo farà fermare.



(a) *La ruota a ballotte.* Questa idea di macchina del moto perpetuo risale all'India dell'VIII secolo. Si sono suggeriti molti progetti più o meno elaborati, tutti basati sullo stesso principio, e tutti fallimentari per lo stesso motivo. Nella versione mostrata qui, le palline sul lato destro (tra «le tre» e «le sei») rotolano verso l'esterno e, trovandosi più lontano dal centro daranno origine a un maggiore momento torcente di quelle vicine al centro. Questo suggerisce che il loro effetto sarà maggiore di quelle sul lato sinistro, facendo girare la ruota in senso orario, una volta che la rotazione è iniziata. In realtà, ci sono sempre più palline sulla sinistra a contrastare la rotazione che palline sulla destra a far girare la ruota, la quale quindi rallenterà fino a fermarsi.

(b) *La ruota magnetica.* Qui, l'idea è che il magnete centrale è isolato da quelli esterni, posizionati in cerchio, eccetto per due finestre sul polo positivo e negativo. In corrispondenza della finestra superiore, il polo negativo è attratto dal polo positivo dei magneti esterni, mentre, nella finestra inferiore, il polo positivo è respinto dai magneti esterni. Entrambi tendono a far girare il magnete al centro... per sempre. L'errore qui è nel funzionamento dei campi magnetici. Di fatto all'interno del cerchio non c'è affatto campo magnetico: viene cancellato per simmetria e nessuna forza agisce sul magnete interno.

Figura 4.5  
Due semplici macchine del moto perpetuo.

### *Il diavoleto di Maxwell e la meccanica quantistica*

Il dibattito sul diavoleto di Maxwell non terminò con il lavoro di Szilárd. I fisici oggi hanno dato la caccia al diavoleto, giù giù fino al regno quantistico, in mezzo alle strane regole che governano il mondo su scala atomica. Nella meccanica quantistica, non appena iniziamo a considerare l'idea di misurare la

posizione e la velocità delle singole molecole, ci scontriamo contro una questione fondamentale: quanta informazione possiamo acquisire? Si chiama «principio di indeterminazione di Heisenberg» e dice che non si può mai sapere esattamente *dove* sta una particella (o molecola d'aria) e *allo stesso tempo* a che velocità esatta sta andando: resta sempre un po' di incertezza. E, a detta di molti, è proprio questa incertezza a essere necessaria per preservare il secondo principio della termodinamica.

Sembrerebbe quasi che il mondo quantistico sia diventato l'ultimo baluardo di speranza per chi ancora sogna una macchina del moto perpetuo. Da molti anni ormai si sentono voci sul fatto che una tale macchina sia possibile usando la cosiddetta «energia del vuoto», o «energia di punto zero». A causa dell'incertezza del mondo quantistico, niente può essere mai completamente in quiete e ogni molecola, ogni atomo, ogni particella subatomica avrà sempre un minimo di energia, perfino se è raffreddata fino allo zero assoluto: per questo si chiama «energia di punto zero». Questa regola si applica perfino allo spazio vuoto: secondo la fisica quantistica, l'intero universo è pieno di questa «energia del vuoto», che molti pensano dovremmo riuscire a raccogliere e a utilizzare. Però questo modo di affrontare la cosa si scontra con le stesse difficoltà trovate nei due lati della scatola piena di molecole d'aria. L'energia del vuoto è uniformemente distribuita, quindi qualunque metodo per estrarla e usarla richiederebbe più energia di quanta riusciremmo a ottenerne. L'energia del vuoto, uniformemente distribuita, non si può raccogliere liberamente, così come non si può creare una differenza di temperatura tra i due lati della scatola senza un aiuto di qualche tipo.

L'aiuto può venire sotto forma di informazione (come quella nel cervello del diavoleto di Maxwell), ma comunque ci vuole altra energia per raccogliere e immagazzinare l'informazione da utilizzare, energia che causa un aumento di entropia in qualche altro posto.

Non si può violare il secondo principio della termodinamica, ricordatevelo sempre.

Quasi dimenticavo: all'inizio del capitolo ho menzionato *quattro* principi della termodinamica, ma non vi ho parlato degli altri due. Non aspettatevi troppo: il terzo principio della termodinamica dice che «l'entropia di un cristallo perfetto è zero quando la temperatura del cristallo è lo zero assoluto», e riguardo al quarto principio, l'unica cosa interessante è che, nonostante sia stato aggiunto



agli altri tre molto tempo più tardi, è considerato fondamentale, e quindi viene chiamato «principio zero», perché deve venire prima degli altri tre. Dice che se due corpi sono in equilibrio termodinamico con un terzo corpo (che è il modo scientifico per dire che hanno la stessa temperatura), allora sono in equilibrio termodinamico tra loro. Bella scoperta, vien da dire. Questo principio ha ottenuto il numero zero semplicemente perché non si voleva cambiare la numerazione degli altri principi, ormai ben radicata. Avrebbe causato molta confusione e la confusione è l'ultima cosa che vogliamo. Vero?

## 5. Il paradosso dell'asta nel fienile

### Quanto è lungo un pezzo di corda? Dipende da quanto va veloce

È probabile che non abbiate mai sentito di questo paradosso, a meno che non siate uno studente di fisica, perché è uno dei tre o quattro famosi esempi usati nei libri di testo per spiegare la teoria della relatività con cui si evidenziano certi bizzarri aspetti dei risultati della teoria riguardo al tempo e allo spazio. Ma è troppo divertente per lasciare che solo i fisici se lo godano, e mi concederò il piacere di dividerlo con voi. Vi avverto, però: non si può enunciare subito senza alcuna conoscenza della fisica sottostante, e la sua spiegazione richiede un po' di teoria della relatività per mettere a posto le cose. Qui, bisogna prendere conoscenza della fisica, prima ancora di riuscire a enunciare il paradosso, figuriamoci per risolverlo.

Ciò nonostante, avevo promesso che avrei descritto ogni paradosso all'inizio di ogni capitolo, così che il lettore potesse avere un'idea di dove si va a parare; eccolo qui, quindi; cercate di mantenere il vostro scetticismo, perché vi sarà molto utile quando ci inoltreremo nel mondo di Einstein.

Un saltatore d'asta corre, tenendo l'asta parallela al suolo, molto velocemente: perché questo paradosso funzioni, dobbiamo ipotizzare che corra a una velocità vicina a quella della luce. Si avvicina a un fienile lungo quanto l'asta: sappiamo che hanno la stessa lunghezza perché, prima di cominciare a correre, il saltatore ha misurato l'asta a fianco del fienile. La porta anteriore e quella posteriore del fienile sono entrambe aperte e l'atleta corre attraverso la costruzione senza rallentare. Senza sapere nulla di teoria della relatività, ci immaginiamo che ci sarà un momento in cui un'estremità dell'asta è appena entrata nel fienile, mentre l'altra estremità ne sta uscendo.

Questo andrebbe bene se il saltatore corresse a velocità normale, una velocità umana. Ma lui sta correndo quasi alla velocità della luce ed è proprio in questo caso che si manifesta ogni sorta di effetto fisico strano e meraviglioso, tutti previsti dalla teoria della relatività. Uno di questi (quello cruciale per la discussione) è che un oggetto molto veloce appare più corto di quando sta fermo. Naturalmente, penserete, ci si può credere: del resto, sfreccia così veloce che, nel momento in cui si percepisce dov'è l'inizio, la fine si è spostata in avanti, e questo dà l'impressione di una cosa più corta. Magari fosse così semplice.

Se si lancia un missile (lungo esattamente un metro) a una velocità vicina a quella della luce, in modo che viaggi lungo un metro a nastro immobile, e si fa una foto mentre è in volo, si vede che la sua lunghezza è effettivamente meno di un metro: e più veloce si muove, più è corto. Indagheremo più a fondo su questo punto tra breve, ma per ora torniamo all'asta nel fienile.

Ricapitolando: la teoria della relatività ci dice che, se siamo nel fienile e guardiamo il saltatore che ci passa attraverso, l'asta ci apparirà più corta del fienile. L'estremità posteriore dell'asta entrerà nel fienile e solo qualche momento più tardi la cima ne uscirà, quindi ci sarà un breve periodo di tempo in cui l'intera asta è all'interno della struttura.

Per quanto bizzarro sia, questo non è un paradosso, perché la teoria della relatività ci insegna un'altra importante lezione, che, in effetti, è ciò che dà alla teoria il suo nome: *il moto è sempre relativo*. Questa idea risale a molto prima di Einstein e per la verità non dice niente di strano. Immaginiamo di stare su un treno, e di veder passare un passeggero che passa accanto al nostro posto camminando nella direzione di marcia del treno. Siccome entrambi ci muoviamo col treno, il passeggero ci passa accanto alla stessa velocità con la quale passerebbe se il treno fosse fermo. Ma nello stesso momento il treno sta transitando in una stazione e qualcuno sul binario vede il passeggero che cammina sul treno. Dal suo punto di vista il passeggero si muove a una velocità che è la somma della velocità a cui cammina più la velocità del treno. Quindi la domanda è: a che velocità si muove il passeggero? Alla velocità alla quale cammina relativamente a noi che siamo seduti sul treno o a quella più la velocità del treno in relazione all'osservatore sul binario?

Possiamo semplicemente rispondere che dipende dall'osservatore. La velocità non è assoluta, dipende dal moto della persona che misura la velocità. Analogamente, si potrebbe sostenere che, per noi che siamo seduti sul treno, il treno stesso si può considerare stazionario, mentre il binario là fuori si muove nella direzione opposta. Questo potrebbe sembrare eccessivo, perché è certo più corretto dire che è il treno che si sta muovendo *per davvero*. Ma consideriamo bene la cosa: e se il treno si muovesse a mille e seicento chilometri l'ora da est a ovest? (Non molto realistico, lo so). Immaginiamo di essere nello spazio, cosa vedremmo? Vedremmo la Terra che gira a circa mille e seicento chilometri l'ora in direzione opposta al treno (è la velocità necessaria

per compiere una rotazione completa attorno al suo asse ogni giorno). Per noi, nello spazio, il treno compenserebbe esattamente la rotazione della terra su cui poggia e quindi non si muoverebbe affatto. Sarebbe come vedere qualcuno che corre sul tapis roulant. E quindi, è il treno o il pianeta che si muove? Vedete? Il moto è relativo, sempre.

Bene, diciamo che fino a qui vi ho convinto. Torniamo all'asta nel fienile. Dal punto di vista del saltatore, anche se sta correndo a una velocità men che realistica, lui stesso e l'asta sono fermi e il fienile si avvicina a loro a una velocità vicina a quella della luce. La relatività qui è molto chiara: per il saltatore, il fienile si muove e lui lo vede accorciato, molto più corto della sua asta. Quindi, secondo lui, quando la fine dell'asta entra nel fienile, la cima è già uscita da un pezzo. In pratica ci sarà un intervallo di tempo in cui l'asta esce dal fienile da tutt'e due le parti.

Ecco qui il paradosso: per noi, che siamo nel fienile e guardiamo l'asta entrare, l'asta risulta più corta del fienile, tanto che potremmo chiudere entrambe le porte, per una frazione di secondo, rinchiudendola al suo interno. Ma per il saltatore l'asta è più lunga del fienile, troppo lunga per starci dentro. Non possiamo avere ragione entrambi. Eppure, la risposta corretta è che sì, *abbiamo ragione entrambi*. Questo è il paradosso, e nel resto di questo capitolo non solo vi darò la soluzione, ma spiegherò anche come e perché la teoria della relatività ci pone un simile dilemma.

Per risolvere il paradosso dovremo affrontare coraggiosamente la teoria della relatività, seguendo la strada percorsa da Einstein stesso più di un secolo fa, un passo logico dopo l'altro, finché arriveremo a destinazione.

L'onestà completa mi sembra la politica migliore da seguire, qui. Non prevedo di usare l'algebra o di disegnare grafici complessi per insegnarvi le basi della relatività, e in linea di principio potrei semplicemente saltare alla conclusione, dandovi la risoluzione del paradosso, nella speranza che vi accontentiate di credermi sulla parola su questa faccenda degli oggetti che si accorciano quando vanno veloci. Ma, d'altra parte, magari mi sto inventando tutto. Quindi siete di fronte a una scelta: potete saltare alla fine di questo capitolo, dove spiego il paradosso, se (a) sapete già qualcosa sulla teoria della relatività ristretta, oppure (b) vi fidate di Albert Einstein: se lo dice lui per voi è una spiegazione più che sufficiente. In alternativa potete seguirmi attentamente e con cura attraverso i ragionamenti. Se scegliete la seconda opzione, alla lunga ne avrete

un giovamento, perché anche i due capitoli seguenti, che parlano di paradossi sul tempo, e non sullo spazio, dipendono dai concetti spiegati qui. E vi prometto che farò del mio meglio per rendere l'esperienza non solo indolore, ma possibilmente anche piacevole. Dopo tutto, la relatività ristretta è una delle teorie più belle di tutta la fisica.

### *Una lezione sulla natura della luce*

Nell'Ottocento era già chiaro che la luce si comporta come un'onda: proprio come il suono, anche se si muove molto più veloce. Ci sono due importanti proprietà delle onde che dovete conoscere per capire il senso della discussione che segue. Prima di tutto le onde hanno bisogno di un mezzo in cui diffondersi, qualcosa che «ondeggia» o vibra. Consideriamo il moto del suono: quando parliamo a qualcuno vicino a noi, le onde sonore dalla nostra bocca al suo orecchio si muovono nell'aria. Sono le molecole d'aria che vibrano e trasportano l'energia sonora. Allo stesso modo, le onde marine hanno bisogno dell'acqua e la «gobba» che viaggia lungo una corda che è stata mossa ha bisogno della corda.

Chiaramente, senza mezzo che trasporta l'onda non ci sarebbe onda. Quindi è comprensibile che i fisici del secolo XIX fossero convinti che la luce, già definita come onda elettromagnetica, avesse bisogno di un mezzo per diffondersi. E siccome nessuno aveva mai visto un mezzo del genere, dovettero inventarsi un esperimento per scoprirlo. Veniva chiamato «etere luminifero» (portatore di luce), e furono fatti grandi sforzi per dimostrare la sua esistenza. Naturalmente l'etere doveva avere certe proprietà: per esempio, doveva permeare l'intera galassia, affinché la luce delle stelle lontane potesse raggiungerci attraverso il vuoto.

Nel 1887, in un'università nell'Ohio, due fisici americani, Albert Michelson ed Edward Morley, condussero uno dei più famosi esperimenti nella storia della scienza. Avevano trovato un modo per misurare molto accuratamente il tempo impiegato da un raggio di luce per percorrere una certa distanza. Ma prima di descrivere i risultati, c'è un'altra proprietà delle onde che voglio ricordare, ed è che *la velocità a cui l'onda si muove non dipende dalla velocità a cui si muove l'origine dell'onda.*

Pensiamo al rumore di una macchina che si avvicina. Le onde sonore arriveranno a noi prima della macchina, perché si muovono più velocemente, ma

la loro velocità ha a che fare con quanto vibrano velocemente le molecole d'aria che la trasportano. Il suono non ci raggiunge più velocemente perché la macchina in corsa lo «spinge». Piuttosto, quello che succede è che, mentre la macchina si avvicina, le onde sonore tra noi e la macchina vengono schiacciate, e la loro lunghezza d'onda si accorcia (ovvero la frequenza aumenta). Si chiama «effetto Doppler» e lo riconosciamo nel cambio di tono delle sirene delle ambulanze che si avvicinano o si allontanano, o nel rombo delle macchine da corsa che passano su una pista. Quindi, mentre la *frequenza* di un'onda sonora dipende dalla velocità della sua fonte, e dal fatto che si stia avvicinando o allontanando, *la velocità stessa dell'onda*, e quindi il tempo che ci mette a raggiungerci, non cambia.

La situazione è radicalmente diversa se vista dal guidatore della macchina. Il rumore del motore è portato dall'aria in ogni direzione alla stessa velocità. Quindi, nella direzione del moto, le onde sonore si muovono *più lentamente* rispetto a lui di quelle perpendicolari alla direzione del moto. Questo perché la velocità a cui le onde sonore si allontanano dalla macchina in avanti è la differenza tra la velocità delle onde nell'aria e la velocità della macchina.

Michelson e Morley applicarono questo principio alle onde luminose. Inventarono un esperimento molto ingegnoso, che, erano convinti, avrebbe per la prima volta confermato e rilevato l'esistenza dell'etere luminifero. Iniziarono ipotizzando che la Terra si muova attraverso l'etere nella sua orbita attorno al Sole, alla velocità di circa 100 000 chilometri all'ora. Nei loro esperimenti avevano misurato, con incredibile accuratezza, il tempo necessario a due raggi di luce per attraversare due percorsi di uguale lunghezza, uno nella direzione del moto della Terra e l'altro perpendicolare al primo. Nel loro laboratorio sulla Terra, mentre osservavano la velocità della luce, erano come il guidatore della macchina che scopre la diversa velocità delle onde sonore a seconda che si allontanino in avanti o di lato rispetto a lui.

Se l'etere esiste, ragionavano Michelson e Morley, allora la Terra deve muoversi in esso, e quindi la luce che viaggia in diverse direzioni impiegherà un tempo differente per coprire la stessa distanza, perché si muoverà, in relazione alla Terra, a velocità diverse nelle diverse direzioni. Sebbene la velocità della luce sia 300 000 chilometri al secondo, che è diecimila volte più veloce della Terra sulla sua orbita, il loro strumento di misura, chiamato «interferometro» era così preciso da riuscire a rilevare differenze anche minuscole nel tempo di

percorrenza di due diversi raggi di luce, misurando l'interferenza tra le due onde quando erano combinate alla fine della corsa.

Non si trovò alcuna differenza.

Il loro esperimento aveva prodotto un risultato che in gergo si chiama «misura di zero» (riprodotta da allora numerose volte mediante esperimenti più precisi con i raggi laser). I fisici non riuscivano a capire questo risultato; di fatto credevano che Michelson e Morley avessero compiuto qualche errore. Com'era mai possibile che i due raggi di luce si muovessero alla stessa velocità? Dov'era finito il principio della relatività del moto?

So che tutto questo genera confusione, quindi cercherò di spiegarlo il più chiaramente possibile. Ricordate l'esempio del passeggero che cammina sul treno? Il risultato di Michelson e Morley equivale a dire che sia noi sul treno sia l'osservatore sul binario vediamo il passeggero muoversi alla stessa velocità! Suona ridicolo, no? Certamente, come abbiamo spiegato prima, noi vediamo il passeggero muoversi alla velocità a cui cammina, mentre l'osservatore sul binario lo vede sfrecciare alla velocità del treno, anzi, un po' di più.

Solo otto anni prima dell'inquietante esperimento di Michelson e Morley, nasceva a Ulm, in Germania, Albert Einstein. Lo stesso anno, il 1879, Albert Michelson, che lavorava all'osservatorio navale degli Stati Uniti a Washington, aveva misurato la velocità della luce con un errore di uno su diecimila. Non era il primo a misurarla e non sarebbe stato l'ultimo, ma questo conferì autorità al famoso esperimento condotto insieme a Morley più tardi. Il giovane Einstein, nel frattempo, completamente ignaro del sorprendente risultato annunciato al mondo da Michelson e Morley, avrebbe presto iniziato egli stesso a ragionare sulle insolite proprietà della luce, inventando esperimenti teorici. Si chiedeva se, viaggiando alla velocità della luce tenendo uno specchio di fronte a sé, sarebbe riuscito a vedere la propria immagine: come avrebbe potuto la luce dal suo viso raggiungerlo, se lo specchio stesso si allontanava alla velocità della luce? I suoi anni di meditazione culminarono nel 1905, quando, poco più che ventenne, pubblicò la teoria della relatività ristretta. All'improvviso, il risultato di Michelson e Morley divenne meravigliosamente comprensibile.



Volando alla velocità della luce, Einstein riesce a vedere il suo riflesso?

Figura 5.1  
Ricerche di Einstein da giovane.

Fino a che Einstein non pubblicò la sua teoria, i fisici si erano rifiutati di credere al risultato di Michelson e Morley, oppure avevano cercato di modificare le leggi della fisica per renderlo accettabile, ma senza grande successo. Avevano pensato che forse la luce si comportava come un flusso di particelle (il che avrebbe spiegato il risultato), ma l'esperimento era stato concepito specificamente per mostrare le proprietà dell'onda luminosa, misurando l'esatto momento di arrivo dei due raggi di luce per mezzo di una rilevazione del modo in cui le onde dei due raggi di luce si sovrappongono. Se la luce era fatta di particelle, in ogni caso si sarebbe eliminato l'etere, perché le particelle non hanno bisogno di un mezzo per propagarsi.

Tutto cambiò nel 1905. L'intera teoria di Einstein si basava su due idee, che da allora si chiamano i due «postulati della relatività». Il primo era ben noto: dice semplicemente che il moto è davvero relativo e niente è mai assolutamente stazionario. Questo significa che non ci sono esperimenti che possano dirci se siamo «veramente» in moto oppure no. Il secondo postulato era quello rivoluzionario, anche se a prima vista sembra piuttosto innocente. Einstein sostenne che la luce si comporta come un'onda, nel senso che si propaga a una velocità indipendente dalla velocità della sua origine (come le onde sonore da una macchina in moto). Però, allo stesso tempo, e al contrario delle onde sonore, la luce non ha bisogno di un mezzo in cui propagarsi: l'etere luminifero non esiste e le onde luminose si possono muovere attraverso lo spazio vuoto.

Fin qui, niente di strano, nessun paradosso, e niente (potreste pensare) che avreste difficoltà a sottoscrivere in questi due innocui postulati. Di certo non sembrano affermazioni che portino a una visione rivoluzionaria dello spazio e del tempo. Eppure è così. Ognuno dei due postulati, in sé, è innocente. È quando li combiniamo che scopriamo la profondità delle idee di Einstein.

Ricapitoliamo. La luce che ci raggiunge viaggia alla stessa velocità, indipendentemente dalla velocità della fonte luminosa che l'ha prodotta. Quindi



la luce funziona come le altre onde, come il suono, nessun problema. Tuttavia, siccome la luce non ha un mezzo in cui si propaga e rispetto al quale si può misurare la sua velocità, allora nessuno ha una posizione privilegiata nell'universo, e ogni osservatore, indipendentemente dal suo moto, dovrà misurare la stessa velocità della luce: trecentomila chilometri al secondo. Questo è il punto in cui le cose diventano strane, quindi spiegherò le implicazioni della faccenda.

Consideriamo due razzi che viaggiano ad alta velocità uno contro l'altro nello spazio. Se spegniamo i motori di entrambi i razzi e li lasciamo procedere per inerzia a velocità costante, allora nessuno che viaggi sui razzi potrebbe determinare se stanno muovendosi entrambi, oppure se uno dei razzi è fermo e l'altro si avvicina a velocità doppia. Di fatto non esiste lo «stare fermo» e il «muoversi», perché il moto è sempre in relazione a qualcos'altro. Quindi non ci si può nemmeno basare su una stella vicina come punto di riferimento, perché chi ci dice che la stella sia ferma?

Ora, un astronauta a bordo di uno dei razzi manda un raggio luminoso verso l'altro razzo e misura la velocità della luce che si allontana. Siccome lui può pensare, legittimamente, di essere fermo, e che è solo l'altro razzo a muoversi, dovrebbe vedere la luce allontanarsi ai soliti trecentomila chilometri al secondo. Allo stesso tempo, l'astronauta sul secondo razzo può anch'egli sostenere legittimamente di essere fermo. Anche lui misura la velocità della luce che arriva, e anche lui trova trecentomila chilometri al secondo, il che non è affatto sorprendente, perché la velocità della luce non dipende dalla velocità della fonte luminosa. Questo è esattamente quello che succede. Paradossalmente, entrambi misurano la stessa velocità della luce.

Questo sì è sorprendente e va contro il senso comune. Entrambi gli astronauti misurano la stessa velocità del raggio di luce, nonostante si stiano muovendo l'uno verso l'altro a una velocità magari vicina a quella della luce!

Prima di continuare, possiamo rispondere alla domanda di Einstein riguardo allo specchio. Indipendentemente da quanto va veloce, vedrà sempre il suo riflesso; questo perché, indipendentemente dalla sua velocità, la luce viaggerà dal suo viso verso lo specchio sempre alla stessa velocità, esattamente come se non si muovesse affatto. In fondo, chi dice che si sta muovendo così velocemente? Il moto è relativo, ricordate?

Ma c'è un prezzo da pagare per ottenere questo risultato; siamo costretti a

rivedere i nostri concetti di spazio e di tempo. L'unico modo per cui la luce può viaggiare alla stessa velocità per tutti gli osservatori, indipendentemente dalla velocità a cui loro si spostano, è ammettere che gli osservatori *misurano tempi e distanze in modo differente*.

### *Distanze che si accorciano*

Prima che iniziate a pensare che questa sia «solo una teoria», pura speculazione, che potrebbe rivelarsi sbagliata, vi devo confermare che è stata studiata e verificata per più di cento anni e i suoi effetti si vedono quotidianamente. Posso testimoniare personalmente, perché, come molti studenti di fisica, ho partecipato a un esperimento in laboratorio quando ero all'università, riguardante una particella subatomica chiamata «muone» prodotta dai raggi cosmici (particelle ad alta energia provenienti dallo spazio che bombardano costantemente gli strati alti dell'atmosfera). I muoni si creano per collisione dei raggi cosmici con le molecole d'aria, e si propagano in giù, verso la Terra. L'esperimento che ho condotto da studente riguardava la cattura e il conteggio di queste particelle in uno speciale rivelatore. Sappiamo che i muoni vivono solo per una frazione di secondo prima di sparire, e noi misurammo accuratamente il fenomeno nell'esperimento. Generalmente vivono solo circa due microsecondi, alcuni un po' di più, alcuni un po' di meno.

I muoni hanno un'energia talmente alta che viaggiano al 99% della velocità della luce. Però, perfino a questa velocità, dovrebbero volerci ben più di un paio di microsecondi per coprire la distanza fino alla superficie della Terra; quindi dovremmo rilevare solo quei pochi muoni insolitamente longevi al punto di riuscire a completare il viaggio. Invece, scopriamo che quasi tutti i muoni riescono ad arrivare e a colpire il nostro rivelatore prima di sparire. Una possibile spiegazione sarebbe che i muoni più veloci vivono più a lungo, per qualche ragione. Ma Einstein direbbe che questa non può essere la spiegazione giusta, perché il moto è relativo, quindi un muone «si muove» solo rispetto a noi che stiamo sulla Terra.

Ecco la spiegazione. Consideriamo le cose dal punto di vista del muone: se potesse parlare, vi direbbe che sta viaggiando quasi alla velocità della luce, o piuttosto, che la Terra sta venendo verso di lui al 99% della velocità della luce. E gli sembra che il tempo sia più che sufficiente per arrivare a incontrare la

Terra, infatti, dal suo punto di vista, il tempo è così poco che dura perfettamente l'arco della sua breve vita. Questo può significare una sola cosa: il tempo per il muone passa più lentamente che per noi sulla Terra. E infatti è così, ma rimando i dettagli sul rallentamento del tempo al prossimo capitolo. Per ora, abbiamo un ultimo ostacolo logico da superare. Consideriamo questo: primo, noi e il muone siamo in accordo sulla velocità a cui si muove (o, più precisamente, la velocità a cui ci avviciniamo l'un l'altro); secondo, il muone dice che il suo viaggio dura meno di quanto noi pensiamo. Quindi, per far tornare i conti, bisogna che il muone copra una distanza più breve. Cioè, se viaggia a una certa velocità, sulla quale siamo in accordo, il muone riesce a coprire la distanza in meno tempo, allora il muone vede la distanza più breve di quanto la vediamo noi.

Questa proprietà del moto ad alta velocità si chiama «contrazione delle lunghezze»: dice che gli oggetti in moto molto veloce sembrano più corti di quando sono fermi, e le distanze da percorrere sembrano più corte viste dall'oggetto in moto molto veloce.

### *Viaggi galattici*

Tutto ciò comporta un'interessante conseguenza, che vale la pena di indagare prima di tornare all'asta nel fienile. Quando abbiamo parlato del paradosso di Olbers nel terzo capitolo, ho scritto che le stelle più vicine a noi sono lontane diversi anni luce. Quindi, anche se potessimo viaggiare alla velocità della luce, ci vorrebbero comunque anni per raggiungerle. È abbastanza deprimente, perché significa che siamo prigionieri del nostro sistema solare e il meglio che potremo realisticamente sperare è visitare gli altri pianeti che orbitano attorno al Sole: ci vorrebbe troppo tempo per arrivare più lontano. Per quanto concerne visitare le stelle più lontane, per non parlare di galassie ai confini dell'universo, beh, sembra proprio fuori questione: dopo tutto perfino la luce ci mette migliaia o milioni di anni per arrivarci.

Quindi, cosa pensereste se vi dicessi che possiamo viaggiare a velocità inferiore a quella della luce, eppure arrivare all'altro capo dell'universo in un battito di ciglia? Fantascienza? No. L'unica cosa che ci ferma è che non abbiamo un razzo che possa viaggiare a velocità vicina a quella della luce, e forse non ce l'avremo mai. Ma supponiamo di averlo. Allora le cose funzionerebbero come per il muone: così come dal punto di vista del muone la

distanza fino al suolo è molto minore di quella che vediamo noi, così un viaggiatore a bordo di un'astronave che si muovesse verso una stella lontana a una velocità vicina a quella della luce vedrebbe la distanza accorciata.

Immaginiamo una pertica solida, lunga migliaia di anni luce, posta tra la Terra e la stella da raggiungere. Chi sta sull'astronave potrebbe dire che non è l'astronave che si muove, è la pertica a farlo, in direzione opposta. L'astronauta la vedrebbe accorciata, e quindi farà presto a superarla, e non ci metterà così tanto a raggiungere la destinazione.

La teoria della relatività dice che più ci si avvicina alla velocità della luce, più le lunghezze si contraggono. Quindi, per darvi un esempio, una distanza di 100 anni luce a un viaggiatore in moto a una velocità pari al 99% della velocità della luce apparirà di soli 14 anni luce. Ma se si viaggia a 99,99% della velocità della luce, questa distanza apparirà come un solo anno luce (e quindi ci vorrà solo un anno a compiere il viaggio, perché l'astronave sta andando a una velocità quasi pari a quella della luce). E se si andasse a 99,9999999% della velocità della luce, ci si arriverebbe in due giorni.

Non stiamo violando alcuna legge della fisica. Più si viaggia a una velocità vicina a quella della luce, meno tempo ci vuole a raggiungere la destinazione, e spero capirete che non è perché si va più veloce (del resto, 99,9999999% della velocità della luce non è tanto più del 99,99%, in termini assoluti), ma perché più si va a una velocità vicina a quella della luce, più breve è la distanza, e più breve è la distanza, minore è il tempo necessario per coprirla.

Dov'è il trucco? Per noi sull'astronave, che percorriamo la distanza accorciata, passerà poco tempo, e il viaggio sarà in breve completato. Se ci mettiamo due giorni a coprire 100 anni luce, allora saremo solo due giorni più vecchi quando arriveremo. Ma ricordate, in confronto al passare del tempo sulla Terra, il nostro tempo scorre molto più lentamente. Dal punto di vista di chi è rimasto sulla Terra noi stiamo viaggiando a velocità quasi pari a quella della luce e dobbiamo coprire una distanza di 100 anni luce, quindi il viaggio prenderà cent'anni (o poco di più, giacché viaggiamo a velocità leggermente minore). Quindi i nostri due giorni sull'astronave corrispondono a 100 anni sulla Terra. Ancora peggio, se mandiamo un segnale luminoso sulla Terra quando arriviamo, ci vorranno altri 100 anni perché il segnale la raggiunga. Quindi la prima indicazione del fatto che siamo arrivati sani e salvi non raggiungerà la Terra che 200 anni dopo la nostra partenza.

La lezione qui è che possiamo viaggiare lontano quanto vogliamo nell'universo in un tempo breve quanto vogliamo e ancora rimanendo *al di sotto della velocità della luce*. Ma non ci venga in mente di tornare sulla Terra e trovare parenti e amici ancora vivi.

Un epilogo affascinante, e inquietante di questa discussione è considerare come dev'essere per un raggio di luce viaggiare nello spazio. Questo è il punto in cui le implicazioni della teoria della relatività si spingono alla loro conclusione logica: a cavallo di un raggio di luce, qualunque distanza, perfino attraverso l'intero universo, sarebbe pari a zero, il che è corretto, perché il tempo si ferma, e quindi si percorre distanza nulla in tempo nullo! Ecco un'altra ragione per cui non si può viaggiare alla velocità della luce: è troppo bizzarro perfino da prendere in considerazione. Ma la luce sembra farlo senza problemi: è solo che nessun raggio di luce è mai venuto a dirci cosa si prova.

