

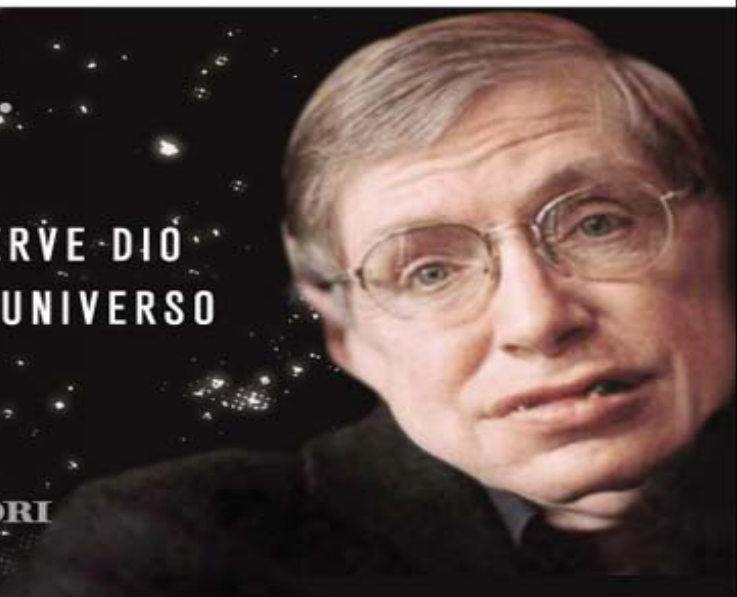
STEPHEN HAWKING

E LEONARD MLODINOW

IL GRANDE DISEGNO

PERCHÉ NON SERVE DIO
PER SPIEGARE L'UNIVERSO

MONDADORI



Il libro

Quando e come ha avuto inizio l'universo? Perché c'è qualcosa invece di nulla? Perché le leggi di natura sono calibrate con tanta precisione da permettere l'esistenza di esseri come noi? Perché siamo qui? E soprattutto, il «Grande disegno» del nostro universo è opera di un benevolente creatore o la scienza può offrire un'altra spiegazione? Formulare una completa teoria dell'universo – scriveva Steven Hawking nel suo *Dal big bang ai buchi neri* – sarebbe il più grande trionfo della ragione umana, perché a quel punto conosceremmo la mente di Dio.

Nel *Grande disegno* il celebre astrofisico si cimenta con la sfida scientifica per eccellenza, affrontando la questione che da sempre divide filosofi, scienziati e teologi: l'origine del cosmo e della vita stessa. Insieme al fisico Leonard Mlodinow, Hawking ripercorre le più recenti scoperte della fisica spiegando come il cosmo, in base alla teoria quantistica, non abbia una sola esistenza, e come tutte le possibili storie dell'universo esistano simultaneamente.

La vita e la stessa presenza umana, sostengono gli autori, sono il prodotto di fluttuazioni quantistiche nell'universo dei primissimi istanti. Approdiamo così alla teoria del «multiverso», la coesistenza del nostro universo accanto a una moltitudine di universi apparsi spontaneamente dal nulla, ciascuno con proprie leggi di natura.

Nel corso della storia della scienza si è scoperta una serie di teorie o modelli sempre migliori, da Platone alla teoria classica di Newton, fino alle moderne teorie quantistiche. È naturale chiedersi se si arriverà a una teoria dell'universo che non possa essere ulteriormente migliorata. Non abbiamo ancora una risposta definitiva, ma oggi disponiamo di una candidata alla teoria ultima del tutto: la «teoria M». Se confermata, sarà la teoria unitaria di cui Einstein era alla ricerca, e il trionfo della ragione umana. Quanto a un presunto creatore del Grande disegno, la scienza dimostra che l'universo può crearsi dal nulla sulla base delle leggi della fisica. Non è necessario appellarsi a Dio per accendere la miccia e mettere in moto il processo. La creazione spontanea è la ragione per cui c'è qualcosa invece di nulla, per cui esiste il cosmo, per cui esistiamo noi.

Un saggio scientifico che spiega con linguaggio accessibile e attraverso eleganti illustrazioni come l'astrofisica sia ormai vicina a comprendere i segreti più nascosti della materia. Un'opera rivoluzionaria, destinata a modificare nel profondo la nostra cultura e le nostre credenze più radicate.

L'autore

Stephen Hawking è stato per trent'anni professore Lucasiano di matematica all'Università di Cambridge e ha ricevuto numerosi riconoscimenti e onorificenze tra cui, di recente, la Medaglia presidenziale della libertà. Tra i suoi libri più noti: *Dal big bang ai buchi neri* (Rizzoli 1988), *Buchi neri e universi neonati e altri saggi* (Rizzoli 1993), *L'universo in un guscio di noce* (Mondadori 2002), *La grande storia del tempo* (con Leonard Mlodinow, Rizzoli 2005).

Leonard Mlodinow è un fisico del California Institute of Technology e autore di bestseller come *La passeggiata dell'ubriaco. Le leggi scientifiche del caso* (Rizzoli 2009), *Euclid's Window. The Story of Geometry from Parallel Lines to Hyperspace* (2001) e *Feynman's Rainbow. A Search for Beauty in Physics and in Life* (2003). Ha sceneggiato alcuni episodi di *Star Trek. The Next Generation*.

Stephen Hawking
e Leonard Mlodinow

IL GRANDE DISEGNO

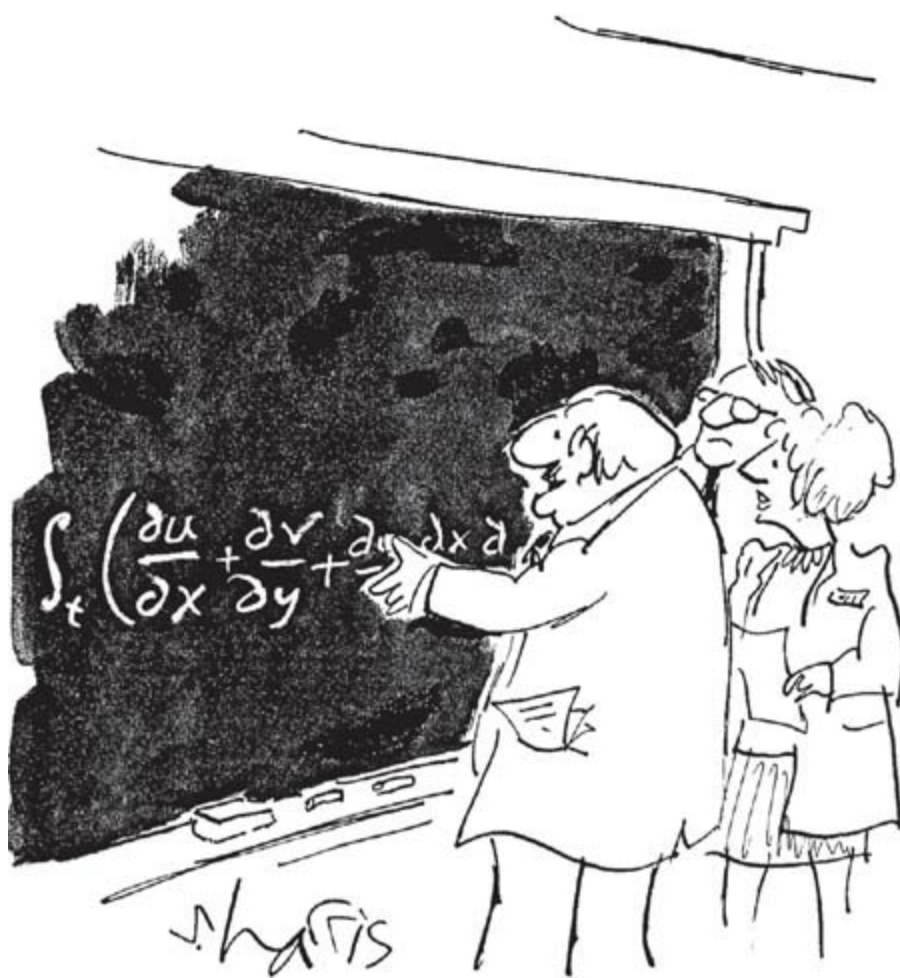
Titolo dell'opera originale: *The Grand Design*
ISBN 9788852018718

IL MISTERO DELL'ESSERE



Ciascuno di noi non esiste che per un breve intervallo di tempo, e in tale intervallo esplora soltanto una piccola parte dell'intero universo. Ma la specie umana è una specie curiosa. Ci facciamo domande, cerchiamo delle risposte. Vivendo in questo mondo sconfinato che può essere ora amichevole ora crudele, e volgendo lo sguardo ai cieli immensi che ci sovrastano, gli uomini si sono sempre posti una moltitudine di interrogativi. Come possiamo comprendere il mondo in cui ci troviamo? Come si comporta l'universo? Qual è la natura della realtà? Che origine ha tutto ciò? L'universo ha avuto bisogno di un creatore? La maggior parte di noi non dedica troppo tempo a preoccuparsi di simili questioni, ma quasi tutti di tanto in tanto ci pensiamo.

Per secoli questi interrogativi sono stati di pertinenza della filosofia, ma la filosofia è morta, non avendo tenuto il passo degli sviluppi più recenti della scienza, e in particolare della fisica. Così sono stati gli scienziati a raccogliere la fiaccola nella nostra ricerca della conoscenza. Questo libro si propone di dare le risposte che sono suggerite dalle scoperte e dai progressi teorici recenti. Tali risposte ci conducono a una nuova concezione dell'universo e del nostro posto in esso, assai diversa da quella tradizionale, e diversa anche da quella che avremmo potuto delineare soltanto un decennio o due fa. Eppure la nuova concezione aveva cominciato a prendere forma embrionale quasi un secolo addietro.



«... E questa è la mia filosofia.»

Secondo la concezione tradizionale dell'universo, i corpi si muovono su traiettorie ben determinate e hanno storie definite, cosicché è possibile specificare la loro esatta posizione in ogni istante del tempo. Sebbene tale descrizione sia abbastanza soddisfacente ai fini della vita quotidiana, negli anni '20 si scoprì che questa immagine «classica» non era in grado di rendere conto del comportamento apparentemente bizzarro osservato sulle scale delle entità atomiche e subatomiche. Era invece necessario adottare un diverso quadro concettuale, chiamato fisica quantistica. Le teorie quantistiche si sono dimostrate straordinariamente precise nel predire gli eventi su tali scale, e al contempo capaci di riprodurre le predizioni delle vecchie teorie classiche quando venivano applicate al mondo macroscopico della vita quotidiana. Eppure la fisica classica e quella quantistica sono basate su concezioni assai diverse della realtà.

Le teorie quantistiche possono essere formulate in molti modi differenti, ma la descrizione probabilmente più intuitiva fu proposta da Richard Feynman (detto Dick), una personalità brillante che lavorava al California Institute of Technology e suonava i bongos in un locale di spogliarelli dei dintorni. Secondo Feynman, un sistema non ha una sola storia, ma ogni storia possibile. Più avanti, nella nostra ricerca delle risposte, spiegheremo nei particolari l'impostazione di Feynman, e ce ne serviremo per analizzare l'idea che l'universo stesso non abbia un'unica storia, e neppure un'esistenza indipendente. Questa sembra un'idea radicale, anche a parecchi fisici. In effetti, come molti concetti della scienza attuale, pare essere in conflitto con il senso comune. Ma il senso comune è basato sull'esperienza di tutti i giorni, non sull'universo quale ci si rivela mediante meraviglie della tecnologia come quelle che ci consentono di spingere lo sguardo fin nel cuore dell'atomo o a

ritroso nell'universo primordiale.

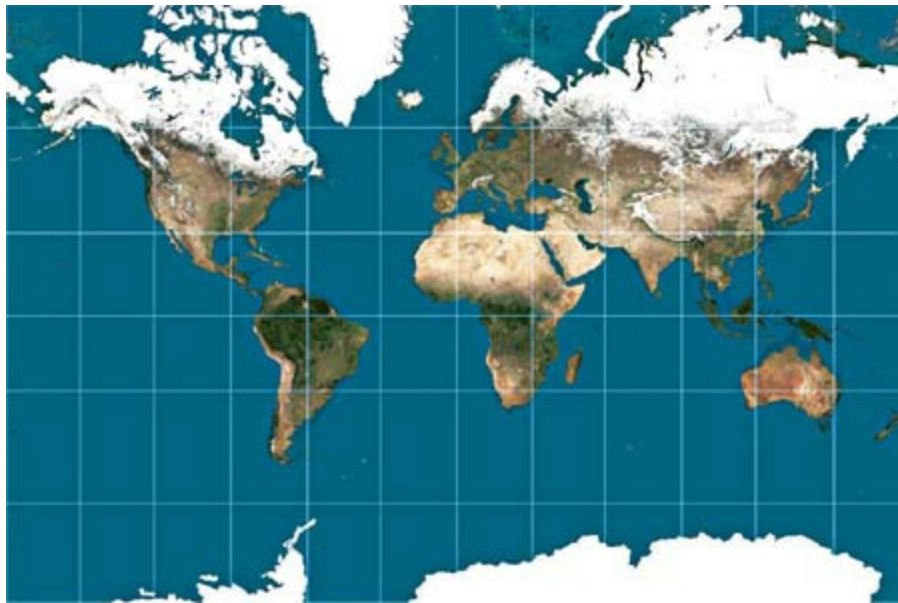
Fino all'avvento della fisica moderna era opinione comune che il mondo possa essere interamente conosciuto tramite l'osservazione diretta, che le cose siano ciò che sembrano, così come vengono percepite mediante i nostri sensi. Viceversa, lo spettacolare successo della fisica moderna, basata su concetti che, come quello di Feynman, sono in contrasto con l'esperienza quotidiana, ha dimostrato che le cose non stanno così. La concezione ingenua della realtà, pertanto, non è compatibile con la fisica moderna. Per affrontare tali paradossi adotteremo un'impostazione che chiameremo realismo dipendente dai modelli. Questa impostazione si basa sull'idea che il nostro cervello interpreti l'informazione proveniente dagli organi sensoriali costruendo un modello del mondo. Quando un simile modello riesce a spiegare gli eventi, tendiamo ad attribuire a esso e agli elementi e ai concetti che lo costituiscono la qualità della realtà o della verità assoluta. Ma possono esserci modi diversi per creare un modello della medesima situazione fisica, e ciascuno di essi potrà utilizzare elementi e concetti fondamentali differenti. Se due teorie fisiche o modelli di questo tipo predicono con esattezza gli stessi eventi, non si può affermare che uno sia più reale dell'altro; si è invece liberi di usare il modello più conveniente.

Nel corso della storia della scienza si è scoperta una serie di teorie o modelli sempre migliori, dalla concezione di Platone alla teoria classica di Newton, fino alle moderne teorie quantistiche. È naturale chiedersi: questa sequenza alla fine avrà un punto di arrivo, porterà a una teoria definitiva dell'universo che includa tutte le forze e predica ogni osservazione che è possibile fare, oppure continueremo per sempre a scoprire teorie di efficacia crescente, senza però mai approdare a una che non possa essere ulteriormente migliorata? Per questa domanda non abbiamo ancora una risposta definitiva, ma oggi disponiamo di una candidata al ruolo di teoria ultima del tutto, ammesso che ne esista effettivamente una, e questa candidata è chiamata teoria M. La teoria M è l'unico modello che abbia tutte le proprietà che si pensa debbano caratterizzare la teoria finale, ed è la teoria su cui si basa gran parte della discussione che segue.

La teoria M non è una teoria nel senso consueto. È un'intera famiglia di teorie diverse, ciascuna delle quali è una buona descrizione delle osservazioni soltanto entro una certa gamma di situazioni fisiche. È un po' come accade nel caso delle carte geografiche. Come si sa, non è possibile rappresentare l'intera superficie terrestre in un'unica carta. L'usuale proiezione di Mercatore, utilizzata per i planisferi, fa sembrare sempre più grandi le aree man mano che si va verso nord o verso sud e non copre le regioni dei poli. Per rappresentare fedelmente tutta la Terra si deve ricorrere a una serie di carte geografiche, ciascuna delle quali copre una regione limitata. Le varie carte si sovrappongono parzialmente tra loro, e dove ciò accade mostrano lo stesso paesaggio. La teoria M è in qualche modo analoga. Le varie teorie che formano questa famiglia possono sembrare molto diverse, ma possono essere considerate tutte come aspetti della medesima teoria fondamentale. Sono versioni della teoria applicabili solo in ambiti limitati: per esempio, quando certe grandezze, come l'energia, sono piccole. Come accade per le carte che si sovrappongono, così dove gli ambiti di validità delle varie versioni si sovrappongono, queste predicono i medesimi fenomeni. Ma proprio come non c'è nessuna carta piana che sia una buona rappresentazione dell'intera superficie terrestre, così non c'è nessuna teoria che da sola sia una buona rappresentazione delle osservazioni in tutte le situazioni.

Vedremo come la teoria M possa offrire soluzioni alla questione della creazione. Secondo questa teoria, il nostro non è l'unico universo. Anzi, la teoria predice che un gran numero di universi sia

stato creato dal nulla. La loro creazione non richiede l'intervento di un essere soprannaturale o di un dio, in quanto questi molteplici universi derivano in modo naturale dalla legge fisica: sono una predizione della scienza. Ciascun universo ha molte storie possibili e molti stati possibili in tempi successivi, cioè in tempi come il presente, assai lontani dalla loro creazione. Gran parte di tali stati saranno radicalmente differenti dall'universo che osserviamo e del tutto inadatti all'esistenza di qualunque forma di vita. Soltanto pochissimi di essi consentirebbero l'esistenza di creature come noi. Pertanto la nostra presenza seleziona da questo immenso assortimento soltanto quegli universi che sono compatibili con la nostra esistenza. Sebbene siamo minuscoli e insignificanti sulla scala del cosmo, ciò fa di noi in un certo senso i signori della creazione.



Planisfero. Per rappresentare l'universo può essere necessaria una serie di teorie che si sovrappongono parzialmente, proprio come per rappresentare la Terra occorrono delle carte geografiche che si sovrappongono parzialmente.

Per comprendere l'universo al livello più profondo, dobbiamo sapere non soltanto *come* esso si comporta, ma anche *perché*.

Perché c'è qualcosa invece di nulla?

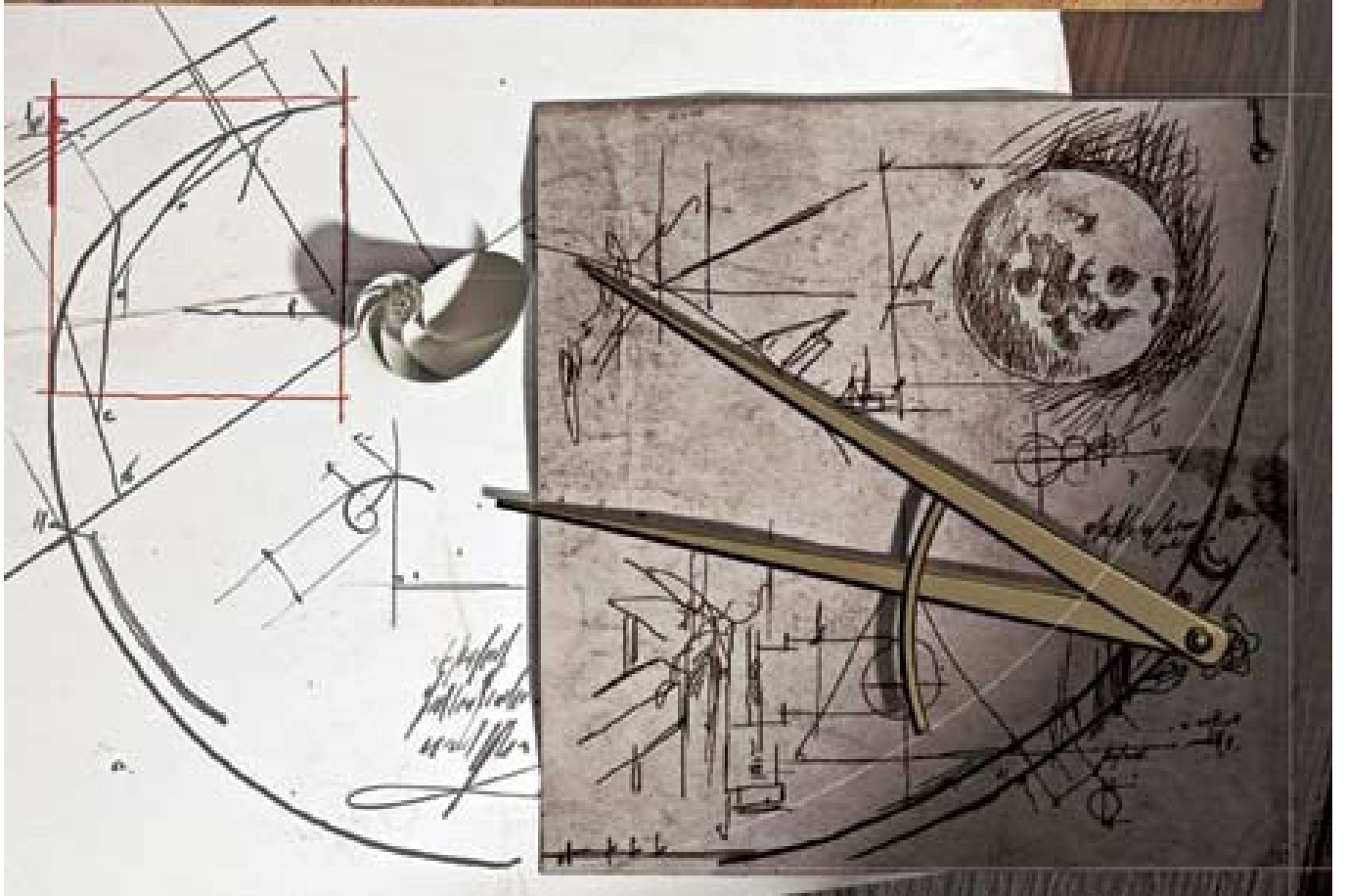
Perché esistiamo?

Perché questo particolare insieme di leggi e non qualche altro?

Questo è l'interrogativo fondamentale sulla vita, l'universo e il tutto. Nelle pagine che seguono tenteremo di dargli risposta. A differenza della risposta data in *Guida galattica per gli autostoppisti*, la nostra non sarà semplicemente un «42».