Esploreremo quest'idea più in dettaglio nel prossimo capitolo. Per ora, dopo questo breve interludio, possiamo finalmente tornare all'asta nel fienile, non solo per risolvere il paradosso, ma per apprezzare che è un paradosso.

### *Ancora l'asta nel fienile*

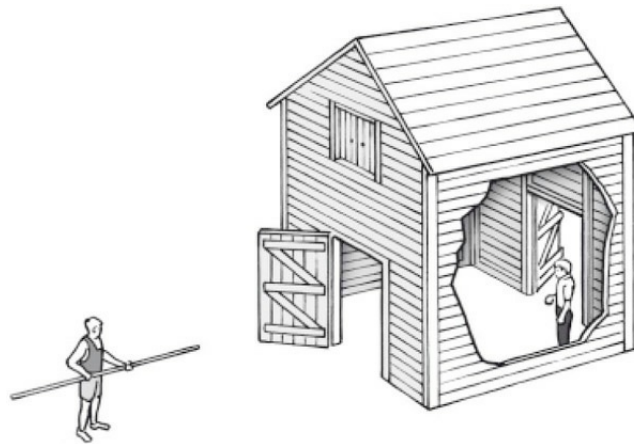
Enunciamo di nuovo il problema, ora che ci siamo messi in pari con le previsioni della teoria della relatività. Ricapitoliamo: noi siamo nel fienile, e guardiamo il saltatore correre verso di noi ad alta velocità. Sappiamo che, da ferma, l'asta ha la stessa lunghezza del fienile. Ma ora, in moto, ci appare più corta, così che può stare comodamente all'interno del fienile. Ci sarà un istante in cui, se saremo abbastanza veloci, potremo chiudere entrambe le porte del fienile e rinchiudervi dentro l'asta.

Però dobbiamo anche considerare la situazione dal punto di vista del saltatore. Per lui, l'asta non si sta muovendo (nel senso che non si sta muovendo *rispetto a lui*), ed è il fienile che si avvicina ad alta velocità. Il saltatore vede un fienile accorciato che gli viene incontro. Durante la sua corsa, la punta dell'asta uscirà dalla porta posteriore *prima* che la parte terminale sia entrata dalla porta anteriore. Quindi non è possibile chiudere entrambe le porte: l'asta è troppo lunga, non ci sta.

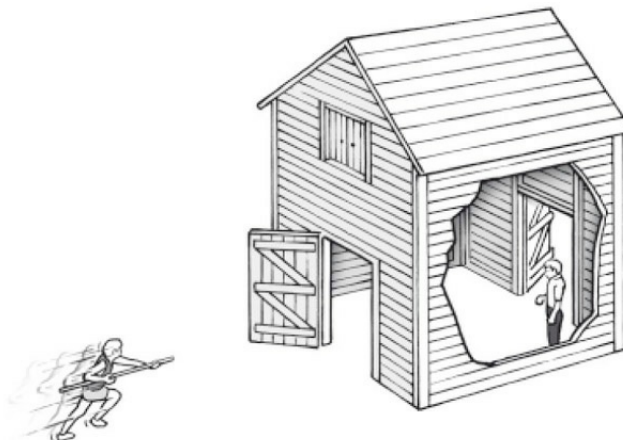
È un'illusione ottica o un effetto fisico reale? Alla fin fine, non possiamo avere ragione entrambi: o l'asta ci sta o non ci sta.

Il paradosso, così come l'abbiamo enunciato all'inizio del capitolo, sta nel fatto che invece abbiamo entrambi ragione. È esattamente ciò che predice la teoria della relatività, sulla base delle due affermazioni «gli oggetti in moto appaiono più corti» e «il moto è relativo».

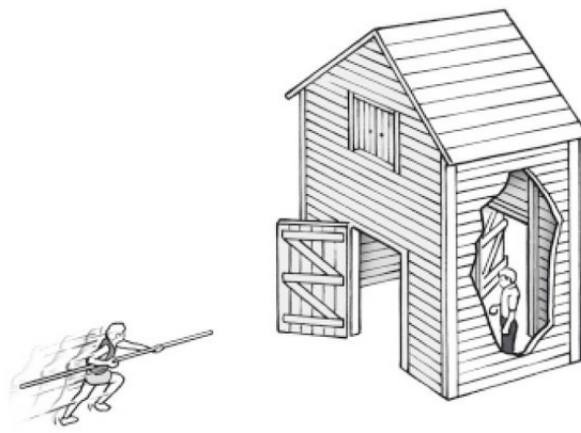
La soluzione sta nel concetto di «eventi simultanei». Abbiamo detto che, stando all'interno del fienile, potremmo chiudere entrambe le porte simultaneamente, rinchiudendo l'asta all'interno della struttura. Naturalmente, riapriremmo la porta posteriore un attimo dopo, prima che l'asta la colpisca. Questo non ha importanza: l'importante è che le porte, in un certo istante, sono entrambe chiuse. Ma ecco come si svolgono gli eventi secondo il saltatore: entra nel fienile, e prima che la cima dell'asta raggiunga la porta posteriore, lui la vede chiudersi. Un attimo dopo la porta si riapre e lascia passare la punta dell'asta. Un altro istante *dopo*, il fondo dell'asta entra nel fienile, e la porta anteriore si chiude. Quindi, sì, dice il saltatore, entrambe le porte si sono chiuse, ma *non allo stesso tempo*: sarebbe impossibile, visto quanto è corto il fienile secondo lui.



(a) Quando l'asta non si muove relativamente al fienile, hanno entrambi la stessa lunghezza.



(b) Per la persona nel fienile, l'asta in moto è ora molto più corta, tanto da riuscire a stare all'interno.



(c) Per il saltatore, è il fienile ad apparire schiacciato, e quindi non riesce a contenere tutta l'asta.

Figura 5.2  
Il paradosso dell'asta nel fienile.

Il fatto che l'ordine degli eventi sembri diverso a diversi osservatori in moto l'uno rispetto all'altro è un'altra conseguenza della teoria della relatività. E, così come gli altri strani risultati che abbiamo già visto, non è solo una semplice previsione teorica. Succede davvero, ma così come il tempo che rallenta o le lunghezze che si accorciano, non si incontra nella vita di tutti i giorni. La ragione è semplice: non succede spesso di viaggiare a velocità vicine a quella della luce. La velocità più alta che la maggior parte di noi sperimenterà mai è quella che si può sperimentare su un aereo, che viaggia a poco meno di mille chilometri l'ora, circa un milionesimo della velocità della luce. Gli effetti relativistici sono molto difficili da rilevare quando si viaggia così lentamente.

Percepisco dello scetticismo, e, francamente, mi sento un poco offeso che non vi siate bevuti tutta questa sbrodolata relativistica (o magari vi sto accusando ingiustamente, e voi siete perfettamente soddisfatti dalle mie spiegazioni). Permettetemi comunque di fare l'avvocato del diavolo e darvi una versione più preoccupante del problema. Come ricorderete, se misurati in quiete l'uno rispetto all'altro, l'asta e il fienile hanno la stessa lunghezza. Quindi, in linea di principio, se non esistesse la contrazione relativistica delle lunghezze, l'asta in moto ci starebbe appena, nel fienile, per un istante. Ma cosa succederebbe se l'asta fosse lunga il doppio del fienile? Presumibilmente, il ragionamento funzionerebbe allo stesso modo; quindi, per noi all'interno del fienile, l'asta sembrerà più corta, e, a patto di muoversi abbastanza veloce, sarà abbastanza corta da stare all'interno del fienile. In caso non aveste capito questo punto nella discussione precedente forse lo capirete ora: questa contrazione delle lunghezze non è un effetto ottico. Non è solo che l'asta *appare* più corta: è

*veramente più corta per noi*, tanto che possiamo chiudere le due porte allo stesso momento. Ma se la contrazione dell'asta è reale, cosa vuol dire?, che gli atomi dell'asta si spiattellano l'uno sull'altro? E ancora, il saltatore probabilmente non è immune a questa contrazione e ci apparirà appiattito mentre corre. Non gli dà fastidio? La risposta è no, non sente niente di diverso da prima (magari un po' di fiato corto, vista la velocità a cui sta correndo) e siamo noi che lui vede schiacciati, dentro il fienile accorciato, perché dal suo punto di vista siamo noi che ci muoviamo, insieme al fienile, verso di lui.

Quindi, se lui non si sente schiacciato e vede l'asta lunga ancora esattamente quanto prima di iniziare a correre, allora l'asta più corta che vediamo noi deve, *deve* essere un'illusione.

Facciamo un esperimento. Che cosa succede se invece della porta posteriore nel fienile ci fosse un solido muro di mattoni? Non preoccupiamoci troppo dell'incolumità del saltatore, se siamo arrivati fin qui credendo che corresse alla velocità della luce possiamo certamente credere che riesca a fermarsi prima di colpire il muro.

Di nuovo, consideriamo come gli eventi si svolgono a seconda dei diversi punti di vista. Per noi, la porta anteriore del fienile si può chiudere quando l'asta accorciata entra completamente nel fienile, il che accade *prima* che la cima dell'asta colpisca il muro.

Ma nel sistema di riferimento di chi corre, la punta dell'asta sbatte contro il muro *prima* che il retro dell'asta sia entrato nel fienile. Se ipotizziamo che sia l'asta, sia il muro siano abbastanza robusti da resistere all'impatto senza rompersi, come potrà il retro dell'asta *entrare* nel fienile, così che la porta si possa chiudere dietro di esso? Il problema sembra più serio, ora, rispetto a un semplice diverso ordine temporale degli eventi. È come se un evento (la chiusura della porta dopo che l'asta è entrata) non avvenga per niente, secondo il saltatore. Questo è certamente un paradosso, che stringe Einstein e la sua teoria nell'angolo.

Be', veramente... no. C'è una spiegazione perfettamente valida e corretta. Vedete, nel sistema di riferimento del saltatore, la cima dell'asta colpisce il muro, ma il retro dell'asta non se ne accorge, perché secondo la teoria della relatività non esiste un corpo perfettamente rigido. Ricorderete che niente può viaggiare più veloce della luce, quindi la cima dell'asta non può trasmettere l'informazione di aver colpito il muro (una sorta di onda d'urto lungo l'asta



stessa) abbastanza veloce da rallentare il retro dell'asta. In pratica, il retro dell'asta non sa che la cima si è fermata. Continua a muoversi così velocemente che quando riceve l'informazione che la cima si è fermata è già entrato nel fienile, e la porta si può chiudere.

Dobbiamo riaprire la porta molto in fretta, perché l'asta non riuscirà a stare confinata nel fienile molto a lungo. Non appena il saltatore si ferma brutalmente dentro il fienile, sia noi sia lui inizieremo a vedere le lunghezze per quello che sono (e con questo intendo quello che sono quando non sono in movimento). E ricordiamo che in questo esempio l'asta è lunga il doppio del fienile. Il saltatore ora sarà d'accordo con noi che, quando le diverse parti dell'asta si fermano (ricordiamo che l'asta non è perfettamente rigida) tornano alla lunghezza originaria, quella in quiete. La cima dell'asta non può andare da nessuna parte perché il muro la blocca, e quindi il retro dell'asta uscirà dal fienile, finché metà dell'asta sarà all'esterno.

C'è un'ultima sottigliezza che non discuterò nei particolari, ma che merita di essere menzionata. In tutto questo discorso, abbiamo parlato di noi e del saltatore che vediamo l'asta fare cose diverse in momenti diversi. Ma anche per vedere la cima dell'asta, o il retro, ci vuole tempo: è il tempo che ci vuole alla luce per viaggiare fino ai nostri occhi, e a quelli del saltatore. Dato che l'asta stessa viaggia quasi alla velocità della luce, queste considerazioni diventano importanti. Ma vi risparmio altri dettagli tecnici per ora. Vi basti sapere che, per quanto riguarda la nostra domanda originale, il nostro pezzo di corda (o asta) varia in lunghezza a seconda di quanto velocemente si muove. E vi potete consolare nella consapevolezza del fatto che ciò che segue, riguardo ai paradossi del tempo, si basa sulle fondamenta gettate in questo capitolo, e quindi riusciremo ad arrivare al dunque più in fretta.

## **6. Il paradosso dei gemelli**

### **La velocità ci porta nel futuro**

In questo capitolo continuiamo con la serie di paradossi generati dalla teoria della relatività. Qui, però, ci inoltreremo nei concetti piacevolmente contorti associati con la natura del tempo, e come viene influenzato dal fatto di viaggiare a velocità vicine a quella della luce.

La trama di questo paradosso può apparire fantascientifica, ma in realtà è perfettamente inserita nel curriculum scolastico di qualunque studente di fisica come esempio delle implicazioni della relatività, anche se non è ancora realizzabile davvero per carenze tecnologiche. Si parla di un'astronave che può viaggiare a velocità vicine a quella della luce, il che è perfettamente ammissibile in linea di principio, anche se per ora non abbiamo la tecnologia necessaria a costruire un simile mezzo di trasporto. E siccome non supera la velocità della luce, non c'è bisogno di ricorrere alle speculazioni più audaci che si trovano nei libri di fantascienza, come la propulsione a curvatura o le scorciatoie attraverso l'iperspazio.

Vi presento i nostri eroi, i gemelli Alice e Bob, che progettano e costruiscono l'astronave. Mentre Bob rimane sulla Terra, Alice pilota l'astronave attraverso la galassia, in un viaggio che dura esattamente un anno. Al suo ritorno sulla Terra, Alice è un anno più vecchia (dal punto di vista biologico): secondo la sua percezione è passato un anno, e tutti gli orologi e gli altri dispositivi per misurare il tempo a bordo dell'astronave sono in accordo col fatto che è passato un anno da quando hanno lasciato la Terra.

Bob, nel frattempo, ha seguito il suo viaggio da casa ed è testimone di uno degli strani effetti che si manifestano come risultato del viaggio a velocità così elevate, previsto dalla teoria della relatività: secondo lui, il tempo sull'astronave scorre molto più lentamente che sulla Terra. Se guardasse gli eventi all'interno dell'astronave attraverso una telecamera, vedrebbe tutto come alla moviola: gli orologi ticchettano più lentamente, Alice si muove e parla più lentamente e così via. Quindi un viaggio che ad Alice sembra durare un anno, in realtà sulla Terra dura dieci anni, secondo Bob. E in effetti Alice torna sulla Terra e scopre che il suo gemello è invecchiato dieci anni, mentre lei è solo un anno più vecchia di prima.

Questo in sé non è il «paradosso» del titolo di questo capitolo. Può sembrare

strano, ma è perfettamente coerente con le previsioni della teoria di Einstein. Il tempo che ho scelto è arbitrario e dipende dalla velocità dell'astronave. Se Alice per esempio si fosse spinta ancora più vicino alla velocità della luce, allora si potrebbe fare un semplice conto e concludere che un anno sull'astronave corrisponde a un milione di anni sulla Terra, o, analogamente, durante un giorno di viaggio di Alice migliaia di anni passano sulla Terra. Ma atteniamoci alla velocità che ci fornisce un rapporto di 1 a 10 tra il tempo sull'astronave e quello sulla Terra, così che Alice possa tornare e trovare suo fratello ancora vivo.

Il paradosso si manifesta per via delle conclusioni apparentemente contraddittorie del concetto di moto relativo. In questo senso, la nostra storia è molto simile a quella dell'asta nel fienile del capitolo precedente; tuttavia, le stranezze riguardanti il tempo turbano la nostra mente molto più di quelle riguardanti lo spazio. Vedete, sembra che abbiamo scelto il nostro sistema di riferimento un po' troppo in fretta e abbiamo troppo frettolosamente concluso che il tempo rallenta in uno e non nell'altro caso. Nel quinto capitolo abbiamo enunciato il primo postulato della relatività: il moto è relativo. Vediamo se qui si applica ugualmente. Certamente, Alice ha lo stesso diritto di Bob di sostenere che non è la sua astronave a muoversi, ma è la Terra ad allontanarsi nella direzione opposta: non esiste il moto «vero». Ma Alice può veramente sostenere che la sua astronave era ferma durante il suo viaggio di un anno, mentre la Terra si muoveva, prima allontanandosi e poi riavvicinandosi? La risposta è sì, e viene dal fatto che se Alice avesse guardato la Terra attraverso una telecamera, avrebbe visto gli orologi terrestri muoversi più lentamente di quelli sull'astronave! Quindi, sosterrà lei, sarà Bob a essere più giovane quando si rivedono, perché durante il suo viaggio di un anno, solo un decimo (poco più di un mese) sarà passato sulla Terra. Ecco il paradosso.

Questa simmetria apparente negli effetti del moto relativo ha dato origine a molta confusione. In effetti si sono pubblicati molti articoli scientifici nei quali si sostiene che questo paradosso confuta la teoria di Einstein e le sue previsioni secondo cui il tempo scorre diversamente in un sistema di riferimento piuttosto che in un altro. Sicuramente Bob e Alice sperimentano una sorta di illusione ottica e il tempo non rallenta «davvero». A prima vista può sembrare che, data l'apparente simmetria tra i due sistemi di riferimento, non ci dovrebbe essere alcuna differenza tra il tempo che passa sulla Terra e quello che passa

sull'astronave, e quindi Alice e Bob avranno la stessa età quando lei ritorna. Quindi hanno torto entrambi? Di sicuro non possono avere entrambi ragione.

Credeteci o no, la risposta esatta è che Bob ha ragione: Alice sarà più giovane di lui, al suo ritorno. Il rompicapo è come far combaciare questo risultato con la relatività del moto: dove si rompe la simmetria?

Per risolvere questo paradosso, devo prima convincervi che il tempo rallenta sul serio quando si viaggia vicini alla velocità della luce, nello stesso modo in cui le lunghezze cambiano. Prima, sarà utile ragionare più accuratamente sulla natura del tempo stesso, il che ci tornerà utile nel prossimo capitolo, quando le cose si complicheranno davvero e incontreremo il primo vero paradosso, originato dai viaggi nel tempo.

### *Che cos'è il tempo?*

Possiamo in tutta onestà sostenere che fondamentalmente nessuno capisce che cosa sia il tempo. La teoria migliore che abbiamo sul tempo è quella fornita dalla relatività generale, introdotta nel capitolo sul paradosso di Olbers. Ma perfino le nostre teorie scientifiche più potenti spesso mostrano segni di cedimento quando le forziamo a darci risposte su domande metafisiche come «Il tempo scorre per davvero o è solo una sensazione?», oppure «La velocità a cui scorre il tempo è fissa? E la sua direzione?» Chiaramente, risposte come «Il tempo scorre dal passato al futuro e la sua velocità è di un secondo al secondo» non sono di grande aiuto.

Fino a quando Isaac Newton non completò il suo lavoro sulle leggi del moto nei suoi *Principia mathematica*, il tempo era considerato un argomento filosofico e non scientifico. Newton descrisse come gli oggetti si muovono e si comportano sotto l'influenza di forze, e siccome ogni movimento e ogni cambiamento richiedono il concetto di tempo, dovette includere il tempo nella sua descrizione matematica della natura. Il tempo newtoniano, però, è assoluto e inarrestabile. Si dice che scorre a velocità costante, come se ci fosse un immaginario orologio cosmico che segna i secondi, le ore, i giorni e gli anni indipendentemente dalla nostra esperienza sul suo fluire (spesso soggettiva), e noi non abbiamo alcuna influenza su di lui. Tutto ciò sembra assolutamente ragionevole, ma la fisica moderna ha dimostrato al di là di ogni dubbio che questa visione del tempo è sbagliata.

Nel 1905 Einstein rivelò la sua scoperta sulla relazione profonda che lega tra loro il tempo e lo spazio con la pubblicazione della teoria della relatività, che provocò una rivoluzione in fisica. Dimostrò che il tempo non è assoluto e indipendente dall'osservatore, ma piuttosto rallenta o accelera a seconda della velocità.

Vorrei chiarire che queste variazioni della velocità del tempo non hanno niente a che fare con la nostra percezione soggettiva. Naturalmente tutti abbiamo familiarità con aneddoti in cui ci divertiamo a una festa e il tempo passa velocissimo, o, al contrario, partecipiamo a una riunione noiosa che sembra durare un'eternità. Sappiamo bene che il tempo non accelera né rallenta in queste situazioni. Allo stesso modo, scopriamo che man mano che invecchiamo il tempo passa sempre più veloce; di nuovo, sappiamo bene che questo non è dovuto a un reale accelerare del tempo, è solo perché ogni anno che passa è una frazione sempre più piccola della nostra vita: pensate a quando eravate bambini e quanto tempo passava tra un compleanno e l'altro. Nonostante queste esperienze, tutti abbiamo una forte, viscerale consapevolezza di un tempo assoluto, newtoniano, che esiste davvero «fuori da noi» e scorre alla stessa velocità in tutto l'universo.

Ma anche prima dell'arrivo di Einstein, alcuni scienziati e filosofi non erano del tutto soddisfatti di questa descrizione del tempo esterno e assoluto, e molti avevano discusso questioni legate alla velocità e alla direzione dello scorrere del tempo. Alcuni filosofi sostenevano che il tempo stesso fosse un'illusione. Consideriamo il seguente piccolo paradosso, che suona proprio come un ragionamento degno di Zenone:

Il tempo, concorderete certamente, si può dividere in tre componenti: il passato, il presente e il futuro. Sebbene abbiamo retaggi dal passato, e ricordiamo eventi accaduti, di sicuro dobbiamo convenire che il passato non esiste più. Il futuro, d'altra parte, deve ancora accadere, e quindi anch'esso si può considerare non esistente. Questo lascia solo l'istante presente, che è definito come la linea di demarcazione tra passato e futuro. Sicuramente «ora» esiste. Ma sebbene percepiamo «ora» come un momento cangiante, che percorre la linea del tempo trasformando il futuro nel passato, è comunque solo un istante, e come tale non ha alcuna durata. Il momento presente, che cambia costantemente, non è altro che la linea di demarcazione tra passato e futuro, e quindi non si può dire che abbia una reale esistenza. Se tutte e tre le componenti del tempo non esistono, allora il tempo stesso è un'illusione!

Suggerisco di prendere questi arguti ragionamenti filosofici *cum grano salis*.

Ma torniamo al nostro argomento principale: la cosa più difficile da giustificare

è il fatto che il tempo effettivamente «scorre». È naturalmente difficile per noi negare la sensazione che questo è proprio ciò che succede, ma nella scienza le sensazioni viscerali, per quanto forti, non sono sufficienti. Nel linguaggio naturale diciamo «il tempo passa», «verrà il momento», «l'attimo è fuggito» e così via. Ma se ci pensiamo, il moto, e qualsiasi cambiamento, va valutato rispetto al tempo: è così che definiamo il cambiamento. Quando vogliamo descrivere la velocità di un certo processo o contiamo il numero di eventi in ogni unità di tempo, come il numero di battiti cardiaci al minuto, oppure misuriamo il cambiamento per unità di tempo, come per esempio quanto peso ha preso un bambino in un mese. Ma misurare la velocità a cui il tempo stesso cambia è senza senso, perché non possiamo confrontare il tempo con se stesso.

Per chiarire, vi farò la seguente domanda: come ci accorgeremmo che il tempo accelera? Siccome noi esistiamo all'interno del tempo e misuriamo la sua durata usando orologi che, come il nostro orologio interno, accelererebbero anch'essi, non ce ne accorgeremmo mai. L'unico modo per parlare del passaggio del tempo è quello di confrontarlo con un tempo esterno, fondamentale.

Ma se esistesse un tempo esterno, fondamentale, rispetto al quale misurare la velocità a cui scorre il nostro tempo, il problema sarebbe solo spostato di un passo, non risolto. Certamente, se il tempo per sua natura scorre, anche questo tempo esterno scorrerà. In questo caso, siamo nuovamente di fronte al problema di trovare un altro tempo, ancora più fondamentale, rispetto al quale misurare lo scorrere del tempo esterno, e così via all'infinito.

Il fatto che non riusciamo a definire la velocità con cui scorre il tempo non significa che esso non scorra affatto. Forse sta fermo, mentre noi (la nostra coscienza) ci muoviamo lungo il tempo: siamo noi ad andare verso il futuro e non il futuro che viene a noi incontro. Quando guardiamo fuori dal finestrino di un treno in corsa e vediamo i campi scorrere al nostro fianco, in realtà sappiamo bene che è il treno a muoversi mentre i campi stanno fermi. Allo stesso modo, abbiamo la netta impressione soggettiva che il momento presente (ciò che chiamiamo «ora») e un evento nel futuro (per esempio il prossimo Natale) si avvicinino l'uno all'altro. L'intervallo di tempo che li separa si rimpicciolisce. Potremmo descrivere questa situazione dicendo che ci stiamo avvicinando al Natale, oppure che il Natale si avvicina; in ogni caso, abbiamo la sensazione che qualcosa stia cambiando. Sicuramente possiamo essere tutti d'accordo su questo, vero? Per niente: molti fisici confutano la validità perfino di questa

semplice idea.

Per quanto possa sembrare strano, le leggi della fisica non dicono nulla sullo scorrere del tempo. Descrivono il modo in cui ogni cosa, dagli atomi, agli orologi, alle astronavi, alle stelle si comporta quando è soggetta a una forza in ogni dato istante, e ci danno anche le regole per calcolare il comportamento o lo stato di un oggetto in ogni istante futuro. Ma da nessuna parte le leggi della fisica dicono nulla sul fatto che il tempo scorre. Il concetto che il tempo «passa», o si muove, in fisica manca completamente. Scopriamo che il tempo, così come lo spazio, esiste; semplicemente «è». Forse questa sensazione dello scorrere del tempo è solo una sensazione, per quanto reale ci appaia. Per ora la scienza non riesce a darci una spiegazione soddisfacente che ci indichi da dove venga questa percezione del tempo che scorre e del cambiare del momento presente. Alcuni fisici e filosofi si spingono fino a dire che manca qualcosa nelle leggi della fisica, e potrebbero avere ragione.

D'accordo, basta con la filosofia per ora. Torniamo a come e perché la velocità del tempo cambia secondo la teoria della relatività ristretta, perché questo ci aiuterà a risolvere il paradosso dei gemelli.

### *Il tempo rallenta*

Guardiamo allora alla natura del tempo secondo Einstein. Nel capitolo precedente abbiamo descritto come una lunghezza venga misurata diversamente da osservatori che si muovono ad alta velocità l'uno rispetto all'altro. Un modo semplice di vedere che questo avrà un effetto anche sul tempo è il seguente. Una formula familiare a tutti, che s'impara a scuola, è che la velocità è uguale alla distanza diviso il tempo. Ora, sappiamo che tutti gli osservatori, indipendentemente da quanto vanno veloci l'uno rispetto all'altro, vedono la luce muoversi alla stessa velocità. Se misurano distanze diverse (come nell'esempio dell'asta nel fienile), significa che la loro misurazione del tempo dev'essere anch'essa diversa, così che quando dividono le loro misure della distanza per il tempo arrivano entrambi alla stessa risposta per la velocità della luce. Quindi, se un osservatore misura la distanza tra due punti e ottiene il valore di un miliardo di chilometri, e la luce percorre questa distanza in un'ora, mentre un secondo osservatore sostiene che la distanza tra i due punti è di due miliardi di chilometri (ricorderete che due osservatori in moto relativo non

misurano le stesse lunghezze), allora a giudizio del secondo osservatore il raggio di luce deve coprire la distanza nel doppio del tempo, se deve andare alla stessa velocità. Così, il primo osservatore dirà che la luce viaggia a un miliardo di chilometri all'ora, e il secondo dirà che percorre due miliardi di chilometri in due ore, che è la stessa cosa.

Quindi, il fatto che tutti misuriamo la stessa velocità della luce ci costringe ad accettare il concetto che l'intervallo di tempo tra due eventi (in questo caso la partenza e l'arrivo del raggio di luce) avrà diversi valori per osservatori diversi: magari per me passa un'ora e per voi ne passano due.

Accettare il concetto della velocità del tempo relativa è molto difficile e quindi farò un altro tentativo per convincervi. Immaginate di accendere una pila e mandare un raggio di luce verso il cielo; poi io parto con un'astronave a fianco del raggio, viaggiando a tre quarti della velocità della luce. In effetti, secondo voi la luce si allontana da me a un quarto della velocità a cui si allontana da voi (come avviene quando una macchina veloce ne sorpassa una più lenta a una velocità che è la differenza tra le velocità delle due macchine). Logicamente, cosa vi potreste aspettare che io veda guardando fuori dalla finestra dell'astronave? La risposta ovvia, di buon senso, è che io dovrei vedere la luce che mi sorpassa a un quarto della velocità a cui si allontana da voi. Però, siccome Einstein ci assicura che tutti gli osservatori misurano la stessa velocità della luce, allora vedrò la luce sorpassarmi a trecentomila chilometri al secondo, la stessa velocità che vedete voi. Questo è ciò che prevede la teoria della relatività, e proprio questo risultato è stato verificato migliaia di volte nei laboratori di tutto il mondo nel corso del secolo scorso. Ma quali sono le conseguenze?

(Una nota: uso il termine «vedere» quando parlo di misurare la velocità di un raggio di luce. Ma naturalmente la luce deve viaggiare dal raggio ai nostri occhi, e ci vuole tempo. E cosa vuol dire «vedere un raggio di luce»? Intendiamo che la luce rimbalza sulla luce? Certamente no. Uso il termine «vedere» per dire «misurare in qualche modo», per esempio, nel caso di un impulso di luce, registrando il momento esatto in cui colpisce dei dispositivi adeguatamente posti lungo il suo cammino).

Quindi, io che viaggio a tre quarti della velocità della luce, come faccio a vedere la luce viaggiare alla stessa velocità a cui la vedete voi dalla Terra? Il solo modo per rendere tutto ciò possibile è che il tempo per me vada più



lentamente che per voi. Immaginiamo di avere orologi identici. Voi vedreste il mio ticchettare più lentamente, mi vedreste muovere più lentamente e, quando comunichiamo, la mia voce sarebbe rallentata e con un timbro più grave. Eppure, io non mi sentirei affatto diverso e sarei completamente inconsapevole del rallentare del tempo.

Gli allievi che studiano la teoria di Einstein imparano a calcolare matematicamente il rallentamento del tempo in funzione della velocità dell'astronave. Il tempo a bordo di un'astronave che viaggia a tre quarti della velocità della luce rispetto a qualche osservatore passerà il 50% più lento del tempo dell'osservatore. Cioè, ogni minuto che l'osservatore vede passare sull'orologio dell'astronave ci mette 90 secondi a passare, secondo l'orologio dell'osservatore.

Potreste pensare che questa situazione è di interesse puramente teorico, perché non abbiamo astronavi che possano nemmeno avvicinarsi a queste velocità. Ma perfino alla velocità più modesta delle navicelle Apollo, per esempio (circa 40000 chilometri l'ora), l'effetto sul tempo esiste: gli orologi in viaggio perdono qualche nanosecondo al secondo, piccole differenze trascurabili, ma sicuramente misurabili. Torneremo brevemente su questo tra breve.

Ma guardiamo un momento a un altro esempio del mondo reale, dove questo effetto diventa importante (e più avanti ne prenderemo in considerazione un altro ancora). Il rallentamento del tempo ad alta velocità è noto con il nome di «dilatazione del tempo», e viene comunemente preso in considerazione negli esperimenti di fisica, in particolare quelli in cui particelle subatomiche sono accelerate in dispositivi come il Large Hadron Collider al CERN di Ginevra. Qui, le particelle raggiungono velocità così vicine a quella della luce che, senza prendere in considerazione questi effetti relativistici, gli esperimenti non avrebbero alcun senso.

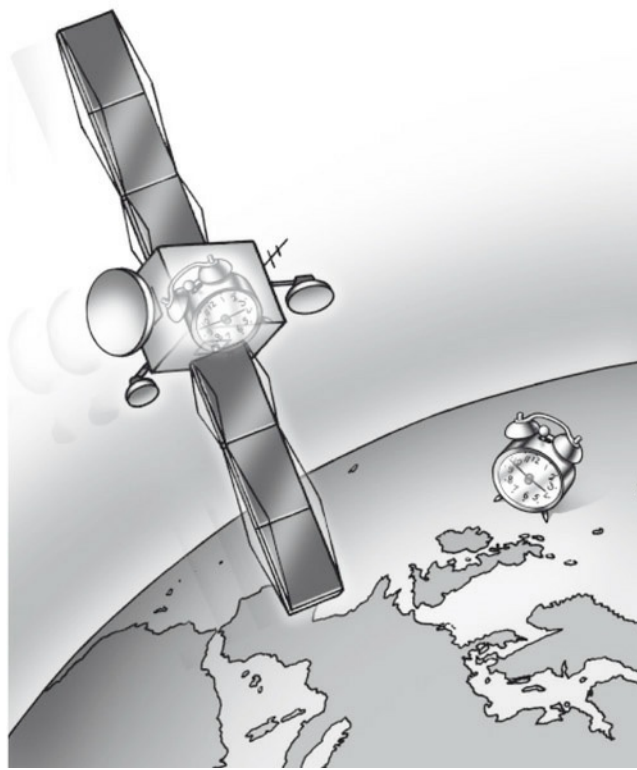
La teoria della relatività generale ci dà anche un altro mezzo per rallentare il tempo: la gravità.