II

IL DOMINIO DELLA LEGGE

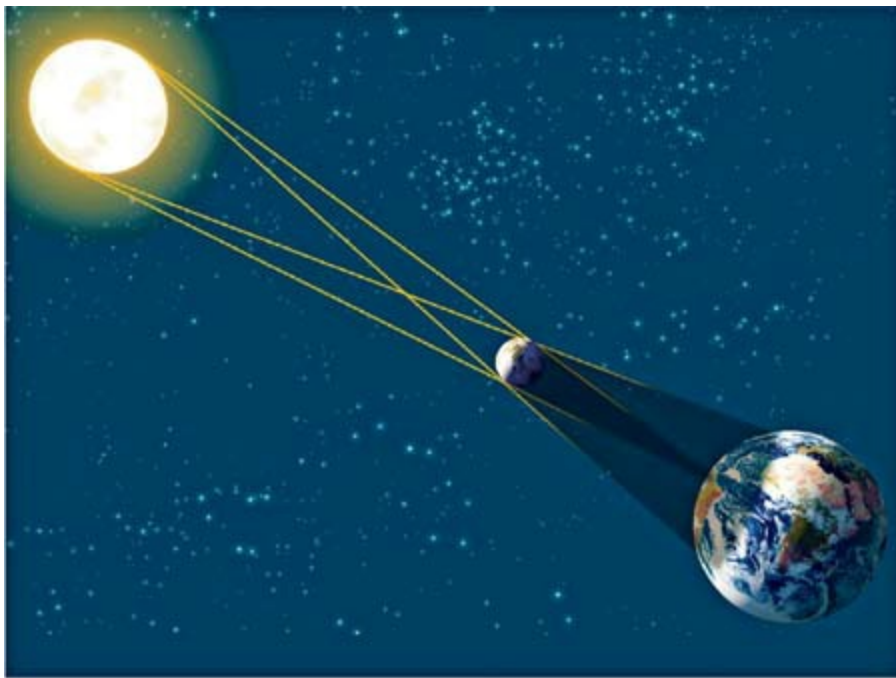


Skoll si chiama il lupo che insegue la divinità splendente fino al riparo della foresta;

ma l'altro, Hati, che è figlio di Hróðvitnir, deve correre dinanzi al chiaro sole.

GRÍMNISMÁL, *Edda poetica*

Nella mitologia vichinga Skoll e Hati inseguono il Sole e la Luna. Quando i due lupi raggiungono l'uno o l'altra, avviene un'eclissi. Allorché ciò accade, gli uomini sulla Terra si precipitano in soccorso dei due astri facendo quanto più rumore possibile nella speranza di spaventare i lupi. In altre culture vi sono miti simili. Ma a un certo punto gli uomini devono essersi accorti che il Sole e la Luna presto riemergevano dall'eclissi indipendentemente dal fatto che essi si mettessero a scorrazzare strillando e battendo sugli oggetti. Dopo qualche tempo devono essersi resi conto anche del fatto che le eclissi non si verificavano del tutto casualmente, ma secondo schemi regolari che si ripetevano. Questi schemi erano particolarmente evidenti per le eclissi di Luna e consentirono agli antichi babilonesi di predire le eclissi lunari con una certa precisione, sia pure senza comprendere che erano causate dalla Terra che intercettava la luce del Sole. Le eclissi di Sole erano più difficili da prevedere perché visibili soltanto da una striscia della superficie terrestre larga circa 50 chilometri. Eppure, una volta colti, gli schemi ricorrenti rendevano chiaro che le eclissi non dipendevano dai capricci arbitrari di esseri soprannaturali, ma erano invece governate da leggi.



Eclissi. Gli antichi non sapevano quale fosse la causa delle eclissi, ma individuarono delle regolarità nel loro ricorrere.

Nonostante qualche iniziale successo nella predizione del moto dei corpi celesti, la maggior parte degli eventi naturali appariva ai nostri antenati impossibile da predire. Eruzioni vulcaniche, terremoti, tempeste, pestilenze e unghie incarnite sembravano tutti capitare senza una causa o una regolarità evidenti. Nell'antichità era istintivo attribuire le azioni violente della natura a un Olimpo di divinità dispettose o malevole. Le calamità venivano spesso considerate un segno del fatto che in qualche modo gli dei erano stati offesi. Per esempio, nel 5600 a.C. circa, il vulcano Mount Mazama in Oregon entrò in eruzione, espellendo roccia e cenere ardente per anni e provocando molti anni di pioggia che finirono per colmare il cratere vulcanico oggi chiamato Crater Lake. Gli indiani klamath dell'Oregon si tramandano una leggenda che si accorda perfettamente in ogni particolare con la testimonianza geologica dell'evento, ma gli conferisce una connotazione drammatica attribuendo la causa della catastrofe a un essere umano. La nostra propensione ai sensi di colpa è tale che troviamo sempre il modo di accusare noi stessi. Secondo la leggenda, Llao, il signore del mondo di sotto, si innamora della bellissima figlia umana di un capo klamath. Ma questa lo respinge e, per vendetta, Llao tenta di distruggere i klamath con il fuoco. Fortunatamente, stando alla leggenda, Skell, il signore del mondo di sopra, ha pietà degli uomini e dà battaglia alla divinità degli inferi. Alla fine Llao, ferito, ricade nel Mount Mazama, producendo un immenso buco, il cratere poi riempitosi d'acqua.

Nei tempi antichi, l'ignoranza dei comportamenti della natura induceva i popoli a inventare dei che presiedessero a ogni aspetto della vita umana. C'erano divinità dell'amore e della guerra; del Sole, della Terra e del Cielo; degli oceani e dei fiumi; della pioggia e dei temporali, e perfino dei terremoti e dei vulcani. Quando gli dei erano contenti, l'umanità veniva premiata con il bel tempo, la pace e l'assenza di disastri naturali e malattie. Quando erano insoddisfatti, arrivavano siccità, guerra, pestilenza ed epidemie. Poiché la relazione di causa ed effetto in natura era invisibile agli occhi dei nostri antenati, queste divinità apparivano imperscrutabili e gli uomini sembravano alla loro mercé. Ma con Talete di Mileto (c. 624 - c. 546 a.C.), all'incirca 2600 anni fa, le cose cominciarono a cambiare. Sorse l'idea che la natura si attenesse a principi coerenti che potevano essere decifrati. E

così ebbe inizio il lungo processo nel corso del quale all'idea del regno degli dei si sostituì la concezione di un universo governato da leggi di natura, e creato secondo un progetto che un giorno potremmo essere in grado di comprendere.

Considerata sulla scala temporale della storia umana, l'indagine scientifica è un'impresa molto recente. La nostra specie, *Homo sapiens*, ebbe origine nell'Africa subsahariana intorno al 200.000 a.C. La lingua scritta risale soltanto al 7000 a.C. circa, come prodotto di società basate sulla coltivazione dei cereali. (Alcune delle più antiche iscrizioni riguardano la razione giornaliera di birra accordata a ogni cittadino.) Le prime testimonianze scritte della grande civiltà dell'antica Grecia datano al IX secolo prima di Cristo, ma il culmine di quella civiltà, il «periodo classico», venne diversi secoli più tardi, iniziando poco prima del 500 a.C. Secondo Aristotele (384-322 a.C.), fu all'incirca in quel periodo che Talete elaborò per primo l'idea che il mondo potesse essere compreso, che i complessi accadimenti che vediamo intorno a noi potessero essere ricondotti a principi più semplici e spiegati senza ricorrere a giustificazioni mitiche o teologiche.

A Talete viene attribuita la prima predizione di un'eclissi solare nel 585 a.C., sebbene la grande precisione di tale predizione fosse probabilmente frutto di una fortunata congettura. Fu un personaggio oscuro, che non lasciò alcuno scritto di suo pugno. La sua città era uno dei centri intellettuali di una regione chiamata Ionia, che era stata colonizzata dai greci ed esercitò un'influenza che arrivò a estendersi dall'attuale Turchia fino all'Italia. La scienza ionica fu un'impresa caratterizzata da un forte interesse per la scoperta di leggi fondamentali che spiegassero i fenomeni naturali, e rappresentò una straordinaria pietra miliare nella storia del pensiero umano. L'impostazione di questi pensatori era razionale e in molti casi condusse a conclusioni sorprendentemente simili a ciò che i nostri metodi più perfezionati ci hanno portato a credere oggi. Si trattò di un eccellente inizio. Ma nel corso dei secoli gran parte della scienza ionica sarebbe stata dimenticata, soltanto per essere poi riscoperta o reinventata, più di una volta in alcuni casi.

Stando alla leggenda, la prima formulazione matematica di ciò che oggi potremmo chiamare una legge di natura risale a un pensatore ionico di nome Pitagora (c. 580 - c. 490 a.C.), famoso per il teorema che da lui prende nome, secondo il quale il quadrato dell'ipotenusa (il lato più lungo) di un triangolo rettangolo è pari alla somma dei quadrati degli altri due lati. Si dice che Pitagora abbia scoperto la relazione numerica tra la lunghezza delle corde usate negli strumenti musicali e le combinazioni armoniche dei suoni. Nel linguaggio attuale, descriveremmo tale relazione dicendo che la frequenza – il numero di oscillazioni al secondo – di una corda vibrante sottoposta a una tensione costante è inversamente proporzionale alla lunghezza della corda. Dal punto di vista pratico, ciò spiega perché corde di chitarra più corte producono note di tonalità più alta rispetto a corde più lunghe. Probabilmente Pitagora non scoprì davvero questo – e non scoprì neppure il teorema che porta il suo nome – ma ci sono prove che una qualche relazione tra lunghezza delle corde e tonalità fosse nota ai suoi tempi. In tal caso, si potrebbe definire quella semplice formula il primo esempio di ciò che oggi conosciamo come fisica teorica.



La Ionia. Gli studiosi dell'antica Ionia furono tra i primi a spiegare i fenomeni naturali mediante leggi di natura invece che ricorrendo ai miti o alla teologia.

A parte quella pitagorica delle corde, le uniche leggi fisiche note in forma corretta agli antichi erano tre leggi formulate con precisione da Archimede (c. 287 - c. 212 a.C.), di gran lunga il più eminente fisico dell'antichità. Nella terminologia odierna, la legge della leva stabilisce che piccole forze possono sollevare grandi pesi perché la leva amplifica una forza in proporzione al rapporto tra le distanze dal fulcro della leva. La legge del galleggiamento afferma che qualunque corpo immerso in un fluido è soggetto a una forza diretta verso l'alto pari al peso del liquido spostato. E la legge della riflessione sancisce che l'angolo formato da un raggio di luce con uno specchio è uguale all'angolo compreso tra lo specchio e il raggio riflesso. Ma Archimede non chiamò leggi questi enunciati, e non li giustificò in riferimento all'osservazione e alla misura. Li trattò invece come se fossero teoremi puramente matematici, nell'ambito di un sistema assiomatico simile a quello creato da Euclide per la geometria.

Con il diffondersi dell'influenza ionica si moltiplicarono coloro che pensavano che l'universo possedeva un ordine interno suscettibile di essere compreso tramite l'osservazione e la ragione. Anassimandro (c. 610 - c. 546 a.C.), amico e forse allievo di Talete, affermò che, essendo i neonati umani del tutto indifesi al momento della nascita, se il primo uomo fosse in qualche modo comparso sulla Terra come neonato, non sarebbe sopravvissuto. Gli uomini, ragionò Anassimandro in quello che fu forse il primo accenno dell'umanità all'evoluzione, devono perciò essersi evoluti da altri animali i cui piccoli sono più resistenti. In Sicilia, Empedocle (c. 490 - c. 430 a.C.) osservò l'uso di uno strumento chiamato clessidra. Utilizzato talvolta come una specie di mestolo, questo consisteva in una sfera con un collo aperto e dei piccoli fori nella parte inferiore. Quando era immersa nell'acqua la clessidra si riempiva, e se il collo aperto veniva poi otturato, poteva essere sollevata fuori dal liquido senza che l'acqua in essa contenuta cadesse attraverso i fori. Empedocle osservò che se si ottura il collo prima di immergere la clessidra, questa non si riempie. Ne concluse che

qualcosa di invisibile doveva impedire all'acqua di entrare nella sfera attraverso i fori: aveva scoperto la sostanza materiale che chiamiamo aria.

Più o meno nello stesso periodo Democrito (c. 460 - c. 370 a.C.), originario di una colonia ionica nella Grecia settentrionale, rifletté su ciò che accadeva quando si spezzava o si tagliava un corpo in minuti frammenti. Democrito sostenne che non dovrebbe essere possibile ripetere indefinitamente il procedimento, e postulò invece che ogni cosa, compresi tutti gli esseri viventi, fosse fatta di particelle fondamentali che non potevano essere ulteriormente spezzate o suddivise in parti. Chiamò queste particelle ultime «atomi», dall'aggettivo greco che significa «impossibili da tagliare». Democrito credeva che ogni fenomeno materiale fosse un prodotto della collisione degli atomi. Nella sua concezione, detta appunto atomismo, tutti gli atomi si spostano senza sosta nello spazio, e, a meno che subiscano un'azione esterna, si muovono in avanti indefinitamente. Oggi quest'idea prende il nome di principio d'inerzia.

L'idea rivoluzionaria che siamo semplicemente abitanti ordinari dell'universo, e non esseri speciali contraddistinti dal fatto di vivere al suo centro, fu proposta per la prima volta da Aristarco (c. 310 - c. 230 a.C.), uno degli ultimi scienziati ionici. Dei suoi calcoli ne è giunto a noi uno solo: una complessa analisi geometrica di accurate osservazioni da lui compiute sulle dimensioni dell'ombra proiettata dalla Terra sulla Luna durante un'eclissi lunare. Dai suoi dati Aristarco trasse la conclusione che il Sole debba essere molto più grande della Terra. Forse ispirato dall'idea che oggetti minuscoli dovessero orbitare intorno a corpi enormi e non viceversa, fu il primo ad affermare che la Terra non è il centro del nostro sistema planetario, e che invece essa e gli altri pianeti orbitano intorno al Sole molto più grande. Non c'è che un piccolo passo tra la comprensione del fatto che la Terra è soltanto un pianeta fra gli altri e l'idea che anche il nostro Sole non abbia nulla di speciale. Aristarco sospettava che così stessero le cose e credeva che le stelle che vediamo nel cielo notturno non siano altro che soli lontani.

Quella ionica fu soltanto una delle numerose scuole della filosofia greca antica, scuole dotate di tradizioni differenti e spesso contrastanti tra loro. Purtroppo, la concezione della natura degli ionici – secondo cui essa può essere spiegata mediante leggi generali e ridotta a un insieme semplice di principi – esercitò un'influenza rilevante soltanto per qualche secolo. Questo perché, tra l'altro, nelle teorie ioniche sembrava non trovassero posto né il concetto di libero arbitrio o di intenzionalità, né l'idea che gli dei intervengano nelle attività del mondo. Omissioni sorprendenti, profondamente inquietanti per molti pensatori greci, non meno di quanto lo siano per molti oggi. Il filosofo Epicuro (341-270 a.C.), per esempio, si oppose all'atomismo affermando che è «meglio seguire i miti relativi agli dei che diventare “schiavi” del destino dei filosofi naturali». Anche Aristotele respinse il concetto di atomo perché non poteva accettare che gli esseri umani fossero composti di oggetti senza vita e privi di anima. L'idea ionica che l'universo non abbia l'uomo al proprio centro costituì una pietra miliare nella comprensione del cosmo, ma era destinata a essere abbandonata e non più ripresa, né tanto meno comunemente accettata, fino ai tempi di Galileo, quasi venti secoli più tardi.

Per quanto acute fossero alcune delle congetture degli antichi greci sulla natura, la maggior parte delle loro idee in epoca moderna non sarebbero accettate come scienza valida. In primo luogo, poiché i greci non avevano messo a punto il metodo scientifico, le loro teorie non venivano elaborate in vista di una verifica sperimentale. Così, se uno studioso affermava, per esempio, che un atomo si muove in linea retta finché non urta un secondo atomo, e un altro studioso sosteneva che l'atomo si muove in linea retta finché non rimbalza su un ciclope, non c'era un modo oggettivo per dirimere la

disputa. Inoltre non c'era una chiara distinzione tra leggi umane e leggi fisiche. Nel VI secolo prima della nostra era, per esempio, Anassimandro scrisse che tutte le cose derivano da una sostanza primaria, e vi fanno ritorno, perché altrimenti «sono soggette ad ammenda e a sanzione per la loro iniquità». E secondo il filosofo ionico Eraclito (c. 535 - c. 475 a.C.), il Sole si comporta come fa perché altrimenti la dea della giustizia gli darebbe la caccia. Qualche centinaio d'anni dopo gli stoici, una scuola filosofica greca sorta intorno al III secolo a.C., stabilirono una distinzione tra leggi umane e leggi naturali, ma in quest'ultima categoria includevano norme di comportamento umano che consideravano universali, come la venerazione di Dio e l'obbedienza ai genitori. Per converso, spesso descrivevano i processi fisici in termini giuridici, nella convinzione che dovessero in qualche modo essere legalmente imposti, sebbene gli oggetti da cui ci si aspettava «obbedienza» alle leggi fossero inanimati. Se pensate che sia difficile indurre gli esseri umani ad attenersi alle norme del codice stradale, provate a immaginare di convincere un asteroide a muoversi lungo un'ellisse.

Questa tradizione continuò per molti secoli a influenzare i pensatori delle epoche successive. Nel XIII secolo il filosofo cristiano Tommaso d'Aquino (c. 1225-1274) adottò questa concezione e se ne servì per argomentare in favore dell'esistenza di Dio, scrivendo: «È chiaro che [i corpi inanimati] raggiungono il loro fine non per caso ma intenzionalmente ... C'è pertanto un essere personale intelligente in virtù del quale ogni cosa in natura è ordinata al proprio fine». Ancora nel XVI secolo, il grande astronomo tedesco Johannes Kepler (Keplero, 1571-1630) credeva che i pianeti fossero dotati di percezione sensoriale e seguissero consapevolmente leggi del moto che erano comprese dalla loro «mente».

L'idea di un'obbedienza intenzionale alle leggi di natura riflette il punto di vista degli antichi che mettevano al centro la *causa* per cui la natura si comporta come fa, piuttosto che il *modo* in cui si comporta. Aristotele fu uno dei massimi fautori di tale concezione, e per questo respingeva l'idea che la scienza fosse basata principalmente sull'osservazione. Misurazioni precise e calcoli matematici erano in ogni caso difficili nell'antichità. La notazione numerica in base dieci che ci appare così comoda per le operazioni dell'aritmetica risale soltanto al 700 d.C. circa, allorché gli indù compirono i primi grandi passi necessari per farne un potente strumento. I segni abbreviati «più» e «meno» non comparvero che nel XV secolo. E né il segno di uguale, né gli orologi in grado di misurare i tempi con la precisione del secondo esistevano prima del XVI secolo.

Aristotele però non considerava i problemi di misurazione e di calcolo come ostacoli allo sviluppo di una fisica che fosse in grado di produrre predizioni quantitative. Più che altro non vedeva alcuna necessità di farne. Viceversa fondò la sua fisica su principi che lo soddisfacevano intellettualmente. Ignorò i fatti che gli sembravano sgradevoli e concentrò la sua attenzione sulle ragioni per cui le cose accadono, investendo energie relativamente scarse nell'analisi precisa di ciò che accadeva. Quando il vistoso contrasto tra le sue conclusioni e l'osservazione non poteva essere ignorato, Aristotele modificava le sue conclusioni. Ma tali aggiustamenti erano spesso spiegazioni di comodo che servivano solo a nascondere alla meno peggio la contraddizione. In tal modo, per quanto nettamente la sua teoria si discostasse dalla realtà, era sempre in grado di modificarla quanto bastava perché il conflitto sembrasse eliminato. Per esempio, la sua teoria del moto prevedeva che i gravi cadessero con una velocità costante proporzionale al loro peso. Per spiegare il fatto che chiaramente i corpi acquistano velocità mentre cadono inventò un nuovo principio, secondo il quale i corpi si muovono con maggiore entusiasmo, e quindi accelerano, quando si avvicinano al loro luogo naturale di riposo: un principio che ai nostri occhi sembra descrivere più adeguatamente certe persone che

degli oggetti inanimati. Benché le teorie di Aristotele avessero spesso scarsa capacità predittiva, la sua concezione della scienza dominò il pensiero occidentale per quasi duemila anni.

Gli eredi cristiani del pensiero greco respinsero l'idea che l'universo sia governato dalla legge naturale indifferente alle vicende umane. Respinsero anche l'idea che gli uomini non occupino una posizione privilegiata all'interno di quell'universo. E sebbene nel periodo medievale non vi fosse un unico sistema filosofico coerente, un tema comune era che l'universo fosse una sorta di casa delle bambole di Dio e la religione di gran lunga più meritevole di studio dei fenomeni della natura. Così nel 1277 il vescovo di Parigi Etienne Tempier, agendo su istruzioni di papa Giovanni XXI, pubblicò un elenco di 219 errori o eresie che erano da condannare. Tra le eresie c'era l'idea che la natura segua delle leggi, perché ciò è in conflitto con l'onnipotenza di Dio. Non è privo di interesse il fatto che papa Giovanni fosse ucciso dagli effetti della legge di gravità quando, qualche mese dopo, il tetto del suo palazzo gli cadde in testa.

Il moderno concetto di legge di natura prese forma nel XVII secolo. Sembra che Keplero sia stato il primo scienziato a intendere il termine nel senso della scienza moderna, sebbene, come si è detto, mantenesse una concezione animistica degli oggetti fisici. Galileo Galilei (1564-1642) non fece uso del termine «legge» nelle sue opere più spiccatamente scientifiche (sebbene il termine appaia in alcune traduzioni di tali opere). Ma che si sia servito o no della parola, Galileo di fatto scoprì numerosissime leggi, e sostenne i fondamentali principi che l'osservazione è la base della scienza e che lo scopo della scienza è di ricercare le relazioni quantitative che sussistono tra i fenomeni fisici. Tuttavia, a formulare per primo in modo esplicito e rigoroso la nozione di legge di natura quale la intendiamo noi fu René Descartes, o Cartesio (1596-1650).



«Se c'è una cosa che ho imparato durante il mio lungo regno è che il calore sale.»

Cartesio credeva che tutti i fenomeni fisici dovessero essere spiegati mediante le collisioni di masse in movimento, che erano governate da tre leggi, precorritrici delle tre famose leggi del moto di Newton. Affermava che quelle leggi di natura erano valide in tutti i luoghi e in ogni tempo, e dichiarava esplicitamente che l'obbedienza a tali leggi non implicava che questi corpi in moto fossero dotati di una mente. Cartesio comprendeva anche l'importanza di quelle che oggi chiamiamo «condizioni iniziali», che costituiscono una descrizione dello stato di un sistema all'inizio di un qualsiasi intervallo di tempo sul quale si cerca di fare delle predizioni. Con un dato insieme di condizioni iniziali, le leggi di natura determinano come un sistema evolve nel tempo; ma in mancanza di uno specifico insieme di condizioni iniziali, l'evoluzione non può essere definita. Se, per esempio, all'istante zero un piccione esattamente sulla verticale della nostra posizione lascia cadere «qualcosa», la traiettoria del corpo in caduta è determinata dalle leggi di Newton. Ma il risultato sarà assai differente a seconda che, all'istante iniziale, il piccione sia fermo su un filo del telefono oppure stia passando in volo a una velocità di 30 chilometri all'ora. Per poter applicare le leggi della fisica si deve conoscere lo stato iniziale di un sistema, o almeno il suo stato in un istante ben definito. (Si possono usare le leggi anche per ripercorrere l'evoluzione di un sistema a ritroso nel tempo.)

Con questa rinnovata fiducia nell'esistenza di leggi di natura ci furono nuovi tentativi di

riconciliare tali leggi con il concetto di Dio. Secondo Cartesio, Dio potrebbe alterare a suo piacimento la verità o falsità di proposizioni di carattere etico o di teoremi matematici, ma non la natura. Il filosofo francese era convinto che Dio avesse stabilito le leggi di natura ma non avesse avuto alcuna alternativa in merito; le aveva scelte perché le leggi di cui facciamo esperienza sono le uniche possibili. Ciò sembrerebbe porre un limite all'autorità di Dio, ma Cartesio aggirava questa difficoltà sostenendo che le leggi sono immutabili perché sono un riflesso della natura intrinseca di Dio stesso. Ammesso questo, si poteva pensare che Dio nella creazione avesse pur sempre la possibilità di scegliere tra una varietà di mondi differenti, ciascuno corrispondente a un diverso insieme di condizioni iniziali, ma Cartesio negava anche questa alternativa. Qualunque fosse la disposizione della materia all'origine dell'universo, sosteneva, nel corso del tempo si sarebbe evoluto un mondo identico a quello che conosciamo. Inoltre, secondo Cartesio, Dio, dopo aver messo in moto il mondo, lo aveva lasciato del tutto a se stesso.

Una posizione (in parte) analoga fu adottata da Isaac Newton (1643-1727). Al successo delle sue tre leggi del moto e della sua legge di gravitazione, che insieme rendevano conto delle orbite della Terra, della Luna e dei pianeti e spiegavano fenomeni quali le maree, si deve la generale accettazione del moderno concetto di legge scientifica. Il ristretto numero di equazioni da lui formulate e la complessa struttura matematica che in seguito ne abbiamo derivato vengono ancora insegnate oggi, e sono impiegate ogniqualvolta un architetto progetta un edificio, un ingegnere progetta un'automobile o un fisico calcola come lanciare un razzo destinato ad atterrare su Marte. Come proclamò il poeta Alexander Pope,

*La natura e le leggi della natura giacevano nascoste nella notte;
Dio disse: «Sia Newton!», e tutto fu luce.*

Oggi la maggior parte degli scienziati converrebbe che una legge di natura è un'enunciazione normativa che si basa su una regolarità osservata e fornisce predizioni che vanno al di là delle situazioni immediate da cui essa deriva. Per esempio, potremmo osservare che il Sole è sorto a oriente ogni mattina della nostra vita, e postulare la legge «il Sole sorge sempre a est». Questa è una generalizzazione che va oltre le nostre limitate osservazioni del sorgere del Sole e compie predizioni verificabili sul futuro. D'altra parte, un enunciato come «i computer in questo ufficio sono neri» non è una legge di natura perché si riferisce soltanto ai computer presenti nell'ufficio e non fa alcuna predizione del tipo: «se il mio ufficio acquista un nuovo computer, questo sarà nero».

La nostra moderna concezione del termine «legge di natura» è una questione lungamente discussa dai filosofi, e più sottile di quanto a prima vista si potrebbe pensare. Per esempio, il filosofo John W. Carroll confrontò l'enunciato «tutte le sfere d'oro hanno un diametro inferiore a un chilometro» con una proposizione come «tutte le sfere di uranio-235 hanno un diametro inferiore a un chilometro». Le nostre osservazioni del mondo ci dicono che non esistono sfere d'oro con un diametro superiore al chilometro, e possiamo essere abbastanza sicuri che non ce ne saranno mai. Tuttavia, non abbiamo alcuna ragione per credere che non potrebbe essercene una, e quindi l'enunciato non è considerato una legge. Viceversa, l'enunciato «tutte le sfere di uranio-235 hanno un diametro inferiore a un chilometro» potrebbe essere considerato una legge perché, stando a quanto sappiamo della fisica nucleare, se una sfera di uranio-235 raggiungesse un diametro maggiore di circa 15 centimetri, si distruggerebbe in un'esplosione nucleare. Pertanto possiamo essere certi che

sfere simili non esistano (e non sarebbe una buona idea cercare di costruirne una!). Questa distinzione è importante perché chiarisce che non tutte le generalizzazioni che emergono dalle nostre osservazioni possono essere intese come leggi di natura, e che nella maggioranza dei casi le leggi di natura esistono come parte di un più ampio sistema interconnesso di leggi.

Nella scienza moderna le leggi di natura sono solitamente formulate in linguaggio matematico. Possono essere esatte o approssimate, ma l'osservazione deve averne confermato la validità senza eccezione, se non in termini universali almeno sotto un insieme specificato di condizioni. Per esempio, oggi sappiamo che le leggi di Newton devono essere modificate se i corpi si muovono a velocità prossime a quella della luce. Nondimeno le consideriamo leggi perché valgono, quanto meno con ottima approssimazione, nelle condizioni dell'esperienza quotidiana dove le velocità con cui si ha a che fare sono molto inferiori a quella della luce.

Se la natura è governata da leggi, si pongono tre interrogativi:

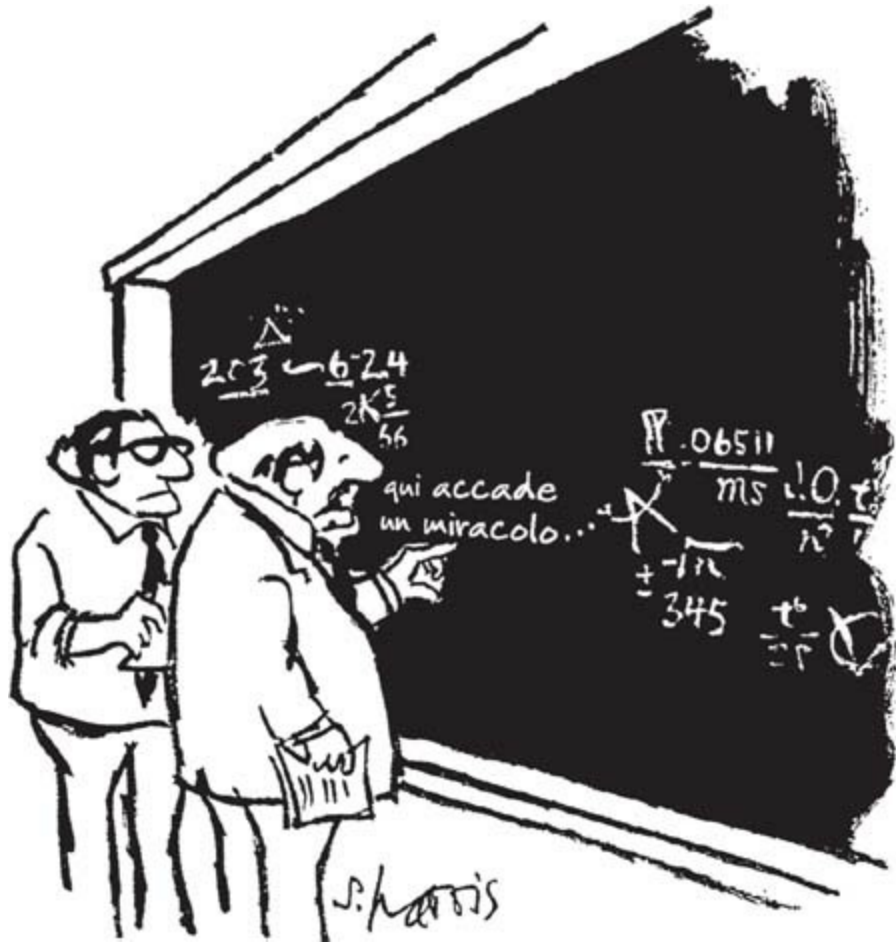
1. Qual è l'origine delle leggi?
2. Ci sono eccezioni alle leggi, vale a dire miracoli?
3. C'è un solo insieme di leggi possibili?

Queste importanti questioni sono state affrontate in vari modi da scienziati, filosofi e teologi. La risposta alla prima domanda – la risposta di Keplero, Galileo, Cartesio e Newton – è stata per secoli che le leggi sono opera di Dio. Ma questa non è che una definizione di Dio come personificazione delle leggi di natura. A meno che non si doti Dio di qualche altro attributo, quale quello di essere il Dio dell'Antico Testamento, servirsi di Dio come di una risposta alla domanda sull'origine delle leggi equivale semplicemente a sostituire un mistero con un altro. Quindi se si chiama in causa Dio nella risposta alla prima domanda, la vera questione cruciale diventa la seconda domanda: ci sono miracoli, eccezioni alle leggi?

Le opinioni in merito sono state le più contrastanti. Platone e Aristotele, i più influenti autori dell'antichità, ritenevano che non potessero esserci eccezioni alle leggi. Ma se si assume il punto di vista della Bibbia, non solo Dio ha creato le leggi ma è anche possibile appellarsi a Lui con la preghiera perché faccia delle eccezioni, come guarire i malati terminali, porre fine anzitempo alle siccità o ripristinare il croquet come sport olimpico. In contrasto con l'opinione di Cartesio, quasi tutti i pensatori cristiani hanno ritenuto che Dio debba essere in grado di sospendere le leggi per compiere miracoli. Anche Newton credeva in «ordinari» miracoli. Infatti pensava che le orbite dei pianeti sarebbero state di per sé instabili perché l'attrazione gravitazionale dell'uno sull'altro avrebbe causato perturbazioni, che con il tempo si sarebbero intensificate e avrebbero fatto sì che i pianeti o cadessero nel Sole o venissero espulsi dal sistema solare. Dio, secondo Newton, doveva intervenire di continuo per aggiustare le orbite, ovvero per «caricare l'orologio celeste, che altrimenti si sarebbe arrestato». Viceversa, Pierre-Simon marchese di Laplace (1749-1827), comunemente noto come Laplace, sostenne che le perturbazioni, invece che cumulative, sarebbero state periodiche, vale a dire soggette a cicli ripetuti. Il sistema solare così si sarebbe rimesso a posto da solo, e non ci sarebbe stato bisogno di un intervento divino per spiegare come mai fosse sopravvissuto fino alla nostra epoca.

A Laplace solitamente viene attribuita la prima formulazione chiara del determinismo scientifico: dato lo stato dell'universo a un certo istante, un insieme completo di leggi determina totalmente sia il

futuro che il passato. Ciò escluderebbe la possibilità di miracoli o di un ruolo attivo di Dio. Il determinismo scientifico proposto da Laplace è la risposta dello scienziato moderno alla seconda domanda. Costituisce di fatto la base di tutta la scienza moderna, ed è un principio che risulterà di grande importanza nel seguito di questo libro. Una legge scientifica non è tale se è valida solamente quando qualche essere soprannaturale decide di non intervenire. Si dice che Napoleone, rendendosene conto, abbia domandato a Laplace come Dio si inserisse in questo quadro. E Laplace rispose: «Sire, non ho avuto bisogno di quest'ipotesi».



«Credo che dovresti essere più esplicito qui, nel secondo passaggio.»

Dal momento che noi viviamo nell'universo e interagiamo con gli altri corpi, il determinismo scientifico deve valere anche per noi. Molti, però, pur ammettendo che il determinismo scientifico governi i processi fisici, farebbero un'eccezione per il comportamento umano perché credono che siamo dotati di libero arbitrio. Cartesio, ad esempio, per salvare l'idea di libero arbitrio, sostenne che la mente umana era qualcosa di diverso dal mondo fisico e non ne seguiva le leggi. Nella sua concezione una persona è costituita da due ingredienti, il corpo e l'anima. I corpi non sono altro che ordinarie macchine, ma l'anima non è soggetta alla legge scientifica. Cartesio era molto interessato all'anatomia e alla fisiologia e considerava un minuscolo organo al centro del cervello, chiamato ghiandola pineale, come sede principale dell'anima. Quella ghiandola era, a suo giudizio, il luogo in cui si formano tutti i nostri pensieri, la fonte del nostro libero arbitrio.

Gli esseri umani sono dotati di libero arbitrio? Se ne siamo dotati, in quale punto dell'albero evolutivo questo si è sviluppato? Forse le alghe verdi-azzurre o i batteri hanno libero arbitrio, oppure il loro comportamento è automatico e rientra nel dominio della legge scientifica? Sono

soltanto gli organismi pluricellulari ad avere il libero arbitrio, o soltanto i mammiferi? Potremmo pensare che uno scimpanzé stia esercitando libero arbitrio quando sceglie di addentare una banana, o che lo stia esercitando un gatto quando fa uno strappo nel nostro divano, ma che dire del verme nematode *Caenorhabditis elegans*, una semplice creatura formata da soltanto 959 cellule? Probabilmente non pensa mai: «Erano dei batteri davvero gustosi quelli con cui ho cenato laggiù», eppure anch'esso ha una ben definita preferenza nel cibo e si accontenterà di un pasto poco attraente o andrà a cercare qualcosa di meglio a seconda della sua esperienza recente. Questo è esercizio del libero arbitrio?

Anche se abbiamo l'impressione di poter scegliere che cosa fare, ciò che sappiamo della base molecolare della biologia indica che i processi biologici sono governati dalle leggi della fisica e della chimica e pertanto sono determinati come le orbite dei pianeti. Recenti esperimenti nel campo delle neuroscienze corroborano l'idea che sia il nostro cervello fisico a determinare, seguendo le leggi scientifiche note, le nostre azioni, e non un qualche agente che opera al di fuori di tali leggi. Per esempio, uno studio condotto su pazienti sottoposti a chirurgia cerebrale da svegli ha stabilito che stimolando elettricamente le appropriate regioni del cervello è possibile creare nel paziente il desiderio di muovere la mano, il braccio o il piede, oppure di muovere le labbra e parlare. È difficile immaginare come possa operare il libero arbitrio se il nostro comportamento è determinato dalla legge fisica, e così sembra che non siamo nient'altro che macchine biologiche e che il libero arbitrio sia soltanto un'illusione.

Pur ammettendo che il comportamento umano sia effettivamente determinato dalle leggi di natura, sembra ragionevole anche concludere che l'esito è determinato in modo così complicato e in base a variabili talmente numerose da rendere in pratica impossibile predirlo. Per farlo sarebbe necessario conoscere lo stato iniziale di ciascuna delle migliaia di trilioni di trilioni di molecole presenti nel corpo umano e risolvere un numero all'incirca uguale di equazioni. Ci vorrebbero alcuni miliardi di anni, e allora sarebbe un po' tardi per schivare il colpo infertoci dalla persona che ci sta di fronte.

Essendo così poco pratico servirsi delle leggi fisiche fondamentali per predire il comportamento umano, adottiamo quella che viene chiamata una teoria efficace. In fisica una teoria efficace è una struttura creata per produrre un modello di certi fenomeni osservati senza descrivere nei particolari tutti i processi sottostanti. Per esempio, non possiamo risolvere in modo esatto le equazioni che governano le interazioni gravitazionali di ciascun atomo del corpo di una persona con ciascun atomo della Terra. Ma a tutti i fini pratici la forza gravitazionale agente tra una persona e la Terra può essere descritta in termini di un numero ristretto di variabili, come la massa totale della persona. Analogamente, non siamo in grado di risolvere le equazioni che governano il comportamento di atomi e molecole complessi, ma abbiamo messo a punto una teoria efficace chiamata chimica, che fornisce una spiegazione adeguata di come si comportano atomi e molecole nelle reazioni chimiche senza rendere conto di ogni particolare delle interazioni. Nel caso delle persone, dal momento che non possiamo risolvere le equazioni che determinano il nostro comportamento, ricorriamo alla teoria efficace secondo la quale siamo dotati di libero arbitrio. Lo studio della nostra volontà, e del comportamento che ne deriva, costituisce la scienza della psicologia. Anche l'economia è una teoria efficace, basata sul concetto di libero arbitrio e sull'ipotesi che le persone valutino le loro possibili linee d'azione alternative e scelgano la migliore. Tale teoria efficace ha un successo soltanto parziale nel predire il comportamento perché, come ben sappiamo, le decisioni sono spesso irrazionali o sono basate su un'analisi imperfetta delle conseguenze della scelta. Questa è la ragione per cui il mondo è

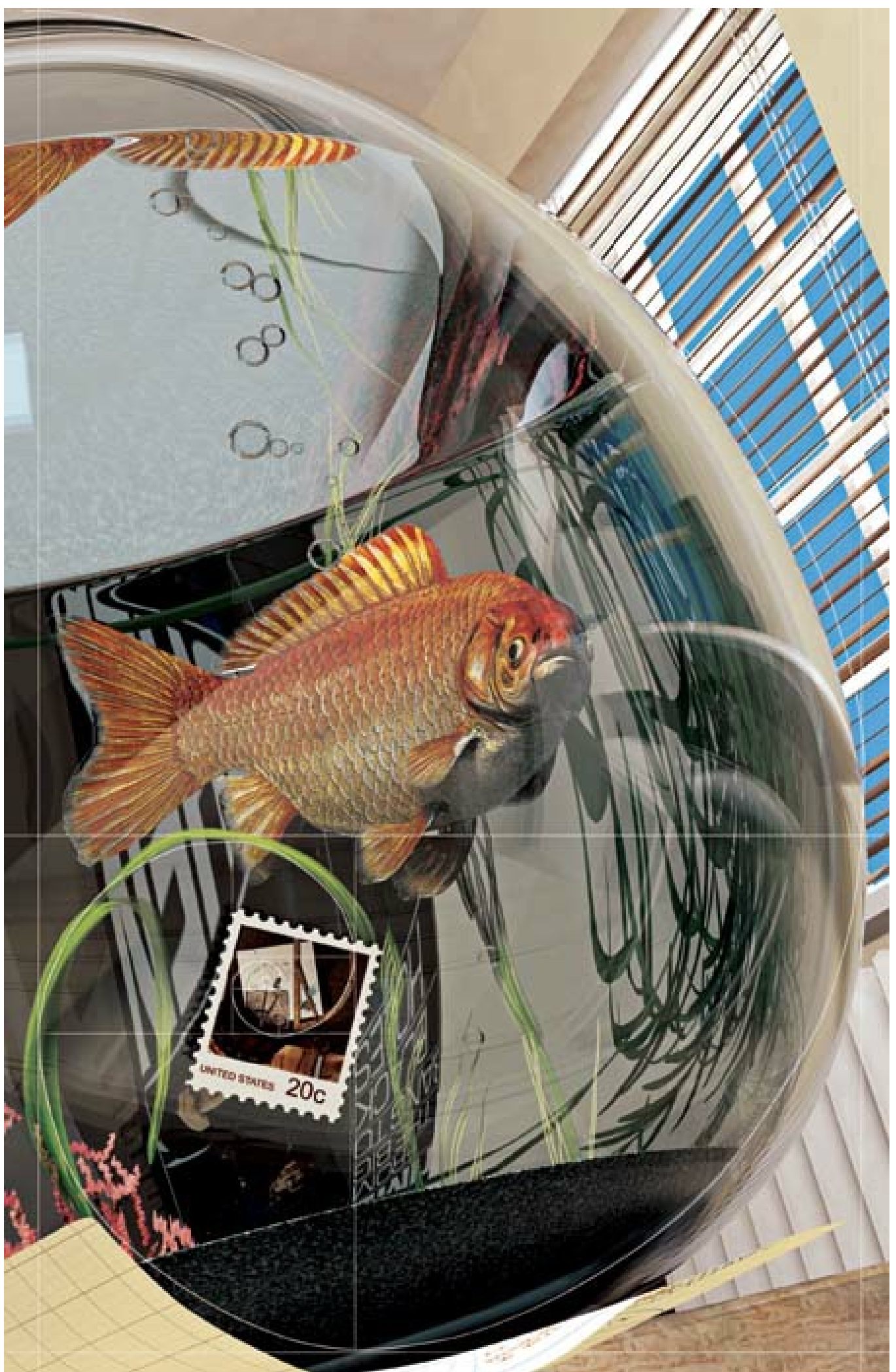
in uno stato così caotico.

La terza domanda affronta la questione dell'unicità delle leggi che determinano sia l'universo che il comportamento umano. Se la vostra risposta alla prima domanda è che Dio ha creato le leggi, allora la questione è se Dio abbia avuto qualche libertà nel sceglierle. Tanto Aristotele e Platone, quanto più tardi Cartesio e Einstein, credevano che i principi di natura esistano per «necessità», ossia perché sono le uniche leggi che abbiano senso logico. Proprio a causa della convinzione che le leggi di natura traggano origine dalla logica, Aristotele e i suoi seguaci pensavano che fosse possibile «dedurre» tali leggi senza prestare troppa attenzione a come la natura effettivamente si comportava. Questa impostazione, insieme alla maggiore importanza attribuita al perché i corpi seguono leggi piuttosto che a quali siano specificamente le leggi, portò Aristotele a formulare leggi prevalentemente qualitative che erano spesso sbagliate e in ogni caso non risultavano molto utili, anche se dominarono il pensiero scientifico per parecchi secoli. Soltanto molto più tardi alcuni, come Galileo, osarono sfidare l'autorità di Aristotele e osservare che cosa la natura realmente faceva, invece di pensare a che cosa avrebbe dovuto fare secondo la pura «ragione».

Questo libro si basa sul concetto di determinismo scientifico, il che implica che la risposta alla seconda domanda è che non vi sono miracoli, né eccezioni alle leggi di natura. Torneremo ad affrontare in modo approfondito la prima e la terza domanda, chiedendoci quindi come sorgono le leggi e se siano le uniche possibili. Ma prima affronteremo, nel prossimo capitolo, la questione di che cosa le leggi di natura descrivono. La maggior parte degli scienziati risponderebbe che le leggi sono il riflesso matematico di una realtà esterna che esiste indipendentemente dall'osservatore che la vede. Ma considerando il modo in cui osserviamo ciò che ci circonda e ci formiamo concetti in merito, siamo inevitabilmente indotti a domandarci se abbiamo davvero ragione di credere che esista una realtà oggettiva.

III

CHE COS'È LA REALTÀ?