La gravità della Terra ottiene l'effetto di far scorrere il tempo più lentamente che nello spazio vuoto, lontano dall'attrazione gravitazionale di stelle o pianeti. E siccome tutti gli oggetti hanno massa, tutti sono circondati dal campo gravitazionale generato da loro stessi. Più grande è l'oggetto, più forte è l'attrazione gravitazionale sui corpi vicini, e, secondo Einstein, più consistente è

l'effetto sul tempo. Una conseguenza affascinante, quando si applica alla velocità dello scorrere del tempo sulla Terra, è che più ci si alza sul livello del mare, più debole è l'attrazione gravitazionale della Terra e quindi il tempo scorre più velocemente. Nella pratica l'effetto è piccolissimo: dovremmo allontanarci molto, nello spazio, prima di essere completamente fuori dalla gravità terrestre. Perfino a 400 chilometri di altezza, che è l'orbita tipica dei satelliti, l'attrazione gravitazionale è al 90% di quello che sarebbe sulla superficie (la ragione per cui i satelliti riescono a orbitare indefinitamente senza cadere è che sono in orbita: sono in caduta libera attorno alla Terra e quindi sono senza peso, perché costantemente in moto).

Un esempio divertente, che amo citare quando descrivo gli effetti della gravità sul tempo, è che se il mio orologio resta indietro, un modo di aggiustarlo è quello di tenere il braccio sopra la testa. Siccome l'orologio è più alto, sentirà una minore attrazione gravitazionale, e quindi andrà un po' più veloce. Certo, per guadagnare un secondo dovrei tenere il braccio in alto per diversi milioni di anni.

In certe situazioni i due tipi di dilatazione (dovuti alla relatività ristretta e generale) possono compensarsi. Consideriamo due orologi, uno sulla Terra e uno su un satellite in orbita. Quale resterà indietro? Secondo l'orologio sulla Terra, il moto ad alta velocità dell'orologio in orbita dovrebbe farlo andare più lentamente, mentre il fatto che è in caduta libera attorno alla Terra, e quindi non percepisce alcuna forza di gravità, dovrebbe farlo andare più veloce. Quale dei due effetti vince?



L'orologio a bordo di un satellite va avanti o indietro rispetto a uno sulla Terra? Per rispondere a questa domanda, dobbiamo capire entrambe le teorie della relatività, generale e ristretta.

Figura 6.1  
Accelerare il tempo.

Tutto ciò comincia a sembrare paradossale, eppure la combinazione di questi effetti fu elegantemente dimostrata in un bell'esperimento eseguito nei primi anni settanta. È noto come «esperimento di Hafele-Keating», dal nome dei due fisici che lo idearono e lo portarono a termine.

Nell'ottobre del 1971, Joseph Hafele e Richard Keating posero due orologi molto precisi su due aerei commerciali che fecero il giro del mondo, uno verso est (in direzione concorde alla Terra), e l'altro verso ovest, e poi confrontarono il tempo segnato dai due orologi rispetto a un orologio rimasto al suolo nell'osservatorio di ricerca navale degli Stati Uniti, a Washington.

Bisognava misurare accuratamente i due effetti sul tempo, il rallentamento di un orologio in veloce movimento e l'accelerazione di un orologio che sta in alto rispetto alla superficie della Terra, tenendo conto della direzione di volo. Consideriamo attentamente: a causa della loro altitudine simile, gli orologi sentiranno una minore forza di gravità, e questo li farà accelerare rispetto all'orologio rimasto al suolo. Però, siccome l'aereo che va verso est si muove nel verso della Terra, e quindi va un po' più veloce (come una barca in direzione della corrente), il suo orologio dovrebbe rallentare rispetto a quello al suolo, mentre l'orologio che viaggia verso ovest, contro la rotazione della Terra,

dovrebbe andare un po' più veloce di quello al suolo.

All'inizio dell'esperimento gli orologi furono sincronizzati con grande precisione. Alla fine, l'orologio in viaggio verso est era rimasto 0,04 microsecondi indietro (il rallentamento dovuto alla sua velocità era più consistente dell'accelerazione dovuta alla minore attrazione gravitazionale), mentre l'orologio in viaggio verso ovest andava *avanti* di quasi dieci volte tanto: 0,3 microsecondi (l'accelerazione dovuta alla minore attrazione gravitazionale, si sommava agli effetti della relatività ristretta).

È tutto abbastanza complicato, e perfino i fisici più esperti aggrottano le sopracciglia quando cercano di capire la cosa, ma il punto importante è che, in entrambi i casi, i risultati misurati nell'esperimento sono esattamente in accordo con le previsioni matematiche delle teorie di Einstein.

Al giorno d'oggi questi effetti sul tempo sono regolarmente presi in considerazione sui satelliti GPS che rilevano la posizione sulla superficie terrestre (ecco qui l'altro esempio preso dal mondo reale che vi avevo promesso). Senza queste correzioni per le minuscole differenze tra lo scorrere del tempo sul satellite e al suolo, non riusciremmo a localizzare la nostra posizione usando i telefoni di ultima generazione e i navigatori satellitari con la precisione a cui siamo abituati. La precisione nella posizione (a meno di pochi metri) dipende dal tempo che impiega il segnale del dispositivo a terra a rimbalzare sul satellite e tornare indietro, e deve essere misurato con precisione, a meno di qualche centesimo di microsecondo. Di quanto ci sbaglieremmo se ignorassimo gli effetti relativistici? Dunque, il moto relativo implica che l'orologio del satellite andrebbe indietro di circa sette microsecondi al giorno rispetto al nostro. Però, l'assenza di gravità sul satellite (ricordiamo che è in caduta libera) implica che l'orologio del satellite andrà avanti di circa 45 microsecondi al giorno rispetto al nostro. Quindi alla fine va avanti di circa 38 microsecondi al giorno. Dato che ogni microsecondo corrisponde a una distanza di circa 300 metri, ignorare Einstein ci porterebbe a sbagliare la posizione di più di dieci chilometri al giorno, e l'effetto è cumulativo.

Ora che ho introdotto l'idea della gravità che rallenta il tempo, prendiamo di nuovo in considerazione l'esempio degli orologi sulla navicella Apollo in rotta verso la Luna. Ci aiuterà con il problema dei gemelli.

L'Apollo 8 fu la seconda missione del programma spaziale americano Apollo con uomini a bordo, e la prima a portare esseri umani fuori dall'orbita terrestre.

I tre membri dell'equipaggio, Frank Borman, James Lovell e William Anders, furono i primi a vedere il pianeta Terra nella sua interezza, e anche i primi a vedere la faccia nascosta della Luna. Al ritorno, Frank Borman sosteneva che tutti e tre erano più vecchi di quanto sarebbero stati rimanendo al suolo. Inoltre, diceva scherzando che gli avrebbero dovuto pagare gli straordinari per la frazione di secondo in più in cui erano stati in volo rispetto al tempo passato sulla Terra. Sebbene la sua rilevanza economica fosse insignificante, il tempo addizionale a bordo della navicella era reale.

Questo sembra contrastare il paradosso di questo capitolo, in cui la gemella in viaggio, Alice, torna più giovane del gemello che resta al suolo. La ragione per cui l'effetto è quello opposto è esattamente l'interazione sottile tra i due effetti relativistici sul tempo. Globalmente, i tre astronauti invecchiarono circa 300 microsecondi in più di chi rimane a casa. Facciamo i conti.

Il tempo a bordo dell'Apollo 8 va più veloce o più lento che sulla Terra, a seconda di quanto è lontana la navicella. Per le prime migliaia di chilometri, mentre si allontana, la gravità della Terra non è ancora sufficientemente debole da far accelerare il tempo a bordo, e la velocità dell'Apollo rispetto alla Terra risulta essere il fattore dominante, il che provoca un rallentamento del tempo degli astronauti, che invecchiano più lentamente dei loro colleghi al suolo. Ma quando si allontanano dalla Terra, gli effetti dell'attrazione gravitazionale diminuiscono e il tempo sull'Apollo inizia ad accelerare, il che significa che gli effetti della relatività generale vincono su quelli della relatività ristretta. Considerando tutto il viaggio, questa accelerazione del tempo è l'effetto dominante, e quindi sull'Apollo passa più tempo rispetto alla Terra, esattamente 300 microsecondi in più.

Per divertimento, i fisici alla NASA calcolarono con grande precisione se veramente gli astronauti fossero invecchiati di più, e scoprirono che questo era accaduto solo per William Anders, che era al suo primo volo nello spazio. Sia Borman che Lovell avevano partecipato a una missione orbitale su Gemini 7, durata due settimane, durante la quale, secondo i calcoli, il rallentamento del tempo dovuto alla velocità era stato l'effetto dominante, e quindi erano invecchiati meno dei terrestri di circa 400 microsecondi. Quindi, globalmente, entrambi avevano un guadagno netto di 100 microsecondi, ed erano in realtà leggermente più giovani di chi era rimasto a terra. Pertanto, invece di meritare

gli straordinari, erano stati pagati troppo.

### *La soluzione del paradosso dei gemelli*

Ora che abbiamo capito gli effetti della gravità sul tempo, torniamo a esaminare e, speriamo, a risolvere, il paradosso definito all'inizio del capitolo. Ricordiamo che ogni gemello può sostenere che è l'altro a muoversi davvero, e quindi ognuno sostiene che il tempo dell'altro scorre più lentamente. Bob dice che Alice è partita nella sua astronave e torna più giovane di lui, mentre Alice dice che è Bob, con tutta la Terra, che è partito e tornato indietro, e quindi è il suo tempo a essere andato più lentamente, rendendo Bob più giovane quando si rivedranno.

Ci sono molti modi di analizzare questo problema; quando arrivo a questo argomento nel corso che tengo all'università del Surrey, mi diverto un mondo con gli studenti a esaminare i diversi argomenti. Cominciamo dal più semplice.

La risposta giusta, come ho detto prima, è che Bob ha ragione e Alice ha torto: sarà lei a tornare più giovane del fratello. Prima di tutto, osserviamo che la loro situazione non è perfettamente simmetrica. Alice deve accelerare per lasciare la Terra, e poi, se viaggia in linea retta, deve rallentare, fare inversione e accelerare di nuovo, prima della frenata finale per atterrare. Bob, d'altra parte, rimane costantemente alla stessa velocità. Anche se Alice fa un percorso circolare, così da poter viaggiare a velocità costante, sentirà gli effetti dell'accelerazione dovuti al cambiamento continuo di direzione. Quindi il moto relativo dei due gemelli non è completamente simmetrico: Alice sente gli effetti del suo viaggio, mentre Bob rimane attaccato alla Terra, che ruota uniformemente. Però questo non ci dà una ragione ovvia per cui Alice sarà quella più giovane, alla fine.

C'è un modo di considerare il problema che prescinde da ogni accelerazione o rallentamento. Alice parte nello spazio, raggiunge la sua velocità di crociera prima di passare vicino alla Terra, e a quel punto lei e Bob sincronizzano gli orologi. Alice viaggia in linea retta a velocità costante e poi, a un certo punto (lo so che non è realistico, ma seguitemi, per ora), cambia istantaneamente direzione senza modificare la velocità e si dirige di nuovo verso la Terra. Questa è una situazione ideale, praticamente impossibile, ma presa comunque in considerazione dai fisici perché fornisce un'utile semplificazione senza essere

sbagliata. Ora possiamo analizzare la situazione analizzando la distanza percorsa da Alice, misurata da ognuno dei gemelli; di fatto, la ragione per cui Alice invecchia di meno si spiega con la contrazione delle lunghezze.

Consideriamo un esempio concreto. Diciamo che il punto in cui Alice si gira e torna indietro sia la stella Alfa Centauri, che dista quattro anni luce dalla Terra. Se Alice viaggia a metà della velocità della luce, secondo i calcoli di Bob ci metterà il doppio della luce a percorrere quella distanza: 8 anni; il che porta a un tempo totale di viaggio di 16 anni per andare avanti e indietro. Però, per Alice, la distanza da percorrere si contrae per gli effetti relativistici dovuti alla sua alta velocità, o piuttosto alla velocità di Alfa Centauri in avvicinamento, perché Alice può legittimamente sostenere di essere ferma. A questo punto è ovvio che per lei il viaggio avanti e indietro durerà meno di quanto sostiene Bob: se non va così lontano, ci metterà di meno.

In realtà, ovviamente, Alice non può invertire la rotta istantaneamente e quindi deve rallentare, girarsi e accelerare di nuovo. È qui che dobbiamo ricorrere all'altro metodo per rallentare il tempo, la relatività generale. Ma dov'è l'effetto gravitazionale? Nell'esempio usato la stella Alfa Centauri è il punto in cui Alice si gira e torna indietro, ma chiaramente possiamo immaginare qualunque altro punto nello spazio vuoto, così che l'astronave non incontri alcun campo gravitazionale nel suo viaggio. Dobbiamo quindi considerare un'altra idea di Einstein.

### *Il pensiero più felice della sua vita*

Vi siete mai chiesti perché quando si descrivono gli effetti dell'accelerazione in un'automobile o su un aereo si parla di «forza g»? Diciamo che un pilota di Formula 1 percepisce diversi g di forza quando accelera, frena, o prende una curva molto velocemente. La «g» significa «gravità» e sottolinea così un legame molto importante tra l'accelerazione e la forza di gravità. Sappiamo bene l'effetto che fa: quando siamo su un aereo al decollo, prima sentiamo il motore rombare, quando il pilota lo spinge al massimo, poi ci sentiamo schiacciati contro il sedile mentre l'aereo accelera sulla pista, acquistando velocità per sollevarsi dal suolo. Provate a staccare il capo dal poggiatesta subito prima del decollo, e sentirete una forza che cerca di tirarlo indietro. Questa resistenza è simile a quella che attira la vostra testa verso il cuscino quando siete sdraiati a

letto. Se l'aereo accelera a 1 g, la sensazione sarà esattamente la stessa. L'accelerazione ha lo stesso effetto della forza di gravità.

Einstein scoprì questa equivalenza qualche anno prima di completare la formulazione della teoria della relatività generale. Lo chiamò, un po' banalmente «principio di equivalenza». Più tardi avrebbe raccontato che questo momento di «eureka» fu il pensiero più felice di tutta la sua vita, il che, se non altro, dimostra la sua totale dedizione alla scienza. Da qualche tempo stava considerando cosa accade agli oggetti in caduta libera. La sensazione di mancanza di peso che sperimentiamo divertendoci sull'ottovolante è la migliore dimostrazione dell'equivalenza, perché è proprio in quel momento, quando ci arrendiamo al campo gravitazionale della Terra, che non sentiamo più la sua attrazione. È come se la nostra accelerazione verso il basso cancellasse la sensazione della gravità.

Einstein dimostrò che tutti gli effetti della gravità sullo spazio e sul tempo si manifestano anche quando un oggetto è in accelerazione. In effetti, se fossimo in un'astronave che accelera a 1 g, allora non riusciremmo a distinguere la sensazione di gravità che proveremmo sulla Terra seduti su una sedia appoggiata con lo schienale sul pavimento. In entrambi i casi sentiremmo la stessa attrazione verso lo schienale. Quest'idea è cruciale, perché implica che l'accelerazione rallenta lo scorrere del tempo proprio come fa un campo gravitazionale. Accelerare e rallentare equivale a immergersi in un campo gravitazionale e l'effetto può essere maggiore di quello del campo gravitazionale terrestre.

Quindi possiamo mettere la parola fine al paradosso dei gemelli. La ragione per cui Alice invecchia meno di Bob è che è lei ad accelerare e rallentare, e quindi il suo tempo scorre meno velocemente durante i periodi in cui la sua velocità varia, secondo le previsioni della relatività generale, sia che viaggi in linea retta avanti e indietro sia che non lo faccia. Se infatti cambiasse direzione nello spazio, dovrebbe accelerare e rallentare più volte, aumentando l'effetto.





Correre in tondo a una velocità vicina a quella della luce fa scorrere il tempo più lentamente.

Figura 6.2  
Rallentare il tempo.

### *Osserviamo gli orologi*

Potremmo finire qui, immagino. Alla fin fine non c'è alcun paradosso dei gemelli (o «paradosso degli orologi» come viene più noiosamente chiamato da alcuni), perché i loro «viaggi» nello spazio-tempo non sono simmetrici. Ma è interessante considerare cosa vedrebbe ciascuno dei due gemelli, se potessero scambiarsi messaggi reciprocamente durante il viaggio.

Diciamo che Alice e Bob si mettano d'accordo per mandare un segnale luminoso a intervalli regolari, secondo il loro orologio, per esempio una volta al giorno sempre alla stessa ora. Durante il viaggio di andata di Alice, i gemelli si allontanano ad alta velocità, quindi ognuno riceverà il segnale dell'altro a intervalli maggiori di 24 ore, a causa degli effetti sul tempo previsti dalla teoria della relatività ristretta. Ma in aggiunta, ogni segnale luminoso dovrà viaggiare più a lungo di quello precedente, e quindi si avrà un altro ritardo, oltre a quello dovuto al rallentamento del tempo. Questo secondo effetto è dovuto allo stesso principio alla base dell'effetto Doppler (il cambiamento di frequenza delle onde prodotte da sorgenti in moto).

Quando Alice rallenta, accelera, o cambia direzione, il suo tempo rallenta ancora di più e i suoi segnali arrivano ancora più distanti l'uno dall'altro. Alla fine, la cosa particolarmente interessante è ciò che succede durante il viaggio di ritorno, perché i due effetti che nel viaggio di andata si sommavano, entrambi ritardando il segnale luminoso, ora sono in contrasto: la velocità relativa dei due gemelli fa sì che ognuno veda il tempo dell'altro rallentato, e quindi i segnali più

distanti di 24 ore, ma siccome ogni segnale deve percorrere una distanza sempre minore, cominciano ad arrivare aggregati. Facendo i calcoli si vede che quest'aggregazione (segnali che arrivano a intervalli minori di 24 ore) vince sull'effetto di rallentamento del tempo, e quindi ciascuno vede l'orologio dell'altro andare avanti. Se potessero, vedrebbero accelerate anche le azioni e i movimenti dell'altro.

Ciò nonostante, alla fine di tutte queste considerazioni Alice torna sulla Terra più giovane di Bob. C'è altro da dire? Certamente: Alice ha viaggiato per un anno e torna sulla Terra, dove sono passati dieci anni, e quindi possiamo ben dire che ha viaggiato nel futuro.

### *Il viaggio nel tempo dei poveri*

Molti sosterrrebbero che rallentare il tempo non è «veramente» viaggiare nel futuro. In definitiva, cosa c'è di diverso dall'animazione sospesa, o, a pensarci bene, dal sonno? Se ci si addormenta all'improvviso e poi ci si sveglia convinti di aver dormito solo qualche minuto, ma guardando l'orologio ci si rende conto che sono passate diverse ore, non è forse anche questo un po' come viaggiare nel futuro?

Io controbatterei che il rallentamento relativistico del tempo è molto più sostanziale, e rappresenta un vero viaggio nel tempo, anche se è pur sempre il viaggio nel tempo «dei poveri». Potreste pensare che un vero viaggio nel tempo implica che il futuro esiste già, parallelo al nostro presente, in attesa del nostro potenziale arrivo. Non è così in questo caso. Quello che succede è che il futuro si realizza sulla Terra mentre Alice è in viaggio. È solo che, siccome per lei scorre meno tempo, Alice si muove su un altro binario temporale rispetto alla Terra. In un certo senso, Alice va avanti-veloce e arriva nel futuro prima degli altri, e l'anticipo con cui arriva nel futuro dipende solo dalla velocità della sua astronave e da quante curve e cambiamenti di direzione ci sono stati nel suo cammino.

La domanda, quindi, è: se Alice torna sulla Terra, e il futuro non le piace, c'è un modo per lei di tornare indietro, nel suo tempo? Questo, naturalmente, vorrebbe dire viaggiare nel passato, ed è tutta un'altra storia. Siamo alla questione che ci porta direttamente all'unico vero paradosso di questo libro, che esploreremo nel prossimo capitolo.

## 7. Il paradosso del nonno

**Chi viaggia nel passato e uccide suo nonno, non sarebbe mai nato.**

Se io potessi viaggiare nel passato e uccidere il mio nonno materno prima che conoscesse la nonna, la mia mamma non sarebbe mai nata, e io nemmeno. Ma se io non fossi mai nato, non sarei andato nel passato a uccidere mio nonno, che quindi sarebbe vissuto, avrebbe conosciuto mia nonna, e alla fine io sarei nato, sarei andato nel passato e lo avrei ucciso; ma allora... e così via. Il ragionamento gira in tondo, in un circolo vizioso contraddittorio. Sembra che io non riesca a uccidere mio nonno proprio perché ci sto provando.

Questo è il classico paradosso del viaggio nel tempo, e si presenta in molte forme diverse. Per esempio mi ha sempre incuriosito sapere perché bisogna tornare indietro abbastanza da uccidere il nonno e non il padre o la madre. Forse saltare una generazione rende la cosa meno orribile. Non c'è bisogno di una storia così brutale, del resto; questa è solo la versione tradizionale, creata presumibilmente in tempi più violenti. Una versione più benevola descrive una persona che inventa una macchina del tempo, torna nel passato e la distrugge un attimo prima di accenderla, così che non la può usare per tornare indietro e distruggerla.

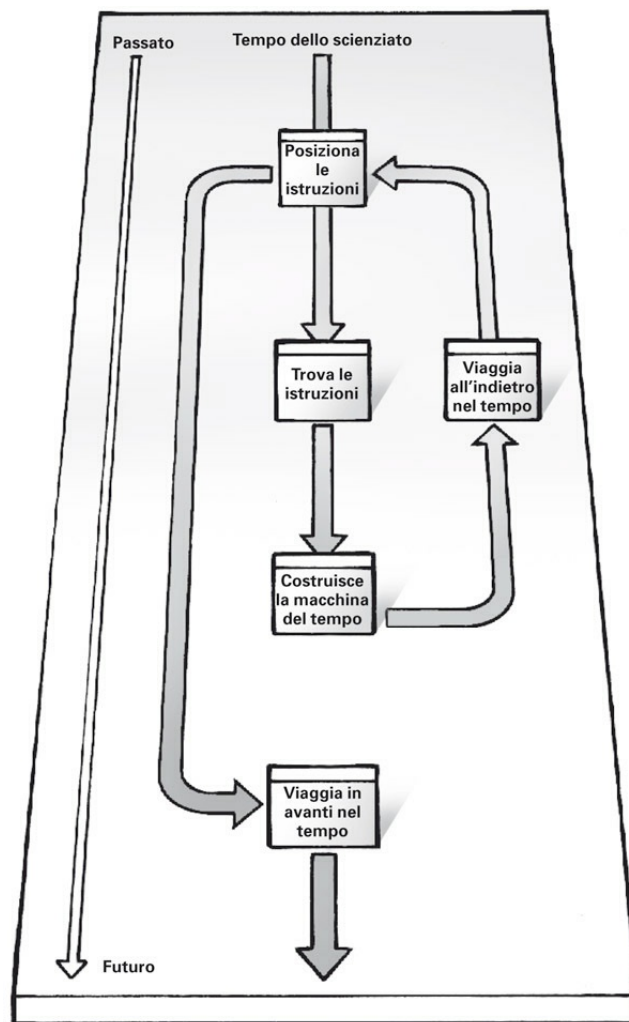


Figura 7.1  
Il paradosso del viaggio nel tempo.

Il paradosso si può enunciare anche in un altro modo. Uno scienziato scopre su uno scaffale nel suo laboratorio le istruzioni per costruire una macchina del tempo. La costruisce, e, un mese dopo, la usa per tornare indietro nel tempo di un mese, portando le istruzioni con sé. Le mette sullo scaffale affinché il se stesso di un mese prima le trovi. Chiaramente, così come nel paradosso del nonno, il futuro sembra predeterminato e non è possibile alcun libero arbitrio nelle nostre azioni. Nel primo paradosso, non possiamo uccidere il nonno perché dobbiamo assicurare la nostra esistenza affinché i fatti possano avvenire. Nel secondo esempio, lo scienziato deve costruire la macchina del tempo affinché lo possa/potrà/poté fare (i tempi dei verbi tendono a confondersi quando si parla di viaggi nel tempo). Ma cosa succede se trova una nota sulle istruzioni, secondo la quale esse provengono dal se stesso nel futuro in viaggio nel passato, e decide di non costruirla, e di distruggere le istruzioni?

C'è un altro paradosso in questa storia, che non è facile individuare, riguardante il fatto che non si capisce chi abbia creato le istruzioni per costruire

la macchina del tempo: sono scoperte, usate, e tornano indietro in un circolo vizioso temporale continuo. Ma da dove vengono? Come sono finiti gli atomi di inchiostro sulla carta? Ci vogliono intelligenza e conoscenza per creare queste istruzioni, eppure sembrano sorgere da un circolo logico coerente, in avanti in tempo reale e all'indietro tramite la macchina del tempo, da cui non c'è scampo e, ancora più importante, non c'è punto di origine per la loro creazione.

Oggi come oggi, conosciamo tutti il concetto di viaggio nel passato, grazie alle molte storie di fantascienza dei libri e dei film: basti pensare a grandi successi come *Terminator* o *Ritorno al futuro*. Molti di noi si accontentano di sospendere la logica (giustamente) e godersi la storia, ma è facile restare invischiati nei paradossi logici se si ha la giusta predisposizione.

Esiste un terzo e ultimo paradosso di cui dobbiamo occuparci: usare una macchina del tempo viola la legge di conservazione della massa e dell'energia. Si potrebbe ad esempio usare la macchina, tornare indietro di cinque minuti e incontrare se stessi, quindi ci sarebbero due copie della stessa persona nello stesso momento. In quel momento, uno dei due corpi è apparso dal nulla, aggiungendo massa all'universo. Facciamo attenzione: questo non è il caso del fenomeno ben noto nella fisica subatomica, chiamato «produzione di coppia», in cui una particella e la sua anti-particella (una sorta di immagine allo specchio) si creano a partire dalla pura energia. Appena prima del vostro arrivo, non c'è energia di scorta da usare per pareggiare i conti dell'improvvisa apparizione della vostra massa. Stiamo veramente violando uno dei capisaldi centrali di tutta la fisica: il primo principio della termodinamica, che dice, parafrasando, «non si può generare qualcosa dal niente».

Qualcuno ha suggerito un modo per aggirare i paradossi del viaggio nel tempo sostenendo che il viaggiatore è incapace di partecipare agli eventi passati e può agire solo come osservatore. In questa versione, riusciremmo a tornare nel passato e guardarlo scorrere come un film, immersi nell'azione, mentre nessuno ci vede o ci percepisce. Sfortunatamente, questa forma passiva di viaggio nel passato, se pur priva di paradossi, è ancora meno plausibile, perché vedere qualcosa (così come il viaggiatore vedrebbe gli eventi del passato) significa che dei fotoni viaggiano dall'oggetto osservato agli occhi dell'osservatore, e scatenano una serie di eventi chimici ed elettrici nella retina, che alla fine provocano impulsi nervosi verso il cervello. Questi fotoni interagiscono in modo molto reale con gli oggetti osservati e portano informazione verso gli occhi

dell'osservatore. A livello microscopico, affinché un osservatore riesca a toccare, a sentire, o a interagire in qualunque modo con il passato, deve riuscire a scambiare fotoni con l'ambiente circostante, perché quasi tutti i tipi di contatto tra due corpi nel mondo reale avvengono attraverso un'interazione elettromagnetica tramite scambio di fotoni. Non voglio entrare nei particolari tecnici, ma il risultato finale è: se si vede qualcosa, si riesce anche a toccare. Quindi, se riusciamo a viaggiare nel passato per osservarlo, riusciremo anche a interagire con esso e partecipare agli eventi passati.

Se vogliamo ficcare il naso nel passato ed evitare i paradossi, dobbiamo trovare un altro modo.

### *Come raggiungere il passato*

Ci sono essenzialmente due modi per raggiungere il passato. Il primo è mandare informazione *all'indietro* nel tempo. Questo tipo di viaggio ispirò lo scrittore di fantascienza Gregory Benford nel suo romanzo *Timescape* del 1980, in cui alcuni scienziati comunicano a decenni di distanza: nel 1998 mandano un messaggio indietro nel 1962 per avvisare del disastro ecologico imminente. Lo fanno usando ipotetiche particelle subatomiche chiamate «tachioni», la cui esistenza è prevista matematicamente dalla teoria della relatività, che hanno proprietà così strane che al momento si trovano confinate nei romanzi di fantascienza. I tachioni (il cui nome, dal greco *tachys*, ossia «veloce», fu coniato nei primi anni sessanta, quando vennero studiati seriamente per qualche tempo) sono particelle che viaggiano più veloci della luce, e così facendo devono anche tornare indietro nel tempo.

Questa implicazione fu descritta in modo divertente da un biologo canadese di nome Reginald Buller in un limerick pubblicato sulla rivista «Punch» nel 1923:

Un tale Pelide, diceva la gente,  
del lampo viaggiava più velocemente.  
Partì un certo giorno  
e fece ritorno  
al sorgere del sole del dì precedente.

Torneremo più tardi su come e perché le cose stanno così.

L'altro modo di arrivare al passato è viaggiare in avanti nel tempo, apparentemente, su una traiettoria curva nello spazio-tempo che ci riporta

indietro nel passato (come fare il giro della morte sull'ottovolante). Queste traiettorie si chiamano in fisica «curve spaziotemporali chiuse di tipo tempo» e sono state l'oggetto di ricerca teorica seria in anni recenti.

Chiaramente, il fatto che io parli di tachioni e di curve spaziotemporali chiuse significa che non intendo congedare in fretta i paradossi dei viaggi nel tempo. Sarebbe troppo facile: dire che i viaggi nel passato (al contrario dei viaggi nel futuro di cui abbiamo parlato nell'ultimo capitolo) sono logicamente impossibili renderebbe questo un capitolo troppo scarno. Cercheremo piuttosto di risolvere i paradossi scientifici più ardui restando all'interno dei limiti posti dalle leggi fisiche, così come le concepiamo oggi. La ragione per cui li prendo sul serio è che (e questo potrà forse sorprendervi) fin dalla metà del secolo scorso si sa che la teoria della relatività prevede in realtà la possibilità di viaggiare nel passato, sebbene a certe condizioni, e solo per mezzo di cavilli matematici.

La teoria della relatività ristretta mostra come il primo tipo di viaggio nel passato sia possibile (cioè il viaggio all'indietro causato da una velocità maggiore di quella della luce), mentre la relatività generale permette l'esistenza dell'altro tipo, più tradizionale, di viaggio nel passato, quello attraverso le curve spaziotemporali chiuse di tipo tempo. Il logico Kurt Gödel, che lavorò con Einstein a Princeton negli anni quaranta, dimostrò matematicamente la possibilità, almeno teorica, di questi viaggi nel tempo, senza violare alcuna legge di natura, vale a dire a parte i paradossi già menzionati. Quindi dobbiamo affrontare questi paradossi lancia in resta, se vogliamo riscattare la reputazione di Einstein.

### *Più veloce della luce*

Prima di tutto, occupiamoci del perché andare più veloce della luce significa tornare indietro nel tempo. Per farlo, userò lo scenario dell'asta nel fienile, descritto nel quinto capitolo. Ricapitoliamo: noi siamo nel fienile e guardiamo il saltatore correre quasi alla velocità della luce portando la sua asta accorciata. Siccome, per noi, l'asta è più corta del fienile, possiamo chiudere entrambe le porte, anteriore e posteriore, allo stesso momento, e rinchiudere l'asta all'interno per una frazione di secondo. In linea di principio, potremmo chiudere la porta anteriore non appena il retro dell'asta è entrato, *prima* di chiudere la porta posteriore: l'asta è più corta del fienile, e quindi ci sarà un breve

intervallo tra il momento in cui il retro dell'asta entra (e la porta si chiude dietro di lei), e il momento in cui la punta dell'asta esce (e in quel momento la porta posteriore dovrà essere di nuovo aperta, per far uscire l'asta). Durante questo brevissimo intervallo abbiamo la possibilità di chiudere la porta posteriore. Quindi, nel nostro sistema di riferimento, è possibile chiudere la porta anteriore del fienile e successivamente quella posteriore.