Nel 2004 il consiglio comunale di Monza vietò ai proprietari di animali da compagnia di tenere i pesci rossi in vasche curve. Il promotore della misura la motivò affermando tra l'altro che è crudele tenere un pesce in una vasca con pareti curve perché, guardando fuori, l'animale avrebbe una visione distorta della realtà. Ma noi come facciamo a sapere che abbiamo della realtà la visione vera, priva di distorsioni? Non potremmo essere anche noi all'interno di una qualche grande boccia di vetro e avere una visione distorta da un'enorme lente? L'immagine che della realtà ha il pesce rosso è diversa dalla nostra, ma possiamo essere certi che sia meno reale?...

La visione dei pesci rossi non è uguale alla nostra, ma gli animali potrebbero ugualmente formulare leggi scientifiche relative al moto dei corpi che osservano all'esterno della boccia. Per esempio, a causa della distorsione, un corpo che si muove liberamente e che alle nostre osservazioni apparirebbe procedere in linea retta, alle osservazioni dei pesci rossi risulterebbe muoversi lungo una traiettoria curva. Nondimeno i pesci rossi potrebbero formulare dal loro sistema di riferimento distorto leggi scientifiche che varrebbero sempre e che consentirebbero loro di fare predizioni sul moto futuro dei corpi all'esterno della boccia. Le loro leggi sarebbero più complicate di quelle vigenti nel nostro riferimento, ma la semplicità è una questione di gusto. Se un pesce rosso formulasse una simile teoria, dovremmo ammettere la sua visione come una descrizione valida della realtà.

Un esempio famoso di differenti descrizioni della realtà ci è offerto dalla vicenda del modello introdotto intorno al 150 d.C. da Tolomeo (c. 85 - c. 165 d.C.) per descrivere il moto dei corpi celesti. Tolomeo pubblicò le sue ricerche in un trattato in tredici libri solitamente noto con il titolo arabo, *Almagesto*. L'*Almagesto* comincia spiegando le ragioni per cui si deve pensare che la Terra sia sferica, immobile, posta al centro dell'universo e di dimensioni trascurabili rispetto alla distanza dei cieli. Nonostante il modello eliocentrico proposto da Aristarco, queste convinzioni erano state largamente dominanti tra i greci colti almeno dai tempi di Aristotele, il quale credeva per ragioni di carattere filosofico che la Terra dovesse trovarsi al centro dell'universo. Nel modello di Tolomeo la Terra era immobile al centro mentre pianeti e stelle si muovevano intorno a essa in complicate orbite comprendenti epicicli, simili a ruote che girano intorno ad altre ruote.



L'universo tolemaico. Nella concezione di Tolomeo la Terra era al centro dell'universo.

Questo modello sembrava naturale perché non avvertiamo la Terra muoversi sotto i nostri piedi (salvo che durante i terremoti o in momenti di forte emozione). La cultura europea delle epoche successive si basò sulle fonti greche che erano state tramandate, cosicché le idee di Aristotele e Tolomeo divennero la base di gran parte del pensiero occidentale. Il modello del cosmo di Tolomeo fu fatto proprio dalla Chiesa cattolica e considerato sua dottrina ufficiale per quattordici secoli. Soltanto nel 1543 un modello alternativo venne proposto da Copernico nel suo libro *De revolutionibus orbium coelestium*, pubblicato solamente nell'anno della sua morte (benché l'astronomo polacco avesse lavorato sulla teoria per diversi decenni).

Copernico, come Aristarco circa diciassette secoli prima, descrisse un mondo in cui il Sole era fermo e i pianeti gli giravano intorno in orbite circolari. Benché l'idea non fosse nuova, la sua reviviscenza incontrò una violenta opposizione. Si riteneva che il modello copernicano fosse in contraddizione con la Bibbia, che veniva interpretata come se affermasse che i pianeti girano intorno alla Terra, sebbene non contenga nessuna affermazione esplicita in questo senso. In realtà, all'epoca in cui fu scritta la Bibbia si credeva che la Terra fosse piatta. Il modello copernicano causò un acceso dibattito in merito al moto della Terra, che culminò nel 1633 con il processo a Galileo, accusato di eresia per il suo sostegno a tale modello, e per la convinzione «che si possa tener e difendere per probabile un'opinione dopo esser stata dichiarata e definita per contraria alla Sacra Scrittura». Galileo fu riconosciuto colpevole, costretto ad abiurare e confinato agli arresti domiciliari per il resto dei suoi giorni. Si dice che abbia mormorato sottovoce «eppur si muove».

Nel 1992 la Chiesa cattolica riconobbe finalmente che aveva sbagliato a condannare Galileo.

Allora qual è il sistema reale, quello tolemaico o quello copernicano? Sebbene capiti spesso di sentir dire che Copernico dimostrò che Tolomeo era in errore, questo non è vero. Come nel caso della nostra normale visione del mondo e di quella dei pesci rossi, si possono usare entrambe le descrizioni come modello dell'universo, in quanto le nostre osservazioni dei cieli possono essere spiegate sia assumendo che la Terra sia in quiete, sia assumendo che lo sia il Sole. Nonostante il ruolo che il sistema copernicano riveste nei dibattiti filosofici sulla natura dell'universo, il suo reale vantaggio è che le equazioni del moto sono molto più semplici nel sistema di riferimento in cui il Sole è in quiete.

Un tipo diverso di realtà alternativa è quella che compare nel film di fantascienza *Matrix*, in cui la specie umana vive inconsapevolmente in una realtà virtuale simulata, creata da computer intelligenti per mantenere gli uomini tranquilli e contenti mentre i computer ne assorbono l'energia bioelettrica (qualunque cosa sia). Può darsi che una simile idea non sia poi così inverosimile, dal momento che molte persone preferiscono passare il loro tempo nella realtà simulata di siti web come Second Life. Come facciamo a sapere di non essere semplicemente i personaggi di una soap opera generata da computer? Se vivessimo in un mondo artificiale immaginario, gli eventi non necessariamente avrebbero una qualsiasi logica o coerenza o obbedirebbero a leggi. Gli alieni che ne avessero il controllo potrebbero trovare più interessante o divertente osservare le nostre reazioni se, per esempio, la luna piena si spaccasse a metà o se a tutti coloro che al mondo fanno una dieta venisse una voglia incontrollabile di torta alla crema di banana. Ma se gli alieni imponessero leggi coerenti, non ci sarebbe alcun modo per stabilire che esista un'altra realtà dietro quella simulata. Sarebbe facile chiamare «reale» il mondo in cui vivono gli alieni e «falso» quello artificiale. Ma se – come noi – gli esseri che vivono nel mondo simulato non potessero osservare il loro universo dall'esterno, non avrebbero alcuna ragione per dubitare della loro immagine della realtà. Questa è una versione moderna dell'idea che noi siamo tutti creature fittizie del sogno di qualcun altro.



Simili esempi ci conducono a una conclusione che avrà grande importanza in questo libro: *non esiste alcun concetto di realtà indipendente dalle descrizioni o dalle teorie*. Adotteremo invece un punto di vista che chiameremo realismo dipendente dai modelli: l'idea, cioè, che una teoria fisica o descrizione del mondo è un modello (in genere di natura matematica) unito a un insieme di regole che connettono gli elementi del modello alle osservazioni. Ciò fornisce uno schema con cui interpretare la scienza moderna.

Nel corso del tempo i filosofi, da Platone in poi, hanno discusso sulla natura della realtà. La scienza classica è basata sul presupposto che esista un mondo esterno reale le cui proprietà sono definite e indipendenti dall'osservatore che le percepisce. Secondo la scienza classica, certi corpi esistono e hanno proprietà fisiche, quali velocità e massa, che hanno valori ben definiti. In questa concezione le nostre teorie sono tentativi di descrivere tali corpi e le loro proprietà, e le nostre misurazioni e percezioni corrispondono a essi. Osservatore e osservato sono entrambi parti di un mondo che ha un'esistenza oggettiva, e qualunque distinzione tra essi non ha alcun significato di rilievo. In altre parole, se vi capita di vedere un branco di zebre che litigano per un posto in un parcheggio coperto, è perché c'è davvero un branco di zebre che litigano per un posto in un parcheggio coperto. Qualunque altro osservatore che assista misurerà le stesse proprietà, e il branco avrà quelle proprietà indipendentemente dal fatto che qualcuno lo osservi o no. In filosofia questa tesi è chiamata realismo.

Sebbene il realismo possa essere un punto di vista allettante, come vedremo più avanti, ciò che sappiamo della fisica moderna rende arduo sostenerlo. Per esempio, secondo i principi della fisica quantistica, che è una descrizione precisa della natura, una particella non ha né una posizione definita né una velocità definita a meno che e fintanto che queste grandezze non vengano misurate da un osservatore. Perciò *non* è esatto dire che una misurazione fornisce un certo risultato perché la grandezza oggetto di misura aveva quel valore all'istante della misurazione. In realtà, in alcuni casi i singoli corpi non hanno neppure un'esistenza individuale ma esistono soltanto come parte di un insieme di molte entità. E se una teoria chiamata principio olografico risultasse corretta, noi e il nostro mondo quadridimensionale potremmo essere ombre sul contorno di un più vasto spaziotempo pentadimensionale. In tal caso la nostra condizione nell'universo sarebbe analoga a quella dei pesci rossi.

I realisti ortodossi spesso sostengono che la prova che le teorie scientifiche rappresentano la realtà sta nel loro successo. Ma differenti teorie possono descrivere in modo soddisfacente lo stesso fenomeno mediante strutture concettuali disparate. In effetti molte teorie scientifiche che avevano avuto successo sono state in seguito sostituite da altre teorie, ugualmente di successo, basate su concezioni della realtà del tutto nuove.

Tradizionalmente coloro che non accettano il realismo sono stati chiamati antirealisti. Costoro ipotizzano una distinzione tra conoscenza empirica e conoscenza teorica, e generalmente sostengono che osservazione ed esperimento sono dotati di significato, ma che le teorie sono soltanto utili strumenti che non contengono alcuna verità più profonda sottostante ai fenomeni osservati. Alcuni antirealisti hanno perfino inteso ridurre la scienza alle cose che si possono osservare. Per questa ragione molti nel XIX secolo respingevano l'idea degli atomi con la motivazione che non se ne sarebbe mai osservato uno. George Berkeley (1685- 1753) si era spinto addirittura a sostenere che non esiste nulla all'infuori della mente e delle sue idee. Quando un amico fece osservare allo scrittore e lessicografo inglese Samuel Johnson (il famoso dottor Johnson, 1709-1784), che la tesi di

Berkeley non poteva in alcun modo essere confutata, si dice che Johnson abbia risposto facendo qualche passo verso una grossa pietra, dandole un calcio e proclamando: «La confuto così». Naturalmente il dolore al piede che il dottor Johnson avvertì era anch'esso un'idea nella sua mente, e quindi non stava realmente confutando le concezioni di Berkeley. Ma il suo atto illustrava l'opinione del filosofo David Hume (1711-1776), il quale scrisse che sebbene non abbiamo alcuna base razionale per credere in una realtà oggettiva, non abbiamo altra scelta che agire come se ci fosse.



«Voi due avete qualcosa in comune. Il dottor Davis ha scoperto una particella che nessuno ha mai visto, e il professor Higbe ha scoperto una galassia che nessuno ha mai visto.»

Il realismo dipendente dai modelli va oltre tutte queste dispute e discussioni tra la scuola di pensiero realista e quella antirealista. Secondo questa concezione, è inutile chiedersi se un modello sia reale, ma bisogna domandarsi soltanto se è in accordo con l'osservazione. Se ci sono due modelli che sono entrambi in accordo con l'osservazione, come la visione dei pesci rossi e la nostra, non è possibile dire che uno sia più reale dell'altro. Ci si può servire del modello che è più adatto nella situazione oggetto di indagine. Ad esempio, per chi si trovasse all'interno della boccia di vetro la visione dei pesci rossi sarebbe utile, ma per chi è all'esterno sarebbe poco pratico descrivere gli eventi, magari da una galassia lontana, nel sistema di riferimento di una boccia sulla Terra, soprattutto perché la boccia sarebbe in moto, dato che la Terra orbita intorno al Sole e ruota sul proprio asse.

Costruiamo modelli nella scienza, ma ne costruiamo anche nella vita quotidiana. Il realismo dipendente dai modelli si applica non soltanto ai modelli scientifici ma anche ai modelli mentali consci e subconsci che tutti noi creiamo per interpretare e comprendere il mondo di tutti i giorni. Non c'è modo di eliminare l'osservatore – cioè noi – dalla nostra percezione del mondo, che viene prodotta mediante la nostra elaborazione sensoriale e mediante il modo in cui pensiamo e ragioniamo. La nostra percezione – e quindi le osservazioni su cui si basano le nostre teorie – non è diretta, bensì è modellata da una specie di lente, la struttura interpretativa del cervello umano.

Il realismo dipendente dai modelli corrisponde al modo in cui percepiamo gli oggetti. Nella

visione il cervello riceve una serie di segnali tramite il nervo ottico. Questi segnali non costituiscono il tipo di immagine che considereremmo accettabile sullo schermo del nostro televisore. C'è un punto cieco dove il nervo ottico si connette alla retina, e l'unica parte del nostro campo visivo con una buona risoluzione è un'area ristretta dell'ampiezza di circa un grado intorno al centro della retina, un'area delle dimensioni del pollice quando viene tenuto alla distanza del braccio teso. E così i dati grezzi inviati al cervello sono qualcosa di simile a un'immagine maldefinita con un buco in mezzo. Fortunatamente il cervello umano elabora tali dati, combinando quelli provenienti dai due occhi, colmando le lacune sul presupposto che le proprietà visive di posizioni vicine siano simili, e operando un'interpolazione. Inoltre il cervello riceve dalla retina una gamma di dati bidimensionale e con questa crea l'impressione dello spazio tridimensionale. Il cervello, in altre parole, costruisce un'immagine mentale o modello.

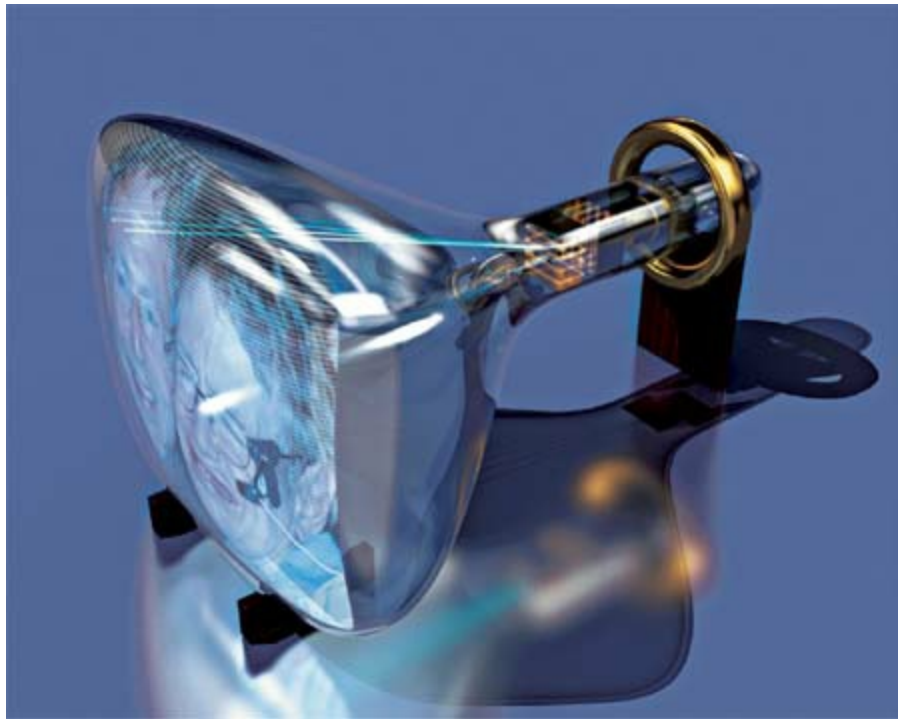
Il cervello è così abile a costruire modelli che, se a qualcuno vengono messi occhiali che fanno pervenire ai suoi occhi immagini rovesciate a testa in giù, dopo un po' il cervello adegua il modello in modo che il soggetto torna a vedere immagini diritte. Se poi gli si tolgono gli occhiali, vedrà per qualche tempo il mondo rovesciato, prima di tornare a una visione normale. Ciò dimostra che quando diciamo «vedo una sedia» intendiamo semplicemente che abbiamo usato la luce diffusa dalla sedia per costruire un'immagine mentale o modello di quell'oggetto. Se il modello è rovesciato, con un po' di fortuna il cervello lo correggerà prima che tentiamo di sederci sulla sedia.

Un altro problema che il realismo dipendente dai modelli risolve, o quanto meno evita, è quello del significato dell'esistenza. Come faccio a sapere che un tavolo esiste ancora se esco dalla stanza e non lo posso vedere? Che significa dire che esistono cose che non possiamo vedere, come l'elettrone, o i quark, le particelle che si ritiene costituiscano il protone e il neutrone? Potremmo adottare un modello in cui il tavolo scompare quando esco dalla stanza e ricompare nella medesima posizione quando ritorno, ma sarebbe poco pratico; e se poi, mentre sono fuori, accadesse qualcosa, se per esempio crollasse il soffitto? Come potrei spiegare, sulla base del modello «il-tavolo-scomparequando-esco-dalla-stanza», il fatto che la volta successiva in cui entro il tavolo ricompare rotto, sotto le macerie del soffitto? Il modello in cui il tavolo rimane al suo posto è molto più semplice e si accorda con l'osservazione. Non si può chiedere di più.

Nel caso delle particelle subatomiche che non si possono vedere, quello degli elettroni è un modello utile, che spiega osservazioni come le tracce in una camera a nebbia e le macchie luminose sul tubo catodico di un televisore, oltre a molti altri fenomeni. Solitamente si dice che l'elettrone fu scoperto nel 1897 dal fisico britannico J.J. Thomson al laboratorio Cavendish dell'Università di Cambridge. Thomson stava compiendo esperimenti sui flussi di elettricità all'interno di tubi di vetro vuoti, fenomeno noto con il nome di «raggi catodici». Gli esperimenti lo condussero all'audace conclusione che i misteriosi raggi fossero composti di minuti «corpuscoli» che erano costituenti materiali degli atomi, all'epoca considerati unità fondamentali e indivisibili della materia. Thomson non «vide» un elettrone, e la sua congettura non fu confermata in modo diretto e univoco dai suoi esperimenti. Ma il modello si è dimostrato cruciale in applicazioni che vanno dalla scienza fondamentale all'ingegneria, e oggi tutti i fisici credono agli elettroni, anche se non è possibile vederli.

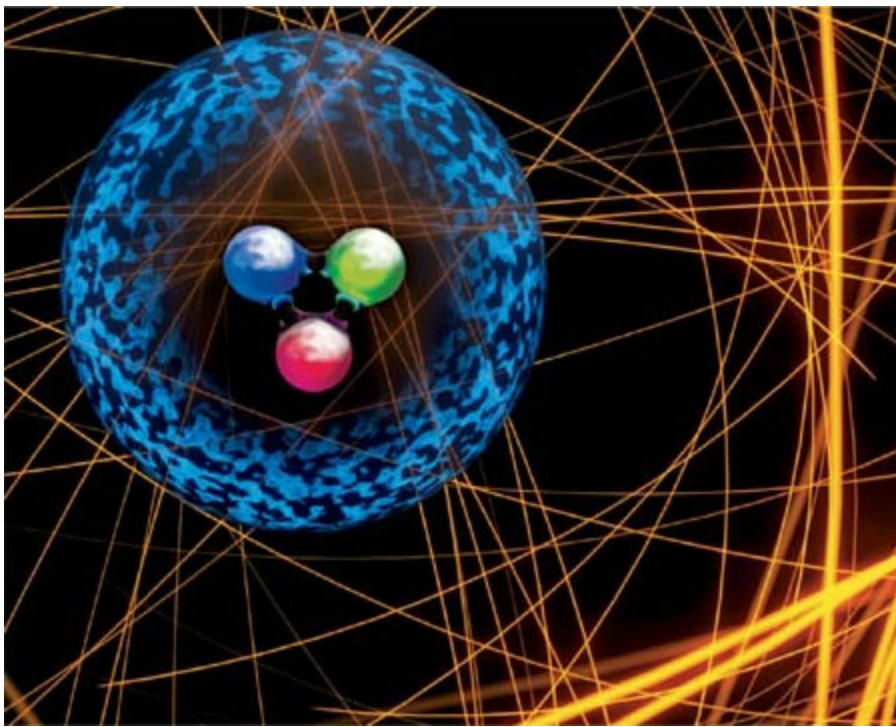
I quark, a loro volta impossibili da vedere, sono un modello per spiegare le proprietà dei protoni e dei neutroni all'interno del nucleo dell'atomo. Sebbene si dica che protoni e neutroni sono fatti di quark, non osserveremo mai un quark perché la forza di legame tra queste particelle aumenta con la

distanza, e quindi quark liberi isolati non possono esistere in natura. Essi si presentano invece sempre in gruppi di tre (protoni e neutroni), o in coppie di un quark e un antiquark (mesoni π), e si comportano come se fossero tenuti insieme da elastici.



I raggi catodici. Non possiamo vedere i singoli elettroni, ma possiamo avvertire gli effetti che producono.

Se abbia senso dire che i quark esistono realmente visto che non è possibile isolarne uno fu una questione assai controversa negli anni successivi alla prima formulazione del modello a quark. L'idea che certe particelle fossero fatte di differenti combinazioni di alcuni costituenti subnucleari forniva un principio di organizzazione che dava una spiegazione semplice e convincente delle loro proprietà. Ma per quanto i fisici fossero abituati ad accettare particelle la cui esistenza veniva soltanto desunta da picchi statistici nei dati relativi alla diffusione di altre particelle, l'idea di attribuire realtà a una particella che poteva essere in linea di principio inosservabile era troppo anche per molti di loro. Nel corso degli anni, però, via via che il modello a quark portava a sempre nuove predizioni corrette, l'opposizione si smorzò. È senz'altro possibile che degli esseri alieni con diciassette braccia, occhi infrarossi e l'abitudine di schizzare panna rappresa dalle orecchie facciano le medesime osservazioni sperimentali che facciamo noi, ma le descrivano senza ricorrere ai quark. Nondimeno, secondo il realismo dipendente dai modelli, i quark esistono in un modello che è in accordo con le nostre osservazioni sul comportamento delle particelle subnucleari.



I quark. Il concetto di quark è un elemento essenziale delle nostre teorie della fisica fondamentale, anche se osservare singoli quark non è possibile.