Ora, cosa succede se la chiusura della porta posteriore è innescata dalla chiusura della porta anteriore? In questo caso l'ordine degli eventi è fisso, con la porta posteriore che si chiude (l'«effetto») *perché* la porta anteriore si è appena chiusa (la «causa»). Il fatto che la causa deve venire prima dell'effetto si chiama «principio di causalità» ed è un concetto fondamentale della natura. Vedere un effetto prima della causa viola il principio di causalità e dà origine a ogni sorta di paradosso logico. Per esempio, se io premo un interruttore e accendo la luce, allora la mia azione è la causa e l'illuminazione della stanza è l'effetto. Ma supponiamo che un altro osservatore, in moto a velocità vicina a quella della luce, passi a fianco a me e veda la luce accendersi prima che io prema l'interruttore. In teoria, potrebbe impedirmi di premere l'interruttore *dopo* che la luce si è già accesa. Secondo la «relatività della simultaneità», due osservatori in moto l'uno rispetto all'altro non solo vedono intervalli di tempo diversi tra gli eventi, ma a volte li vedono anche accadere in ordine inverso nel tempo. Questo tipo di causalità alla rovescia è esattamente ciò che succede quando i segnali viaggiano più veloce della luce.

Per capire meglio, torniamo all'asta nel fienile. Il saltatore, come ricorderete, vede il fienile accorciato e quindi secondo lui l'asta non potrà mai starci dentro. Nel suo sistema di riferimento, che è altrettanto valido del nostro, le due porte si aprono e si chiudono in un certo ordine: la porta posteriore si chiude, e si riapre *prima che la porta anteriore si chiuda*. Solo con questo ordine degli eventi l'asta può passare incolume attraverso il fienile, con entrambe le porte che si chiudono per qualche istante. Ma se la porta posteriore si chiude perché un segnale viene mandato dalla porta anteriore una volta che questa si è chiusa, allora il saltatore deve vedere gli eventi accadere nell'ordine inverso, e per lui l'effetto accade prima della causa. E questo è un problema.

Nonostante ciò, la teoria della relatività riesce a spiegare benissimo la cosa, basandosi su una matematica solidissima. Consideriamo il seguente scenario: in un esperimento, noi premiamo un interruttore sulla Terra e una luce si accende



sulla Luna. La luce ci mette circa 1,3 secondi per percorrere la distanza tra la Terra e la Luna, quindi, se il nostro segnale viaggia alla velocità della luce, vedremo il lampo di luce attraverso il telescopio 2,6 secondi più tardi (il tempo necessario alla luce per fare andata e ritorno). Ma se potessimo mandare il segnale più veloce della luce magari riusciremmo a vedere il lampo di luce solo 2 secondi dopo, il che significa che il nostro segnale verso la Luna ci ha messo solo 0,7 secondi per arrivare fin là. Tutto ciò sembra perfettamente ragionevole, ma la teoria della relatività ci dimostra che in natura non è possibile.

Per convincervi dovete veramente fare i conti (oppure potete credermi sulla parola). A un osservatore in viaggio a velocità vicine a quella della luce, il lampo sulla luna apparirebbe *prima* del momento in cui l'interruttore viene azionato sulla terra. Questa sarebbe una violazione del principio di causalità, cioè l'effetto appare *prima* della sua causa, e quindi il segnale dalla Terra alla Luna avrebbe dovuto viaggiare indietro nel tempo. Ma la relatività ci insegna che il moto è relativo e quindi l'ordine degli eventi secondo l'osservatore in moto è valido quanto quello dell'osservatore sulla Terra. Pertanto il solo modo per evitare queste situazioni è decretare l'impossibilità che un segnale viaggi più veloce della luce.

È proprio questa una delle ragioni per cui i fisici sanno che niente può viaggiare più veloce della luce: se fosse possibile, si arriverebbe a una violazione del principio di causalità. Questo, secondo me, rende impossibili i viaggi nel tempo del primo tipo.

Esploriamo ora l'idea delle curve spaziotemporali chiuse di tipo tempo.

### *L'universo-blocco*

Per visualizzare meglio i cammini spaziotemporali, introdurremo il concetto di universo-blocco, che è una semplice e profonda filosofia che immagina lo spazio e il tempo in modo unificato.

Immaginiamo l'universo come un'enorme scatola rettangolare. Ora, se aggiungiamo il tempo come quarta dimensione, otteniamo un'entità quadridimensionale chiamata spesso «universo-blocco». Tuttavia, siccome non riusciamo a visualizzare quattro dimensioni, dobbiamo semplificare l'idea per riuscire a creare un'immagine di uso pratico: sacrificiamo una delle tre dimensioni spaziali, schiacciando i volumi in una superficie bi-dimensionale che

costituisce una faccia, o lato, dell'universo-blocco. La dimensione orizzontale, perpendicolare a questa superficie (la terza dimensione) rappresenterà il tempo: è l'asse temporale. Possiamo immaginare il tutto come una gigantesca forma di pan carré, in cui ogni fetta è un'immagine dello spazio in un dato istante, e le fette successive corrispondono a istanti successivi. Naturalmente, la descrizione non è accurata, perché lo spazio ha tre, e non due dimensioni, ma può servire come supporto per visualizzare l'asse temporale. La figura 7.2 mostra una rappresentazione dell'universo-blocco come l'ho descritto sopra.

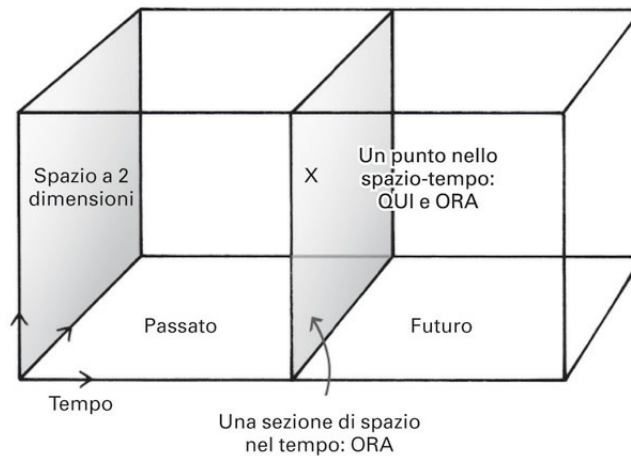


Figura 7.2  
L'universo-blocco.

La cosa interessante di questa figura è che un evento che accade in un certo posto e in un certo momento si può rappresentare come un punto nella scatola (x nella figura 7.2). Ancora più importante, in questa rappresentazione si vede il tempo tutto insieme, come un paesaggio temporale, con tutti gli eventi passati e futuri che coesistono nell'universo-blocco statico e fuori dal tempo.

Ci si può chiedere se questa rappresentazione abbia qualcosa a che fare con la realtà, o se sia solo un utile strumento di visualizzazione. Per esempio, come si mette in relazione questo modello statico dello spazio-tempo con la sensazione molto reale che il tempo «scorre»? I fisici hanno due modi per spiegarlo. Il senso comune ci dice che il nostro «ora» è un'istantanea, una «fetta» dello spazio, con l'universo passato a sinistra e l'universo futuro a destra. Questa visione della totalità dell'esistenza, in cui l'intero tempo (passato, presente e futuro) è sciorinato davanti a noi, congelato e immobile, è un'esperienza che nessuno vivrà mai, in pratica, perché non possiamo porci al di fuori dell'universo. Il nostro «ora» si muove da destra a sinistra, da istante a istante, da una fetta di pane all'altra, come altrettanti fotogrammi di un film.

L'alternativa è scartare del tutto il concetto di «presente», così che il passato, il presente e il futuro coesistano, e tutti gli eventi già accaduti o che devono ancora accadere, si trovino gli uni accanto agli altri nell'universo-blocco. In questa immagine, non solo il futuro è predeterminato, ma esiste già, ed è fisso e inalterabile tanto quanto il passato.

Questo è più che un modo comodo di visualizzare lo spazio-tempo: è la visione che risulta dall'interconnessione tra lo spazio e il tempo descritta dalla teoria della relatività. Consideriamo due eventi separati, A e B, che possono avere una relazione causa-effetto oppure no, e che accadono in due luoghi e istanti diversi, A prima di B. Secondo la nostra comprensione dello spazio e del tempo prima dell'arrivo di Einstein, entrambe le distanze spaziali e temporali tra A e B si consideravano indipendenti e identiche per tutti gli osservatori. Invece Einstein ci ha mostrato come due osservatori che si muovono ad alta velocità l'uno rispetto all'altro misurino queste due quantità (tempo e distanza spaziale) ottenendo risultati diversi. Ma se consideriamo gli eventi nello spazio-tempo, vediamo che, nell'universo-blocco, tutti gli osservatori concordano e misurano la stessa «distanza» tra A e B, una distanza che è una combinazione di spazio e di tempo. Solo nello spazio-tempo riusciamo a calcolare un numero assoluto su cui siamo tutti d'accordo. Questo fatto è cruciale nella teoria della relatività. Naturalmente, qui non è questo il punto. Menzionavo la cosa solo per rassicurarvi sul fatto che non ci inventiamo cose come l'universo-blocco così, tanto per divertirci.

La coesistenza di tutto il tempo nell'universo-blocco rende l'idea di viaggiare nel tempo molto più plausibile. Se riusciamo a viaggiare indietro nel tempo in un dato istante, allora per le persone coinvolte arriveremo nel loro istante presente, il loro «ora», dal futuro. Per loro, il futuro è reale tanto quanto il presente e, in ogni caso, cosa renderebbe il nostro «ora» più speciale del loro? Non possiamo certo sostenere che il nostro presente sia quello «vero», o che loro pensino di vivere nel presente, ma in realtà vivono nel passato; perché così come noi, altri possono viaggiare nel tempo dal nostro futuro al nostro presente, e per loro noi siamo il passato. Quindi, sia il nostro futuro che il nostro passato (in realtà, tutto il tempo) devono esistere insieme, e sono altrettanto reali. Questa è la lezione che ci insegna il modello dell'universo-blocco.

*Viaggiare nel tempo nell'universo-blocco*

Fondamentalmente nessuno sa se e come il tempo «scorra», ma possiamo almeno essere certi della sua direzione, la freccia del tempo. Si tratta di un concetto astratto, il cui significato è che possiamo definire un ordine degli eventi. La freccia del tempo punta dal passato al futuro, da eventi più antichi ad altri più recenti; la direzione del tempo è l'ordine in cui le cose accadono. Possiamo pensare che questa freccia del tempo ci sia imposta dal secondo principio della termodinamica. È come la freccia sul tasto «play» del nostro lettore DVD: possiamo andare avanti veloce o riavvolgere e tornare indietro quanto vogliamo, ma il film si svolge in una sola direzione, non nell'altra.

Nonostante questa restrizione, l'universo-blocco comincia a sembrare un enorme film in cui si può saltare da un istante all'altro, nel passato e nel futuro. Non esiste alcun momento presente, perché ogni punto del film è reale quanto ogni altro: sono tutti co-esistenti. Ma nell'universo reale è possibile controllare il tempo in questo modo? È proprio vero che tutto il passato e tutto il futuro sono «là fuori» da qualche parte, in qualche istante, e si svolgono in maniera altrettanto reale di quanto noi percepiamo il nostro presente? Se è così, come facciamo ad arrivarci? Quest'ultima è la domanda cruciale. Sappiamo come muoverci da un punto all'altro dello spazio, quindi dovremmo poterci muovere anche da un punto all'altro del tempo.

### *Una possibile soluzione ai paradossi dei viaggi nel tempo*

Quando i fisici si trovano di fronte a particolari difficoltà nel verificare le previsioni delle loro teorie, a volte ricorrono agli «esperimenti teorici»: scenari immaginari idealizzati in cui non si viola alcuna legge fisica, ma troppo estremi e ipotetici per essere realizzati praticamente in un laboratorio. Uno di questi esperimenti riguarda una macchina del tempo che funziona come un tavolo da biliardo. In questo esperimento, cerchiamo di rispondere alla domanda: «Che cosa succede se una cosa viaggia all'indietro nel tempo e incontra se stessa?» Cosa ci dice la matematica in questo caso?

L'idea è che una palla cade in una buca del biliardo. La buca è collegata, tramite una macchina del tempo, a un'altra buca, così da venire risputata fuori sul biliardo in un momento precedente a quello in cui è caduta nella prima buca. Questo permette che la palla scontri se stessa prima di cadere nella buca.

In questo esperimento teorico si possono facilmente evitare paradossi

ipotizzando di considerare solo le situazioni che non portano a paradossi, cioè considerando solo quelle che i fisici chiamano «soluzioni coerenti». Quindi una palla può andare indietro nel tempo, ri-spuntare fuori da un'altra buca e colpire se stessa in modo che la se stessa del passato cada nella buca. La situazione in cui la palla spunta dalla seconda buca, colpisce la se stessa precedente così che non cada nella prima buca non è presa in considerazione, perché condurrebbe a un paradosso.

L'idea sottostante in tutti i paradossi dei viaggi nel tempo è che nel nostro universo esiste una sola versione del passato. È già successo e non si può cambiare. In linea di principio, possiamo viaggiare nel tempo e interferire con gli eventi del passato quanto vogliamo, a patto che le cose poi si svolgano come si sono svolte la prima volta. Non potremo mai cambiare il corso della storia, perché siamo parte integrante dell'universo e portiamo con noi la memoria di come si sono svolti gli eventi del passato. In pratica, quello che è successo, è successo.

Possiamo perfino immaginare degli scenari in cui è proprio perché il viaggiatore si è recato nel passato che le cose sono andate come sono andate, così come nel caso del biliardo.

Questa condizione di permettere solo «soluzioni coerenti» riguardo ai viaggi nel tempo è sufficiente a risolvere tutti i paradossi? La risposta è un sonoro «no». In superficie, è un'idea molto attraente: si può viaggiare nel tempo e incontrare il se stesso più giovane, solo se già ci si ricorda di aver conosciuto il se stesso più vecchio quando si era giovani. Se non ce lo ricordiamo, l'incontro non è mai avvenuto o non avverrà mai. Allo stesso modo, nello scenario più violento del paradosso del nonno, non possiamo uccidere il nonno, e la dimostrazione è la nostra esistenza, il fatto stesso che siamo nati.

Però questo non ci aiuta a risolvere gli altri paradossi menzionati, come le istruzioni per costruire la macchina del tempo imprigionate in un circolo vizioso temporale, senza che nessuno le abbia mai create. (L'unico modo di aggirare il paradosso è che lo scienziato più giovane trovi le istruzioni, le distrugga senza leggerle, poi inventi la macchina del tempo di sana pianta, scriva le istruzioni, torni indietro nel tempo e le metta sullo scaffale. Se le legge prima di distruggerle siamo daccapo, perché sarà la conoscenza di come si costruisce la macchina del tempo a rimanere imprigionata in un circolo vizioso temporale, senza venire mai creata).

Infine, il ragionamento delle soluzioni coerenti non spiega la violazione del primo principio della termodinamica quando la macchina del tempo e il suo equipaggio arrivano dal nulla nel passato, aggiungendo massa ed energia all'universo in quel momento, prendendole in prestito dal futuro.

### *Il vero viaggio nel tempo richiede un multiverso*

A questo punto abbiamo esplorato quasi tutte le teorie dei viaggi nel tempo, ma diamo un'occhiata a una delle idee più bizzarre e interessanti emerse dalla fisica teorica nell'ultimo mezzo secolo: la teoria degli universi paralleli. Nella sua formulazione originale fu inventata per spiegare alcune delle implicazioni e delle osservazioni più strane del mondo quantistico, in cui gli atomi possono trovarsi in più di un posto allo stesso tempo e si comportano come microscopiche particelle o come onde, secondo come decidiamo di studiarli, e dove due particelle sembrano riuscire a comunicare istantaneamente tra loro, anche se sono lontanissime. Questi fenomeni possono sembrare paradossi in se stessi, e ne parleremo nel nono capitolo, quando arriveremo al gatto di Schrödinger. Ma ora, la cosa interessante di questa teoria degli universi paralleli è la sua rilevanza nel caso dei viaggi nel tempo.

Nella sua formulazione più antica, l'idea degli universi paralleli prevedeva che, ogniqualvolta una particella può scegliere tra due o più opzioni (secondo la meccanica quantistica), l'intero universo si moltiplica in un numero di realtà parallele uguale al numero di opzioni della particella. Secondo questa visione, ci sono infiniti universi, più o meno diversi da quello in cui siamo noi a seconda di quanto tempo fa si sono divisi; ognuno di questi universi è reale quanto il nostro. Sembra un'idea balzana, a prima vista, ma quando la mettete vicino ad alcune implicazioni della fisica quantistica non sembra poi così incredibile.

Per diversi decenni l'interpretazione degli universi paralleli rimase una curiosità della fisica, appannaggio più della fantascienza che della scienza. A oggi, non si è trovata alcuna prova sperimentale dell'esistenza di questi universi e non c'è modo di contattarli, anche se esistono. Sembra impossibile che ci sia abbastanza spazio per tutti questi altri mondi e dimensioni. Dopo tutto, il nostro universo potrebbe essere esso stesso infinito. Dove starebbero gli altri? Il modo di figurarseli è come universi-blocco sovrapposti. Condividono tutti lo stesso asse temporale, ma ognuno ha le sue dimensioni spaziali, coesistenti le une sulle

altre ma senza interazioni a livello quantistico.

Più recentemente, l'idea di universi paralleli che si diramano l'uno dall'altro è stata sostituita da una teoria più sofisticata, chiamata il «multiverso quantistico». Secondo questa idea, l'universo non si suddivide in copie di se stesso; esiste già un numero infinito di universi paralleli coesistenti e sovrapposti, ognuno reale quanto gli altri. Improvvisamente, il nostro universo-blocco è molto affollato. Ma ci sono notevoli vantaggi in questa idea rispetto all'universo-blocco singolo, nel quale c'è un solo futuro, fisso e statico. Ora, tutti i possibili futuri sono di nuovo possibili e possiamo rivendicare il libero arbitrio. Le nostre scelte ci conducono su sentieri attraverso tutti i possibili spazi-tempo ed è la selezione di percorsi fatta da noi che alla fine definisce il nostro universo. La selezione infinita di possibili futuri di fronte a noi rappresenta l'infinita totalità di universi coesistenti nel multiverso.

Improvvisamente i viaggi nel tempo diventano possibili, perché il nostro spazio-tempo contiene solo uno degli infiniti possibili futuri e un numero infinito di passati. Viaggiare indietro nel tempo nel multiverso non è differente dal modo in cui veniamo portati normalmente nel futuro: così come ci sono molti futuri disponibili, allo stesso modo ci sono molti passati possibili da visitare. Il viaggio nel tempo si realizzerebbe seguendo un cammino chiuso nella dimensione tempo in uno dei possibili passati. Questo significa che una curva di tipo tempo nel passato ci porterà quasi inevitabilmente nel passato di un universo parallelo vicino. Possiamo figurarci la cosa in questo modo: se potessimo tornare indietro nel tempo e rifare le stesse scelte e le stesse azioni, per quanto ci sforzassimo di riprodurre esattamente gli stessi eventi qualcosa sarebbe per forza diverso la seconda volta; non necessariamente perché faremmo una scelta leggermente diversa, ma probabilmente perché qualcos'altro, in qualche luogo, avrebbe seguito un cammino differente, alterando il corso delle cose, e quindi finiremmo in un futuro leggermente diverso. Lo stesso avverrebbe se viaggiassimo all'indietro nel tempo: non finiremmo mai nel passato del nostro universo, è estremamente improbabile. È infinitamente più probabile che scivoleremmo nel passato di un universo quasi identico al nostro. Di fatto, data la complessità, sarebbe quasi indistinguibile dal nostro universo, almeno finché non cominciamo a fare danni.

Una volta arrivati lì, potremmo alterare il passato a piacimento, perché non è il nostro passato. Gli eventi nell'universo parallelo in cui siamo arrivati non

devono per forza svolgersi come nel nostro. Una cosa da ricordare, però, è che la probabilità di riuscire a tornare nel nostro universo è piccolissima; ce ne sono troppi.

Vediamo ora come la teoria del multiverso risolve il paradosso del nonno e altri paradossi dei viaggi nel tempo. Iniziamo da quello originale. Ora possiamo benissimo uccidere il nonno (anche se rimane un'azione disdicevole) nel nuovo universo. L'unica conseguenza sarà che *in quell'universo* noi non saremo mai nati.

Anche l'esempio dello scienziato e delle istruzioni per costruire la macchina del tempo si risolve. Lo scienziato torna nel passato in un universo parallelo, in cui il se stesso più giovane può scegliere se costruire la macchina o no. Non ci sono paradossi perché lui non diventerà mai lo scienziato che viaggia nel tempo.

Perfino il problema della non-conservazione della massa e dell'energia è risolto, perché ora il principio non si applica a ogni universo singolarmente, ma all'intero multiverso. L'energia e la massa di cui siamo fatti si muove da un universo all'altro, così che la somma totale della massa e dell'energia nell'intero multiverso rimane costante.

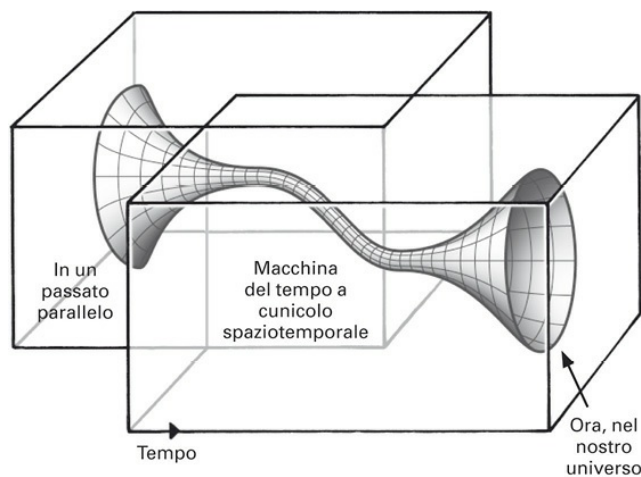
### *Universi collegati*

Uno dei problemi da affrontare nella descrizione del multiverso è la spinosa questione della causalità. Sembra che l'universo parallelo in cui andiamo a finire nel nostro viaggio nel tempo debba sapere che stiamo per arrivare. Siccome la fine del viaggio (nel nuovo universo) è in un momento precedente a quello della partenza, non solo il nostro arrivo improvviso deve soddisfare le leggi della fisica nell'universo di arrivo, ma risulta anche che le scelte fatte, e i cambiamenti apportati, non si sarebbero verificati se non avessimo viaggiato all'indietro nel tempo. È veramente un passo avanti rispetto al paradosso di viaggiare all'indietro nel tempo del nostro universo? Sembra quasi che gli eventi già accaduti in un universo parallelo ci costringano, nel futuro del nostro universo, a viaggiare indietro nel tempo. Possiamo violare la causalità se la causa e l'effetto sono in mondi reali diversi? Sembra poco convincente, vero?

Esiste un modo di uscirne, ma prevede una macchina del tempo costruita e accesa non dalla nostra parte, ma nell'universo in cui arriviamo. Il collegamento tra gli universi è allora *in avanti nel tempo*. Una volta stabilito, questo



collegamento dovrebbe permettere il viaggio in entrambi i sensi tra i due universi. E la relatività generale prevede un mezzo, almeno teorico, di collegare il nostro universo con un universo parallelo esattamente in questo modo. Si chiama «cunicolo spaziotemporale» o «ponte di Einstein-Rosen».



Per evitare paradossi, un cunicolo spaziotemporale dev'essere collegato al passato di un altro universo.

Figura 7.3  
Un cunicolo spaziotemporale.

I cunicoli spaziotemporali sono costrutti ipotetici nella trama stessa dello spazio-tempo, oggetti che non si pensa esistano veramente nel mondo reale, ma siccome teoricamente sono realizzabili (perlomeno nella migliore teoria della natura, dello spazio e del tempo che abbiamo a disposizione al momento), ci permettiamo almeno di accarezzare l'idea che *potrebbero* esistere. Al contrario dei loro cugini, i buchi neri (formati quando la materia viene sottoposta a pressioni incredibili, come in una stella collassata o nel centro delle galassie) della cui esistenza molti fisici e astronomi sono sicuri, i cunicoli spaziotemporali si possono formare solo in condizioni molto particolari, che non si pensa esistano davvero. Ciò nonostante, perlomeno in teoria, un cunicolo spaziotemporale sarebbe una scorciatoia attraverso lo spazio-tempo, fuori dal nostro universo, che sbuca in un luogo completamente diverso o addirittura in un universo parallelo. Questi tunnel ci forniscono la speranza dei viaggi nel tempo.

Abbiamo quindi relegato con successo il paradosso del nonno e i suoi affini nella categoria dei «paradossi percepiti», che si sciolgono come neve al sole di fronte alle leggi della fisica? Non proprio: abbiamo evidenziato *possibili* modi per risolvere i paradossi, e così facendo siamo scivolati nel regno della pura speculazione. Non abbiamo violato alcuna legge fisica, naturalmente, ma idee come il multiverso e i cunicoli spaziotemporali rimangono fuori dalla scienza

convenzionale: è divertente considerarli, ma sono impossibili da verificare... per ora, comunque.

### *Dove sono tutti i viaggiatori nel tempo?*

Molti hanno usato questa domanda come argomentazione per dimostrare l'impossibilità dei viaggi nel tempo. Si dice: se i viaggi nel tempo diventeranno possibili, allora sicuramente ci saranno dei viaggiatori che sceglieranno di visitare il nostro tempo, e noi dovremmo vederli arrivare. Ma finora non ne abbiamo visto uno. Questa è la dimostrazione certa che le macchine del tempo non si costruiranno mai.

Viaggiare nel passato potrà forse risultare impossibile, perché gli universi paralleli o i cunicoli spaziotemporali non esistono, o perché qualche precisazione nella teoria della relatività li escluderà, ma la mancanza di viaggiatori temporali tra noi non è un ragionamento conclusivo. L'errore sta nel pensare che il collegamento tra due tempi diversi, attraverso un cunicolo spaziotemporale o qualche altro mezzo, sia fatto nel momento in cui il viaggiatore inizia il suo viaggio. In realtà non è così. Il collegamento avviene nel momento in cui si crea (o si accende) la macchina del tempo, che garantisce la *possibilità* di viaggiare. Se nel secolo XXII inventeremo una macchina del tempo, allora potremo usarla dopo la sua attivazione per tornare indietro nel tempo fino al momento in cui l'abbiamo accesa, ma non prima, non certo fino al secolo XXI. Questo perché costruire una macchina del tempo collegherà tempi diversi all'interno del multiverso; tutti i tempi precedenti saranno perduti per sempre e non saranno mai più disponibili. Quindi è eliminata qualsiasi possibilità di riuscire a tornare alla preistoria, salvo che non troviamo una macchina del tempo naturale, un cunicolo spaziotemporale molto vecchio da qualche parte nello spazio-tempo.

Quindi, la ragione per cui non arrivano viaggiatori nel tempo fino a noi è semplice: è perché le macchine del tempo non sono ancora state inventate.

In realtà c'è una quantità di ulteriori ragioni che spiegherebbe l'assenza dei viaggiatori nel tempo. Per esempio, se la teoria del multiverso è corretta (e lo dev'essere, per permettere i viaggi nel tempo) allora il nostro universo forse semplicemente non è uno di quelli fortunati da essere visitati dai viaggiatori, ipotizzando che in qualche altro universo parallelo si sia già inventata una macchina del tempo. Un'altra ragione potrebbe essere che il viaggio nel passato

è vietato da qualche legge fisica non ancora scoperta. O forse ci sono ragioni più banali: aspettarsi di vedere dei viaggiatori arrivare presuppone che loro vogliano visitare proprio questo secolo. Forse per loro ci sono periodi più sicuri e più gradevoli da visitare. O magari i viaggiatori nel tempo sono tra noi, ma cercano di passare inosservati.

## 8. Il paradosso del diavoletto di Laplace

### **Il battito d'ali di una farfalla ci salverà da un futuro predeterminato**

«Fare previsioni è una cosa molto difficile, specialmente se riguardano il futuro», disse il fisico quantistico danese Niels Bohr. La citazione può sembrare banale e frivola, ma, come spesso accade con le cose dette da Bohr, contiene idee profonde sulla natura del fato, del libero arbitrio e della nostra abilità a determinare come si svolgerà il futuro.

Descriviamo il paradosso. Il matematico francese Pierre-Simon Laplace inventò questo diavoletto immaginario mezzo secolo prima che Maxwell proponesse il suo. Il diavoletto di Laplace è molto più potente di quello di Maxwell, perché conosce la posizione e il moto non solo delle particelle d'aria in una scatola, ma di ogni singola particella dell'universo, e conosce perfettamente le leggi della fisica che ne governano le interazioni. Questo significa che, in linea di principio, il diavoletto onnisciente potrebbe calcolare l'evoluzione dell'universo nel tempo e riuscire a prevedere lo stato futuro di tutto. Ma se è così potrebbe anche decidere di agire, basandosi sulle sue informazioni, e cambiare deliberatamente il corso delle cose, facendo evolvere l'universo in modo diverso da ciò che dicevano le sue previsioni, rendendole così sbagliate e minando alla base la propria abilità di prevedere il futuro (sicuramente nei suoi calcoli avrà tenuto conto anche delle proprie azioni).

Facciamo un esempio che chiarisca il paradosso. Immaginiamo che il diavoletto sia in realtà un enorme supercalcolatore, così potente e con una memoria così grande da conoscere ogni minimo dettaglio dell'universo, fino allo stato di ogni atomo che costituisce il computer stesso, e ogni elettrone che si muove nei suoi circuiti. Con queste informazioni, il computer può calcolare precisamente il futuro. Gli operatori gli impartiscono la seguente istruzione: «autodistruggiti se prevedi che nel futuro esisterai ancora; e non fare niente se prevedi che nel futuro non esisterai più». Ripetiamo: se nelle sue previsioni sarà ancora esistente, allora non ci sarà, e se nelle sue previsioni non esisterà più, allora ci sarà. In ogni modo, la sua previsione è sbagliata. Quindi, sopravvive o no?

Come molti altri paradossi in questo libro, la soluzione ci dice qualcosa di profondo sulla realtà, e sfugge alla pura discussione filosofica. Laplace stesso non sembra rendersi conto della natura paradossale del suo diavoletto: lui anzi lo descrive come «un intelletto». Ecco la sua descrizione originale:

Possiamo considerare lo stato attuale dell'universo come l'effetto del suo passato e la causa del suo futuro. Un intelletto che ad un determinato istante dovesse conoscere tutte le forze che mettono in moto la natura, e tutte le posizioni di tutti gli oggetti di cui la natura è composta, se questo intelletto fosse inoltre sufficientemente ampio da sottoporre questi dati ad analisi, esso racchiuderebbe in un'unica formula i movimenti dei corpi più grandi dell'universo e quelli degli atomi più piccoli; per un tale intelletto nulla sarebbe incerto ed il futuro proprio come il passato sarebbe evidente davanti ai suoi occhi.<sup>1</sup>

Laplace non era in cerca di paradossi: presentava questa ipotesi per porre l'accento su un'idea che al tempo sembrava inconfutabile, e cioè che l'universo è deterministico. Questa parola è fondamentale per questo paradosso, quindi dobbiamo capire esattamente cosa significa e definirla accuratamente. Il determinismo è una corrente filosofica secondo la quale il futuro, in linea di principio, si può prevedere. Tuttavia, il paradosso suggerisce che questo non è vero: Laplace aveva torto e il nostro universo non è deterministico. Ma, come vedremo, tenendo conto di certi dettagli e alcune incertezze nelle teorie fisiche attuali, abbiamo ragione di credere che l'universo in realtà sia deterministico.

Vuol forse dire che dobbiamo abbandonare l'idea del libero arbitrio, poiché il nostro destino è già scritto? E come risolviamo il paradosso del diavoletto di Laplace?

Possiamo confrontare questa situazione con quella dei paradossi dei viaggi nel tempo descritti nell'ultimo capitolo. In quel caso, il nostro passato era fissato e noto, ma viaggiando indietro nel tempo potevamo cambiarlo e creare un paradosso. Qui, il diavoletto di Laplace conosce il futuro e non c'è bisogno di viaggiare nel tempo: basta aspettare che il futuro arrivi e, mentre aspetta, il diavoletto può fare danni nel presente così che il futuro risulti diverso.

Un modo non molto scientifico di evitare i paradossi riguardanti i viaggi nel tempo è quello di decretare che viaggiare nel passato è semplicemente impossibile. Ma nel caso del diavoletto di Laplace non c'è bisogno di viaggiare nel tempo: il futuro arriverà anche se nessuno fa niente per farlo arrivare, e quindi sembra che ci sia bisogno di un'altra spiegazione per risolvere la questione. La possibilità più semplice è spesso quella corretta, e qui dev'essere che, al contrario del passato che è fisso, il futuro non è ancora determinato. Quello che il diavoletto prevede è presumibilmente solo uno dei possibili futuri. Certamente, per garantire la possibilità che esso possa scegliere liberamente le sue azioni (e così anche noi), l'universo non può essere deterministico. È un argomento convincente, ma non è necessariamente quello che ci aiuterà a

risolvere il paradosso del diavoletto di Laplace.

Per dimostrare che questa semplice soluzione non è sufficiente, immaginiamo il seguente scenario. Usiamo il supercalcolatore per calcolare lo stato dell'universo nel futuro, un futuro in cui ci sarà una meravigliosa nuova teoria fisica, scoperta dopo decenni di esperimenti ingegnosi e costruzioni teoriche, risultato del contributo di molti grandi scienziati. Questa teoria si esprime mediante eleganti equazioni matematiche. Otteniamo tutte queste informazioni dal supercalcolatore, e quindi l'umanità non dovrà passare attraverso il lungo e doloroso processo di ricerca scientifica che invece sarebbe stato necessario per scoprire la teoria. Ringraziamo il computer, lo spegniamo, e andiamo a ritirare il premio Nobel senza aver fatto alcun lavoro.

Ecco il problema: se il computer ha davvero previsto solo uno degli infiniti possibili futuri, quello in cui si fa questa profonda scoperta scientifica, allora possiamo constatare che non c'è alcuna vera previsione; non ci sarebbe alcuna differenza se il calcolatore avesse scoperto la teoria per puro caso. La situazione è in qualche modo simile al «teorema della scimmia instancabile», in cui una scimmia che schiaccia tasti a caso su una macchina da scrivere, se ha un tempo infinito, può, per puro caso, produrre l'opera omnia di Shakespeare. Insomma, questa spiegazione non spiega nulla. Il fatto che il computer scopra accidentalmente una «teoria del tutto» non è completamente impossibile, ma è talmente improbabile che possiamo ignorare quest'eventualità. Naturalmente, il supercalcolatore avrà iniziato i suoi calcoli dal momento presente, e avrà tenuto in conto lo stato attuale della conoscenza e la direzione della ricerca dei maggiori fisici teorici mondiali, così come le idee per nuovi esperimenti possibili nel futuro, quindi in qualche modo questa scoperta è un po' più probabile che se l'avesse fatta una scimmia che schiaccia tasti a caso su una tastiera, ma le probabilità sono comunque bassissime.

Però naturalmente esiste una soluzione perfettamente valida di questo paradosso, e ve la racconterò ora. Sono un po' riluttante, perché la soluzione è molto più banale del paradosso stesso. Quando ho descritto i poteri del supercalcolatore, ho detto che la sua conoscenza è così completa da comprendere tutti i dettagli della sua struttura interna; quindi esso può prevedere le sue proprie azioni (lasciamo stare la domanda se il calcolatore abbia libero arbitrio o meno: possiamo ipotizzare che, nonostante il suo

immenso potere, non abbia coscienza di sé e non sappia di poter ingannare se stesso facendo qualcosa di diverso dalle sue previsioni). La situazione si risolve quando analizziamo cosa vuol dire per il calcolatore conoscere lo stato di ogni atomo e ogni elettrone di cui è composto. Deve immagazzinare questa informazione nella sua memoria, ma la memoria è fatta essa stessa di atomi sistemati in modo molto preciso, e questa configurazione è parte dell'informazione che deve immagazzinare, e così via. Questo ovviamente è paradossale, e quindi non è possibile che il computer sappia tutto di se stesso; quindi non può includere se stesso nei calcoli che svolge per predire il futuro, e pertanto la sua conoscenza dell'universo è incompleta.

Questo argomento è sufficiente per togliere di mezzo il diavoletto di Laplace. Ma è tutto qui quello che possiamo dire su questo paradosso? Niente affatto. Nell'evidenziare la possibilità di conoscere il futuro, abbiamo aperto un vaso di Pandora sulle questioni dell'universo deterministico, della nostra libertà di agire e del futuro preordinato e fissato. La scienza ha qualcosa da dire su tutti questi temi.

### *Determinismo*

Iniziamo con l'accurata distinzione fra tre diversi concetti: determinismo, prevedibilità e casualità.

Con la parola «determinismo» intendiamo «determinismo causale»: l'idea che gli eventi del passato sono la causa degli eventi del futuro. Da ciò deriva, logicamente, che tutto avviene come risultato di una catena di eventi che si può ripercorrere a ritroso fino alla nascita dell'universo.

Nel secolo XVII Isaac Newton scoprì le leggi della meccanica usando l'analisi matematica, che egli stesso aveva sviluppato. Le sue equazioni permisero agli scienziati di prevedere come si muovono gli oggetti e come interagiscono gli uni con gli altri, dalle palle di cannone ai pianeti. Usando le sue formule matematiche, si possono inserire i valori che rappresentano attributi fisici di un oggetto (come la massa, la forma e la posizione, insieme alla velocità e alle forze che agiscono su di esso) in semplici equazioni che forniscono informazioni sullo stato dell'oggetto in qualsiasi momento futuro.

Questo portò alla convinzione diffusa, durata per i due secoli successivi, che se tutte le leggi della natura fossero note, in linea di principio si potrebbero

calcolare le azioni di qualsiasi oggetto nell'universo. Nel nostro universo tutto (ogni movimento, ogni cambiamento) è predeterminato. Non c'è libera scelta, nessuna incertezza e nessuna possibilità, un modello che a volte viene chiamato «universo-macchina». A prima vista, non è tetro come l'universo-blocco di Einstein in cui tutto ciò che è già successo e succederà in futuro è disposto davanti a noi, congelato nel tempo. Ma in realtà, l'universo-macchina di Newton non è molto diverso, nel senso che il suo stato in ogni istante futuro è predeterminato e fisso.

Poi la visione cambiò all'improvviso. Nel 1886 il re di Svezia offrì un premio di 2500 corone (un bel gruzzolo, più di quanto molti guadagnassero in un anno) a chiunque potesse dimostrare (o confutare) la stabilità del sistema solare: cioè dire con certezza se i pianeti avrebbero continuato a orbitare attorno al Sole per sempre o se c'era la possibilità che alcuni potessero cadere sul Sole o sfuggire alla sua gravità e perdersi nello spazio. Il matematico francese Henri Poincaré accettò la sfida. Iniziò ad analizzare un problema più semplice, comprendente solo la Terra, la Luna e il Sole, che è chiamato il «problema dei tre corpi». Scopri che anche con soli tre corpi, il problema era impossibile da risolvere matematicamente. Inoltre, certe configurazioni dei tre corpi erano così instabili e sensibili alle condizioni iniziali che le equazioni davano come soluzione un comportamento irregolare e imprevedibile. Poincaré vinse il premio, anche se non riuscì a trovare la risposta alla questione della stabilità del sistema solare.

Henri Poincaré aveva scoperto che l'evoluzione nel tempo di un sistema di soli tre corpi interagenti l'uno con l'altro non è prevedibile con precisione, e ancor meno un sistema con tutti i corpi del sistema solare (tutti i pianeti con tutte le loro lune, e il Sole). Ma le implicazioni di questa scoperta avrebbero dovuto attendere altri 75 anni.

### *L'effetto farfalla*

Diamo quindi al nostro computer onnisciente il compito molto più modesto di prevedere come si sparpaglieranno delle palle da biliardo colpite dal pallino all'inizio di una partita di carambola. Ogni palla sul tavolo sarà colpita in qualche modo, e molte saranno coinvolte in numerose collisioni successive, rimbalzando l'una sull'altra e sui bordi del tavolo. Naturalmente, il calcolatore dovrà sapere



esattamente con che forza è stato colpito il pallino, e l'angolo esatto con cui colpisce la prima palla nella formazione. Ma è abbastanza? Quando tutte le palle si sono fermate, quanto sarà vicina la previsione del computer alla realtà? Mentre in teoria calcolare il risultato di due palle che collidono è assolutamente fattibile, nella realtà è quasi impossibile tenere in conto come le palle, sparpagliandosi, finiranno col disporsi sul tavolo. Se una delle palle si muove con un angolo anche solo leggermente diverso, potrà forse colpire un'altra palla, che invece in un altro caso non avrebbe toccato, e quindi entrambe le traiettorie verranno sostanzialmente modificate. All'improvviso, il risultato è completamente diverso.

Quindi, sembra che dobbiamo dare al nostro computer non solo le condizioni iniziali del pallino, ma la posizione precisa di tutte le altre palle sul tavolo: se si toccano, qual è la distanza esatta tra loro e i bordi e così via. E nemmeno questo sarà abbastanza. Un minuscolo granello di polvere potrà perturbare una traiettoria di una frazione di millimetro, o rallentare una palla di pochissimo, cambiando leggermente la forza con cui colpirà un'altra palla. Dobbiamo anche fornire al computer informazioni accurate sullo stato della superficie del tavolo: se è impolverato o liso, per esempio, in modo da tenere conto dell'effetto sull'attrito.

Comunque, potremmo sempre pensare che questo compito non sia impossibile. Si può fare, *in linea di principio*, se si hanno tutte le informazioni sulle condizioni iniziali e si conoscono le leggi e le equazioni del moto. La configurazione finale in cui si trovano le palle non è casuale: obbedisce alle leggi della fisica e le palle si comportano in accordo con le forze che agiscono su di esse in ogni istante, in modo perfettamente deterministico. Il problema è che *in pratica* non si può fare una previsione affidabile, perché dovremmo sapere tutte le condizioni iniziali con un livello di precisione incredibile, che significa prendere in considerazione ogni particella di polvere su ogni palla e ogni fibra nel panno del tavolo. Naturalmente, se c'è poco attrito tra le palle e il tavolo, esse continueranno a colpirsi e a rotolare molto più a lungo, e quindi dovremo sapere le condizioni iniziali con una precisione ancora più grande per determinare dove andranno a finire quando si fermeranno.

Questa impossibilità di sapere, o controllare le condizioni iniziali e tutte le altre influenze con un livello di precisione infinito si può trovare anche in sistemi apparentemente molto più semplici. Per esempio, quando si lancia una moneta

non è possibile aspettarsi di ripetere la stessa azione e ottenere lo stesso risultato. Se si lancia una moneta e viene testa, è troppo difficile lanciarla esattamente nello stesso modo, facendola girare lo stesso numero di volte, così che venga di nuovo testa.

Sia nell'esempio del biliardo, sia in quello della moneta, se avessimo conoscenza infinita, potremmo ripetere esattamente le stesse azioni e ottenere un risultato finale identico. Questa ripetibilità è l'essenza del mondo newtoniano e si trova ovunque. Ma altrettanto si trova la sensibilità alle condizioni iniziali, e la vediamo nella vita di ogni giorno. Se si prende una certa decisione una mattina mentre si va al lavoro, come ad esempio fermarsi un secondo prima di attraversare la strada, si può perdere l'occasione di incontrare un vecchio amico, che ci dà un'informazione in base alla quale faremo domanda per un nuovo lavoro che cambierà la nostra vita. Aspettare un altro secondo prima di attraversare ci farà magari andare sotto a un tram. Il nostro destino potrà anche essere definito in un universo deterministico, ma è completamente imprevedibile.

L'uomo che per primo portò alla luce queste idee, dando al mondo il nuovo concetto di «caos», fu Edward Lorenz, un matematico e meteorologo americano che si imbatté per caso in questo fenomeno mentre lavorava su modelli matematici per descrivere i fenomeni meteorologici nei primi anni sessanta del Novecento. Usava un modello primitivo di computer da tavolo, l'LGP-30, su cui faceva girare la sua simulazione. A un certo punto volle ripetere una simulazione eseguendo il programma da capo, con gli stessi dati in entrata. Per fare ciò, usò un numero che il programma aveva calcolato e stampato quando era a metà della simulazione. Lo inserì di nuovo e fece partire il programma. Era certo che il computer sarebbe arrivato allo stesso risultato della prima volta: del resto, il numero era lo stesso, no?

In realtà, no. Il calcolatore aveva una precisione di sei decimali, ma prima di stamparlo era stato arrotondato a tre decimali. Il numero originale era 0,506127, che venne stampato e reinserto la seconda volta come 0,506. Lorenz si aspettava che questa minuscola differenza tra i due valori (0,000127) non avrebbe fatto molta differenza sul risultato finale, anche lasciando girare la simulazione per molto tempo. Ma non fu così, e la sorpresa fu grande. Lorenz aveva scoperto che piccolissime differenze possono a volte produrre effetti

enormi. La simulazione era un esempio di fenomeno «non lineare». È questa la ragione per cui è così difficile fare previsioni del tempo a lungo termine: perché non possiamo conoscere tutte le variabili in gioco con la precisione necessaria. È come l'esempio del biliardo, ma molto più complicato. Possiamo magari prevedere con ragionevole sicurezza che pioverà tra qualche giorno, ma non potremo mai dire se pioverà o no tra un anno.

Quando Lorenz si rese conto e comprese profondamente cosa era successo, coniò il termine di «effetto farfalla». L'idea che il battito d'ali di una farfalla potrebbe avere effetti dirompenti, a cascata, sugli eventi successivi è stata descritta, sembra, per la prima volta nel racconto *Rumore di tuono (A Sound of Thunder)*, scritto nel 1952 da Ray Bradbury. L'idea era presa a prestito da Lorenz, che l'aveva divulgata con l'esempio, ora familiare, secondo cui il battito d'ali di una farfalla potesse causare un uragano, mesi dopo, dall'altra parte del mondo. Naturalmente, è importante chiarire che questo non significa che l'uragano abbia origine nel battito delle ali di una specifica farfalla, ma piuttosto che è il risultato di miliardi di minuscole perturbazioni nell'atmosfera in tutto il mondo: se *una sola* venisse a mancare, o fosse diversa, magari l'uragano non si formerebbe.

## Caos

La parola «caos» nel linguaggio naturale significa disordine, casuale e senza forma, nel senso in cui una festa per bambini è caotica. Nella scienza, il termine «caos» ha un significato più specifico. Mescola insieme il determinismo e la probabilità, in modo decisamente non ovvio. Una volta compreso, diventa perfettamente logico e intuitivo, ma il fatto che questa comprensione sia arrivata in tempi relativamente recenti dimostra quanto sia stata in fondo inaspettata. Ecco una definizione di comportamento caotico: se un sistema è ciclico, cioè ripete le stesse azioni in continuazione, ma il modo in cui si evolve dipende pesantemente dalle condizioni iniziali, allora non si ritroverà mai esattamente nello stesso stato, al termine di ogni ciclo; piuttosto, darà *l'impressione* di un comportamento casuale, cambiando il suo percorso in maniera completamente imprevedibile.

Il caos non è una teoria in se stessa (sebbene «teoria del caos» sia diventato un termine comune, e lo userò anch'io). È un concetto, o fenomeno, che troviamo

quasi ovunque in natura, e che ha dato origine a una nuova disciplina della scienza, dal nome poco creativo di «dinamica non lineare», che deriva dalla proprietà matematica principale dei sistemi caotici, cioè il fatto che la causa e l'effetto non sono legati in modo lineare, cioè proporzionale. Con questo voglio dire che, prima di arrivare a una comprensione del caos, si pensava che non solo l'effetto segue la causa, ma cause semplici producono effetti semplici, e cause complesse producono effetti complessi. Il concetto che una causa semplice potesse dare luogo a un effetto complesso era del tutto inaspettata ed è ciò che i matematici chiamano «non lineare».

La teoria del caos ci dice che l'ordine e il determinismo possono generare ciò che appare come disordine. Dice cioè che il nostro universo può ancora essere deterministico, e obbedire a leggi fisiche fondamentali, ma spesso può mostrare la tendenza a diventare estremamente complesso, disordinato, e, cosa ancora più importante, imprevedibile. Ora si trova il caos quasi in ogni area della scienza. Forse ha avuto inizio nel tentativo di fare accurate previsioni del tempo, ma ora lo troviamo nel moto delle stelle nelle galassie, nelle orbite di pianeti e comete nel sistema solare, nel crescere e contrarsi delle popolazioni animali, nel funzionamento del metabolismo all'interno delle cellule e nel battito del cuore. Si trova nel comportamento delle particelle subatomiche, nel funzionamento dei macchinari, nel flusso turbolento dei liquidi nei tubi e degli elettroni nei circuiti elettrici. Ma il modo più semplice è riprodurlo matematicamente, tramite simulazioni al calcolatore. I modelli del comportamento caotico non presentano grandi difficoltà: si tratta di ripetere semplici formule matematiche numerose volte di fila, anche se l'operazione richiede spesso una considerevole velocità computazionale, per ripetere il calcolo moltissime volte.

Quindi, riassumendo, la teoria del caos ci mostra che (lasciando da parte per il momento la casualità quantistica) per quello che ne sappiamo il nostro universo è completamente deterministico, ma non prevedibile; questa imprevedibilità non è il risultato di una vera casualità: la natura deterministica dell'universo implica che segue regole perfette e ben definite, alcune forse ancora da scoprire. L'imprevedibilità sorge dall'impossibilità di riuscire a conoscere con infinita precisione le condizioni iniziali per l'evoluzione di qualsiasi sistema che non sia semplicissimo. Ci sarà sempre un minuscolo errore nei dati iniziali che si ingigantirà, portandoci a previsioni sbagliate.

C'è un altro lato della medaglia del caos, affascinante e forse ancora più importante: l'applicazione ripetuta delle stesse regole semplici che causano un comportamento caotico a partire dal moto regolare e organizzato, possono a volte, a partire da sistemi banali e senza struttura, creare forme eleganti e complesse; in altre parole si può ottenere ordine e complessità dove prima non c'era. Si parte da una cosa destrutturata, si lascia evolvere, e spontaneamente emergono strutture e schemi. Quest'idea ha portato allo sviluppo di nuove discipline accademiche, come la teoria della complessità e il comportamento emergente, che sempre più giocano un ruolo importante in molte aree diverse, dall'economia, alla biologia, all'intelligenza artificiale.

### *Libero arbitrio*

Cos'ha a che fare tutto questo con la natura del libero arbitrio (e quindi col paradosso del diavoletto di Laplace)? Ci sono molti diversi punti di vista filosofici, e la questione è tutt'altro che risolta. Il meglio che posso fare è darvi la mia opinione di fisico teorico. Siete sempre liberi di non essere d'accordo. O no?

Ci sono quattro possibilità nel nostro universo:

1. L'universo è deterministico, e quindi tutte le nostre azioni sono prevedibili e il libero arbitrio non esiste: abbiamo solo l'illusione di compiere libere scelte.
2. L'universo è deterministico, ma esiste il libero arbitrio.
3. L'universo non è deterministico; la casualità è insita nell'universo e permette l'esistenza del libero arbitrio.
4. L'universo non è deterministico, ma il libero arbitrio non esiste perché gli eventi accadono in modo casuale e noi non possiamo influenzarli, esattamente come se fossero predeterminati.

Scienziati, filosofi e teologi hanno discusso per millenni sulla questione del libero arbitrio dell'uomo. Qui mi concentrerò su certi aspetti della natura del libero arbitrio che sono in collegamento con la fisica. Certamente non mi avventurerò nei meandri del «problema mente-corpo», la natura della coscienza o l'esistenza dell'anima.

Il nostro cervello fisico, fatto di una rete di circa cento miliardi di neuroni collegati da centinaia di milioni di miliardi di sinapsi, è, per quanto ne sappiamo, niente più di una macchina sofisticata ed estremamente complicata su cui gira

L'equivalente di un programma per computer, sebbene veramente molto complesso e interconnesso. Tutti questi neuroni sono alla fin fine fatti di atomi che obbediscono alle stesse leggi della fisica seguite dal resto dell'universo. Quindi, in linea di principio, se potessimo conoscere la posizione di ogni atomo del nostro cervello, e quello che sta facendo, e se capissimo alla perfezione le regole che governano le interazioni tra loro, allora in linea di principio riusciremmo a conoscere lo stato del nostro cervello in ogni istante futuro. Cioè, avendo sufficiente informazione io potrei prevedere quello che farete o penserete domani (se non interagite col mondo esterno, altrimenti dovrei sapere ogni dettaglio anche di quello).

Quindi, se non fosse per le bizzarre regole quantistiche, di natura probabilistica, che governano gli atomi, e in assenza di qualunque dimensione metafisica, spirituale o soprannaturale legata alla coscienza (di cui non c'è prova), saremmo costretti ad ammettere che siamo tutti parte dell'universo-macchina newtoniano, e che tutte le nostre azioni sono predeterminate e fissate in anticipo. In sostanza, non avremmo libero arbitrio.

Ma allora il libero arbitrio esiste o no? La risposta, credo, nonostante ciò che ho appena detto sul determinismo, è sì, esiste. E non è la meccanica quantistica a salvarlo, come sostiene qualche fisico, ma la teoria del caos. Non importa se viviamo in un universo deterministico in cui il futuro è, in linea di principio, previsto. Quel futuro sarebbe noto solo se potessimo vedere tutto lo spazio e tutto il tempo da fuori. Ma per noi e per la nostra coscienza, immersi all'interno dello spazio-tempo, quel futuro non sarà mai possibile conoscerlo. È la sua imprevedibilità che ci regala un futuro aperto. Le scelte che facciamo sono, per noi, scelte vere, e a causa dell'effetto farfalla, piccoli cambiamenti causati da decisioni diverse portano a risultati molto diversi, e quindi a futuri differenti.

Grazie alla teoria del caos non sarà mai possibile conoscere il futuro. Possiamo forse dire che il futuro è predeterminato, e il libero arbitrio è solo un'illusione, ma resta il punto che le nostre azioni determinano quale degli infiniti possibili futuri si realizzerà.

Consideriamo la situazione non dal punto di vista di un individuo che osserva il mondo deterministico, eppure imprevedibile, attorno a sé, ma esaminando la complessità del cervello e di come funziona. È esattamente questa inevitabile imprevedibilità di come funziona un sistema complesso come il cervello, con tutti i processi mentali, i ricordi, le reti interconnesse di neuroni, con retroazioni e

circuiti, che ci regala il libero arbitrio.

Possiamo scegliere di chiamarla libertà o illusione, non importa. Non riusciremo mai a prevedere cosa dirà o penserà un'altra persona, perché in pratica non riusciremo mai a modellare l'attività neuronale nel cervello, anticipare ogni connessione sinaptica e replicare il battito d'ali di ognuna delle milioni di miliardi di farfalle che costituiscono la mente cosciente in maniera tale da calcolare i pensieri. E questo genera il libero arbitrio, e accade nonostante le azioni del cervello siano in tutta probabilità completamente deterministiche, a meno che la meccanica quantistica non abbia più voce in capitolo di quanto sappiamo ora.

### *Il mondo quantistico: la casualità, finalmente!*

La meccanica quantistica, cioè la teoria del mondo subatomico, descrive le regole della natura su scala minuscola, dove le cose sono molto diverse dal mondo di tutti i giorni. Il trucco fu compreso all'inizio del XX secolo: non si può usare la meccanica newtoniana per descrivere il moto di una particella subatomica come un elettrone.

Se l'elettrone è qui, ora, e noi gli applichiamo una certa forza, per esempio tramite un campo elettrico, allora dovremmo riuscire a prevedere con certezza, e con un certo grado di precisione, dove si troverà un secondo più tardi. Ma una tale previsione risulta impossibile, e la ragione di questa impossibilità è dovuta a molto più della nostra semplice incapacità di conoscere le condizioni iniziali con sufficiente precisione. Le equazioni newtoniane del moto, che regolano il comportamento degli oggetti di tutti i giorni, dalle monete, alle palle da biliardo, ai pianeti, sono inutili nel mondo quantistico, dove vengono sostituite da altre regole e altre relazioni matematiche. Queste regole descrivono una realtà microscopica che sembra a tutti gli effetti completamente casuale. Ecco, finalmente sembra che abbiamo trovato l'antidoto al determinismo fatalistico dell'universo descritto da Newton e da Einstein, perché qui troviamo il vero «indeterminismo».

Come abbiamo visto nel secondo capitolo, un atomo può decadere radioattivamente sparando fuori una particella alfa. Ma non riusciamo a prevedere quando accadrà, e, secondo l'interpretazione corrente della meccanica quantistica, questo non ha niente a che fare con la nostra ignoranza

delle informazioni necessarie per saperlo, come nel caso precedente. Risulta che nemmeno *in linea di principio* si può prevedere quando l'atomo decadrà, indipendentemente dalla precisione con cui si conoscono le condizioni iniziali. In un certo senso questo è dovuto al fatto che l'atomo stesso non lo sa. Questa incertezza sembra una caratteristica fondamentale della natura a questo livello di grandezza, dove le cose si comportano in maniera impossibile da stabilire.

L'atomo radioattivo non si comporta in maniera completamente casuale perché, osservando un numero molto grande di atomi identici, si trova una correlazione statistica nel loro comportamento. Il tempo necessario perché la metà di un campione di atomi di un certo elemento decada radioattivamente è noto col nome di «tempo di dimezzamento» di quell'elemento, e questo valore si può determinare con grande precisione se il campione è sufficientemente grande, nello stesso modo in cui si può prevedere che se si lancia una moneta moltissime volte si converge verso un risultato del 50% di teste e 50% di croci. Però, se per la moneta questa particolarità probabilistica del risultato proviene dall'imprevedibilità delle condizioni iniziali che influenzano un processo deterministico, per gli atomi le probabilità quantistiche sembrano innate alla natura stessa, e non si può arrivare a un risultato più preciso, nemmeno *in linea di principio*.

La domanda importante qui è se questo indeterminismo quantistico ci salva dal cupo determinismo del nostro macro-mondo, restituendoci un vero e proprio libero arbitrio. Alcuni filosofi pensano di sì. La mia umile opinione è che abbiano torto, e questo per due ragioni. Prima di tutto, in anni recenti si è scoperto che l'indeterminabilità quantistica scompare quando si considerano sistemi complessi fatti di miliardi di miliardi di atomi. Quando si arriva alla scala del mondo newtoniano, fatto di persone, di cose, di cervelli, le stranezze quantistiche si bilanciano e scompaiono, e il normale determinismo viene ristabilito.

La seconda ragione mi è particolarmente cara, e non si può respingere senza ulteriori analisi. È possibile che la meccanica quantistica non sia la fine della storia, e che l'imprevedibilità di un processo come il decadimento radioattivo sia dovuta proprio alla nostra ignoranza. Magari ci manca una conoscenza più profonda della natura, per cui saremmo in grado di prevedere esattamente quando un dato atomo decadrà, *in linea di principio*, se non in pratica, così come una conoscenza più completa di tutte le forze in gioco nel lancio di una moneta ci



permetterebbe di prevedere il risultato. Se è così, dobbiamo andare al di là della meccanica quantistica per trovare la risposta, o perlomeno sviluppare una diversa interpretazione delle regole quantistiche. Einstein stesso sosteneva questo punto di vista, ed è quello che voleva dire con la sua famosa osservazione «Dio non gioca a dadi». Einstein non riusciva fino in fondo ad accettare la casualità del mondo dei quanti.

Sebbene si sia dimostrato che l'interpretazione di Einstein fosse sbagliata, esiste un altro modo per spiegare la teoria quantistica che non contraddice la versione standard, pur fornendo un comportamento completamente deterministico del mondo subatomico. La spiegazione trae origine dal lavoro di un fisico di nome David Bohm, noto da oltre cinquant'anni. Il problema è che nessuno è ancora riuscito a trovare un modo di controllare se questa versione della teoria quantistica sia giusta, e confermare così, categoricamente, che l'universo è in realtà deterministico anche in scala subatomica.

Secondo Bohm, l'imprevedibilità del mondo quantistico non sorge da una vera casualità, ma dall'esistenza di informazione che ci sarà nascosta per sempre, e senza la quale non riusciamo a fare previsioni esatte. Il mondo quantistico è imprevedibile non perché non riusciamo a scavare abbastanza a fondo, e nemmeno perché esiste un «effetto farfalla quantistico», una sensibilità estrema alla precisione delle nostre misure, ma piuttosto perché non riusciamo a osservare il mondo subatomico senza disturbarlo in qualche modo. Quando guardiamo un elettrone, inevitabilmente cambiamo il suo comportamento, il che rende la nostra previsione inutile. È un po' come pretendere di togliere una moneta dal fondo di un bicchiere pieno d'acqua senza bagnarsi le dita. Nella versione di David Bohm della teoria quantistica, ogni particella nell'universo ha un campo di forza quantistico che controlla le sue azioni; quando facciamo delle misurazioni sulla particella disturbiamo questo campo e quindi cambiamo il suo comportamento. Ma non sappiamo se questa descrizione del mondo quantistico sia corretta, e forse non lo sapremo mai.

### *Riassunto finale*

Abbiamo fatto molta strada dal diavoleto di Laplace. Il paradosso descritto all'inizio del capitolo ha trovato una soluzione relativamente semplice e ci ha condotto a domande affascinanti sulla natura del destino e del libero arbitrio.

Sembra che non riusciremo mai a prevedere il futuro, non perché sia casuale, ma semplicemente perché è imprevedibile, nonostante segua regole uniformi e ben definite. Questa imprevedibilità è, per alcuni, sufficiente a darci un'apparenza di libero arbitrio. La meccanica quantistica, benché ristretta su scala piccolissima, potrebbe forse restituirci la vera casualità, ma perfino questo è in discussione.

E quando si arriva al funzionamento del cervello umano, nessuno può sapere quando arriverà il prossimo sostanziale passo avanti. Potrebbe anche risultare che la natura probabilistica del mondo quantistico abbia un effetto diretto sul mondo a scala normale, particolarmente nelle cellule viventi, e forse anche nel cervello. Abbiamo forse risolto il paradosso del diavoletto di Laplace, ma così facendo abbiamo lasciato aperte molte domande fondamentali.

## 9. Il paradosso del gatto di Schrödinger

### Il gatto nella scatola è sia vivo che morto - finché non guardiamo

Uno dei padri fondatori della meccanica quantistica, il genio austriaco Erwin Schrödinger, nel 1935 ne aveva abbastanza di tutte le interpretazioni bislacche delle sue equazioni matematiche. In seguito a lunghe discussioni con Albert Einstein stesso, tra gli altri, propose uno dei più famosi esperimenti concettuali di tutta la scienza. Scrisse un lungo articolo intitolato *La situazione attuale della meccanica quantistica (Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik)*, pubblicato su un'importante rivista scientifica tedesca, che divenne noto semplicemente come «l'articolo del gatto di Schrödinger», ed è incredibile quante persone, compresi esimi fisici quantistici, si siano da allora lambiccati il cervello cercando di spiegare e chiarire il presunto paradosso che Schrödinger descrisse. Nel corso degli anni sono state proposte molte soluzioni fantasiose, da messaggi mandati all'indietro nel tempo al potere della mente cosciente nell'alterare la realtà.

Schrödinger si chiese cosa succederebbe se chiudessimo un gatto in una scatola con un contatore Geiger e un minuscolo ammontare di materiale radioattivo. Il materiale è così poco che c'è una probabilità del 50% che, nel giro di un'ora, uno solo dei suoi atomi sia decaduto, e così facendo abbia emesso un'entità subatomica, come una particella alfa. Se questo accade, farà scattare il contatore Geiger, e, attraverso un relé, un martello romperà una fialetta di acido cianidrico, che verrà rilasciato nella scatola e ucciderà il gatto. (Spero di non dover precisare che un esperimento del genere non è mai stato eseguito; proprio per questo è chiamato «esperimento mentale»).

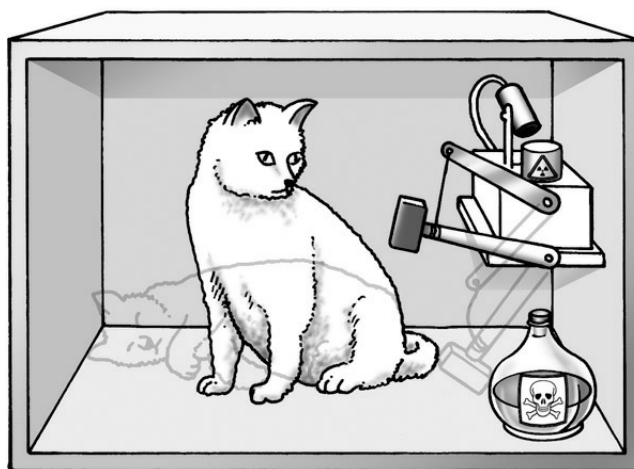


Figura 9.1

Come abbiamo visto nell'ultimo capitolo, il momento esatto del decadimento di un atomo radioattivo è uno di quegli eventi quantistici che non si possono prevedere nemmeno in linea di principio. Secondo l'interpretazione standard della meccanica quantistica, spiegata e chiarita da due dei suoi padri fondatori, Niels Bohr e Werner Heisenberg, non si tratta del fatto che non abbiamo tutte le informazioni necessarie per fare la previsione; piuttosto, a livello quantistico, la natura stessa non sa quando accadrà. Un evento quantistico di questo tipo è ciò che molti credono ci salvi dal determinismo newtoniano, che abbiamo discusso nell'ultimo capitolo. Tutto ciò che possiamo dire è: c'è una certa probabilità che un atomo sia decaduto dopo un certo tempo (dipendente dal «tempo di dimezzamento» del materiale radioattivo). Nel momento in cui chiudiamo il coperchio della scatola, sappiamo che nessun atomo è ancora decaduto. Dopo, non solo non sappiamo se uno degli atomi è decaduto, ma siamo letteralmente costretti a descrivere ogni atomo nel campione radioattivo come esistente in due stati contemporaneamente, decaduto e non decaduto, con la probabilità di uno stato che cresce mentre l'altra decresce nel tempo. Devo insistere che questo non è dovuto solo alla nostra ignoranza, non è solo che non sappiamo cos'è successo nella scatola; questa descrizione ci è imposta dal funzionamento del mondo quantistico: gli atomi e le altre entità microscopiche si comportano in modo comprensibile solo se possono esistere in questo stato di mezzo, non definito. Se non fosse così, semplicemente non riusciremmo a dare un senso al mondo a livello atomico.