Il realismo dipendente dai modelli può fornire un quadro concettuale per discutere questioni come la seguente: se il mondo fu creato un tempo finito fa, che cosa accadeva prima? Un filosofo cristiano dei primi secoli, sant'Agostino (354-430), disse che la risposta non era che Dio stava preparando l'inferno per chi faceva domande simili, ma che il tempo era una proprietà del mondo creato da Dio e non esisteva prima della creazione, la quale Agostino riteneva fosse avvenuta abbastanza di recente. Questo è un modello possibile, che è preferito da quanti credono che il resoconto fornito dalla Genesi sia vero alla lettera, anche se il mondo contiene fossili e altre prove che lo fanno sembrare molto più vecchio. (Furono forse messi lì per ingannarci?) Si può adottare anche un diverso modello, in cui il tempo continua a ritroso per 13,7 miliardi di anni, fino al big bang. Tale modello, che spiega la maggior parte delle nostre attuali osservazioni, comprese le testimonianze storiche e geologiche, è la miglior rappresentazione che abbiamo del passato. Il secondo modello – la teoria del big bang – è in grado di spiegare le documentazioni fossili e radioattive nonché il fatto che riceviamo luce da galassie lontane da noi milioni di anni luce, e quindi è più utile del primo. Eppure di nessuno dei due si può dire che sia più reale dell'altro.

Alcuni sostengono un modello in cui il tempo risale all'indietro anche oltre il big bang. Non è chiaro se un modello di questo tipo sarebbe in grado di spiegare meglio le osservazioni attuali perché sembra che le leggi che governano l'evoluzione dell'universo possano cessare di valere in corrispondenza del big bang. Se fosse così, non avrebbe senso creare un modello che comprenda il tempo precedente al big bang, perché ciò che è esistito allora non avrebbe alcuna conseguenza osservabile nel presente, e quindi potremmo anche attenerci all'idea che il big bang sia stato la creazione del mondo.

Un modello è soddisfacente se:

1. È elegante.

2. Comprende pochi elementi arbitrari o modificabili.
3. È in accordo con tutte le osservazioni esistenti e le spiega.
4. Fa predizioni particolareggiate su osservazioni future, predizioni che possono confutare o falsificare il modello se non sono confermate.

Per esempio, la teoria di Aristotele secondo la quale il mondo era costituito di quattro elementi, terra, aria, fuoco e acqua, e i corpi si comportavano in modo da adempiere il loro fine, era elegante e non conteneva elementi modificabili. Ma in molti casi non faceva predizioni definite, e quando ne faceva, queste non erano sempre in accordo con l'osservazione. Una di queste predizioni era che i corpi più pesanti dovrebbero cadere più rapidamente perché il loro fine è di cadere. Sembra che nessuno prima di Galileo abbia pensato che era importante verificare questa tesi. Secondo la leggenda, lo scienziato pisano l'avrebbe messa alla prova lasciando cadere dei gravi dalla Torre Pendente della sua città. Probabilmente questa è una versione apocrifa, ma sappiamo che Galileo fece rotolare gravi di diverso peso lungo un piano inclinato e osservò che acceleravano tutti nella stessa misura, in contrasto con la predizione di Aristotele.

I criteri sopra citati hanno ovviamente carattere soggettivo. L'eleganza, per esempio, non è qualcosa che si possa misurare con facilità, ma è tenuta in gran conto dagli scienziati perché scopo delle leggi di natura è di condensare in modo economico un certo numero di casi particolari in una semplice formula. L'eleganza si riferisce alla forma di una teoria, ma è strettamente connessa all'assenza di elementi modificabili, in quanto una teoria piena di fattori arbitrari non è molto elegante. Per parafrasare Einstein, una teoria dovrebbe essere semplice fin dove possibile, ma non di più. Tolomeo aggiunse epicicli alle orbite circolari dei corpi celesti in modo che il suo modello descrivesse con precisione i loro moti. Il modello avrebbe potuto essere reso ancora più preciso annettendo epicicli agli epicicli, o perfino introducendo un terzo livello di epicicli. Sebbene un aumento di complessità possa renderlo più preciso, gli scienziati considerano insoddisfacente un modello che risulti complicato per adeguarsi a un insieme specifico di osservazioni, configurandosi più come un catalogo di dati che come una teoria che abbia una probabilità significativa di includere un qualsiasi principio utile.

Vedremo nel V capitolo che molti considerano inelegante il «modello standard» che descrive le interazioni delle particelle elementari fondamentali. Tale modello ha un successo di gran lunga maggiore degli epicicli di Tolomeo, avendo predetto l'esistenza di parecchie nuove particelle prima che venissero osservate e descritto con grande precisione l'esito di numerosi esperimenti nell'arco di diversi decenni. Ma contiene decine di parametri arbitrari i cui valori devono essere fissati in modo da accordarsi con le osservazioni, invece di essere determinati dalla teoria stessa.

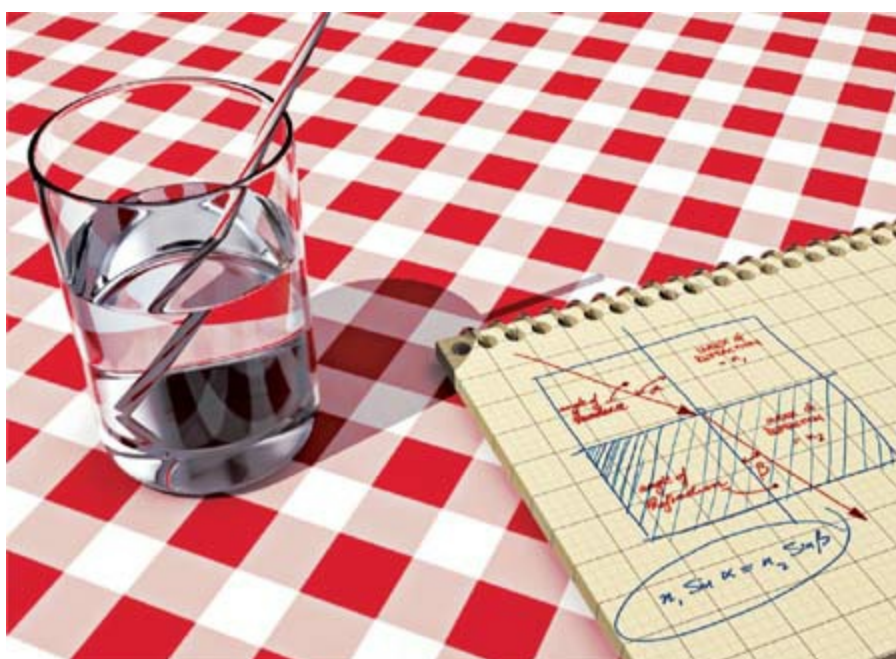
Per quanto riguarda il quarto punto, gli scienziati sono sempre molto colpiti quando predizioni nuove e sorprendenti si dimostrano corrette. Per contro, quando un modello risulta carente, è comune la reazione di sostenere che l'esperimento era sbagliato. Se poi si constata che le cose non stanno così, spesso gli scienziati non abbandonano comunque il modello ma cercano di salvarlo apportando delle modifiche. Sebbene i fisici siano in effetti tenaci nei loro tentativi di salvare le teorie che ammirano, la tendenza ad adattarle si attenua via via che le modifiche diventano più artificiose o lambiccate, e perciò «ineleganti».

Se le modifiche necessarie per conciliare una teoria con nuove osservazioni diventano troppo complicate, è segno che occorre un nuovo modello. Un esempio di vecchio modello che cedette il

passo sulla spinta di nuove osservazioni è quello di universo statico. Negli anni '20 del XX secolo la maggior parte dei fisici credeva che l'universo fosse statico, cioè di dimensioni costanti. Poi, nel 1929, Edwin Hubble pubblicò le sue osservazioni che dimostravano che l'universo è in espansione. Ma Hubble non aveva osservato in modo diretto l'universo espandersi. Aveva osservato la luce emessa dalle galassie, la quale porta una firma caratteristica, detta spettro, che dipende dalla composizione di ciascuna galassia e che risulta leggermente modificata se la galassia è in moto rispetto a noi. Perciò, analizzando gli spettri di galassie lontane, Hubble aveva potuto determinarne le velocità. Si era aspettato di trovare tante galassie che si allontanavano quante erano quelle che si avvicinavano. Aveva scoperto invece che quasi tutte le galassie si allontanano da noi, e si muovono tanto più velocemente quanto più sono distanti. Aveva così concluso che l'universo si espande, ma altri, cercando di restare fedeli al precedente modello, tentarono di spiegare le sue osservazioni nel contesto dell'universo statico. Per esempio, il fisico del Caltech Fritz Zwicky propose che per qualche ragione ancora ignota la luce potesse perdere lentamente energia mentre percorreva grandi distanze. La diminuzione dell'energia avrebbe comportato una variazione dello spettro della luce, che, secondo Zwicky, avrebbe potuto assumere l'aspetto osservato da Hubble. Per decenni dopo le ricerche di Hubble molti scienziati continuarono ad aderire alla teoria dello stato stazionario. Ma il modello più naturale era quello di Hubble, dell'universo in espansione, ed è questo che ha finito per essere generalmente accettato.

Nella ricerca delle leggi che governano l'universo abbiamo formulato un certo numero di teorie o modelli: la teoria dei quattro elementi, il modello tolemaico, la teoria del flogisto, quella del big bang e così via. Con l'avvento di ciascuna teoria, la nostra concezione della realtà e dei costituenti fondamentali dell'universo è cambiata. Pensiamo per esempio alla teoria della luce. Newton riteneva che la luce fosse fatta di piccole particelle o corpuscoli. Ciò avrebbe spiegato perché la luce si propaga in linea retta, e Newton si servì dell'idea anche per spiegare perché la luce viene deviata, o rifratta, quando passa da un mezzo come l'aria a un altro, come il vetro o l'acqua.

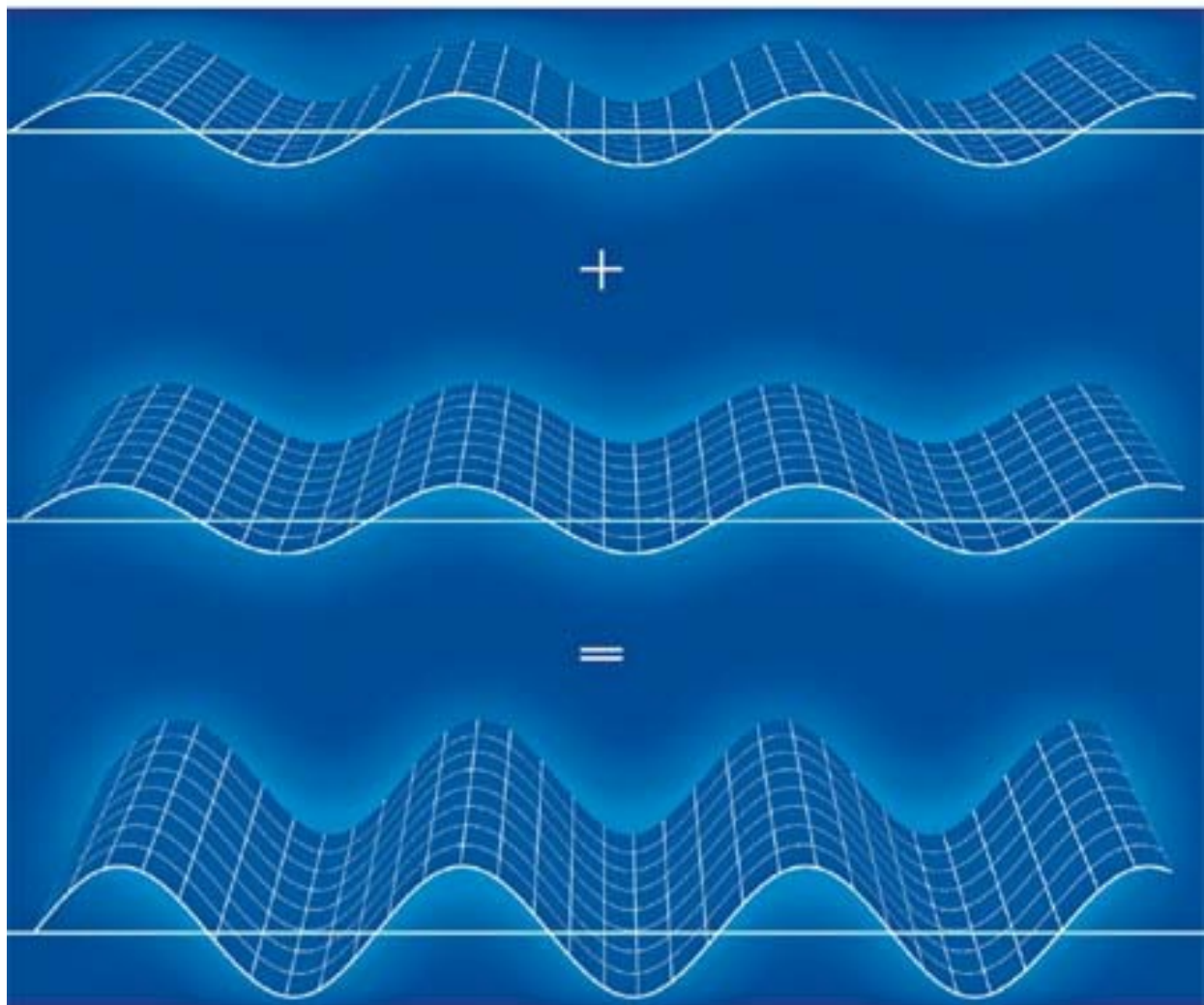
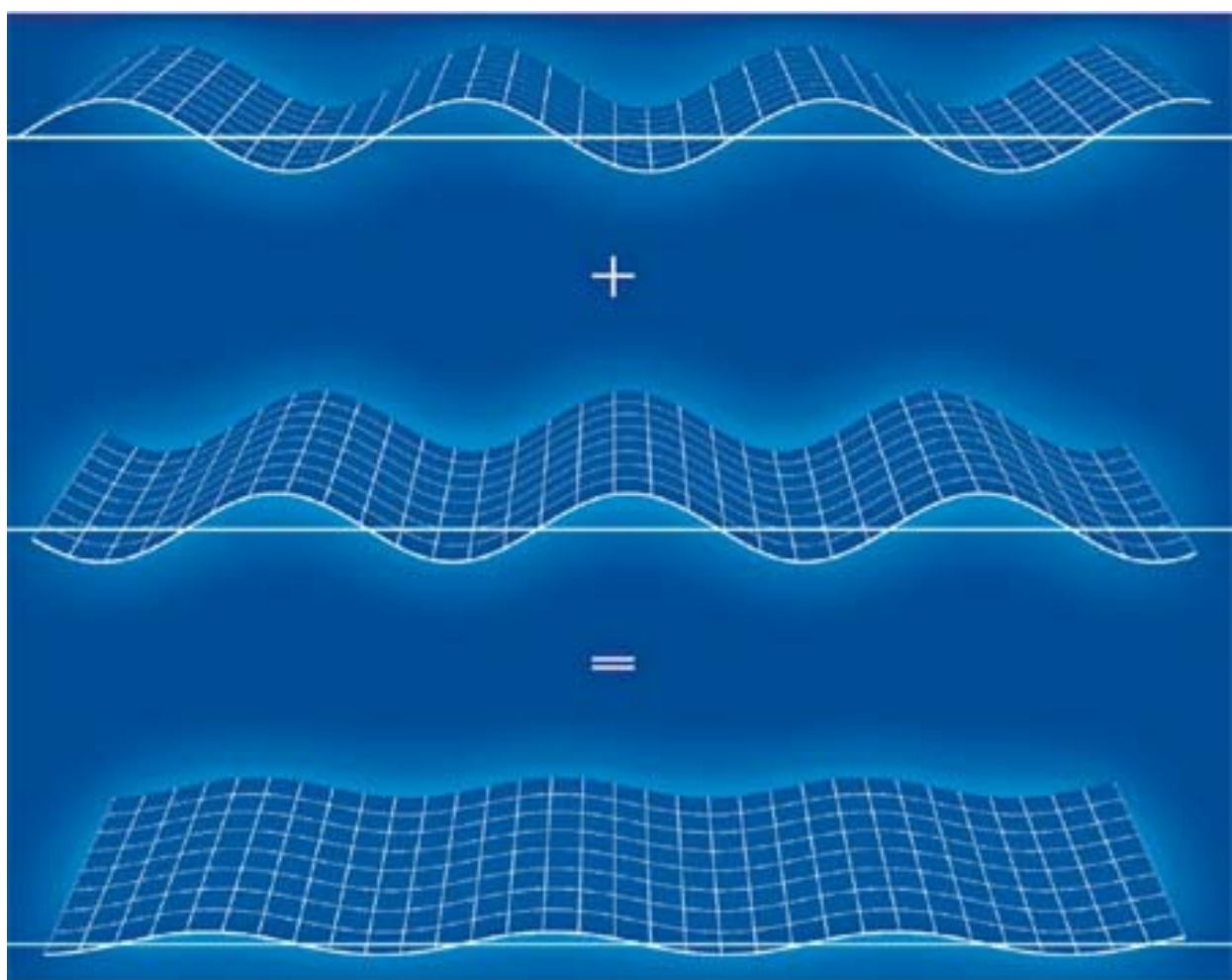
Ma la teoria corpuscolare non poteva essere utilizzata per spiegare un fenomeno che Newton stesso aveva osservato, e che è noto con il nome di «anelli di Newton». Si ponga una lente su una lastra riflettente piana e la si illumini con luce di un unico colore, per esempio con una lampada al sodio. Guardando dall'alto, si vedrà una serie di anelli chiari e scuri centrati sul punto in cui la lente tocca la superficie. Il fenomeno sarebbe difficile da spiegare con la teoria corpuscolare della luce, ma se ne può dare una giustificazione nel contesto della teoria ondulatoria.



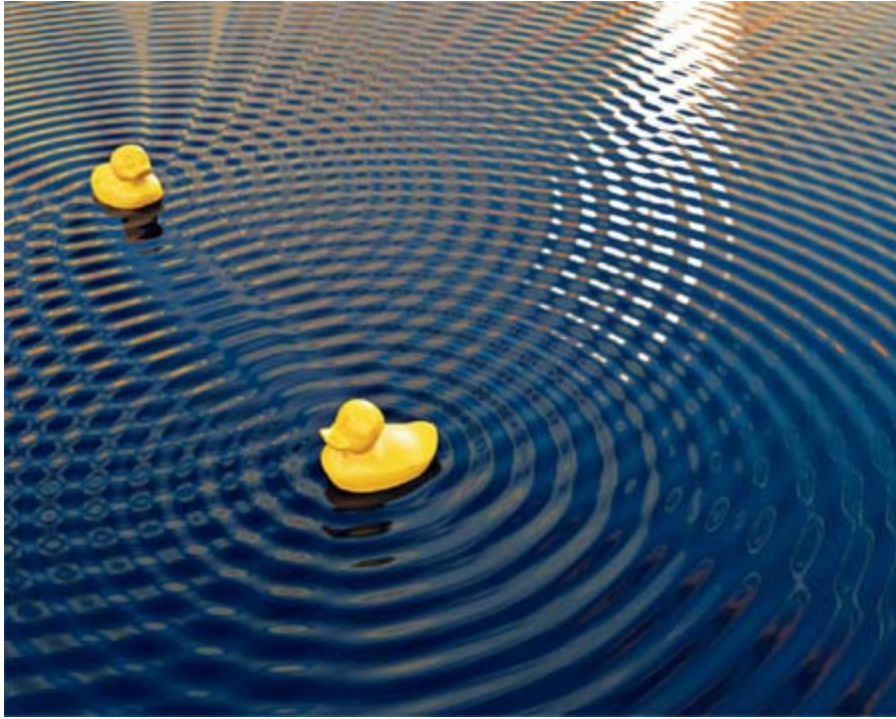
La rifrazione. Il modello newtoniano era in grado di spiegare perché la luce deviava quando passava da un mezzo a un altro, ma non poteva spiegare un altro fenomeno noto oggi con il nome di anelli di Newton.

Secondo la teoria ondulatoria della luce, gli anelli chiari e scuri sono causati da un fenomeno chiamato interferenza. Un'onda, come quelle più familiari che si formano sull'acqua, è costituita da una serie di creste e di ventri. Quando le onde collidono, se capita che le rispettive creste e i rispettivi ventri corrispondano, si rinforzano reciprocamente, producendo un'onda più grande. In tal caso si parla di interferenza costruttiva, e si dice che le onde sono «in fase». All'altro estremo, quando le onde si sovrappongono, le creste dell'una potrebbero coincidere con i ventri dell'altra. In tal caso le onde si annullano reciprocamente e si dice che sono «sfasate», mentre il fenomeno viene detto interferenza distruttiva.

Nel fenomeno degli anelli di Newton, gli anelli chiari sono posti a distanze dal centro in corrispondenza delle quali la separazione tra la lente e la lastra riflettente è tale che l'onda riflessa dalla lente differisce dall'onda riflessa dalla lastra di un numero intero (1, 2, 3,...) di lunghezze d'onda, producendo interferenza costruttiva. (Una lunghezza d'onda è la distanza tra una cresta e la successiva, o tra un ventre e il successivo.) Gli anelli scuri, viceversa, sono posti a distanze dal centro in corrispondenza delle quali la separazione tra le due onde riflesse è pari a un numero semintero ($\frac{1}{2}$, $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$,...) di lunghezze d'onda, il che produce interferenza distruttiva: l'onda riflessa dalla lente elide quella riflessa dalla lastra.



L'interferenza. Come le persone, le onde quando si incontrano possono tendere o a rinforzarsi o a indebolirsi reciprocamente.



L'interferenza in una pozza d'acqua. Il fenomeno dell'interferenza si manifesta nella vita quotidiana sugli specchi d'acqua, dalle pozzanghere agli oceani.

Nel XIX secolo, questa fu considerata una conferma della teoria ondulatoria della luce e una confutazione della teoria corpuscolare. Ma all'inizio del XX secolo Einstein mostrò che l'effetto fotoelettrico (oggi utilizzato nei televisori e nelle macchine fotografiche digitali) poteva essere spiegato ammettendo che una particella, o quanto di luce, colpisse un atomo e ne espellesse un elettrone. Così la luce si comporta sia come una particella che come un'onda.

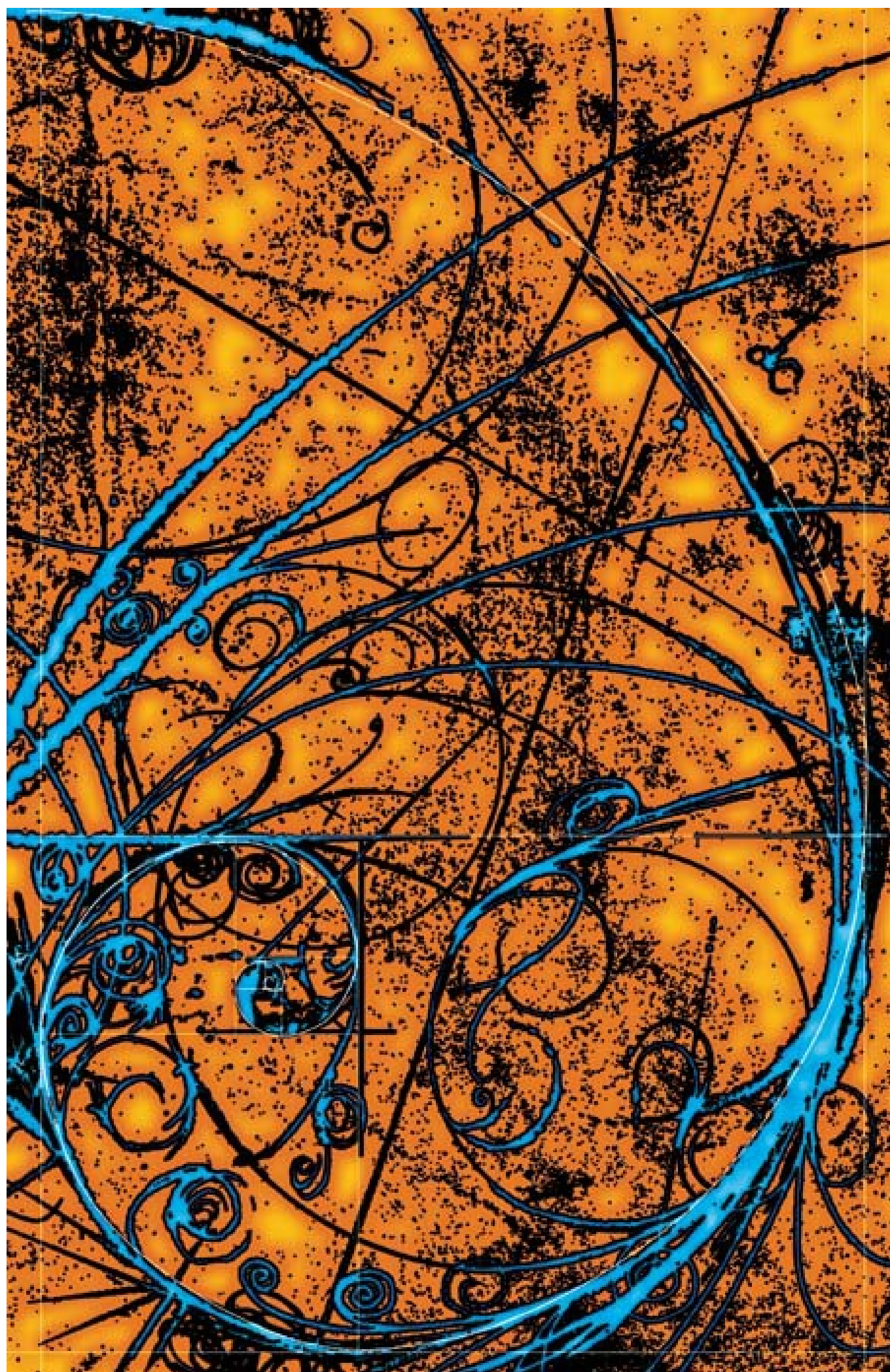
Il concetto di onda probabilmente ci è stato suggerito in origine dall'osservazione dell'oceano, o di una pozza dopo che vi è caduto un sasso. In effetti, se qualche volta avete provato a lasciar cadere due sassi in una pozza, probabilmente avete visto l'interferenza all'opera, come nell'immagine nella pagina precedente. Un comportamento analogo viene osservato anche negli altri liquidi, con l'eccezione forse del vino, qualora se ne sia bevuto troppo. Il concetto di particella era familiare per via di pietre, sassi e sabbia. Ma il dualismo onda-particella – l'idea cioè che un corpo possa essere descritto sia come una particella sia come un'onda – è altrettanto estraneo all'esperienza quotidiana quanto l'idea che si possa bere un pezzo di arenaria.

Dualismi di questo tipo – situazioni in cui due teorie diverse descrivono in modo preciso il medesimo fenomeno – sono compatibili con il realismo dipendente dai modelli. Ciascuna teoria è in grado di descrivere e spiegare certe proprietà, e nessuna delle due può essere definita migliore o più reale dell'altra. Quanto alle leggi che governano l'universo, possiamo dire questo: sembra che non vi sia nessun modello matematico capace di descrivere da solo ogni aspetto dell'universo. Come si è accennato nel capitolo iniziale, pare che invece ci si debba avvalere della rete di teorie chiamata teoria M. Ogni teoria di questa rete è in grado di descrivere i fenomeni in un certo ambito. Dovunque i loro ambiti si sovrappongono, le varie teorie della rete sono in accordo tra loro, cosicché si può dire che sono parti dello stesso complesso teorico. Ma nessuna teoria della rete può descrivere da

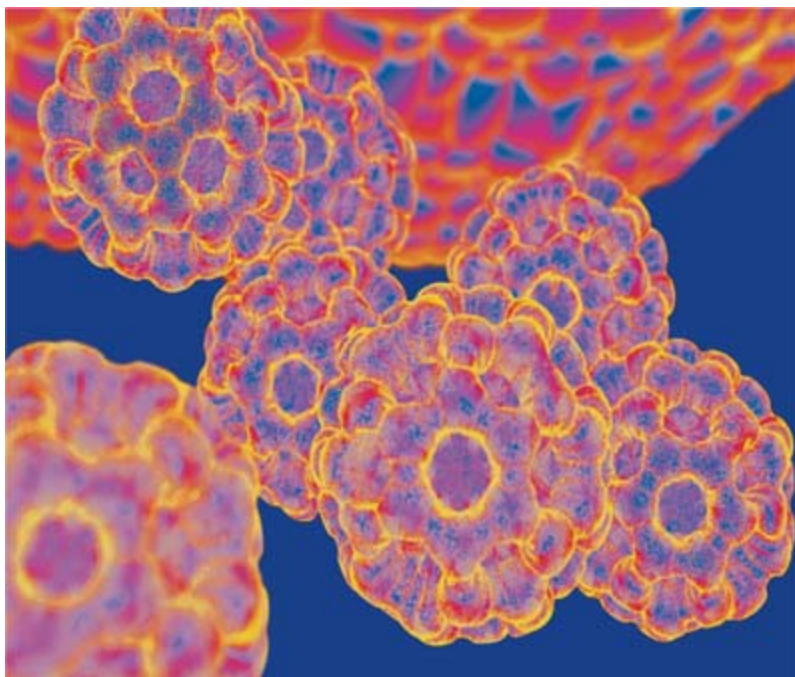
sola ogni aspetto dell'universo: tutte le forze fondamentali, le particelle che sono soggette a tali forze, e la struttura spaziotemporale in cui tutto ciò si svolge. Sebbene questa situazione non realizzi il classico sogno dei fisici di un'unica teoria unitaria, è accettabile nel contesto del realismo dipendente dai modelli.

Torneremo a discutere del dualismo e della teoria M nel V capitolo, ma prima ci occuperemo di un principio fondamentale su cui si basa la moderna concezione della natura: la teoria quantistica, e in particolare la formulazione di tale teoria in termini delle cosiddette «storie alternative». In questa formulazione, l'universo non ha un'unica esistenza o storia; al contrario, tutte le possibili versioni dell'universo esistono simultaneamente in quella che è chiamata sovrapposizione quantistica. Ciò può apparire stravagante come la teoria in cui il tavolo scompare ogni volta che usciamo dalla stanza, ma in questo caso la teoria ha superato tutte le verifiche sperimentali cui nel tempo è stata sottoposta.

IV
STORIE ALTERNATIVE

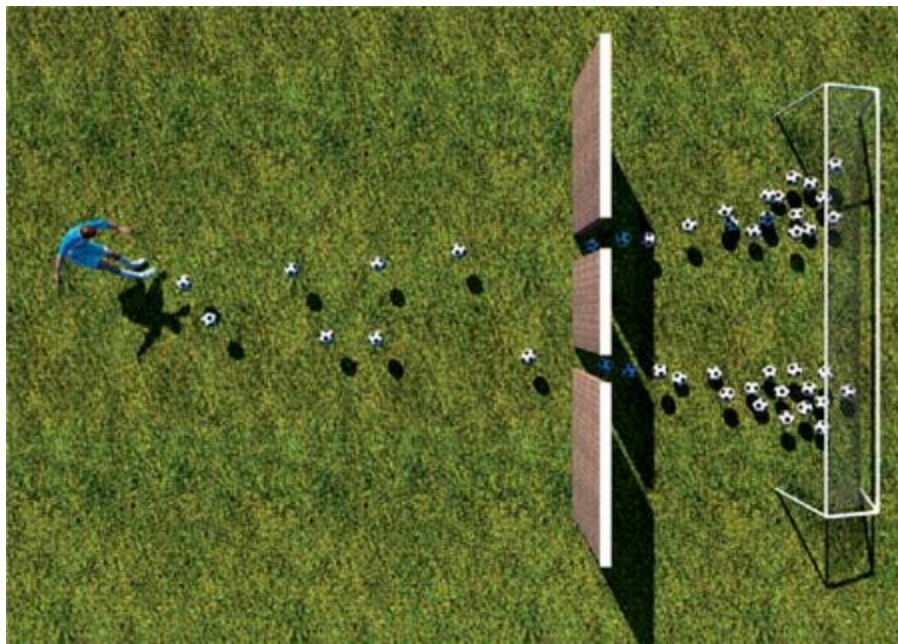


Nel 1999 in Austria un gruppo di fisici sparò una serie di molecole a forma di pallone da calcio contro una barriera. Si trattava di molecole, ciascuna formata da sessanta atomi di carbonio, chiamate a volte *buckyballs*, in onore dell'architetto Buckminster Fuller che costruiva edifici di quella forma. Le cupole geodetiche di Fuller erano probabilmente i più grandi oggetti a forma di pallone esistenti. Le *buckyballs* erano i più piccoli. La barriera contro cui gli scienziati le proiettavano presentava in realtà due fenditure attraverso le quali le *buckyballs* potevano passare. Al di là della barriera i fisici avevano disposto l'equivalente di uno schermo per rivelare e contare le molecole che la superavano.



Buckyballs. Le *buckyballs* sono simili a microscopici palloni da calcio fatti di atomi di carbonio.

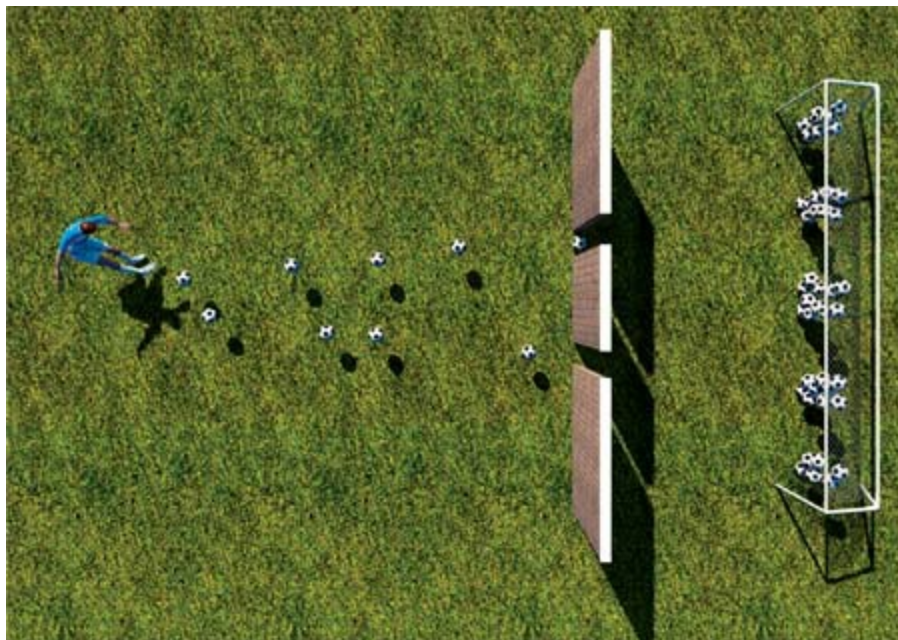
Se dovessimo allestire un esperimento analogo con veri palloni, avremmo bisogno di un giocatore magari con una mira meno precisa ma con la capacità di lanciare i palloni sempre con la velocità scelta da noi. Collocheremmo questo calciatore davanti a una parete in cui ci sono due fenditure. Oltre la parete, e parallela a essa, disporremo una porta molto lunga. Gran parte dei tiri del giocatore colpirebbero la parete rimbalzando all'indietro, ma alcuni passerebbero da un'apertura o dall'altra ed entrerebbero in porta. Se le aperture fossero appena più larghe del diametro dei palloni, dall'altra parte uscirebbero due flussi altamente collimati. Se le aperture fossero un po' più ampie, ciascun flusso si allargherebbe un po' a ventaglio, come mostra la figura qui sotto.



Calcio verso una parete a due fenditure. Un giocatore che calciasse palloni verso le fenditure aperte in una parete produrrebbe una distribuzione ovvia.

Si noti che se chiudessimo uno dei varchi, il corrispondente flusso di palloni non passerebbe più, ma non si avrebbe nessun effetto sull'altro flusso. Se riapriremo il secondo varco, aumenterebbe il numero dei palloni che arrivano in ogni dato punto al di là della parete, perché ci sarebbero tutti i palloni che passavano attraverso il varco che era rimasto aperto, e in più altri palloni provenienti dal varco appena riaperto. In altre parole, ciò che si osserva con entrambi i varchi aperti è la somma di ciò che si osserva con il primo varco aperto e il secondo chiuso e di ciò che si osserva con il primo varco chiuso e il secondo aperto. Questa è la realtà a cui siamo abituati nella vita quotidiana. Ma non è quello che i ricercatori austriaci videro quando spararono le loro molecole.

Nell'esperimento effettuato in Austria, l'apertura del secondo varco aumentava effettivamente il numero delle molecole che arrivavano in certi punti dello schermo, ma diminuiva il numero in altri punti, come nella figura qui sotto. Anzi, c'erano punti in cui non arrivava nessuna *buckyball* quando entrambe le fenditure erano aperte, ma ne arrivavano quando era aperta soltanto una o l'altra delle fenditure. Sembra molto strano. Come è possibile che l'apertura di un secondo varco faccia arrivare meno molecole in certi punti?



Calcio con buckyballs. Quando vengono sparati palloni da calcio molecolari verso le fenditure aperte in uno schermo, la distribuzione riflette strane leggi quantistiche.

Possiamo farci un'idea della risposta scendendo nei particolari. Nell'esperimento, molti dei palloni molecolari arrivavano in un punto posto a metà strada tra le due posizioni dove ci si sarebbe aspettato che arrivassero se fossero passati dall'una o dall'altra fenditura. A una certa distanza da questa posizione centrale arrivavano pochissime molecole, ma ancora un po' più in là si osservavano di nuovo altri arrivi. Questa distribuzione non è la somma delle distribuzioni che si formano quando l'una o l'altra delle fenditure sono aperte separatamente, ma vi si può riconoscere l'aspetto caratteristico delle onde in interferenza che abbiamo visto nel III capitolo. Le aree in cui non arrivano molecole corrispondono a regioni in cui le onde emesse dalle due fenditure giungono sfasate, e producono interferenza distruttiva; le aree in cui arrivano molte molecole corrispondono a regioni in cui le onde giungono in fase, e producono interferenza costruttiva.

Nei primi due millenni circa del pensiero scientifico, l'esperienza ordinaria e l'intuizione costituivano la base della spiegazione teorica. Ma con il progresso della tecnologia e l'ampliamento della gamma di fenomeni che si era in grado di osservare, si è cominciato a scoprire che la natura si comportava in modi che erano sempre meno conformi alla nostra esperienza quotidiana e quindi alla nostra intuizione, come mette in evidenza l'esperimento con le *buckyballs*. Tale esperimento è tipico del genere di fenomeni che non possono essere ricompresi nella scienza classica ma sono descritti da quella che è detta fisica quantistica. In effetti, Richard Feynman scrisse che un esperimento delle due fenditure come quello che abbiamo appena descritto «contiene tutto il mistero della meccanica quantistica».

I principi della fisica dei quanti furono elaborati nei primi decenni del XX secolo, in seguito alla scoperta che la teoria newtoniana era inadeguata alla descrizione della natura a livello atomico o subatomico. Le teorie fisiche fondamentali descrivono le forze di natura e il modo in cui i corpi vi rispondono. Le teorie classiche come quella di Newton sono costruite su una base che riflette l'esperienza quotidiana, in cui gli oggetti materiali hanno un'esistenza individuale, possono essere localizzati in posizioni definite, seguono traiettorie ben determinate, e così via. La fisica quantistica fornisce una struttura che consente di comprendere come la natura operi su scala atomica e

subatomica, ma, come vedremo meglio più avanti, impone uno schema concettuale completamente diverso, in cui posizione, traiettoria e perfino passato e futuro di un corpo non sono rigorosamente determinati. Le teorie quantistiche di forze come la gravità o l'interazione elettromagnetica sono costruite nell'ambito di tale schema.

Ma teorie edificate su una base concettuale tanto estranea alla vita quotidiana sono in grado di spiegare anche gli eventi dell'esperienza ordinaria, di cui la fisica classica forniva un modello così preciso? La risposta è sì, perché noi e ciò che ci circonda siamo strutture composite, fatte da un numero inconcepibilmente grande di atomi, maggiore del numero delle stelle presenti nell'universo osservabile. E benché gli atomi componenti obbediscano ai principi della fisica quantistica, si può dimostrare che i grandi aggregati che formano i palloni da calcio, le rape e i jumbo jet – nonché i nostri corpi – riescono a evitare la diffrazione nel passare attraverso le fenditure. Così, sebbene i componenti dei corpi ordinari obbediscano alla fisica quantistica, le leggi di Newton costituiscono una teoria efficace che descrive con grande precisione il comportamento delle strutture composite che formano il nostro mondo di tutti i giorni.

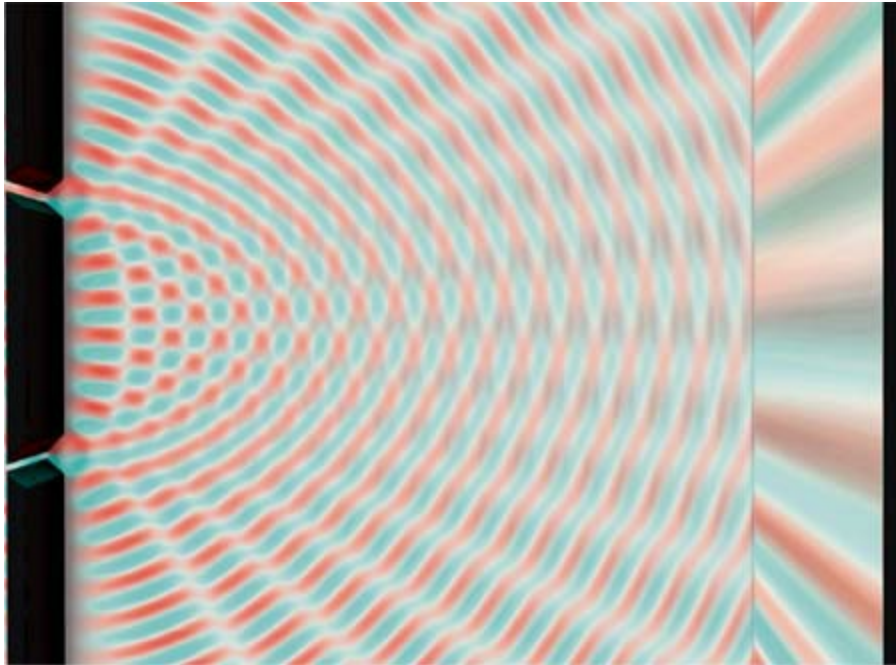
Potrebbe sembrare strano, ma nella scienza ci sono molti casi in cui un grande aggregato appare comportarsi diversamente da quanto fanno i suoi singoli componenti. Le reazioni di un singolo neurone sono ben poco indicative di quelle del cervello umano, e avere informazioni su una molecola d'acqua non dice molto sul comportamento di un lago. Nel caso della teoria quantistica, i fisici stanno ancora cercando di chiarire nei particolari come le leggi di Newton emergano dal dominio quantistico. Ciò che sappiamo è che i componenti di tutti i corpi obbediscono alle leggi della fisica quantistica, mentre le leggi di Newton costituiscono una buona approssimazione per descrivere il modo in cui si comportano i corpi macroscopici formati da quei componenti quantistici.

Le predizioni della teoria newtoniana pertanto sono in accordo con la concezione della realtà cui tutti perveniamo facendo esperienza del mondo che ci circonda. Ma i singoli atomi e le singole molecole operano in una maniera profondamente diversa da quanto avviene nella nostra esperienza quotidiana. La fisica quantistica è un nuovo modello della realtà che ci dà una descrizione di tale universo. Si tratta di una descrizione in cui molti concetti fondamentali per la nostra comprensione intuitiva della realtà non hanno più significato.

L'esperimento delle due fenditure fu eseguito per la prima volta con delle particelle nel 1927 da Clinton Davisson e Lester Germer, due fisici sperimentali dei Laboratori Bell che stavano studiando come un fascio di elettroni – oggetti molto più semplici delle *buckyballs* – interagiscono con un cristallo di nichel. Il fatto che particelle materiali quali gli elettroni si comportino come onde d'acqua costituisce il miglior esempio del tipo di osservazioni sperimentali sbalorditive che hanno ispirato la teoria quantistica. Poiché questo comportamento non si osserva su scala macroscopica, gli scienziati a lungo si sono chiesti fino a che dimensioni e grado di complessità potesse arrivare un corpo pur continuando a esibire proprietà ondulatorie. Farebbe sensazione se si potesse riprodurre questo effetto con delle persone o con un ippopotamo, ma, come si è detto, in generale quanto più grande è un corpo tanto meno evidenti e significativi sono gli effetti quantistici. Quindi è improbabile che un animale rinchiuso passi come un'onda attraverso le sbarre della sua gabbia. E tuttavia i fisici sperimentali hanno osservato il comportamento ondulatorio con particelle di dimensioni sempre maggiori. Gli scienziati sperano di ripetere in futuro l'esperimento delle *buckyballs* usando un virus, che non soltanto è molto più grande ma è anche considerato da alcuni un essere vivente.