Ci sono molti fenomeni naturali che si possono spiegare solo se questa descrizione è vera. Per esempio, per comprendere come e perché il Sole brilla, dobbiamo descrivere il processo di fusione termonucleare che avviene al suo interno nei termini di questo strano comportamento quantistico. Le leggi di buon senso della fisica che si applicano nel nostro mondo macroscopico di tutti i giorni non riescono a spiegare come i nuclei si possano fondere insieme per rilasciare il calore e la luce emessi dalla nostra stella, senza i quali naturalmente non potremmo esistere. Se i nuclei degli atomi non si comportassero secondo le regole quantistiche, non riuscirebbero mai ad avvicinarsi tanto da fondersi, perché le cariche positive creano tra loro un campo di forza repulsivo. È solo a causa di questo comportamento fumoso e diffuso che riescono a sovrapporsi e

quindi ogni tanto si trovano dalla stessa parte di questo campo di forza.

Schrödinger, pur ammettendo che il mondo quantistico era davvero molto strano, sosteneva che, siccome il gatto è anch'esso fatto di atomi, ognuno dei quali obbedisce alle regole della meccanica quantistica, una volta che il suo destino diventa inestricabilmente legato a quello dell'atomo radioattivo diventa descrivibile con le stesse regole quantistiche. Se l'atomo non è decaduto, il gatto è vivo, se è decaduto, il gatto è morto. Quindi, se l'atomo esiste in entrambi gli stati contemporaneamente, anche il gatto dovrà esistere in due stati: sarà contemporaneamente vivo e morto. Questo significa che non sarà né veramente vivo né veramente morto, ma in uno stato di mezzo, confuso, non fisico, che si risolve in un modo o nell'altro quando apriamo la scatola. Questo è ciò che ci dice la meccanica quantistica, e sembra una sciocchezza. Dopo tutto, non vediamo mai il gatto in questo stato «vivo e morto» quando guardiamo, eppure la fisica quantistica ci dice che questo è proprio il modo giusto di descrivere lo stato del gatto *prima* di guardare.

Per quanto tutto ciò appaia assurdo, vi assicuro che quest'idea non è l'elucubrazione fantasiosa di qualche fisico teorico che ha passato troppo tempo chiuso in un laboratorio, ma una previsione serissima di una delle teorie più potenti e affidabili di tutta la scienza.

Certamente, mi risponderete, il gatto *deve* essere o vivo o morto, e quando apriamo la scatola non possiamo certo influenzare il risultato. È solo che non sappiamo cos'è già successo (o non è ancora successo). Be', questo è esattamente il punto che Schrödinger cercava di evidenziare. Nonostante il suo consistente contributo alla teoria (l'equazione più importante della fisica quantistica porta il suo nome), Schrödinger non era convinto di certi suoi aspetti, e aveva avuto numerosi battibecchi con Bohr e Heisenberg negli anni venti proprio su questo punto.

Per quanto si cerchi di spiegarla accuratamente, per chi non è un fisico, la meccanica quantistica suonerà sempre sconcertante, se non addirittura inverosimile. Ma il fatto è che le regole e le equazioni che descrivono il mondo quantistico non sono per niente ambigue, anzi, sono ben definite, sia dal punto di vista logico sia da quello matematico. E per quanto molti fisici quantistici non si sentano sempre a loro agio con il modo in cui le loro equazioni si relazionano nel mondo reale, le strutture matematiche della meccanica quantistica sono talmente precise e forniscono previsioni così accurate, che non ci può essere

alcun dubbio che riflettano verità fondamentali sul nostro mondo. Allora, possiamo venire a capo del paradosso del gatto e al contempo salvare la meccanica quantistica con tutte le sue bizzarrie? Vediamo se riusciamo a risolvere anche questo rompicapo; in fin dei conti, non siamo certo arrivati fin qui, combattendo demoni e diavoletti vari per farci mettere nel sacco da un micio.

### *Erwin Schrödinger*

Nel periodo 1925-27 ebbe luogo una rivoluzione scientifica mai vista né prima né dopo. Naturalmente ci sono stati altri grandi momenti nella storia della scienza, e i passi avanti fatti da geni come Copernico, Galileo, Newton, Darwin, Einstein, Watson e Crick hanno cambiato in modo fondamentale la nostra comprensione del mondo; ma mi sento di sostenere che nessuna delle scoperte di questi grandi scienziati abbia rivoluzionato la scienza quanto la meccanica quantistica. La teoria fu sviluppata nel giro di pochi anni, e cambiò il nostro modo di vedere la realtà per sempre.

Analizziamo lo stato della fisica nei primi anni venti. Si sapeva che tutta la materia è fatta di atomi e gli scienziati avevano una vaga idea di come fossero composti questi atomi al loro interno e di cosa fossero costituiti. Si sapeva anche, grazie al lavoro di Einstein, che la luce poteva comportarsi come un flusso di particelle o come un'onda, a seconda del tipo di esperimento eseguito e quali proprietà della luce fossero sotto esame. Già questo era abbastanza strano, ma c'erano prove sempre più consistenti del fatto che le particelle di materia, come gli elettroni, potessero anch'esse mostrare questo tipo di comportamento contraddittorio.

Nel 1916 Niels Bohr ritornò trionfante a Copenaghen da Manchester, dove aveva aiutato Ernest Rutherford a sviluppare un modello teorico sulle orbite degli elettroni attorno al nucleo negli atomi. In pochi anni aveva fondato un nuovo istituto a Copenaghen, con fondi donati dalla fabbrica di birra Carlsberg. Poi, con il premio Nobel del 1922 nel cervice, iniziò a raccogliere attorno a sé i più grandi geni del suo tempo. Il più famoso della banda di discoli era il fisico tedesco Werner Heisenberg. Nel bel mezzo di una febbre da fieno, sull'isola tedesca di Heligoland, nell'estate del 1925, Heisenberg aveva fatto un enorme progresso nella formulazione delle equazioni matematiche necessarie a

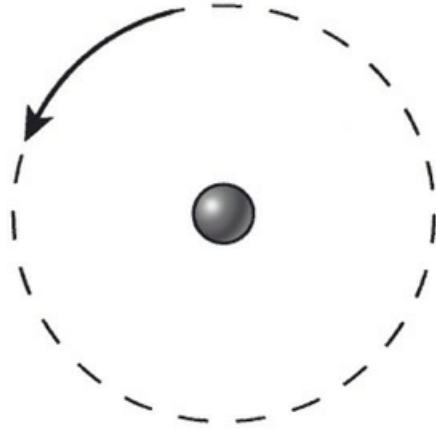
descrivere il mondo degli atomi. Ma era uno strano tipo di matematica, e quello che diceva sugli atomi era ancora più strano. Per esempio, Heisenberg sosteneva che non solo non si può dire esattamente dov'è un elettrone se non lo stiamo osservando, ma che l'elettrone stesso non ha una posizione precisa, ed è sparpagliato in modo confuso e non conoscibile.

Heisenberg fu costretto a concludere che il mondo atomico è un posto spettrale, non completamente reale, che si cristallizza in un'esistenza ben definita solo quando predisponiamo uno strumento per osservarlo e misurarlo, e perfino in questo caso lo strumento rileverà solo le caratteristiche oggetto della sua misurazione. Quindi, senza entrare in dettagli tecnici, uno strumento che misuri la posizione di un elettrone lo troverà in una qualche posizione ben definita, mentre un altro strumento che ne misuri la velocità ci dirà quanto va veloce, ma è impossibile determinare sperimentalmente con grande precisione esattamente dove si trova un elettrone e quanto sta andando veloce allo stesso tempo. Questa idea fu racchiusa nel famoso «principio di indeterminazione», che è tuttora uno dei più importanti concetti nella scienza.

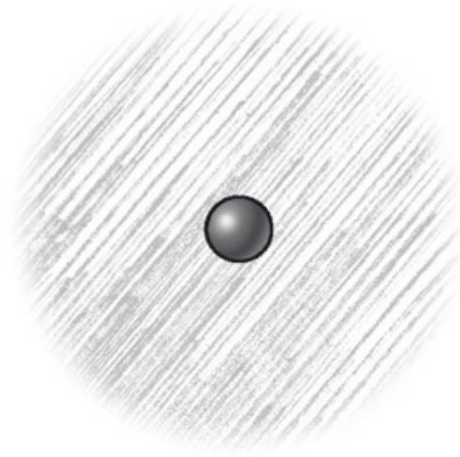
Nel gennaio del 1926, più o meno allo stesso tempo in cui Heisenberg sviluppava queste idee, Erwin Schrödinger presentò un articolo in cui delineava un diverso modo di descrivere matematicamente l'atomo, che forniva un'immagine molto diversa. La sua teoria atomica suggeriva che la posizione dell'elettrone orbitante non era confusa e impossibile da conoscere, ma era in realtà come un'onda di energia attorno al nucleo. L'elettrone non ha una posizione precisa perché in realtà non è una particella, bensì un'onda. Schrödinger voleva fare una distinzione tra l'immagine sfocata di un elettrone diffuso nello spazio e l'immagine nitida di una nuvola o un banco di nebbia. In entrambi i casi non riusciamo a specificare dove sia esattamente l'elettrone, ma Schrödinger preferiva pensare all'elettrone come «veramente» diffuso nello spazio, almeno finché non guardiamo. La sua versione della teoria atomica divenne nota col nome di «meccanica ondulatoria», e la sua famosa equazione descrive come si evolvono queste onde nel tempo in maniera totalmente deterministica.

Oggi abbiamo imparato a convivere con questi due modi di vedere il mondo quantistico: la visione matematica astratta di Heisenberg e quella ondulatoria di Schrödinger. Entrambe vengono insegnate agli studenti, funzionano egregiamente, e i fisici quantistici imparano a saltare facilmente dall'una

all'altra a seconda del problema che devono risolvere. Il fatto è che entrambe queste descrizioni forniscono le stesse previsioni sul mondo ed entrambe sono in spettacolare accordo con i risultati sperimentali. In realtà, altri pionieri quantistici, come Wolfgang Pauli e Paul Dirac, mostrarono nei tardi anni venti che i due modi di descrivere la materia dal punto di vista matematico sono esattamente equivalenti, ed è solo una questione di convenienza quale dei due usare per comprendere una particolare caratteristica degli atomi e dei loro costituenti. Un po' come dire la stessa cosa in due lingue diverse.



(a) Secondo Ernest Rutherford (1911)



(b) Secondo Werner Heisenberg (1925)

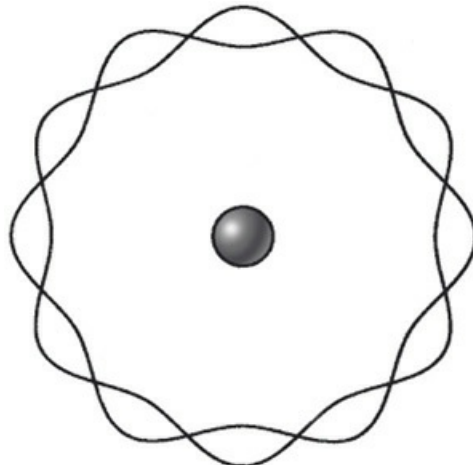




Figura 9.2

Tre immagini dell'atomo di idrogeno, con un singolo elettrone in orbita attorno al nucleo.

Quindi la meccanica quantistica, come teoria matematica, ha avuto un successo strepitoso nello spiegare la struttura del micromondo degli atomi e delle particelle che costituiscono la materia, dagli elettroni ai quark ai neutrini, ma è ancora accompagnata da questioni irrisolte, che hanno a che fare sia con la nostra interpretazione della matematica, sia con il modo in cui il mondo quantistico si relaziona con il mondo familiare delle cose di dimensioni normali, il macromondo che noi abitiamo. È questo secondo punto che Schrödinger voleva sottolineare, nell'immaginare il suo paradosso.

### *Sovrapposizioni quantistiche*

In questa storia manca però un passo importante. Mi rendo conto che vi sto chiedendo di lambiccarvi il cervello su un gatto, fatto di milioni di miliardi di atomi, che è vivo e morto allo stesso tempo, e di bervi la storia che i singoli atomi possano essere in due stati diversi semplicemente con la giustificazione che il mondo quantistico è «bizzarro». Probabilmente sarebbe una buona idea spiegare perché i fisici credono fermamente che gli atomi si comportano proprio così.

Il «fare due (o più) cose allo stesso momento» o «essere in due (o più) posti allo stesso momento» è una proprietà chiamata «sovrapposizione», e non ci è così aliena come può sembrare a prima vista. L'idea della sovrapposizione, infatti, non è relegata al solo regno della meccanica quantistica, ma è una proprietà generale di tutte le onde. Si vede chiaramente osservando le onde dell'acqua. Immaginiamo un tuffatore olimpionico. Quando entra nell'acqua, si vedono onde circolari che si allontanano dal punto d'entrata del tuffatore e arrivano al bordo della piscina. Il disegno è molto diverso da come appare l'acqua quando la piscina è piena di gente che sguazza: in quel caso la superficie è turbolenta, a causa dell'effetto combinato di molte perturbazioni che si sommano tra loro. Il processo sommatorio di onde diverse si chiama appunto «sovrapposizione».

La sovrapposizione di molte onde è piuttosto complicata; consideriamo il caso più semplice in cui ve ne siano solo due. Immaginiamo di lasciar cadere due sassolini in una pozza di acqua ferma nello stesso istante, uno dalla mano destra

e uno dalla mano sinistra. Ogni sassolino darà origine a onde circolari che si allontanano e si sovrappongono con quelle create dall'altro. Se si facesse una fotografia di questa sovrapposizione si vedrebbe uno schema complesso che contiene, in certi punti, due estremi: ci saranno regioni dove le creste delle due onde si combinano e creano un rigonfiamento più consistente (inferenza costruttiva), e ci saranno altri punti dove la cresta di un'onda corrisponde esattamente al punto più basso dell'altra, lasciando quel punto temporaneamente piatto, come se nessun'onda stesse passando di lì (inferenza distruttiva). Tenete a mente questo concetto: l'idea cioè che due perturbazioni ondulatorie possano sovrapporsi e cancellarsi a vicenda.

Ora vediamo l'equivalente di questo fenomeno nel mondo quantistico. Dispositivi chiamati «interferometri» (già incontrati nel quinto capitolo, nella discussione sulla luce e il suo moto nello spazio) riescono a mettere insieme le onde per mostrare dove si combinano in modo costruttivo o distruttivo. Un interferometro che produce un certo segnale quando un'onda singola lo colpisce, si può calibrare in modo che, quando un'altra onda lo colpisce, interferisca distruttivamente con la prima cancellando completamente il segnale. Questa sarebbe la prova che un fenomeno ondulatorio ha colpito l'interferometro.

E ora viene il bello. Certi tipi di interferometri rilevano il passaggio di particelle subatomiche, come gli elettroni. Queste particelle si possono inviare da un dispositivo costruito in modo tale che ogni elettrone può seguire due cammini diversi per arrivare allo stesso punto finale. Se questo dispositivo è calibrato in modo da analizzare la luce, ecco cosa succede: il fascio luminoso si divide in due mediante un pezzo di vetro semi-trasparente che lascia passare metà della luce, la quale segue un certo percorso e riflette l'altra metà del fascio su un altro cammino. Questo ci permette di ottenere due fasci di luce generati dal singolo fascio da cui siamo partiti. Questi due fasci, o onde luminose, viaggiano sulle loro strade diverse attraverso il dispositivo e si ricombinano alla fine, interferendo l'uno con l'altro in un modo che dipende precisamente dalla distanza percorsa. Se i due percorsi hanno esattamente la stessa lunghezza, le onde luminose coincideranno (cioè si combinano «in fase»), ma se arrivano sfasate, vedremo delle interferenze distruttive in certi punti, cioè delle zone in cui non c'è affatto luce. La cosa importante da ricordare è che questo risultato si ottiene solo quando due onde si sovrappongono.

Ed ecco la caratteristica scioccante del mondo quantistico. Se si fa passare un

singolo elettrone attraverso questo dispositivo, così che sia costretto a scegliere tra le due traiettorie (per esempio usando un magnete per deviarlo) allora, invece di fare quello che il senso comune ci direbbe, cioè andare o da una o dall'altra parte, si comporta esattamente come la luce, e in qualche modo si divide e va da tutt'e due le parti contemporaneamente! Come facciamo a saperlo? Perché il risultato, alla fine, quando i due percorsi vengono ricombinati, è esattamente quello che ci saremmo aspettati se avessimo avuto due onde che viaggiano attraverso il dispositivo.

Fin dalla nascita della meccanica quantistica i fisici hanno cercato di capire come le particelle potessero comportarsi in questo modo. Sembra che riescano veramente ad andare su due traiettorie diverse contemporaneamente; se non fosse così, non vedremmo il comportamento ondulatorio di interferenza costruttiva e distruttiva che invece si osserva sperimentalmente. Il fatto è che questo comportamento è esattamente previsto dalla teoria quantistica: dobbiamo descrivere le entità quantistiche come onde, quando non stiamo guardando. Ma non appena guardiamo, per esempio mettendo un rilevatore su uno dei due percorsi dell'interferometro, allora o vediamo l'elettrone oppure non lo vediamo (il che significa che l'elettrone ha scelto l'altro percorso). Quindi, quando controlliamo l'elettrone in transito, lo vediamo percorrere solo una delle due traiettorie. Ma con la nostra osservazione avremo inevitabilmente disturbato il suo comportamento quantistico, e tutte le proprietà ondulatorie come l'interferenza saranno scomparse, il che non è sorprendente, perché ora l'elettrone non sta percorrendo entrambi i percorsi contemporaneamente.

L'insegnamento è questo: nel mondo quantistico, le cose si comportano in modo molto diverso a seconda se le stiamo osservando oppure no. Quando non guardiamo, possono trovarsi in stato di sovrapposizione e fanno due cose diverse contemporaneamente. Non appena le osserviamo, in qualche modo sono immediatamente costrette a scegliere tra le diverse opzioni e a comportarsi ragionevolmente. L'atomo radioattivo nella scatola col gatto in realtà si trova nella sovrapposizione di due stati quantistici, decaduto e non decaduto allo stesso tempo. E questo non perché, data la nostra ignoranza sulla situazione, dobbiamo per forza supporre che possa essere in ognuno dei due stati, ma apparentemente perché si trova effettivamente in una irrealistica combinazione dei due stati.

## *Il problema della misura*

Descrivere il comportamento degli atomi attraverso equazioni matematiche è una bella cosa, ma una teoria scientifica che si rispetti si valuta sulla base delle previsioni che fa sul mondo reale e sui risultati degli esperimenti eseguiti per verificare le sue previsioni. La meccanica quantistica descrive quello che succede nel mondo atomico quando non stiamo guardando (una descrizione matematica, in qualche modo astratta), eppure riesce a fare previsioni incredibilmente accurate di ciò che si riesce a misurare. Però, l'effettivo passaggio dalla descrizione della realtà non osservata alla realtà misurata con i nostri dispositivi è ancora una sorta di mistero, noto come «problema della misura». La questione è facile da descrivere: come fanno gli atomi e i loro compari a passare da piccole particelle localizzate a versioni ondulatorie di se stessi, dispersi nello spazio, e poi tornare a comportarsi in maniera assolutamente ragionevole come piccole particelle localizzate non appena li guardiamo?

Nonostante tutti i suoi successi, la meccanica quantistica non riesce a spiegare il passaggio dalle equazioni che descrivono un elettrone che gira attorno a un atomo a ciò che effettivamente vediamo quando misuriamo quell'elettrone nella pratica. Per questa ragione, i padri fondatori della meccanica quantistica si inventarono una serie di regole ad hoc, in aggiunta alla teoria, postulati che forniscono una sorta di manuale di istruzioni su come tradurre le previsioni matematiche delle equazioni in proprietà tangibili e osservabili come, ad esempio, dove si trova un elettrone in un dato momento.

Nessuno conosce l'effettivo processo per cui un elettrone passa istantaneamente da uno stato «sia qui che là» a uno stato «o qui o là» quando lo guardiamo; la maggioranza dei fisici si accontenta di seguire il punto di vista pragmatico di Niels Bohr, che diceva «succede così». Lo chiamava «un atto irreversibile di amplificazione», ed è incredibile che per quasi tutti i fisici quantistici del secolo XX fosse sufficiente. Bohr operò una distinzione arbitraria tra il mondo quantistico, dove succedono cose strane, e il nostro mondo macroscopico, dove tutto si comporta ragionevolmente. Lo strumento di misurazione che osserva l'elettrone dev'essere parte del macromondo. Ma come, quando e perché questo processo di misurazione avvenga, non è per niente chiaro. Ecco il problema di Schrödinger: dov'è la linea di demarcazione

tra il micromondo e il macromondo? Presumibilmente dev'essere da qualche parte tra gli atomi e i gatti, ma se è così, come possiamo fare la distinzione, se i gatti non sono altro che un agglomerato di atomi? In altre parole, qualunque strumento di misurazione, sia esso un contatore Geiger, un interferometro, una macchina complicata con manopole e quadranti, o perfino un gatto, alla fin fine è fatto di atomi. Quindi dove dovremmo tracciare la riga tra il dominio quantistico, che segue le sue regole quantistiche, e il macromondo degli strumenti di misurazione?

Nel nostro mondo di tutti i giorni, fatto di grandi oggetti, diamo per scontato il fatto che l'apparenza di un oggetto è ciò che l'oggetto «è». Ma «vedere» qualcosa significa che la luce dall'oggetto deve raggiungere i nostri occhi, e l'atto di illuminare qualcosa disturberà l'oggetto, lo modificherà, anche se di pochissimo, quando la luce lo colpisce e rimbalza. Tutto ciò non ha effetti pratici quando guardiamo una cosa grande, come una macchina o una sedia o una persona, o perfino una cellula al microscopio, perché la collisione delle particelle di luce (fotoni) non ha alcun effetto rilevabile. Ma quando consideriamo gli oggetti quantistici, che sono essi stessi alla scala dei fotoni, le cose sono diverse. D'altra parte, ogni azione provoca una reazione uguale e contraria e quindi per «vedere» un elettrone dobbiamo far rimbalzare su di lui un fotone, deviando così l'elettrone dalla sua traiettoria originaria.

In altre parole: per sapere qualcosa su un sistema, lo dobbiamo misurare, ma misurandolo spesso inevitabilmente lo cambiamo, e quindi non riusciamo a vedere la sua vera natura. Ho descritto questo concetto in termini semplici, che non rendono giustizia alle sottigliezze delle misurazioni quantistiche, ma spero di aver dato un'idea.

Fermiamoci un momento a prendere fiato e riassumiamo. Sappiamo che il mondo quantistico è scivoloso e infido; non solo produce effetti che sembrano impossibili nel nostro mondo di tutti i giorni, ma è così equivoco da impedirci di prenderlo con le mani nel sacco, mentre si sta comportando in maniera strana. Quando apriamo la scatola di Schrödinger, troveremo sempre un gatto vivo o un gatto morto, e mai una sovrapposizione di entrambi. Quindi non abbiamo fatto alcun passo avanti verso la soluzione del paradosso.

*Tentativi disperati*

Come reagirono i fisici all'articolo di Schrödinger? Bohr e Heisenberg non avvallarono l'ipotesi che il gatto fosse al contempo vivo e morto. Ma invece di fornire una soluzione ragionevole al paradosso, si tolsero dalle grane con un ragionamento arguto. Sostennero che non possiamo dire niente sul gatto: non possiamo nemmeno considerarlo una realtà indipendente prima di aprire la scatola e controllare. Chiedersi se il gatto è veramente vivo e morto allo stesso tempo è una domanda mal posta.

Secondo il loro ragionamento finché la scatola è chiusa non possiamo dire niente sullo stato «reale» del gatto. Tutto ciò che abbiamo è quello che le equazioni prevedono di trovare quando apriremo la scatola. Insomma, la meccanica quantistica non ci può dire cosa succede nella scatola e nemmeno cosa troveremo quando la apriremo, può solo prevedere la probabilità di trovare il gatto vivo o morto. Se si facesse per davvero un esperimento del genere molte volte di fila (con il sacrificio di molti gatti), la correttezza di queste previsioni sarebbe certa (così come si deve lanciare una moneta molte volte per verificare la probabilità del 50% del risultato di testa o croce). Le probabilità quantistiche sono estremamente accurate, ma riusciamo a calcolarle solo accettando il fatto che gli atomi esistano nella sovrapposizione di due stati.

Durante gli anni molti fisici hanno provato, se non a spiegare le stranezze quantistiche, perlomeno a trovare un modo di avvicinarsi a una comprensione di come fa il mondo quantistico a comportarsi così; alcuni dei suggerimenti più fantasiosi sono sorti proprio in risposta all'indovinello del gatto di Schrödinger. Un'idea, nota come «teoria transazionale», si basa non solo sui collegamenti istantanei nello spazio, che è già un problema abbastanza serio, ma anche sui collegamenti attraverso il tempo. Per questa spiegazione, l'atto di aprire la scatola manda un segnale indietro nel tempo che dice all'atomo radioattivo di «decidere» se decadere o meno.

A un certo punto era persino di moda parlare di misurazioni che richiedono la coscienza umana per costringere il mondo quantistico a relazionarsi col macromondo: si suggeriva che ci fosse qualcosa di unico riguardo alla coscienza, che forza «l'atto irreversibile di amplificazione», e fa scomparire le sovrapposizioni quantistiche. Siccome nessuno sapeva dove mettere il confine tra il dominio quantistico delle sovrapposizioni e il macrodominio dei risultati delle misurazioni, forse aveva senso porre il confine solo dov'è strettamente

necessario. Siccome perfino l'apparecchio di misura (rilevatore, schermo o gatto che sia) è solo un agglomerato di atomi, che si dovrebbe comportare come qualsiasi altro sistema quantistico, pur se molto grosso, allora dobbiamo abbandonare la descrizione quantistica solo quando viene registrata dalla nostra mente cosciente.

Tracciare la linea tra il misurante e il misurato a livello della coscienza umana corrisponde a ciò che i filosofi chiamano «solipsismo»: l'idea che l'osservatore è al centro dell'universo e ogni cosa è solo il frutto della sua immaginazione. Per fortuna, questo punto di vista è ormai screditato da tempo. La cosa affascinante però, e anche un po' frustrante a volte, è che ancora tanti non-fisici sostengono come, dal momento che non capiamo del tutto la meccanica quantistica e nemmeno l'origine della coscienza, le due cose debbano dunque essere magicamente correlate. Questo tipo di speculazioni, per quanto divertenti, non trovano posto nel pensiero scientifico serio (per ora).

E il gatto? Non è forse cosciente? Non può fare anche lui delle osservazioni mentre è nella scatola? C'è un modo ovvio di verificare la cosa. Potremmo sostituire il gatto con un volontario umano e magari mettere una pozione soporifera al posto di quella letale (cosa che avremmo potuto fare anche con il gatto, a dire il vero). Che cosa succede ora quando apriamo la scatola? Chiaramente, non troveremo il volontario simultaneamente sveglio e addormentato, e nemmeno riusciremo a convincerlo che era in questa sovrapposizione di stati prima che aprissimo la scatola. Se è cosciente, ci racconterà che, a parte un po' di nervosismo, si sentiva esattamente uguale a prima. E se lo troviamo incosciente, quando si riprenderà ci dirà che ha sentito il dispositivo scattare qualche minuto dopo la chiusura della scatola e subito dopo ha cominciato a girargli la testa, poi si è svegliato annusando i sali.

Allora, mentre un singolo atomo può esistere in una sovrapposizione quantistica, il volontario chiaramente non può farlo. E siccome il nostro volontario non ha niente di speciale (deve avere un dottorato, o vestire un camice da laboratorio, affinché la sua coscienza sia sufficientemente qualificata?) non riusciremo a trovare una differenza sostanziale tra lui e il gatto. Siamo quindi costretti a concludere che non c'è alcuna ragione per cui il gatto si debba descrivere come vivo e morto allo stesso tempo, prima che apriamo la scatola, e l'unica vera ragione è che, se fosse così, il gatto stesso lo saprebbe.

## *Dispersioni quantistiche*

Se il gatto non si trova mai nella sovrapposizione di stati diversi, allora presumibilmente la linea di demarcazione tra il micromondo quantistico e il macromondo nel quale viviamo noi è giù, verso la parte quantistica della scala. Analizziamo più a fondo la questione di cosa significa «misurare».

Consideriamo cosa succede a un atomo di uranio all'interno di una roccia sepolta sotto terra. Molto di rado questi atomi spontaneamente si dividono in due frammenti che si allontanano tra loro, sprigionando grandi quantità di energia, un fenomeno chiamato «fissione nucleare». Si tratta della stessa energia prodotta nei reattori nucleari, che fornisce calore e quindi elettricità. Questi frammenti di nucleo atomico, ognuno grande circa la metà del nucleo di uranio di partenza, possono allontanarsi in qualsiasi direzione. La meccanica quantistica ci dice che, prima di misurare, dobbiamo pensare che ogni frammento sia stato sparato in tutte le direzioni possibili. È molto più facile da capire se pensiamo ai due frammenti non come particelle ma come onde, e quindi è ovvio il paragone con le increspature circolari dell'acqua prodotte da un sasso che cade. Però sappiamo che i frammenti di fissione nucleare lasciano minuscole tracce nella roccia, rilevabili al microscopio. Lo studio di queste tracce, lunghe solo qualche millesimo di millimetro, è un utile strumento per la datazione radiometrica delle rocce.

Quindi la questione è la seguente: poiché queste tracce sono prodotte nel mondo quantistico, fino a che non le misuriamo dobbiamo accettare il fatto che ci sono e non ci sono allo stesso tempo; se l'atomo di uranio si è diviso, ci sono, e se non si è diviso, non ci sono. E se la fissione è avvenuta, dobbiamo accettare che i frammenti si sono allontanati in tutte le direzioni possibili. Ma cos'è una misurazione? Dobbiamo forse pensare che la roccia sia in una sorta di limbo, con e senza le tracce, finché non la guardiamo al microscopio? Naturalmente no; o ci sono o non ci sono, sia che guardiamo la roccia oggi, tra cent'anni, o mai.

Le misurazioni del mondo quantistico avvengono in continuazione e gli osservatori coscienti, con o senza camici di laboratorio, non possono certo giocare alcun ruolo. La corretta definizione di misurazione è la registrazione di un evento o di un fenomeno, nel senso che l'evento lascia una traccia rilevabile,



volendo, anche molto tempo dopo.

La cosa potrà forse sembrarvi così ovvia da chiedervi come sia possibile che i fisici quantistici non ci siano arrivati subito. Ma, ancora una volta, certe previsioni della meccanica quantistica sono tutt'altro che razionali. È necessaria un'idea più chiara di come vengono registrati gli eventi nel mondo quantistico, perché quello è il momento in cui le stranezze quantistiche (andare in due direzioni allo stesso tempo, fare e non fare una cosa simultaneamente) trapelano nel macromondo.

Durante gli anni ottanta e novanta del secolo scorso i fisici riuscirono finalmente a capirci qualcosa. Considerarono cosa succede quando un sistema quantistico isolato, come un singolo atomo, smette di esistere nella sua isola felice di sovrapposizioni e si collega a uno strumento di misura, che potrebbe anche solo essere il suo ambiente circostante, come nel caso della roccia. La meccanica quantistica dice che i molti milioni di miliardi di atomi che costituiscono lo strumento (o la roccia) devono anch'essi essere in sovrapposizione quantistica. Però, questi delicati effetti quantistici diventano troppo complessi da mantenere in un oggetto così grande, e si disperdono, quasi come il calore che si diffonde da un corpo caldo. Il processo si chiama «decoerenza» ed è oggi oggetto di accesi dibattiti e di molta ricerca. Un modo di spiegare la decoerenza è dire che le delicate sovrapposizioni individuali si perdono irrimediabilmente nell'enorme numero di altre possibili sovrapposizioni provenienti dalle diverse combinazioni di interazioni tra tutti gli atomi del sistema macroscopico. Recuperare la sovrapposizione originale è un po' come cercare di «de-mescolare» un mazzo di carte, ma ancora più difficile.

Molti fisici oggi considerano la decoerenza come un processo fisico reale, che accade ovunque nell'universo in ogni momento. Avviene ogni volta che un sistema quantistico non è più isolato dall'ambiente circostante. Se il collegamento all'ambiente circostante è abbastanza forte, allora la delicata sovrapposizione di partenza si perde molto in fretta. La decoerenza è uno dei processi più veloci e più efficienti di tutta la fisica e la sua notevole efficienza è proprio la ragione per cui è sfuggita ai fisici per così tanto tempo; solo recentemente si è riusciti a controllarla e a studiarla.

Anche se non capiamo a fondo la decoerenza, possiamo perlomeno cercare di dare un senso al nostro paradosso. La ragione per cui non vedremo mai il gatto di Schrödinger vivo e morto allo stesso tempo è che la decoerenza avviene nel

contatore Geiger, molto prima di aprire la scatola. Il contatore, con la sua capacità di registrare il decadimento del singolo atomo, costringe a decidere. Quindi, in qualunque intervallo di tempo, l'atomo sarà decaduto oppure no, e il contatore Geiger avrà registrato l'evento, mettendo in moto il dispositivo che uccide il gatto, oppure no. Una volta emersi dal mondo delle sovrapposizioni quantistiche, non c'è modo di tornare indietro e ci resta solo la semplice probabilità.

Un esperimento molto bello, condotto nel 2006 da Roger Carpenter e Andrew Anderson, due scienziati dell'università di Cambridge, confermò che il collasso della sovrapposizione, e la perdita della bizzarria quantistica, avviene in effetti a livello del contatore Geiger. L'esperimento ricevette però poca attenzione, forse perché i fisici quantistici considerano risolta la questione.

Sembra quindi che la decoerenza ci dica non solo perché non vedremo mai il gatto di Schrödinger vivo e morto allo stesso tempo, ma anche perché il gatto stesso non esiste mai in questo limbo tra due stati. Quello che la decoerenza non ci dice, naturalmente, è come si sceglie tra un'opzione e l'altra. La meccanica quantistica rimane probabilistica, e l'imprevedibilità delle singole misurazioni non scompare.

Se invece si accetta la teoria del multiverso, non c'è bisogno di spiegare come venga scelta una delle due possibili opzioni. In questo caso il gatto sarà vivo in un universo e morto in un altro. Quando si apre la scatola, si scopre in quale universo ci si trova, quello del gatto vivo o quello del gatto morto. In qualunque universo ci troviamo, ci sarà un'altra versione di noi, in un altro universo, che apre la scatola e trova il risultato opposto. Semplice, no?

# 10. Il paradosso di Fermi

## Dove sono tutti?

Il premio Nobel italiano Enrico Fermi diede importanti contributi alla meccanica quantistica e alla fisica atomica. Costruì il primo reattore nucleare, il Chicago Pile-1, nei primi anni quaranta del Novecento; i fermioni, una delle due classi di particelle elementari, hanno preso il suo nome (gli altri sono i bosoni); esiste perfino un'unità di lunghezza nominata in suo onore: il fermi, che è il nome alternativo del femtometro, pari a  $10^{-15}$  metri, cioè un millesimo di miliardesimo di millimetro, utile nella fisica delle particelle. Ma questo capitolo parlerà di una questione posta da Fermi nel 1950, che non ha relazione con la sua ricerca nella fisica subatomica. Riguarda il paradosso più profondo e più importante di tutti: per questo l'ho tenuto per ultimo.

La domanda di Fermi fu formulata durante un pranzo con i colleghi, nel corso di una visita estiva al laboratorio nazionale di Los Alamos, nel New Mexico, luogo di nascita della bomba atomica e del progetto Manhattan. La conversazione, non molto profonda, trattava di dischi volanti, in particolare se fosse possibile che superassero la velocità della luce per raggiungere la Terra da sistemi stellari molto distanti.

Il paradosso di Fermi si può descrivere così:

Data la sua considerevole età e la sua immensa vastità, l'universo, con centinaia di miliardi di stelle solo nella Via Lattea, molte delle quali hanno i loro sistemi planetari (a meno che la Terra sia estremamente atipica nel presentare le condizioni per lo sviluppo della vita) dovrebbe brulicare di vita e di civiltà intelligenti, molte delle quali dovrebbero avere la tecnologia necessaria per viaggiare nello spazio e arrivare fino a noi.

Quindi, dove sono tutti?

Secondo Fermi era ovvio che, ipotizzando la non unicità del nostro sistema solare, il tempo sarebbe stato più che sufficiente perché una civiltà aliena con ambizioni imperialiste anche modeste e una tecnologia ben sviluppata avesse ormai colonizzato l'intera galassia. Insieme ad altri stimò il tempo necessario a una specie per arrivare a questo risultato in dieci milioni di anni. Può sembrare un tempo molto lungo, e sicuramente è un numero in qualche modo arbitrario; l'importante è osservare che si tratta di una minuscola frazione (in questo caso un millesimo) dell'età della galassia. E ricordiamo inoltre che *Homo sapiens* si aggira sulla Terra solo da 200000 anni.

Il paradosso quindi si riduce alle due domande seguenti:

- Se la vita non è poi così speciale, dove sono tutti gli altri?
- Se è speciale, come mai l'universo è calibrato per permettere alla vita di esistere solo sulla Terra?

Se pensiamo all'abilità della vita di proliferare e prosperare negli ambienti naturali più ostili del nostro pianeta, allora perché non è successo lo stesso su altri pianeti simili alla Terra? Forse il problema non è la proliferazione della vita una volta insorta, il problema è il primo passo. Prima di esaminare la risposta degli scienziati a questo paradosso e i vari fattori che sono coinvolti, analizziamo le soluzioni comunemente suggerite.

1) *Gli extraterrestri esistono e sono tra noi.* Respingerò questa prima possibilità per il ragionevole motivo che non c'è alcuna prova a sostegno delle fantasiose teorie dei sostenitori dell'esistenza degli UFO. Ciò nonostante, molti rimangono convinti che gli alieni sono arrivati su dischi volanti, magari di passaggio, qualche migliaio di anni fa, giusto il tempo di costruire le piramidi e ripartire, oppure sono ancora tra noi e rapiscono vittime innocenti per condurre su di loro inquietanti esperimenti.

2) *Gli extraterrestri esistono, ma non ci hanno contattato.* Ci sono molte ragioni per cui civiltà aliene sufficientemente avanzate possono aver scelto di non darci alcun segno della loro esistenza. Per esempio, forse (al contrario di noi) non hanno voglia di diffondere la notizia della loro esistenza nella galassia, o magari preferiscono aspettare che ci evolviamo a sufficienza da essere accolti nel loro esclusivo circolo galattico. Tutto ciò, naturalmente, con l'ipotesi che tutte le civiltà aliene seguano processi di ragionamento simili ai nostri.

3) *Non stiamo guardando nel posto giusto.* Sebbene siamo in ascolto da cinquant'anni, non abbiamo ancora ricevuto alcun segnale dallo spazio. Ma forse non abbiamo guardato nelle regioni giuste del cielo, o forse non ci siamo sintonizzati sulla frequenza corretta; o magari i segnali e i messaggi sono arrivati, ma non abbiamo ancora capito come decifrarli.

4) *La vita in altri luoghi viene regolarmente distrutta.* Non ci rendiamo conto di quanto siamo fortunati, qui sulla Terra. I pianeti che possono ospitare la vita in altri sistemi solari devono sopportare regolarmente un assortimento di eventi catastrofici a livello planetario, stellare o galattico, come ere glaciali, impatti di meteoriti o comete, eruzioni stellari, ondate di raggi gamma. Dove questi eventi accadono frequentemente, la vita non ha tempo di evolvere specie intelligenti che viaggiano nello spazio. O forse è vero l'opposto: l'ambiente in altri pianeti è così confortevole e la vita così facile che non si sono verificate le estinzioni di massa necessarie a incoraggiare la biodiversità e quindi l'evoluzione dell'intelligenza.

5) *Autodistruzione.* Si è suggerito che tutta la vita intelligente nell'universo alla fine si autodistruggerà attraverso guerre o malattie, o distruggendo l'ambiente in cui vive, proprio nel momento in cui la tecnologia diventa sufficientemente avanzata da permettere i viaggi nello spazio; il che, se fosse vero, rappresenterebbe per noi un sinistro presagio.

6) *Gli alieni sono troppo... alieni.* Tendiamo a ipotizzare che gli extraterrestri siano come noi, con tecnologie simili a quelle che noi immaginiamo di sviluppare nel futuro. Ci sono buone ragioni per pensarla così, perché ogni forma di vita deve obbedire alle leggi della fisica, ma forse non abbiamo sufficiente immaginazione da concepire un tipo di vita intelligente sufficientemente diverso da noi. Con questo non voglio dire che noi tutti pensiamo che gli alieni avranno le sembianze che hanno nei film, però tendiamo a ipotizzare che siano forme di vita basate sul carbonio, che abbiano arti e occhi e che comunichino per mezzo di onde sonore.

7) *Siamo davvero soli nell'universo.* Forse le condizioni necessarie per l'emergenza della vita sono così rare che si sono verificate in pochissimi luoghi, e la Terra è l'unico pianeta dove la vita intelligente si è evoluta al punto da sottomettere la natura e mandare segnali nell'universo per annunciare la sua esistenza. O forse il nostro pianeta è veramente l'unico su cui la vita sia mai apparsa.

Tutti gli scenari esposti sono solo elucubrazioni e per la maggior parte non molto plausibili. Il punto di vista di Fermi era che, sebbene sia molto probabile che ci sia vita nella galassia, le distanze dei viaggi interstellari sono tali che, data la barriera della velocità della luce, nessuna civiltà penserebbe che valga la pena mettersi in viaggio per venirci a trovare.

Fermi non teneva in considerazione il fatto che potremmo riuscire a rilevare l'esistenza di extraterrestri tecnologicamente avanzati anche se questi non avessero mai lasciato il loro pianeta. Tutto sommato, noi stiamo annunciando la nostra presenza alla galassia intera da quasi un secolo, da quando abbiamo iniziato a usare la radio e la televisione per trasmettere informazioni attorno al mondo e abbiamo disperso segnali nello spazio. Una civiltà aliena che fosse lontana qualche decina di anni luce e puntasse i suoi radiotelescopi verso il Sole, riceverebbe una straordinaria quantità di segnali radio, deboli ma complessi, che indicherebbero la presenza di vita su uno dei pianeti del sistema.

Siccome crediamo che le leggi della fisica siano le stesse in tutto l'universo, e siccome uno dei mezzi più semplici e versatili di trasmettere informazioni sono le onde elettromagnetiche, ci aspetteremmo che una civiltà tecnologicamente avanzata usasse proprio questo mezzo di comunicazione a qualche punto della sua storia. E se lo fa, parte dei suoi segnali si disperderà nello spazio, diffondendosi nella galassia alla velocità della luce.

Una volta sviluppato il radiotelescopio, non ci volle molto agli astronomi del XX secolo per considerare la possibilità di usarlo per mettersi in ascolto di segnali dallo spazio. La ricerca di intelligenza extraterrestre ebbe inizio per mano di un singolo uomo.

## *Drake e le sue equazioni*

Il primo a dare seriamente la caccia a ET fu l'astronomo Frank Drake, che lavorava all'osservatorio radioastronomico nazionale a Green Bank, nel West Virginia. Nel 1960 allestì un esperimento per cercare segni di vita in sistemi solari distanti mediante l'ascolto di segnali elettromagnetici alle frequenze delle onde radio. Il progetto si chiamava «Ozma», in onore della principessa Ozma, sovrana della Città di Smeraldo di Oz, nel libro di Frank Baum.

Drake puntò il suo radiotelescopio verso due stelle non troppo distanti e simili al Sole: Tau Ceti ed Epsilon Eridani, lontane rispettivamente 12 e 10 anni luce, entrambe candidate ragionevoli per ospitare pianeti abitabili. Calibrò la sua antenna per ricevere segnali radio a una frequenza particolare, quella della radiazione elettromagnetica prodotta dall'idrogeno, l'elemento più semplice, più leggero e più abbondante nell'universo, e quindi la scelta più probabile di una civiltà aliena che voglia farsi sentire. Registrò i dati e controllò accuratamente per vedere se ci fosse qualche segnale sovrapposto al rumore di fondo generale. Dopo aver esaminato dati registrati nel corso di molti mesi non trovò niente di interessante, a parte un segnale che risultò provenire da un aereo ad alta quota. Ma Drake non rimase deluso. Aveva sempre sostenuto che il processo fosse come comprare un biglietto della lotteria: sapeva che ci sarebbe voluto un enorme colpo di fortuna per trovare qualcosa.

Per nulla scoraggiato, l'anno dopo organizzò il primo congresso del SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) e invitò tutti gli altri scienziati interessati all'argomento (tutti e dodici).

Per aiutare lo svolgimento dei lavori, trovò una formula matematica per calcolare il numero di civiltà,  $N$ , nella nostra galassia, i cui segnali sarebbero stati rilevabili dalla Terra. La formula è la seguente, e ora porta il suo nome:

$$N = R_* / f_p / n_e / f_l / f_i / f_c / L$$

Ora spiegheremo il significato di ogni simbolo e, tra parentesi, daremo il valore che Drake prese per i suoi calcoli, così da vedere come arrivò al risultato. Il primo simbolo,  $R_*$ , indica il numero medio di nuove stelle che si formano nella galassia ogni anno (la stima di Drake per questa media fu 10). Il successivo,  $f_p$ , è la frazione di queste stelle che hanno sistemi planetari (0,5),  $n_e$  è il numero di

pianeti, in ogni sistema solare, con un ambiente adatto alla vita (2);  $f_l$ ,  $f_i$ , e  $f_c$  rappresentano, rispettivamente, la frazione di pianeti sui quali effettivamente si sviluppa la vita (1); la frazione di pianeti sui quali si sviluppa la vita e che vedono l'insorgenza di vita intelligente (0,5); e la frazione di questi ultimi in cui una civiltà sviluppa la tecnologia necessaria a mandare nello spazio segnali rilevabili (1). Infine,  $L$  è il periodo di tempo per cui una civiltà continuerebbe a mandare segnali nello spazio (10000 anni). Moltiplicando questi sette numeri, Drake arrivò al totale di  $N = 50000$ .

È un numero imponente, e ci aiuta a evidenziare il paradosso di Fermi. Ma quanto è affidabile? La risposta, ovviamente, è «non molto». Anche se queste sette quantità fossero veramente i soli parametri necessari, i valori per molti di esse sono completamente inventati. I primi tre,  $R_*$ ,  $f_p$  e  $n_e$  sono stimati con valori che non erano noti cinquant'anni fa, ma ora cominciano a diventare più chiari, con i passi avanti compiuti dall'astronomia e dalla tecnologia dei telescopi, specialmente da quando sono stati scoperti numerosi pianeti al di fuori del nostro sistema solare.

Tuttavia, i tre fattori successivi valutano la probabilità dell'emergenza della vita intelligente e capace di comunicare. Ognuno potrebbe avere un valore qualunque tra 0 (impossibile) e 1 (certo). Drake scelse valori molto ottimistici: credeva che nelle giuste condizioni, su un pianeta simile alla Terra, la vita sarebbe apparsa inevitabilmente ( $f_l = 1$ ) che se la vita fosse emersa allora la probabilità di evoluzione dell'intelligenza sarebbe stata il 50% ( $f_i = 0,5$ ), e che, se si fosse evoluta, allora questa specie intelligente avrebbe sicuramente sviluppato la tecnologia necessaria a mandare onde elettromagnetiche nello spazio, deliberatamente o per caso ( $f_c = 1$ ).

Ma i valori numerici non hanno importanza. L'equazione di Drake fece molto di più che fornire una stima per il numero di civiltà aliene nella galassia: mise in moto una ricerca mondiale di segnali dallo spazio che continua ancora oggi.

## *SETI*

SETI è il nome collettivo di numerosi progetti in tutto il mondo che da anni cercano segnali extraterrestri. Mettersi in ascolto di possibili messaggi dallo spazio trasmessi per mezzo di onde elettromagnetiche è una cosa che facciamo

da quando gli scienziati iniziarono a capire come mandare e ricevere questi segnali. Uno degli eventi più antichi risale alla fine dell'Ottocento.

Nel 1899, mentre indagava sull'elettricità atmosferica durante i temporali nel suo laboratorio di Colorado Spring, per mezzo del suo nuovo ricevitore di radiofrequenze, molto sensibile, l'inventore e ingegnere serbo Nikola Tesla rilevò deboli segnali che arrivavano raggruppati seguendo uno schema numerico di uno, due, tre e quattro «bip»; era convinto venissero da Marte. Tesla ricorda la sua eccitazione in un'intervista del 1901:

Non dimenticherò mai la prima sensazione provata quando mi resi conto che stavo osservando una cosa che forse aveva conseguenze incalcolabili per l'umanità... Le mie prime osservazioni letteralmente mi terrorizzarono, perché contenevano qualcosa di misterioso, per non dire soprannaturale, ed ero solo, di notte, nel mio laboratorio... [I segnali arrivavano] periodicamente, e con tale chiarezza da suggerire uno schema non collegabile a niente che conoscessi... Solo qualche tempo dopo mi venne l'idea che i disturbi osservati potessero essere originati da un controllo intelligente.<sup>1</sup>

Tesla fu aspramente criticato per le sue ipotesi, ma il mistero dei segnali da lui rilevati rimane irrisolto.

La prima indagine seria su possibili segnali radio provenienti da intelligenze extraterrestri fu un progetto americano di breve durata del 1924. A quel tempo si pensava ancora che il pianeta più probabile per ospitare una civiltà aliena fosse il nostro vicino, Marte; e se i marziani avessero voluto comunicare con noi lo avrebbero fatto nel momento in cui i due pianeti erano più vicini, il che succede durante una cosiddetta «opposizione», quando la Terra passa tra Marte e il Sole. Un'opposizione accadde tra il 21 e il 23 agosto 1924, quando Marte era più vicino alla Terra di quanto fosse mai stato da migliaia di anni (il record fu battuto nell'agosto del 2003 e lo sarà di nuovo nell'anno 2287). Si decise che se i marziani esistevano, allora avrebbero approfittato di questa opposizione per mandare segnali sulla Terra. La Marina degli Stati Uniti prese quest'idea abbastanza sul serio da dichiarare un «giorno di silenzio radio nazionale», in cui fu chiesto a tutte le radio nel paese di interrompere le trasmissioni per 5 minuti. Un ricevitore radio fu portato a 3000 metri d'altezza in un aereo e tutte le stazioni navali monitorarono l'aereo in cerca di qualcosa di strano. Tutto ciò che udirono furono disturbi elettrostatici (insieme ai segnali delle radio private che non avevano osservato i 5 minuti di silenzio).

Dopo i progetti iniziali di Frank Drake il movimento SETI prese piede,



estendendo la ricerca molto oltre il sistema solare. Per dare un'idea di quanto i radiotelescopi avessero esteso la loro portata, tenete conto che le due stelle oggetto delle attenzioni di Drake nel 1960 erano a circa 10 anni luce di distanza: due milioni di volte più lontane di Marte. È un po' come appoggiare un bicchiere al muro per ascoltare i discorsi dei vicini, non sentire niente, e decidere allora di ascoltare una conversazione a New York mentre siamo a Londra. Chiaramente, la scelta di dove puntare il radiotelescopio è cruciale.

L'istituto SETI fu fondato in California nel 1984. Diversi anni più tardi il progetto Phoenix iniziò sotto la direzione dell'astronoma Jill Tarter, a cui si ispirò Carl Sagan per il personaggio principale del suo romanzo *Contatto*. Tra il 1995 e il 2004 il progetto Phoenix usò radiotelescopi in Australia, negli Stati Uniti e a Portorico per osservare 800 stelle simili al Sole a meno di 200 anni luce di distanza. Non trovarono niente. Ma il progetto fornì un'utile fonte di informazioni per la ricerca di possibile vita aliena. Insieme alla collega Margaret Turnbull, Jill Tarter compilò un catalogo di stelle vicine che potrebbero avere sistemi planetari capaci di ospitare la vita, chiamate «stelle abitabili». Il catalogo contiene attualmente circa 17 000 stelle, molte delle quali sono a poche centinaia di anni luce da noi e possiedono le caratteristiche giuste per essere candidate come ospiti di pianeti simili alla Terra.

Nel 2001 Paul Allen, co-fondatore di Microsoft, accettò di finanziare la fase iniziale della costruzione di una nuova rete di radiotelescopi dedicati al progetto SETI. Si chiama Allen Telescope Array (o ATS), ed è ancora in costruzione, qualche centinaio di chilometri a nord-est di San Francisco. Quando sarà completato sarà formato da 350 parabole, ognuna di 6 metri di diametro, che lavoreranno di concerto. La prima fase fu completata nel 2007, quando quarantatré antenne divennero operative, ma il progetto fu bloccato temporaneamente all'inizio del 2011 a causa dei tagli ai finanziamenti governativi. Poco dopo, fu istituito un gruppo di ricerca di fondi privati per salvare il progetto. Migliaia di persone offrirono donazioni, inclusa la stella del cinema Jodie Foster, che aveva impersonato Jill Tarter nella versione hollywoodiana di *Contatto*. Per qualche ragione trovo tutto questo molto commovente.

La ricerca di ET quindi non è stata affatto abbandonata, anzi, ora sta iniziando per davvero. Fino a oggi abbiamo controllato attentamente solo qualche migliaio di stelle in un intervallo molto limitato di frequenze dello spettro

elettromagnetico. Il piano di ATA è ispezionare un milione di stelle lontane fino a 1000 anni luce. Anche l'intervallo di frequenza sarà più vasto. La scelta iniziale di Drake, cioè la frequenza dell'idrogeno, 1,42 GHz, era ragionevole. Il cielo è un luogo molto rumoroso: ci sono onde radio provenienti da ogni luogo, incluso il rumore di fondo galattico, il rumore generato dalle particelle cariche che si muovono all'interno del campo magnetico terrestre, così come la radiazione cosmica di fondo, residuo dei primi vagiti dell'universo. Ma l'intervallo di frequenze in esame da ATA, tra 1 e 10 GHz, la «finestra di microonde», è una regione particolarmente silenziosa dello spettro elettromagnetico, e quindi adatta alla ricerca di segnali extraterrestri.

L'indagine accademica più seria, tuttavia, si è concentrata in anni recenti non tanto sulla ricerca di segnali di vita intelligente, bensì di pianeti simili alla Terra, che potrebbero ospitare quella vita. Oggi la caccia ai pianeti extrasolari è una delle aree più popolari della ricerca astronomica.

### *Gli esopianeti*

Sono sicuro di non essere il solo a considerare estremamente eccitante la ricerca e lo studio dei pianeti extrasolari (o esopianeti). Osservare e studiare le stelle è un conto (dopo tutto, possiamo dedurre molti dettagli sulla loro composizione e il loro moto dalla luce che emettono), ma i pianeti sono un altro paio di maniche. Non solo sono molto più piccoli delle stelle, ma emettono solo luce riflessa, e quindi brillano un milione di volte meno della stella più flebile. Pertanto, ogni prova della loro esistenza può essere solo indiretta. La tecnica più comune è il cosiddetto «metodo del transito», che consiste nell'osservare una piccola diminuzione della luminosità di una stella quando un pianeta le passa davanti. Un altro metodo è l'osservazione del piccolo effetto della gravità del pianeta su una stella molto più grande, che la fa vibrare leggermente. L'effetto si può rilevare o come un cambiamento nella frequenza della luce stellare che si muove verso di noi o nella direzione opposta (effetto Doppler), oppure misurando direttamente un cambiamento nella sua posizione.

Al momento della pubblicazione di questo libro si sono trovati circa 700 esopianeti. Ma il numero probabilmente crescerà in fretta. Nel 2009 la missione Kepler della NASA lanciò una navicella con la strumentazione necessaria alla scoperta di esopianeti. Nel febbraio 2011 il gruppo di ricerca

della missione comunicò una lista di 1235 possibili pianeti, compresi i 54 della «zona abitabile». Di questi, sei hanno dimensioni simili alla Terra.

Si è stimato che ci siano almeno 50 miliardi di pianeti nella Via Lattea e almeno l'uno per cento (500 milioni) di essi si trovino nella zona abitabile. Altre stime danno un valore per il numero di pianeti abitabili simili alla Terra superiore a due miliardi. Di questi, almeno 30 000 sono a meno di 1000 anni luce dalla Terra.

Fino a ora due esopianeti nella zona abitabile hanno in particolare attirato l'attenzione della comunità scientifica internazionale, non tanto perché abbiano mostrato segni di vita, quanto perché sono i candidati più vicini a essere «pianeti di Riccioli d'Oro», né troppo caldi né troppo freddi, come il latte nella tazza dell'orsetto della favola. Il primo si chiama Gliese 581d e orbita attorno a una nana rossa, Gliese 581, che si trova a 20 anni luce dalla Terra, nella costellazione della Bilancia. La lettera «d» alla fine del nome indica che si tratta del terzo pianeta in orbita attorno alla stella (i pianeti si indicano con il nome della stella, a cui si aggiunge una lettera che comincia dalla «b», perché «a» è la stella stessa). Gliese 581d è cinque volte più grande della Terra, ma simulazioni climatiche recenti suggeriscono che abbia un'atmosfera stabile e acqua liquida sulla superficie. Si sono scoperti diversi altri pianeti potenzialmente abitabili attorno alla stessa stella, ma la scoperta non è ancora confermata.

Il secondo candidato è HD85512b, in orbita attorno alla stella HD85512 (il nome viene dal catalogo di Henry Draper), che si trova a 36 anni luce da noi, nella costellazione della Vela. È uno degli esopianeti più piccoli nella zona abitabile scoperti finora, ed è attualmente considerato il miglior candidato a ospitare vita aliena. È circa quattro volte la dimensione della Terra, con una gravità superficiale circa una volta e mezzo la nostra e una temperatura stimata a circa 25 °C negli strati alti dell'atmosfera. La temperatura sulla superficie non è nota, ma probabilmente è molto più alta. Il suo anno (il tempo impiegato a compiere un'orbita completa attorno alla sua stella) è di soli 54 giorni.

Ci fu molta eccitazione verso la fine del 2011, quando la missione Keplerò confermò la scoperta del primo esopianeta, Kepler 22b. Sebbene la sua stella madre sia notevolmente più lontana dalla Terra sia di Gliese 581, sia di HD85512, a circa 600 anni luce di distanza, è molto simile al nostro Sole (una nana gialla). Non si sa molto delle dimensioni di Kepler 22b, ma stime recenti danno un valore per il suo diametro diverse volte quello della Terra; non si sa se

sia un pianeta roccioso, come la Terra, o gassoso, come Giove e Saturno. Se fosse roccioso, allora dovrebbe avere acqua allo stato liquido sulla superficie; e il fatto che sia in orbita alla distanza giusta attorno a una stella come il Sole lo rende un candidato molto interessante.

Si può discutere se si troveranno o no risposte a tutte queste domande in tempi brevi, ma abbiamo fatto molti passi in poco tempo nella ricerca degli esopianeti e le scoperte continuano ad accumularsi velocemente.

### *Quanto siamo speciali?*

Naturalmente si può dire che un pianeta è adatto a ospitare la vita, ma la vera grande incognita è: date le condizioni giuste, quanto è probabile che la vita evolva? Per rispondere, dobbiamo capire come è nata la vita sulla Terra.

Il nostro pianeta brulica di vita, dalla flora alla fauna ai batteri. E molte specie, in particolare di microbi, sembrano capaci di prosperare negli ambienti più ostili, dal freddo intenso al caldo estremo, con e senza luce. Questa diversità di vita, e il fatto che sembra aver preso piede relativamente in fretta dopo il raffreddamento della Terra giovane, suggerisce che la sua insorgenza non fosse poi così difficile. Ma è il modo giusto di considerare la questione? Non sappiamo se le condizioni per sostenere almeno la vita batterica esistano da altre parti nell'universo (o, più specificamente, nel nostro sistema solare), quindi sembra ragionevole aspettarsi che la vita sia potuta emergere in altri mondi. Ma quanto è speciale il nostro pianeta?

La Terra è certamente alla distanza giusta dal Sole: né troppo calda, né troppo fredda. Trae beneficio da un enorme pianeta, Giove, in orbita appena più lontano, che si comporta come un fratello maggiore, proteggendoci e assorbendo con la sua enorme forza gravitazionale tutto il pulviscolo spaziale che altrimenti bombarderebbe la nostra atmosfera.

L'atmosfera terrestre è fondamentale, non solo perché ci fornisce l'aria da respirare (e in effetti la vita iniziò sulla Terra prima che ci fosse ossigeno nell'atmosfera), ma per via di come interagisce con le radiazioni elettromagnetiche. È trasparente alla luce visibile ma assorbe parzialmente la luce infrarossa (calore) sia in entrata (dal Sole) sia in uscita (irradiata dalla superficie terrestre). Questo «effetto serra» scalda l'atmosfera, e di contro mantiene l'acqua sulla superficie del pianeta in forma liquida, che è molto più

utile al fiorire della vita che non il ghiaccio o il vapore.

La Luna è anch'essa cruciale. La sua gravità stabilizza la rotazione terrestre, rendendo il clima costante per l'evoluzione della vita, mentre la forza delle maree sul mantello terrestre (specialmente quando la Luna era molto più vicina, miliardi di anni fa) potrebbe aver aiutato il riscaldamento del mantello e forse anche la creazione del campo magnetico terrestre. Quest'ultimo protegge la Terra dal vento solare, che altrimenti soffierebbe via l'atmosfera nello spazio.

Perfino processi come la tettonica delle placche continentali sono fondamentali, poiché aiutano a riciclare il carbonio necessario a stabilizzare la temperatura dell'atmosfera e a rifornire di nutrimenti le creature che vivono sulla superficie; forse anche questo fenomeno contribuisce alla creazione del campo magnetico terrestre.

Quindi forse il nostro pianeta è davvero molto speciale. Ma significa forse che la vita fosse inevitabile? Una volta che la vita emerse e iniziò il processo evolutivo, la vita in un certo senso fece tutto da sola, ma il punto cruciale è il primo passo.

I primi esseri viventi sulla Terra furono procarioti unicellulari (semplici organismi senza nucleo cellulare), risalenti a circa tre miliardi e mezzo di anni fa. Probabilmente si evolvettero a partire da «protobionti», un agglomerato di molecole organiche racchiuse in una membrana, capaci di riprodursi e di avere un metabolismo, due dei segni chiave della vita.

Quello che ancora non sappiamo è l'esatta sequenza di eventi che portò da molecole organiche come gli amminoacidi (necessari alla formazione delle proteine) e i nucleotidi (le unità strutturali del DNA) al primo vero «replicante». La domanda sull'origine della vita è una delle più importanti nella scienza e lo studio di questo problema si chiama «abiogenetica». Molti confondono la biogenetica (la teoria secondo cui la vita può emergere solo da altra vita) con l'abiogenetica (lo studio di come la vita emerge dalla materia inorganica attraverso processi naturali, cioè, in sostanza, di come si passa dalla chimica alla biologia). L'abiogenetica cerca di scoprire il passo magico, quello comunemente chiamato «generazione spontanea», che trasforma la materia inanimata in organismo vivente.

Si è sostenuto che l'emergere spontaneo della vita sulla Terra sia stato un evento rarissimo, paragonabile a un forte vento che soffia attraverso un deposito di ferrivecchi e crea un aereo con i pezzi a disposizione per puro caso.

Alcuni sostengono che sia questa la probabilità che molecole organiche si combinino assieme casualmente nel modo giusto per creare la più semplice forma di vita. Una coincidenza incredibile. Ma è un paragone ragionevole?

Nel 1953 Stanley Miller e Harold Urey alla University of Chicago concepirono un famoso esperimento per cercare di rispondere a questa domanda. Volevano vedere se si poteva creare la vita in provetta a partire da alcuni elementi di base. Mescolarono dell'acqua con tre diversi gas (ammoniaca, metano e idrogeno) nella convinzione che questi rappresentassero l'atmosfera della Terra agli inizi della vita, e il miscuglio fu scaldato e fatto evaporare. Poi colpirono il vapore con scintille, per simulare i fulmini dell'atmosfera terrestre, e infine fecero condensare il vapore. Dopo una settimana di questo trattamento, osservarono dei composti organici in formazione, compresi alcuni amminoacidi, fondamentali per la vita, in quanto in natura si combinano a formare le proteine delle cellule viventi. Ma l'esperimento non riuscì a produrre proteine complete, in tutta la loro complessità, e nemmeno altri ingredienti cruciali per la vita, come gli acidi nucleici (DNA e RNA).

Nonostante questo inizio promettente, in più di mezzo secolo da quell'esperimento chiave gli scienziati non sono riusciti a creare artificialmente la vita. Allora è davvero così improbabile che la vita inizi spontaneamente? Sappiamo che è successo almeno una volta (e noi ne siamo la prova), ma sarebbe interessante sapere se tutta la vita presente sulla Terra oggi proviene dallo stesso singolo antenato, perché altrimenti vorrebbe dire che la vita è iniziata in più di un'occasione e quindi è meno speciale di quanto potremmo credere.