Ci sono alcuni aspetti della fisica quantistica che è necessario conoscere per comprendere le

argomentazioni che proporremo nei capitoli successivi. Uno di quelli essenziali è il dualismo onda-particella. Che le particelle materiali si comportassero come un'onda fu una sorpresa per tutti. Che la luce si comporti come un'onda non sorprende più nessuno. Il comportamento ondulatorio della luce ci appare naturale ed è stato considerato un fatto acquisito per quasi due secoli. Se si proietta un raggio di luce sulle due fenditure dell'esperimento rappresentato qui sotto, ne usciranno due onde che si incontreranno sullo schermo. In certe posizioni le rispettive creste e i rispettivi ventri coincideranno e formeranno una macchia luminosa; in altre, le creste di un raggio si sovrapporranno ai ventri dell'altro, elidendoli e producendo un'area scura. Il fisico inglese Thomas Young eseguì questo esperimento nei primi anni del XIX secolo, convincendo i contemporanei che la luce era un'onda e non, come aveva creduto Newton, un insieme di particelle.



*L'esperimento di Young. La distribuzione delle *buckyballs* era familiare perché compariva nella teoria ondulatoria della luce.*

Si potrebbe allora concludere che Newton si sbagliava nel sostenere che la luce non fosse un'onda, eppure il grande scienziato aveva ragione quando affermava che la luce può comportarsi come se fosse composta di particelle. Oggi chiamiamo tali particelle fotoni. Proprio come noi siamo formati da un grande numero di atomi, così la luce che vediamo nella vita di tutti i giorni è composita, nel senso che è fatta di un gran numero di fotoni: anche una lampadina da 1 watt ne emette un miliardo di miliardi ogni secondo. Solitamente i singoli fotoni non si possono vedere, ma in laboratorio è possibile generare un fascio di luce così debole da ridursi a un flusso di fotoni isolati, che possono essere rivelati individualmente come si rivelano singoli elettroni o *buckyballs*. Ed è possibile ripetere l'esperimento di Young utilizzando un raggio così diradato che i fotoni raggiungono la barriera uno alla volta, a intervalli di qualche secondo l'uno dall'altro. Se si procede in questo modo, e poi si sommano tutti gli impatti individuali registrati dallo schermo posto oltre la barriera, si trova che nell'insieme formano la medesima figura di interferenza che si sarebbe formata se avessimo effettuato l'esperimento di Davisson-Germer ma avessimo sparato gli elettroni (o le *buckyballs*) contro lo schermo uno alla volta. Per i fisici questa fu una rivelazione sbalorditiva: se le singole particelle interferiscono con se stesse, la natura ondulatoria della luce è proprietà non

soltanto di un fascio o di un grande aggregato di fotoni, ma anche delle particelle individuali.

Un altro dei cardini della fisica quantistica è il principio di indeterminazione, formulato dal fisico tedesco Werner Heisenberg nel 1927. Tale principio dice che la nostra capacità di misurare simultaneamente certi dati, come la posizione e la velocità di una particella, ha dei limiti. Secondo il principio di indeterminazione, per esempio, se si moltiplica l'incertezza della posizione di una particella per l'incertezza della sua quantità di moto (il prodotto della massa per la velocità), il risultato non può mai essere minore di una certa quantità fissa, chiamata costante di Planck. Sembra uno scioglilingua, ma la sostanza del principio può essere formulata in termini semplici: quanto più precisamente si misura la velocità, tanto meno precisamente si può misurare la posizione, e viceversa. Per esempio, se si dimezza l'incertezza della posizione, l'incertezza della velocità deve raddoppiare. È importante osservare anche che, a paragone con le unità di misura comuni come i metri, i chilogrammi e i secondi, la costante di Planck è molto piccola. In effetti, espressa in tali unità, il suo valore è all'incirca $6/10.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000$.



«Se questo è giusto, tutto quello che credevamo fosse un'onda è in realtà una particella, e tutto quello che credevamo fosse una particella è in realtà un'onda.»

Di conseguenza, se si localizza un oggetto macroscopico come un pallone da calcio, della massa di un terzo di chilogrammo, con un'incertezza non superiore a 1 millimetro in ogni direzione, si può ancora misurare la sua velocità con un'incertezza molto minore di un milionesimo di milionesimo di chilometro all'ora. Questo perché, in tali unità di misura, il pallone da calcio ha una massa di $1/3$, e l'incertezza nella sua posizione è $1/1000$. Nessuno dei due numeri rende conto di tutti gli zeri presenti nella costante di Planck, e quindi è l'incertezza della velocità a doverlo fare (il che significa che sarà molto piccola). Ma nelle medesime unità l'elettrone ha una massa pari a $0,000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$, e quindi per gli elettroni la situazione è del tutto diversa. Se si misura la posizione di un elettrone con un'incertezza corrispondente all'incirca alle dimensioni di un atomo, il principio di indeterminazione stabilisce che non è possibile conoscere la velocità della

particella con un'incertezza minore di circa 1000 chilometri al secondo, il che significa che la misura non sarà affatto precisa.

Secondo la fisica quantistica, indipendentemente da quanta informazione otteniamo e da quanto grandi siano le nostre capacità di calcolo, gli esiti dei processi fisici non possono essere predetti con certezza perché non sono *determinati* in modo certo. Al contrario, dato lo stato iniziale di un sistema, la natura ne determina lo stato futuro tramite un processo che è fondamentalmente incerto. In altre parole, la natura non impone l'esito di un qualsiasi processo o esperimento, neppure nella più semplice delle situazioni. Essa consente piuttosto un certo numero di eventualità diverse, ciascuna con una data probabilità di realizzarsi. È come se, per parafrasare Einstein, Dio gettasse i dadi prima di decidere il risultato di ogni processo fisico. L'idea non andava a genio ad Einstein, che così, pur essendo uno dei padri della fisica quantistica, finì per assumere un atteggiamento critico nei suoi confronti.

Potrebbe sembrare che la fisica quantistica mini l'idea che la natura sia governata da leggi, ma non è così. La teoria ci porta invece ad accettare una nuova forma di determinismo: dato lo stato di un sistema a un certo istante, le leggi di natura determinano le *probabilità* di vari corsi futuri e passati, invece di determinare con certezza *il* futuro e *il* passato. Anche se a qualcuno questo non piace, gli scienziati devono accettare le teorie che sono in accordo con l'esperimento, e non restare ancorati ai loro preconcetti.

Ciò che la scienza chiede a una teoria è di essere verificabile. Se la natura probabilistica delle predizioni della fisica quantistica significasse che è impossibile confermare tali predizioni, le teorie quantistiche non sarebbero considerate valide. Ma nonostante il carattere probabilistico delle loro predizioni, possiamo senz'altro verificare queste teorie. Per esempio, possiamo ripetere più volte un esperimento e confermare che la frequenza dei vari risultati è conforme alle probabilità predette. Consideriamo l'esperimento delle *buckyballs*: la fisica quantistica ci dice che nulla è mai localizzato in un punto ben definito perché, se lo fosse, l'incertezza della quantità di moto dovrebbe essere infinita. In realtà, secondo questa teoria, ogni particella ha una certa probabilità di essere osservata in qualunque luogo dell'universo. Così, anche se le probabilità di trovare un dato elettrone nel dispositivo sperimentale delle due fenditure sono molto alte, ci sarà sempre una certa probabilità di trovarlo invece dall'altra parte della stella Alpha Centauri, oppure nel polpettone servito alla mensa del vostro ufficio. Di conseguenza, se date un calcio a una *buckyball* quantistica e la fate volare via, per quanto siate abili o la sappiate lunga non sarete mai in grado di dire in anticipo dove ricadrà di preciso. Ma se ripetete molte volte tale esperimento, i dati che otterrete rifletteranno la probabilità di trovare la palla nelle varie posizioni, e gli esperimenti hanno confermato che i risultati sono in accordo con le predizioni della teoria.

È importante capire che le probabilità della fisica quantistica non sono come le probabilità della fisica newtoniana o della vita quotidiana. Possiamo rendercene conto confrontando le distribuzioni generate dal flusso costante di *buckyballs* lanciate contro lo schermo con la distribuzione dei buchi prodotti dai giocatori di freccette che mirano al centro del bersaglio. Sempre che i giocatori non abbiano bevuto troppa birra, le probabilità di arrivo di una freccetta sono massime vicino al centro, e diminuiscono via via che ce ne si allontana. Come nel caso delle *buckyballs*, ogni data freccetta può arrivare in qualunque punto, e con il tempo si formerà una distribuzione di fori che riflette le probabilità implicate. Nella vita quotidiana potremmo benissimo descrivere la situazione dicendo che una freccetta ha una certa probabilità di arrivare nei vari punti; ma se lo diciamo, è soltanto

perché, diversamente dal caso delle *buckyballs*, la nostra conoscenza delle condizioni del suo lancio è incompleta. Potremmo migliorare la nostra descrizione se conoscessimo esattamente il modo in cui il giocatore ha lanciato la freccetta, la sua direzione, il suo moto di rotazione, la sua velocità e così via. In linea di principio, quindi, potremmo predire dove arriverà la freccetta con una precisione grande quanto vogliamo. L'uso di una terminologia probabilistica per descrivere l'esito degli eventi nella vita quotidiana è pertanto un riflesso non della natura intrinseca del processo, ma soltanto della nostra ignoranza di certi suoi aspetti.

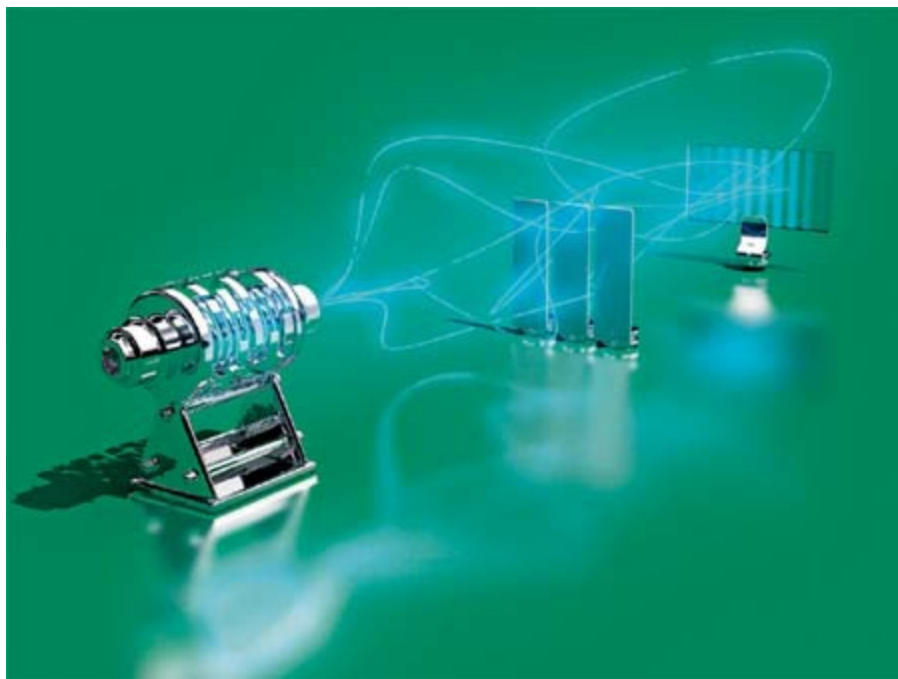
Le probabilità delle teorie quantistiche sono diverse. Il modello quantistico della natura comprende principi che contraddicono non soltanto la nostra esperienza ordinaria ma anche la nostra concezione intuitiva della realtà. Chi trova tali principi strani o difficili da accettare è in buona compagnia, quella di grandi fisici come Einstein e lo stesso Feynman, la cui descrizione della teoria presenteremo tra poco. Infatti una volta Feynman scrisse: «Credo di poter affermare con certezza che nessuno comprende la meccanica quantistica». Ma la fisica quantistica è in accordo con l'osservazione. Non ha mai fallito un test, ed è stata controllata più di qualunque altra teoria scientifica.

Negli anni '40 Richard Feynman ebbe un'intuizione sorprendente riguardo alla differenza tra mondo quantistico e mondo newtoniano. Al centro del suo interesse c'era la questione di come si forma la figura di interferenza nell'esperimento delle due fenditure. Si rammenti che la figura che si osserva quando si sparano le molecole con entrambe le fenditure aperte non è la somma delle figure che si formano quando si effettua l'esperimento due volte, una con solo la prima fenditura aperta, e una con solo l'altra fenditura aperta. Quando entrambe le fenditure sono aperte si osserva invece una serie di strisce chiare e scure, dove quelle scure sono le regioni in cui non arrivano particelle. Ciò significa che particelle che sarebbero arrivate nella zona della striscia scura se, per esempio, fosse stata aperta soltanto la fenditura 1, non vi arrivano quando è aperta anche la fenditura 2. Sembrerebbe che, in qualche punto del percorso tra la sorgente e lo schermo, le particelle acquisiscano informazione su entrambe le fenditure. Questo tipo di comportamento è radicalmente diverso da quello che sembrano avere gli oggetti della vita quotidiana, dove una palla seguirebbe una traiettoria passando da una delle aperture e non sarebbe influenzata dalla situazione dell'altra.

Secondo la fisica newtoniana – e anche nel nostro esperimento, se lo effettuassimo con palloni da calcio invece che con delle molecole – ogni particella segue un unico percorso ben definito dalla sorgente allo schermo. In questa descrizione non c'è spazio per una deviazione in cui la particella durante il tragitto passi nei dintorni di ciascuna delle fenditure. Viceversa, secondo il modello quantistico, la particella non ha una posizione definita nell'intervallo di tempo in cui si trova tra il punto di partenza e quello di arrivo. Feynman si rese conto che non è necessario interpretare questo stato di cose nel senso che le particelle non percorrono *nessuna* traiettoria nel loro viaggio tra sorgente e schermo. Potrebbe invece significare che le particelle seguono *ogni* possibile traiettoria che connette quei punti. Questo, affermò Feynman, è ciò che rende la fisica quantistica diversa da quella newtoniana. La situazione di entrambe le fenditure ha importanza perché, invece di seguire un unico percorso definito, le particelle seguono tutti i percorsi, e li seguono tutti *simultaneamente*! Sembra fantascienza, ma non lo è. Feynman propose una formulazione matematica – la cosiddetta somma di Feynman sulle storie – che riflette quest'idea e riproduce tutte le leggi della fisica quantistica. Nella teoria di Feynman la matematica e la descrizione fisica sono differenti da quelle della formulazione originaria della meccanica quantistica, ma le predizioni sono le stesse.

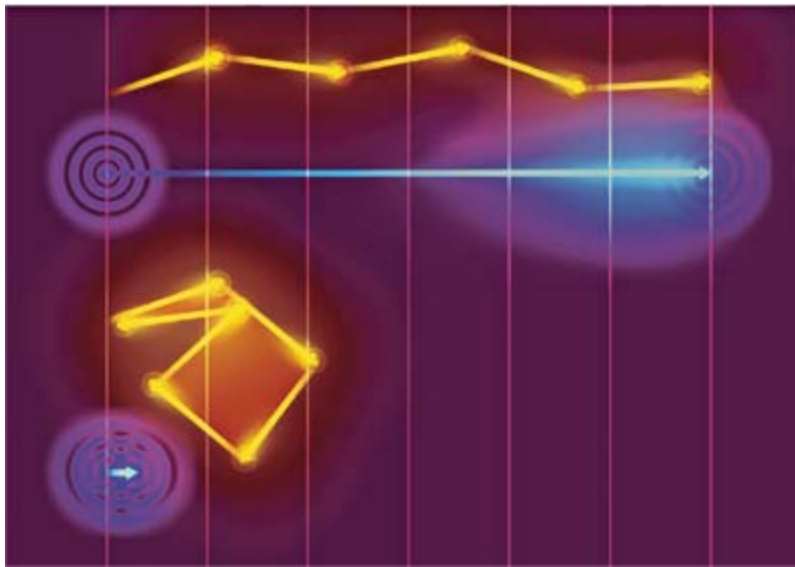
Relativamente all'esperimento delle due fenditure, le idee di Feynman significano che le particelle seguono traiettorie che passano soltanto da una fenditura o soltanto dall'altra; traiettorie che passano dalla prima fenditura, tornano indietro dalla seconda e poi ripassano dalla prima; traiettorie che passano dal ristorante dove si sta servendo quel grosso gambero al curry, e poi girano più volte intorno a Giove prima di arrivare a destinazione; e perfino traiettorie che percorrono avanti e indietro tutto l'universo. Questo, secondo Feynman, spiega come facciano le particelle ad acquisire informazioni su quali fenditure siano aperte: se una di esse è aperta, la particella segue delle traiettorie che vi passano. Quando entrambe le fenditure sono aperte, le traiettorie in cui la particella passa da una fenditura possono interagire con le traiettorie in cui essa passa dall'altra, generando l'interferenza. Potrebbe sembrare stravagante, ma ai fini di gran parte della fisica fondamentale che si fa oggi – e ai fini di questo libro – la formulazione di Feynman si è dimostrata più utile di quella originale.

La concezione di Feynman della realtà quantistica è essenziale per comprendere le teorie che presenteremo tra breve, e quindi vale la pena di dedicare un po' di tempo a farci un'idea di come funzioni. Immaginiamo un semplice processo in cui una particella si trova inizialmente in una posizione A e si muove liberamente. Nel modello newtoniano la particella si muoverà lungo una linea retta. Trascorso un certo tempo ben definito, la troveremo in una ben definita posizione B lungo tale linea. Nel modello di Feynman una particella quantistica prova ogni percorso che connetta A e B, e a ciascuno di essi viene associato un numero chiamato fase. La fase rappresenta la posizione nel ciclo di un'onda, cioè indica se l'onda è a un massimo o a un minimo o in una qualche precisa posizione intermedia. La regola matematica di Feynman per il calcolo della fase fa sì che quando si sommano le onde di tutte le traiettorie si ottenga l'«ampiezza di probabilità» che la particella, partendo da A, arrivi in B. Il quadrato dell'ampiezza di probabilità fornisce poi l'effettiva probabilità che la particella arrivi in B.



Traiettorie di una particella. La formulazione di Feynman della teoria quantistica fornisce una descrizione che spiega perché particelle come le *buckyballs* e gli elettroni formino figure di interferenza quando vengono fatti passare attraverso le fenditure di uno schermo.

La fase con cui ciascun singolo percorso contribuisce alla somma di Feynman (e quindi alla probabilità che la particella vada da A a B) si può rappresentare intuitivamente come una freccia di lunghezza fissa ma che può essere orientata in qualunque direzione. Per sommare due fasi si dispone la freccia che rappresenta una fase consecutivamente alla freccia che rappresenta l'altra (cioè con la coda dell'una coincidente con la punta dell'altra), in modo da ottenere una nuova freccia che rappresenta la somma. Per sommare più fasi basta iterare il procedimento. Si noti che quando le fasi sono allineate, la freccia che rappresenta la somma può essere abbastanza lunga. Ma se le fasi sono orientate in direzioni diverse, tendono a elidersi nella somma, dando come risultato una freccia che può essere anche molto piccola.



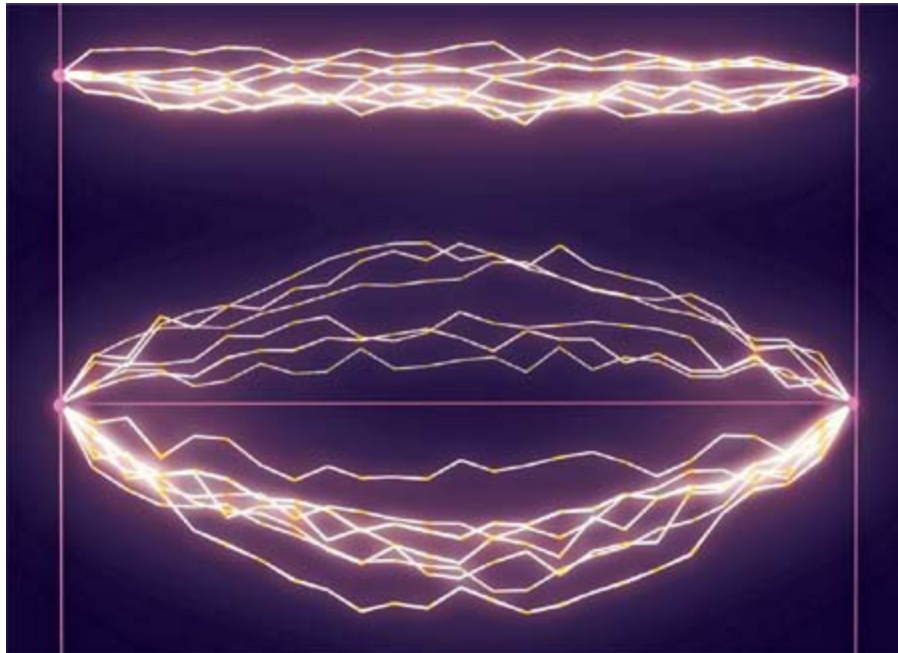
La somma delle traiettorie di Feynman. Gli effetti di differenti traiettorie di Feynman possono rafforzarsi o attenuarsi reciprocamente, proprio come accade alle onde. Le frecce gialle rappresentano le fasi da sommare. Le linee blu rappresentano la loro somma, cioè una linea che va dalla coda della prima freccia alla punta dell'ultima. Nell'immagine in basso le frecce hanno direzioni diverse e quindi la loro somma, la linea blu, è molto corta.

Il procedimento di Feynman per il calcolo dell'ampiezza di probabilità che una particella inizialmente nella posizione A arrivi nella posizione B, prevede che si sommino le fasi, ossia le frecce, associate a ogni traiettoria che va da A a B. C'è un numero infinito di traiettorie, il che rende un po' complicato l'aspetto matematico, ma il procedimento funziona. Alcune delle traiettorie sono rappresentate nella figura qui sopra.

La teoria di Feynman fornisce una descrizione particolarmente chiara del modo in cui un'immagine newtoniana del mondo può scaturire dalla fisica quantistica, che sembra assai diversa. Secondo la teoria di Feynman, le fasi associate a ciascuna traiettoria dipendono dalla costante di Planck, e poiché questa è così piccola, quando si sommano i contributi di traiettorie vicine tra loro, le fasi normalmente variano in modo incontrollato e quindi, come nella figura qui sotto, tendono ad avere somma zero. Ma la teoria prevede anche che vi siano certe traiettorie per cui le fasi tendono ad allinearsi, cosicché queste traiettorie sono favorite, danno cioè un maggiore contributo al comportamento osservato della particella. Si vede che, per i corpi grandi, traiettorie molto simili a quella prevista dalla teoria di Newton avranno fasi analoghe e si rafforzeranno dando i contributi di gran lunga maggiori alla somma, cosicché l'unica destinazione che abbia una probabilità

effettivamente superiore a zero è quella predetta dalla teoria newtoniana, e anzi tale destinazione ha una probabilità molto vicina a 1. Per questo i corpi grandi si muovono proprio come previsto dalla teoria di Newton.