Una ricerca recente piuttosto controversa sembra confutare questa idea. In uno strano lago nel deserto in California si scoprì un nuovo microbo, chiamato «ceppo GFAJ-1». Il lago Mono, formatosi circa un milione di anni fa, presenta una strana composizione chimica. È due o tre volte più salato dell'oceano, contiene cloruri, carbonati e solfati, ed è fortemente basico, con pH 10. Non contiene pesci, ma la composizione chimica è ideale per un tipo di alga unicellulare e miliardi di minuscoli gamberetti, fonte di cibo per milioni di uccelli migratori che si radunano qui per diversi mesi ogni anno. Oh, e il lago è anche ricco di arsenico.

Un'equipe di biologi della NASA, diretti da Felisa Wolfe-Simon, iniziò a

interessarsi del batterio GFAJ-1, perché sembrava riuscire a fare una cosa mai vista prima: si cibava di arsenico, un elemento velenoso per ogni altra forma di vita.

Sappiamo che la vita sulla Terra dipende da una combinazione di diversi elementi, ma il DNA è fatto di soli cinque ingredienti: carbonio, idrogeno, azoto, ossigeno e fosforo. La questione è se altri elementi, chimicamente simili, potrebbero essere usati al loro posto. L'arsenico è subito sotto il fosforo nella tavola periodica, e quindi ha una struttura atomica simile. I ricercatori della NASA sapevano che GFAJ-1 era tollerante all'arsenico, e che il lago Mono contiene pochissimo fosforo. Quindi misero il batterio in un ambiente ricco di arsenico e lui prosperò, anche in totale assenza di fosforo. Ora, quando le cellule si riproducono, hanno bisogno di materia grezza per costruire nuovo DNA, quindi come facevano questi organismi a fare a meno di uno dei cinque ingredienti fondamentali?

La pubblicazione del lavoro alla fine del 2010 provocò una tempesta mondiale nella comunità scientifica. I ricercatori sostennero che GFAJ-1 letteralmente sostituisce il fosforo con l'arsenico nella struttura stessa del suo DNA. Se questo fosse vero, allora ecco la domanda da un milione di dollari: questi microbi hanno sviluppato l'abilità di usare l'arsenico in questo modo evolvendosi oppure sono nati così, in un evento abiogenetico separato? Se fosse vera quest'ultima spiegazione, allora sapremmo che la vita è iniziata almeno due volte e quindi forse non è un evento così raro.

Non sappiamo ancora come è iniziata la vita sulla Terra. Anche se e quando riuscissimo a rispondere a questa domanda, ci sono ancora altre domande attorno alla probabilità dell'emergenza di vita intelligente. Del resto, potrebbe anche essere che la vita esista in molti posti nella galassia, ma la vita intelligente esista solo qui.

Ricerche recenti sul comportamento dei corvi suggeriscono che questi uccelli hanno sviluppato un'intelligenza notevole, su un percorso evolutivo completamente diverso da quello che ha portato agli esseri umani. Se fosse così, allora forse l'intelligenza è il risultato inevitabile dell'evoluzione darwiniana. Questa, e altre questioni, come il modo in cui organismi multicellulari si siano evoluti da quelli unicellulari miliardi di anni fa, ci diranno se possiamo aspettarci che questi passi cruciali del viaggio evolutivo dall'abiogenesi agli umani siano potuti accadere in altri luoghi nell'universo.

## *Il principio antropico*

Esiste una questione ancora più profonda di quella posta dal paradosso di Fermi, che devo menzionare prima della fine di questo capitolo. Fino a pochi anni fa era relegata ai circoli filosofici, ma ora è entrata nella fisica tradizionale. L'idea fondamentale si chiama «principio antropico», e si concentra sulla pura improbabilità che il nostro universo, o il nostro angolo di universo, sia calibrato tanto precisamente per l'esistenza di noi umani. Nella sua formulazione moderna fu proposto e chiarito dal cosmologo australiano Brandon Carter, durante un congresso scientifico in Polonia nel 1973 per il cinquecentesimo anniversario della nascita di Copernico. Carter lo espresse come segue: «Quello che possiamo aspettarci di osservare deve essere limitato dalle condizioni necessarie per la nostra presenza, come osservatori. Sebbene la nostra situazione non sia necessariamente *centrale*, è senza dubbio privilegiata, in qualche modo». L'occasione per introdurre un'idea simile era particolarmente affascinante, poiché Copernico fu il primo scienziato a proporre l'idea che l'umanità *non* occupi un posto privilegiato nell'universo. Ora ecco qui Carter a suggerire che l'universo ha l'aspetto che ha perché se fosse stato diverso noi non saremmo esistiti. Vi darò un esempio tratto dal mio campo, la fisica nucleare. Una delle quattro forze fondamentali della natura è la forza nucleare forte, che tiene insieme gli atomi. Due nuclei di idrogeno (protoni) non riescono a legarsi insieme, perché la forza nucleare forte non è abbastanza potente da legarli, ma è abbastanza potente da tenere insieme un protone e un neutrone per creare una cosa chiamata «deutone» (il nucleo dell'idrogeno pesante), che gioca un ruolo vitale nella sequenza di fusione nucleare che trasforma l'idrogeno in elio, il processo in atto in tutte le stelle che ci fornisce la luce e il calore del Sole, sorgente di vita. Ma cosa accadrebbe se la forza nucleare forte fosse solo un pochino più potente? Potrebbe essere abbastanza forte da legare due protoni, nel qual caso l'idrogeno si trasformerebbe in elio molto più facilmente. Di fatto, tutto l'idrogeno nell'universo si sarebbe in questo caso trasformato in elio poco dopo il Big Bang. Senza idrogeno, non ci sarebbe la possibilità di combinare quell'elemento con l'ossigeno per formare l'acqua e quindi nessuna possibilità di vita (così come noi la concepiamo).

Il principio antropico sembra esprimere il concetto che la nostra stessa



esistenza determina certe proprietà dell'universo, perché se fossero diverse non saremmo qui a ragionarci su. Ma è veramente una cosa così interessante? Forse se l'universo fosse diverso noi (qualunque cosa significhi «noi») ci saremmo evoluti seguendo quelle condizioni, qualunque esse fossero, e quindi saremmo ancora lì a chiederci: come mai l'universo è così esattamente calibrato per la nostra esistenza?

Un altro modo di ragionare potrebbe essere porsi la domanda: come mai io, personalmente, esisto? Dopo tutto, quali erano le probabilità che i miei genitori si conoscessero e producessero proprio me? E quali le probabilità che i loro genitori producessero proprio loro, e così via? Ognuno di noi si trova alla fine di una catena di eventi lunghissima e altamente improbabile, che si dipana fin dalla notte dei tempi, dall'inizio della vita stessa. Se uno solo degli anelli si fosse incrinato noi non saremmo qui. Quindi, se vogliamo, possiamo ponderare su come il principio antropico si applica a noi stessi; ma non è più interessante del vincitore della lotteria che contempla la sua fortuna. E se il suo numero non fosse stato estratto, qualcun altro avrebbe vinto e potrebbe allo stesso modo riflettere sull'improbabilità della sua vincita.

Il ragionamento di Brandon Carter è noto come «principio antropico debole». Esiste anche un «principio antropico forte», che sostiene che l'universo dev'essere proprio com'è affinché una forma di vita intelligente si evolva in qualche luogo e in qualche tempo per ragionare sulla propria esistenza. Questa versione è sottilmente diversa, ed è molto più speculativa. Personalmente, penso sia un'assurdità. Attribuisce un fine all'universo, sostenendo che in qualche modo dovesse risultare esattamente com'è proprio per produrre noi. Esiste perfino una versione quanto-meccanica piuttosto sofisticata di questo ragionamento, che ha il suo parallelo nella soluzione dell'«osservatore cosciente» al paradosso del gatto di Schrödinger: osservando l'universo l'abbiamo fatto esistere, fin dall'inizio del tempo. Di tutti i possibili universi, abbiamo «scelto» quello che ci permette di esistere in esso.

Un modo molto più semplice di risolvere la questione antropica lo si trova se ci lasciamo sedurre dal canto delle sirene del multiverso. In fin dei conti, se ogni possibile universo esiste, allora non è certo sorprendente che noi ci troviamo proprio in quello giusto per noi.

Finirò questo capitolo tornando all'inizio, con la famosa domanda di Enrico

Fermi sul lugubre silenzio spaziale. In effetti un universo adatto a noi sarebbe anche adatto ad altre forme di vita non troppo dissimili da noi. La vastità dell'universo, con i suoi miliardi di galassie, suggerisce che, per quanto la Terra sia speciale e per quanto la nascita della vita fosse improbabile, è incredibilmente probabile che la vita esista anche da qualche altra parte; tuttavia, forse, semplicemente siamo soli in questo angolino della Via Lattea.

Perché allora continuiamo a cercare, magari invano? È perché cerchiamo risposte alla domanda più basilare di tutte, sull'esistenza. Cos'è la vita? Siamo unici? Cosa significa essere umani e qual è il nostro posto nell'universo? Anche se non troveremo mai risposta a queste domande, è importante continuare a indagare.

## 11. Domande in sospeso

### **Le particelle possono viaggiare più velocemente della luce? Esiste il libero arbitrio? E altri roveli irrisolti.**

Spero che siate d'accordo con me nel dire che siamo riusciti ad affrontare e debellare nove dei migliori paradossi scientifici. Abbiamo esorcizzato diavoli, salvato gatti e nonni, calmato gemelli litigiosi, fatto pace col cielo notturno e dato una ridimensionata a Zenone. Ma qualcuno può sospettare che io abbia barato selezionando solo gli interrogativi risolti in maniera chiara dalla scienza e che ce ne siano altri, da me opportunamente ignorati, a cui non è stata ancora data una risposta. Be', certo che ci sono. L'universo è pieno di misteri, ed è questo che lo rende così affascinante.

Gli enigmi e i misteri ancora in sospeso appartengono a una (o più) di queste tre categorie: quelli che la scienza è sul punto di capire e risolvere; quelli che spera di risolvere un giorno, forse nel lontano futuro e quelli di natura filosofica o metafisica a cui la scienza potrebbe non dare mai risposta perché escono dal suo campo di indagine o perché è impossibile concepire, anche solo in linea di principio, un metodo di indagine da cui si riesca a ricavare una risposta definitiva e soddisfacente.

Anziché descrivere questi importanti problemi in dettaglio, dato che siamo alla fine del libro, mi limiterò a elencare alcuni esempi nelle varie categorie. Faccio notare che non sono in alcun modo ordinati secondo la mia idea di quali siano i primi a essere risolti. Sottolineo inoltre che si tratta di elenchi personali e altamente soggettivi, né esaurienti, né limitati a questioni strettamente paradossali. Li espongo qui semplicemente per evidenziare quanto ci sia ancora da imparare sull'universo e sul ruolo che noi abbiamo al suo interno.

Inizio da dieci problemi che appartengono alla prima categoria, cioè quelli per cui mi aspetto che la scienza troverà una risposta soddisfacente mentre sarò in vita:

- 1) Perché nell'universo c'è più materia che antimateria?
- 2) Di che cosa è fatta la materia oscura?
- 3) Che cos'è l'energia oscura?
- 4) Sarà possibile realizzare un mantello dell'invisibilità funzionante?

- 5) Fino a che punto l'auto-aggregazione chimica riuscirà a spiegare la vita?
- 6) Come fa una lunga catena di materiale organico a ripiegarsi formando una proteina?
- 7) C'è un limite assoluto alla durata della vita umana?
- 8) Come vengono registrati e immagazzinati i ricordi nel cervello?
- 9) Si riusciranno a prevedere i terremoti?
- 10) Quali sono i limiti del calcolo informatico?

Seguono dieci problemi di grande rilievo ai quali sono sicuro che la scienza darà risposta, anche se dubito di vederli risolti nel corso della mia vita:

- 1) Le particelle sono davvero minuscole corde vibranti o la teoria delle stringhe non è altro che una ingegnosa prova di matematica?
- 2) C'era qualcosa prima del Big Bang?
- 3) Esistono dimensioni nascoste?
- 4) Dove e come ha origine la coscienza nel cervello?
- 5) Una macchina può avere coscienza?
- 6) È possibile viaggiare all'indietro nel tempo?
- 7) Qual è la forma dell'universo?
- 8) Che cosa c'è dall'altra parte di un buco nero?
- 9) Ci sono principi più profondi alla base delle stranezze quantistiche?
- 10) Sarà possibile il teletrasporto quantistico di esseri umani?

Infine, ecco alcuni problemi che alcuni collocherebbero, almeno in teoria, nel campo d'azione della scienza ma che la scienza, temo, non sarà mai in grado di risolvere:

- 1) Abbiamo libero arbitrio?
- 2) Esistono universi paralleli?

3) Che cosa ha causato la nascita dell'universo?

4) Siamo stati noi a inventare la matematica allo scopo di descrivere l'universo, o le equazioni della fisica sono qualcosa che esiste da sempre e che attendeva solo di essere scoperto?

### *Più veloce della luce?*

Prima di concludere quest'ultimo capitolo, vorrei dare un esempio di quello che molti considererebbero un potenziale paradosso, nel caso un recente risultato sperimentale si dimostri credibile. Al momento della stesura di questo testo ci sono due enigmi irrisolti nella fisica delle particelle che hanno conquistato i titoli dei giornali in tutto il mondo nel 2011; entrambi sono legati a esperimenti condotti presso gli acceleratori del CERN, a Ginevra. Il primo riguarda la possibilità che le particelle possano viaggiare a velocità superiori a quella della luce; il secondo riguarda l'effettiva esistenza dell'inafferrabile bosone di Higgs, la particella che dà sostanza all'universo. In entrambi i casi i risultati non hanno raggiunto conclusioni definitive, e necessitano di ulteriori verifiche sperimentali. Nella speranza di regalare al libro un minimo di longevità, voglio sbilanciarmi e azzardare una previsione sulla risoluzione dei due casi. L'esistenza del bosone di Higgs sarà confermata nell'estate del 2012, mentre le particelle subatomiche chiamate neutrini risulteranno avere una velocità di poco inferiore a quella della luce. Ma per favore non prendetevela con me se si riveleranno profezie sbagliate!

Dei due annunci (la notizia controversa riguardante la misura di una velocità superiore a quella della luce per certi neutrini, e un segnale di scoperta del bosone di Higgs) il primo è molto più rispondente alla nostra definizione di paradosso scientifico.

La storia fino a questo momento è che un esperimento che si avvale della collaborazione tra due istituti europei, il CERN e i Laboratori del Gran Sasso, ha misurato la velocità con cui un fascio di neutrini copre la distanza di 732 km tra i due laboratori viaggiando sottoterra attraverso la roccia, cosa che i neutrini possono fare come se ci fosse il vuoto, dato che praticamente non interagiscono con nulla: in questo preciso momento voi stessi siete attraversati da miliardi di neutrini, principalmente prodotti nel Sole, senza che ve ne accorgiate.

L'esperimento OPERA (acronimo che sta per Oscillation Project with Emulsion

tRacking Apparatus) è incentrato su un sofisticato strumento, situato al Gran Sasso, in grado di catturare una minuscola frazione di queste sfuggenti particelle. Nel settembre 2011 i ricercatori hanno annunciato di aver cronometrato il tempo impiegato dai neutrini per arrivare dal CERN e hanno constatato che era inferiore di 60 miliardesimi di secondo rispetto a quello in cui la luce avrebbe coperto la stessa distanza. Non è molto come differenza di velocità ma abbastanza per essere un risultato incredibile.

Secondo ciò che sappiamo delle leggi della fisica, infatti, nulla può superare la velocità della luce. E per la mia esperienza non c'è nulla che genera più fastidio nella teoria della relatività (perché è da qui che viene il concetto) della pretesa di stabilire questo limite cosmico. Dall'articolo di Einstein del 1905 a oggi migliaia di esperimenti non hanno fatto che confermarlo e, anzi, buona parte dell'edificio della fisica moderna si fonda in maniera cruciale sulla sua correttezza. Il punto fondamentale non è che la luce sia qualcosa di speciale, bensì il fatto che questo limite di velocità è scritto nel tessuto dello spazio-tempo.

Ma che succederebbe se Einstein avesse torto? C'è un modo per interpretare i risultati di OPERA? Le teorie scientifiche esistono per essere messe in dubbio, per essere confutate da nuove prove sperimentali o essere sostituite da teorie migliori e più accurate, in grado di spiegare meglio i fenomeni. Ma affermazioni straordinarie richiedono prove straordinarie, e gli scienziati di OPERA (che non possono certo essere biasimati per la cura con cui hanno lavorato) sono stati i primi ad ammettere di non avere idea di quale fosse la spiegazione del loro risultato.

Dopo il clamore dei media sullo sbugiardamento di Einstein, ecco il nuovo colpo di scena. Anche un altro esperimento ospitato al Gran Sasso, chiamato ICARUS, ha rivelato alcuni dei neutrini del CERN, ma misurandone l'energia anziché il tempo di volo. Alcuni teorici poco dopo il primo annuncio di OPERA avevano fatto notare che se i neutrini fossero davvero superluminali (più veloci della luce) dovrebbero emettere continuamente radiazione durante il tragitto, perdendo energia. Diversamente, sarebbero un po' come aerei che riescono a superare il muro del suono senza emettere il caratteristico boato: impossibile, in teoria.

I ricercatori di ICARUS hanno annunciato di non aver trovato alcuna prova di questa radiazione, dal momento che i neutrini erano arrivati a destinazione con

la stessa energia con cui erano partiti. Dunque non potevano aver viaggiato più veloci della luce.<sup>1</sup>

Il problema è che ICARUS non dimostra che Einstein aveva ragione più di quanto OPERA dimostri che aveva torto. Entrambi i risultati sono misure sperimentali, non scoperte. Una verifica più appropriata richiederebbe un nuovo esperimento condotto in maniera indipendente da un altro laboratorio. Ed è lì che, a mio avviso, si troverà che la luce detiene ancora il primato mondiale.

Ma sarebbe fantastico se i neutrini potessero davvero andare più veloci della luce. Una scoperta del genere, se confermata, significherebbe il paradiso per i fisici in tutto il mondo. Sarebbe tutto uno scribacchiar di lavagne, un grattar di teste e un luccicar di premi Nobel all'orizzonte, in attesa del novello Einstein capace di risolvere il Paradosso dei Neutrini.

## Note

### 1. Il paradosso del gioco a quiz

<sup>1</sup> Esiste una dimostrazione matematica di questo fatto che fa uso del coefficiente binomiale. La formula di tutte le possibili coppie prese da 23 persone si scrive così:

$$\binom{23}{2} = \frac{23 \times 22}{2} = 253$$



### *3. Il paradosso di Olbers*

<sup>1</sup> Naturalmente a una certa distanza saremo fuori dalla Via Lattea e parleremo di galassie, invece che di stelle.

## 8. *Il paradosso del diavoletto di Laplace*

<sup>1</sup> Laplace, P.-S., *Essai philosophique sur les probabilités*, Courcier, Paris 1814 [trad. it. *Saggio filosofico sulle probabilità*, Theoria, Roma 1987].

## 10. Il paradosso di Fermi

<sup>1</sup> *Talking with the Planets*, in «Collier's Weekly», 19 febbraio 1901, pp. 4-5.

## 11. Domande in sospeso

<sup>1</sup> Nel febbraio 2012 OPERA ha annunciato di aver scoperto due possibili cause di errore sistematico sulle misure di tempo di volo dei neutrini, dall'effetto totale ignoto ma plausibilmente compatibile con la discrepanza misurata rispetto al valore atteso. Qualche settimana dopo ICARUS ha reso noti i propri risultati della misura del tempo di volo su pochi neutrini tra quelli appositamente prodotti a fine 2011 dal CERN con modalità tali da permettere una misura rapida con pochi eventi raccolti: il tempo di volo misurato da ICARUS risulta incompatibile con quello misurato in maniera analoga da OPERA, ed è perfettamente compatibile con l'ipotesi di una velocità dei neutrini uguale o di poco inferiore a quella della luce. Ulteriori analisi incrociate sui dati di raggi cosmici registrati da entrambi gli esperimenti hanno confermato l'ipotesi dell'errore sistematico nei dati di OPERA - con tutta probabilità dovuto alla cattiva connessione di una fibra ottica - all'origine della discrepanza di 60 miliardesimi di secondo. Il comunicato ufficiale del CERN si trova qui: <http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2011/PR19.11E>. [N.d.T.].

# Indice analitico

abbondanza cosmica  
abiogenesi  
acceleratore lineare di particelle  
accelerazione, equivalente alla gravità  
Achille e la tartaruga  
Alfa Centauri  
alieni, *vedi* extraterrestri  
Allen, Paul  
Allen Telescope Array (ata)  
*American Statistician, The* (rivista)  
Anders, William  
Anderson, Andrew  
Andromeda  
anni luce  
Aristotele  
arsenico  
asta nel fienile, paradosso della  
    e teoria della relatività ristretta  
astronomia  
atomi  
    decadimento radioattivo  
    formazione  
  
batterio GFAJ-1  
Benford, Gregory  
Bertrand, Joseph  
Big Bang  
    dimostrazione  
biliardo  
biogenesi  
Bohm, David  
Bohr, Niels  
    sui postulati quantistici

sul gatto di Schrödinger

Bondi, Hermann

Borman, Frank

Bradbury, Ray

Brahe, Tycho

buchi neri

Buller, Reginald

calore ed energia

cammini nello spazio-tempo

caos, teoria del

Carlsberg (birra)

Carpenter, Roger

Carter, Brandon

casualità

  algoritmica

  apparente

  e il multiverso

  meccanica quantistica e

  violazione della

CERN

  esperimento opera

  Large Hadron Collider

cervello umano e libero arbitrio

Chéseaux, Jean-Philippe de

Chicago Pile-1

ciclotrone

cinismo (movimento filosofico)

compleanno, paradosso del

complessità, teoria della

comportamento emergente

contatori Geiger e decoerenza

Copernicus, Nicholas (Copernico)

*De revolutionibus*

  e il principio antropico

corvi, intelligenza dei  
coscienza, e solipsismo  
cunicoli spaziotemporali  
curve spaziotemporali chiuse di tipo tempo

decadimento radioattivo  
decoerenza

Democrito

determinismo

causale

e previsioni

e teoria del caos

determinismo newtoniano

deutone

dicotomia, paradosso della

Digges, Leonard e Thomas

dimezzamento, tempo di

dinamica non lineare

Diogene

Dirac, Paul

dischi volanti, *vedi* extraterrestri

disordine/ordine

Doppler, effetto

Drake, Frank

formula di

Du Sautoy, Marcus

Eddington, Arthur

effetto farfalla

effetto quantistico di Zenone

Einstein, Albert

e il secondo principio della termodinamica

e la casualità quantistica

universo-blocco

elettroni

come onde  
e interferometri  
velocità/posizione

energia

conservazione della, e viaggi nel tempo  
e calore

entropia

equivalenza, principio di  
esopianeti

esperimento teorico

etere luminifero

evoluzione della vita sulla Terra

extraterrestri

paradosso di Fermi  
ricerca degli

falsidici, paradossi

Fermi, Enrico  
paradosso di

forza g

forza nucleare forte

Foster, Jodie

freccia, paradosso della  
freccia del tempo

Friedmann, Aleksandr

fusione termonucleare  
e regole quantistiche  
stellare

Gardner, Martin

gemelli, paradosso dei  
e teoria della relatività generale  
e teoria della relatività speciale

GFAJ-1, batterio

Giove



Gliese 581d

Gödel, Kurt

Gran Sasso

esperimento icarus

esperimento opera

gravità

e il tempo

e principio di equivalenza

greci antichi

e infinito

e logica

gruppo locale

Guinness dei primati

Hafele, Joseph

Hafele-Keating, esperimento di

Halley, Edmond

HD85512b

Heisenberg, Werner

e il gatto di Schrödinger

principio di indeterminazione di

Higgs, bosone di

Hoyle, Fred

Hubble, Edwin

idrogeno, nucleo di

indeterminazione, principio di

e decadimento atomico

e posizione/velocità degli elettroni

infinito, e antichi Greci

informazione

e osservatori

e secondo principio della termodinamica

inquinamento luminoso

instabilità del sistema solare

interferenza delle onde  
interferometro  
Itano, Wayne  
  
Jackson, Andy  
  
Keating, Richard  
Kelvin, William Thomson, barone di  
Kepler, Johannes (Keplero)  
Kepler, missione  
Kepler 22b  
  
Laplace, Pierre-Simon de  
    diavoletto di  
    *Saggio filosofico sulle probabilità*  
Large Hadron Collider  
Lawrence, Ernest  
lepre e tartaruga, favola  
libero arbitrio  
Limousin  
logica  
    e greci antichi  
    e paradossi percepiti  
Lorenz, Edward  
Los Alamos, laboratorio nazionale di  
Lovell, James  
luce  
    e interferometri  
    moto della  
    particelle più veloci della  
    stellare  
    velocità della  
    viaggi a velocità vicina alla  
lunghezza, e velocità relativa  
  
Manhattan, progetto  
Marte, segnali radio da

massa, conservazione della, e viaggi nel tempo

materia oscura

Maxwell, James Clerk

diavoletto di

meccanica ondulatoria

meccanica quantistica

decoerenza

e casualità

e paradosso di Zenone

indeterminismo

interpretazione a molti mondi

postulati della

principio di indeterminazione

problema della misura

sovrapposizione

Melisso di Elea

Michelson, Albert

microscopio elettronico

Miller e Stanley, esperimento

Misra, Baidyanaith

missione lunare Apollo

misura, problema della

misurazione delle distanze

Mono, lago

Monty Hall, paradosso di

Morley, Edward

moto

della luce

greco antichi e

relativo

moto perpetuo

multiverso

e causalità

e i cunicoli spaziotemporali

e i viaggi nel tempo  
e il paradosso del nonno  
quantistico

muoni

NASA

e il batterio GFAJ-1  
missione Apollo 22  
missione Kepler

neutrini

e neutroni  
e velocità della luce

New York Times

Newton, Isaac

leggi di  
*Principia Mathematica*

Nobel, premio

nonno, paradosso del  
e il multiverso

Nubi di Magellano

Olbers, Heinrich Wilhelm

paradosso di

Omero, *Iliade*

onde

d'acqua, sovrapposizione  
interferenza

moto delle

sovrapposizione quantistica delle

ondulatoria, meccanica

opera, esperimento

ordine, e teoria del caos

orologi ad alta precisione

osservatori

coscienza e solipsismo

e entità quantistiche

e fotoni

e gatto di Schrödinger

e informazione

e moto relativo

e problema della misura

e spazio-tempo

e tempo relativo

e viaggi nel tempo

Ozma, progetto

paesaggio temporale

Parade (rivista)

paradosso

dei gemelli

dei viaggi nel tempo

del compleanno

del diavoletto di Laplace

del diavoletto di Maxwell

del nonno

dell'asta nel fienile

della dicotomia

della freccia

dello stadio

di Achille

di Fermi

di Monty Hall

di Olbers

di Zenone

falsidico

percepito

veridico

Parmenide di Elea

particelle subatomiche

e interferometro

formazione delle  
superluminali  
Pauli, Wolfgang  
pianeti extrasolari  
Platone  
Poe, Edgar Allan  
Poincaré, Henri  
prevedibilità  
e determinismo  
variabili e  
principio antropico  
debole  
forte  
probabilità  
condizionale  
e meccanica quantistica  
e tempo di dimezzamento  
procarioti  
processi fisici, reversibilità  
Procione  
Proxima Centauri  
Punch (rivista)  
radiazione cosmica di fondo  
relatività, teoria della  
e i viaggi nel tempo  
e l'esperimento opera  
e lunghezze  
e secondo principio della termodinamica  
principio di equivalenza  
generale  
ristretta  
reversibilità dei processi fisici  
Rigel  
ripetibilità

*Ritorno al futuro*

ruota

a ballotte

magnetica

Ruska, Ernst

Rutherford, Ernest

Sagan, Carl

satelliti gps e dilatazione del tempo

Savant, Marilyn vos

Schrödinger, Erwin

e i postulati quantistici

gatto di

*La situazione attuale della meccanica quantistica*

meccanica ondulatoria

Scientific American (rivista)

scuola eleatica

segnali radio e ricerca degli alieni

Selvin, Steve

serie

geometriche

infinite convergenti

SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence)

Sirio

sistema solare, instabilità

Socrate

sovrapposizione quantistica

spazio-tempo

stadio, paradosso dello

Stanley, Miller e esperimento

stelle, luce delle

Sudarshan, George

supernova del 1572

Szilárd, Leo

macchine di

tachioni

Tarter, Jill

tempo

di dimezzamento

dilatazione del

macchine del

misurazione del

newtoniano

principio di equivalenza

relativo

scorrere del

viaggi nel

viaggiatori nel

*Terminator*

termodinamica

primo principio

principio zero

secondo principio

terzo principio

Tesla, Nikola

Tolomeo

transazionale, teoria

transito, metodo del

Turnbull, Margaret

universi paralleli, *vedi* multiverso

universo

di Einstein

macchina

modelli di

newtoniano

universo-blocco

sovrapposto

viaggi nel tempo nell'

visibile



Urey, Harold

valvola

variabili e prevedibilità

velocità

concetto di

e lunghezze relative

veridici, paradossi

Via Lattea

viaggi galattici

viaggi nel tempo

e multiverso

e primo principio della termodinamica

nel futuro

nel passato

nell'universo-blocco

paradossi

più veloci della luce

viaggiatori nel tempo

vita

extraterrestre

sulla Terra

Whitaker, Craig F.

Wolfe-Simon, Felisa

Zenone di Elea

anti-effetto di

e la meccanica quantistica

paradossi di

# Indice

## [Prefazione](#)

## [La fisica del diavolo](#)

### [1. Il paradosso del gioco a quiz](#)

[L'enigma del dollaro mancante](#)

[Il paradosso della scatola di Bertrand](#)

[Il paradosso del compleanno](#)

[Il paradosso di Monty Hall](#)

[Contare le probabilità](#)

[Senza matematica: dimostrazione di buon senso](#)

[Il ruolo della conoscenza a priori](#)

[Provare per credere](#)

### [2. Achille e la tartaruga](#)

[Achille e la tartaruga](#)

[La dicotomia](#)

[Lo stadio](#)

[La freccia](#)

[Il paradosso di Zenone e la meccanica quantistica](#)

### [3. Il paradosso di Olbers](#)

[Un'infinità di stelle](#)

[L'universo in espansione](#)

[Prove del Big Bang](#)

[La soluzione definitiva](#)

[Risoluzione finale e dimostrazione del Big Bang](#)

### [4. Il diavoletto di Maxwell](#)

[Molle, zucchero e ghiaccio](#)

[La valvola](#)

[Ma il diavoletto è più intelligente di così...](#)

[Ma che cosa vuol dire «casuale»?](#)

[Macchine per il moto perpetuo](#)

[Il diavoletto di Maxwell e la meccanica quantistica](#)

### [5. Il paradosso dell'asta nel fienile](#)

[Una lezione sulla natura della luce](#)

[Distanze che si accorciano](#)

[Viaggi galattici](#)

[Ancora l'asta nel fienile](#)

### [6. Il paradosso dei gemelli](#)

[Che cos'è il tempo?](#)

[Il tempo rallenta](#)

[La soluzione del paradosso dei gemelli](#)

[Il pensiero più felice della sua vita](#)

[Osserviamo gli orologi](#)

[Il viaggio nel tempo dei poveri](#)

## [7. Il paradosso del nonno](#)

[Come raggiungere il passato](#)

[Più veloce della luce](#)

[L'universo-blocco](#)

[Viaggiare nel tempo nell'universo-blocco](#)

[Una possibile soluzione ai paradossi dei viaggi nel tempo](#)

[Il vero viaggio nel tempo richiede un multiverso](#)

[Universi collegati](#)

[Dove sono tutti i viaggiatori nel tempo?](#)

## [8. Il paradosso del diavoletto di Laplace](#)

[Determinismo](#)

[L'effetto farfalla](#)

[Caos](#)

[Libero arbitrio](#)

[Il mondo quantistico: la casualità, finalmente!](#)

[Riassunto finale](#)

## [9. Il paradosso del gatto di Schrödinger](#)

[Erwin Schrödinger](#)

[Sovrapposizioni quantistiche](#)

[Il problema della misura](#)

[Tentativi disperati](#)

[Dispersioni quantistiche](#)

## [10. Il paradosso di Fermi](#)

[Drake e le sue equazioni](#)

[SETI](#)

[Gli esopianeti](#)

[Quanto siamo speciali?](#)

[Il principio antropico](#)

## [11. Domande in sospeso](#)

[Più veloce della luce?](#)

[\*Indice analitico\*](#)