Fin qui abbiamo discusso le idee di Feynman nel contesto dell'esperimento delle due fenditure. In tale esperimento si sparano particelle contro una barriera con delle fenditure e si misura la loro posizione all'arrivo su uno schermo situato al di là della barriera. Più in generale, la teoria di Feynman ci consente di predire la probabile evoluzione, invece che di una singola particella, di un «sistema», che potrebbe essere una particella, un insieme di particelle o anche l'intero universo. Tra lo stato iniziale del sistema e le nostre successive misurazioni delle sue proprietà, tali proprietà evolvono in un certo modo, che i fisici chiamano la «storia» del sistema. Nell'esperimento delle due fenditure, per esempio, la storia della particella è semplicemente la sua traiettoria. Feynman dimostrò che, proprio come nell'esperimento delle due fenditure la probabilità di osservare la particella arrivare in un qualsiasi dato punto dipende da tutte le traiettorie che potrebbero averla portata là, così per un sistema generico, la probabilità di una qualsiasi osservazione è determinata da tutte le possibili storie che potrebbero aver condotto a tale osservazione. Per questa ragione il suo metodo è detto «somma sulle storie» o formulazione della fisica quantistica in termini di «storie alternative».



Le traiettorie da A a B. La traiettoria «classica» tra due punti è un segmento di retta. Le fasi delle traiettorie che sono vicine al percorso classico tendono a rafforzarsi reciprocamente, mentre le fasi delle traiettorie più lontane da tale percorso tendono a elidersi.

Ora che ci siamo fatti un'idea dell'impostazione di Feynman, è il momento di prendere in considerazione un altro principio quantistico fondamentale di cui ci serviremo più avanti: il principio secondo il quale osservare un sistema implica necessariamente di alterarne il corso. Ma non possiamo guardare con discrezione senza interferire, come facciamo quando un nostro superiore ha uno schizzo di senape sul mento? No. Secondo la fisica quantistica non è possibile osservare «e basta» qualcosa. In altre parole, questa teoria ammette che per compiere un'osservazione si deve interagire con il corpo che si sta osservando. Per esempio, per vedere, nel senso ordinario del termine, un corpo gli proiettiamo contro della luce. Illuminare una zucca ovviamente avrà uno scarso effetto su di essa. Ma proiettare una luce anche fioca su una minuscola particella quantistica – ossia

spararle contro dei fotoni – ha invece un effetto apprezzabile, e in laboratorio si dimostra che modifica i risultati degli esperimenti proprio nel modo descritto dalla fisica quantistica.

Supponiamo di inviare, come in precedenza, un fascio di particelle verso la barriera nell'esperimento delle due fenditure, e di raccogliere i dati sul primo milione di particelle che passano oltre. Quando si registra il numero di particelle che arrivano nei vari punti di rivelazione, i dati riproducono la figura di interferenza riportata a pagina 61, e quando si sommano le fasi associate a tutte le traiettorie possibili che vanno dal punto di partenza A di una particella al punto di rivelazione B, si trova che la probabilità calcolata di arrivo nei vari punti è in accordo con quei dati.

Ora supponiamo di ripetere l'esperimento, questa volta illuminando le fenditure, in modo da conoscere un punto intermedio, C, dal quale la particella è passata (C è la posizione dell'una o dell'altra fenditura). Questa è detta informazione su «quale percorso», perché ci dice di ciascuna particella se è andata da A alla fenditura 1 e poi in B, oppure da A alla fenditura 2 e poi in B. Dal momento che adesso sappiamo da quale fenditura è passata ciascuna particella, le traiettorie considerate nella somma relativa a tale particella ora comprenderanno soltanto quelle che passano dalla fenditura 1, o soltanto quelle che passano dalla fenditura 2. Non ne faranno mai parte sia quelle che passano dalla fenditura 1 sia quelle che passano dalla fenditura 2. Siccome Feynman spiegava la figura d'interferenza dicendo che le traiettorie passanti da una fenditura interferiscono con le traiettorie che passano dall'altra, se si accende una luce per determinare da quale fenditura passano le particelle, eliminando così l'alternativa, si farà scomparire la figura d'interferenza. Ed effettivamente, quando si esegue l'esperimento, l'accensione di una luce modifica i risultati trasformando la figura di interferenza di pagina 61 in una distribuzione come quella di pagina 60! Inoltre possiamo modificare l'esperimento impiegando luce molto fioca in modo che non tutte le particelle interagiscano con essa. In tal caso siamo in grado di ottenere informazione su «quale percorso» soltanto per qualche sottoinsieme delle particelle. Se poi suddividiamo i dati sugli arrivi delle particelle in base al fatto che abbiamo ottenuto o no l'informazione su «quale percorso», constatiamo che i dati relativi al sottoinsieme per il quale non abbiamo alcuna informazione su «quale percorso» formano una figura di interferenza, mentre quelli relativi al sottoinsieme per il quale abbiamo tale informazione non mostrano effetti di interferenza.

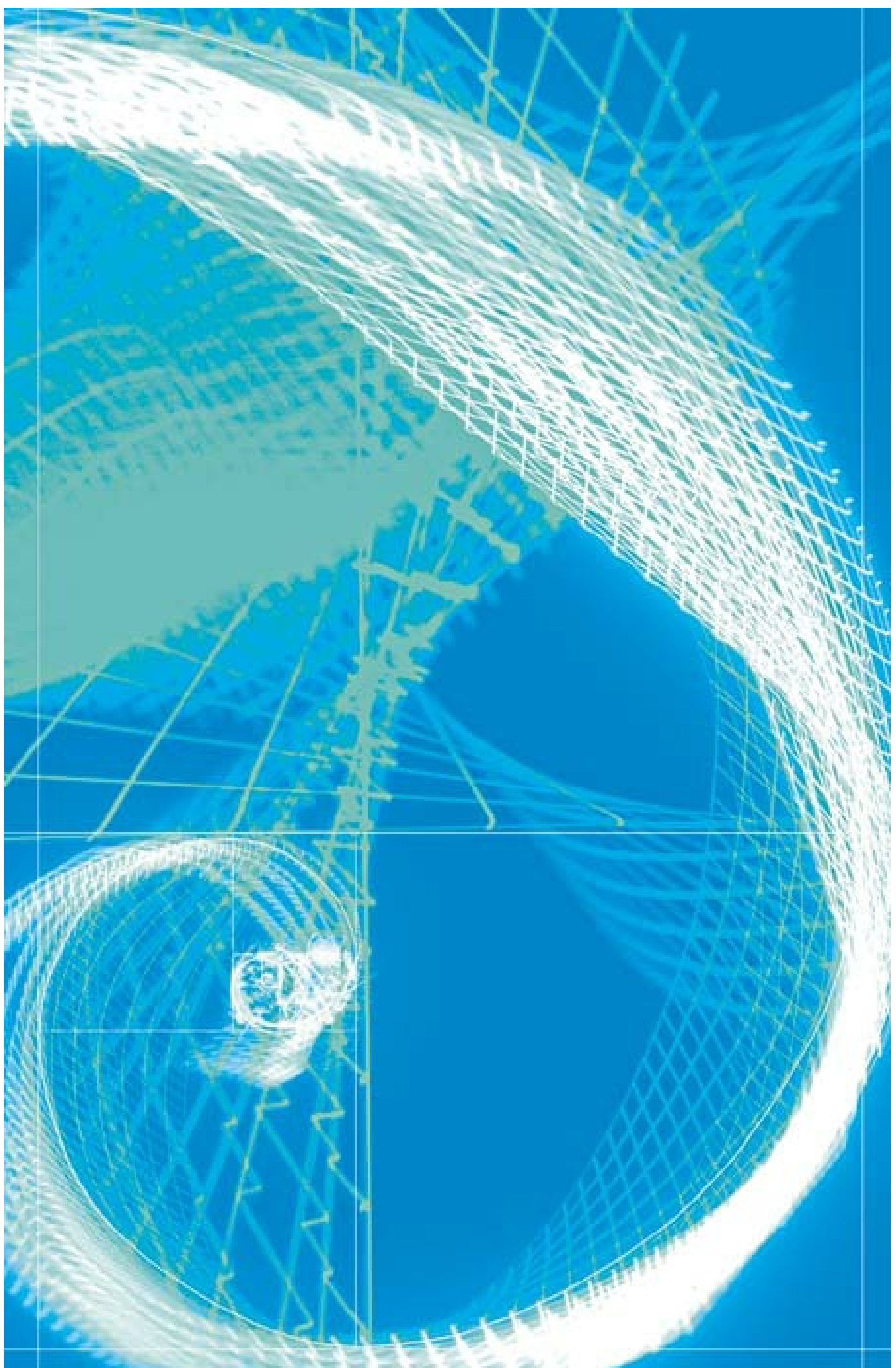
Quest'idea ha importanti implicazioni per la nostra concezione del «passato». Nella teoria newtoniana si assume che il passato esista come serie definita di eventi. Se vedete in frantumi sul pavimento quel bel vaso che avete comprato in Italia l'anno scorso, e il vostro bambino in piedi lì accanto con aria colpevole, potete ricostruire gli eventi che hanno condotto al malestro: i ditini che mollano la presa, il vaso che cade e va in mille pezzi quando tocca terra. In effetti, una volta che si hanno dati completi sul presente, le leggi di Newton consentono di calcolare una descrizione completa del passato. Ciò è coerente con la nostra idea intuitiva che il mondo abbia un passato ben definito, bello o brutto che sia. Può non esserci stato nessuno a osservare, ma il passato esiste con altrettanta certezza che se ne aveste scattato una serie di istantanee. Di una *buckyball* quantistica, invece, non si può dire che abbia seguito una traiettoria definita tra la sorgente e lo schermo. Potremmo localizzare la posizione di una *buckyball* osservandola, ma tra l'una e l'altra osservazione essa segue tutte le traiettorie. La fisica quantistica ci dice che per quanto accurata sia la nostra osservazione del presente, il passato (non osservato), come il futuro, è indefinito ed esiste soltanto come uno spettro di possibilità. L'universo, secondo la fisica quantistica, non ha un unico passato, un'unica storia.

Il fatto che il passato non abbia forma definita significa che le osservazioni che si compiono su un sistema nel presente ne influenzano il passato. Ciò è messo in risalto in modo piuttosto spettacolare da un tipo di esperimento escogitato dal fisico John Wheeler, detto esperimento a scelta ritardata. Schematicamente, un esperimento a scelta ritardata è simile all'esperimento delle due fenditure appena descritto, in cui si ha l'opzione di osservare la traiettoria seguita dalla particella, eccetto che ora si rinvia la decisione se osservare o no il percorso fino a un istante prima che la particella arrivi sullo schermo rivelatore.

Gli esperimenti a scelta ritardata forniscono dati identici a quelli che si ottengono quando si sceglie di avere (o di non avere) l'informazione su «quale percorso» osservando le fenditure. Ma in questo caso la traiettoria seguita dalla particella – vale a dire, il suo passato – è determinata molto dopo che è passata dalle fenditure e che, presumibilmente, ha dovuto «decidere» se passare da una sola fenditura, il che non produce interferenza, o da entrambe, il che la produce.

Wheeler prese in considerazione anche una versione cosmica dell'esperimento, in cui le particelle sono fotoni emessi da potenti quasar distanti miliardi di anni luce. Il raggio luminoso potrebbe essere suddiviso e avviato lungo due differenti percorsi e poi rifocalizzato in direzione della Terra dall'effetto di lente gravitazionale di una galassia interposta. Sebbene l'esperimento sia al di fuori della portata della tecnologia attuale, se si potesse raccogliere un numero sufficiente di fotoni di tale luce, questi fotoni dovrebbero formare una figura di interferenza. Ma, se si mettesse un dispositivo per ricavare informazione su «quale percorso» poco prima del punto di rivelazione, tale figura dovrebbe scomparire. La scelta se seguire una o entrambe le traiettorie in questo caso sarebbe stata compiuta miliardi di anni fa, prima che si formasse la Terra o magari anche il Sole, eppure con la nostra osservazione in laboratorio influenzeremmo la scelta.

In questo capitolo abbiamo illustrato la fisica quantistica servendoci dell'esperimento delle due fenditure. Nel seguito applicheremo la formulazione di Feynman della meccanica quantistica all'universo nel suo insieme. Vedremo che, come una particella, l'universo non ha un'unica storia, ma tutte le storie possibili, ciascuna con la propria probabilità; e che le nostre osservazioni del suo stato attuale influenzano il suo passato e determinano le sue differenti storie, proprio come le osservazioni delle particelle nell'esperimento delle due fenditure influenzano il passato delle particelle. Tale analisi mostrerà come le leggi di natura del nostro universo sorsero dal big bang. Ma prima di discutere come sorsero le leggi, parleremo un po' di che cosa siano tali leggi, e di alcuni degli enigmi che esse propongono.



La cosa più incomprensibile dell'universo è che sia comprensibile.

ALBERT EINSTEIN

L'universo è comprensibile perché è governato da leggi scientifiche; vale a dire che del suo comportamento si possono costruire modelli. Ma quali sono queste leggi o modelli? La prima forza a essere descritta in linguaggio matematico fu la gravità. La legge di gravitazione di Newton, pubblicata nel 1687, affermava che ogni corpo dell'universo attrae ogni altro corpo con una forza proporzionale alla sua massa. Ebbe un grande impatto sulla vita intellettuale dell'epoca perché mostrava per la prima volta che almeno un aspetto dell'universo poteva essere tradotto con precisione in un modello, e forniva l'apparato matematico per farlo. L'idea che esistano leggi di natura solleva questioni analoghe a quella per cui Galileo era stato dichiarato colpevole di eresia circa cinquant'anni prima. Per esempio, la Bibbia narra di come Giosuè pregasse perché il Sole e la Luna si fermassero nelle loro traiettorie in modo che la luce del giorno si prolungasse quanto bastava per finire di sconfiggere gli amorrei a Canaan. Secondo il libro di Giosuè (10.12-13), il Sole rimase fermo per quasi un giorno. Oggi sappiamo che ciò avrebbe significato che la Terra aveva smesso di ruotare su se stessa. Se la Terra si fosse fermata, secondo le leggi di Newton ogni cosa che non vi fosse stata ben fissata sarebbe rimasta in moto con la velocità originaria del pianeta (quasi 1700 chilometri all'ora all'equatore): un prezzo un po' alto da pagare per ritardare un tramonto. Tutto ciò non preoccupava affatto Newton, il quale, come abbiamo detto, credeva che Dio potesse intervenire sul funzionamento dell'universo, e lo facesse effettivamente.

Dopo la gravità, i primi aspetti dell'universo per cui si scoprì una legge o un modello furono le forze elettriche e magnetiche. Queste si comportano come la gravità, con l'importante differenza che due cariche elettriche o due magneti dello stesso tipo si respingono, mentre cariche o magneti di segno opposto si attirano. Le forze elettriche e magnetiche sono assai più intense della gravità, ma solitamente non le avvertiamo nella vita quotidiana perché un corpo macroscopico contiene numeri quasi uguali di cariche elettriche positive e negative. Ciò significa che le forze elettriche e magnetiche agenti tra due corpi macroscopici praticamente si elidono a vicenda, a differenza delle forze gravitazionali che si sommano tutte.

Le nostre attuali idee sull'elettricità e il magnetismo sono state elaborate nell'arco di circa un secolo, tra la metà del Settecento e la metà dell'Ottocento, allorché fisici di diversi paesi condussero approfonditi studi sperimentali di queste forze. Una delle scoperte più importanti fu quella che forze elettriche e magnetiche sono connesse: una carica elettrica in moto esercita una forza sui magneti, mentre una calamita in moto esercita una forza sulle cariche elettriche. Il primo a rendersi conto dell'esistenza di una qualche connessione fu il fisico danese Hans Christian Ørsted. Nel 1820, mentre

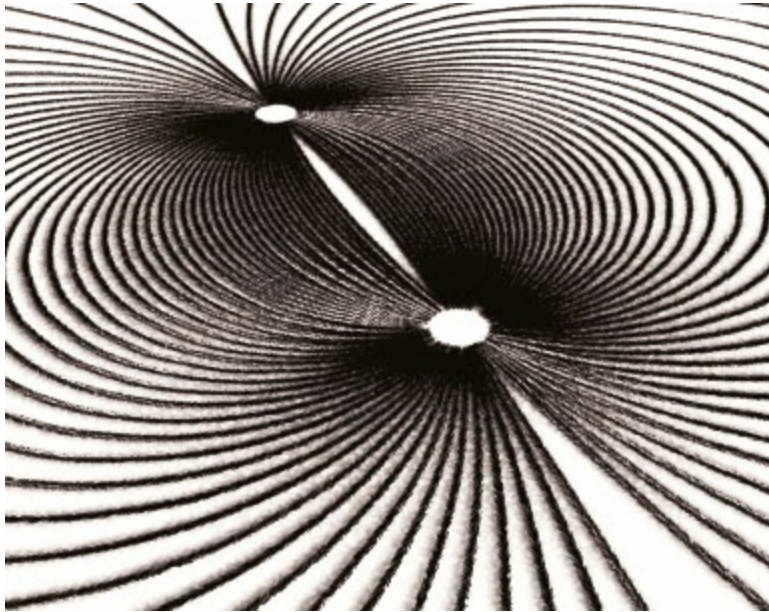
si preparava per una lezione che doveva tenere all'università, Ørsted osservò che la corrente elettrica generata dalla batteria che stava usando faceva deviare l'ago di una bussola che si trovava nelle vicinanze. In breve comprese che l'elettricità in moto generava una forza magnetica, e conìò il termine «elettromagnetismo». Qualche anno dopo lo scienziato britannico Michael Faraday ipotizzò che, se una corrente elettrica – per esprimerci in termini moderni – poteva generare un campo magnetico, un campo magnetico avrebbe potuto generare una corrente elettrica. Faraday diede una dimostrazione sperimentale dell'effetto nel 1831. Quattordici anni più tardi scoprì una connessione anche tra elettromagnetismo e luce dimostrando che un intenso campo magnetico può modificare la natura della luce polarizzata.

Faraday non aveva compiuto studi formali. Provenendo dall'umile famiglia di un fabbro dei dintorni di Londra, aveva lasciato la scuola a tredici anni per lavorare come fattorino e come rilegatore in una libreria. Lì, nel corso degli anni, si diede una formazione scientifica leggendo i libri di cui doveva prendersi cura ed effettuando esperimenti semplici e poco dispendiosi nel tempo libero. Alla fine ottenne un posto di assistente nel laboratorio del grande chimico Sir Humphry Davy, dove sarebbe rimasto per i restanti quarantacinque anni della sua vita, succedendo a Davy alla morte di questi. Faraday aveva difficoltà con la matematica e non ne imparò mai molta, ragione per cui concepire una descrizione teorica degli strani fenomeni elettromagnetici che osservava nel suo laboratorio gli richiese un grande sforzo. Ma ugualmente vi riuscì.

Una delle più importanti innovazioni intellettuali introdotte da Faraday fu il concetto di campo di forza. Al giorno d'oggi, grazie ai libri e ai film dove la fanno da padroni alieni con gli occhi da insetti e relative astronavi, la maggior parte delle persone ha familiarità con il termine, cosicché forse a Faraday spetterebbero dei diritti d'autore. Ma fin dai tempi di Newton uno dei grandi misteri della fisica era il fatto che le sue leggi sembravano indicare che le forze agiscono attraverso lo spazio vuoto che separa i corpi in interazione. A Faraday quest'idea non piaceva, in quanto era convinto che per far muovere un corpo qualcosa dovesse venire a contatto con esso. Così immaginò lo spazio interposto tra le cariche elettriche e i magneti riempito di tubetti invisibili che esercitano fisicamente spinta e trazione, e chiamò campo di forza l'insieme di questi tubetti. Un buon modo per farsi un'idea intuitiva di un campo di forza è l'esperimento che si effettua comunemente nelle aule scolastiche ponendo una lastra di vetro sopra un magnete a sbarra e spargendo della limatura di ferro sulla lastra. Dando qualche colpetto per vincere l'attrito, la limatura si muove come se fosse spinta da una forza invisibile e si dispone in modo da formare degli archi che vanno da un polo della calamita all'altro. Questa configurazione è una mappa della forza magnetica invisibile che permea lo spazio. Oggi si pensa che tutte le forze siano trasmesse da campi, e quindi quello di campo è un concetto importante nella fisica moderna... oltre che nella fantascienza.

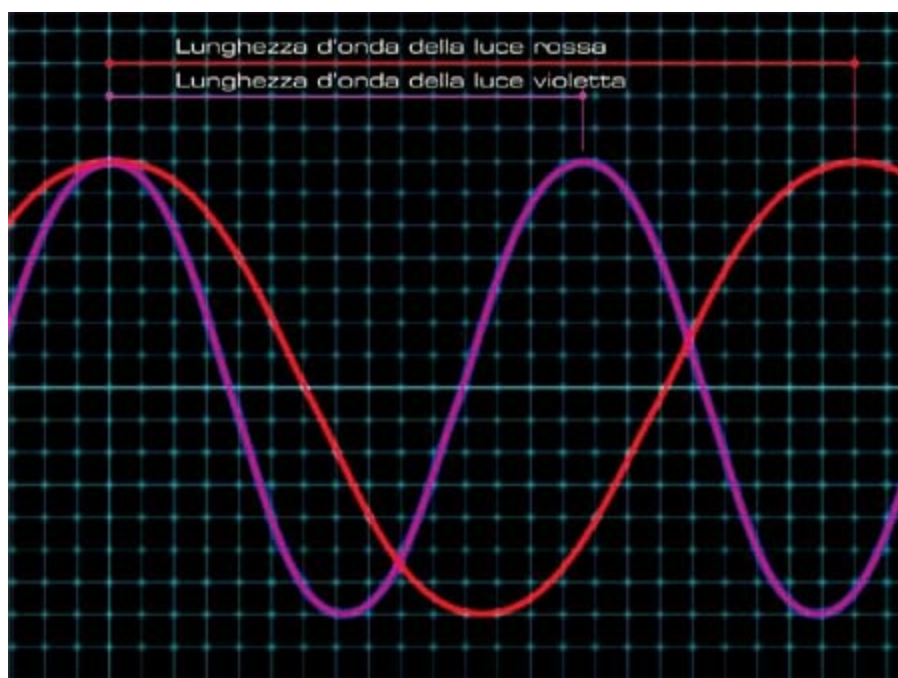
Per diversi decenni la comprensione dell'elettromagnetismo segnò il passo, senza andare al di là della conoscenza di alcune leggi empiriche: l'intuizione che elettricità e magnetismo fossero strettamente connessi, sia pure in modo misterioso; l'idea che avessero una qualche specie di relazione con la luce; e il concetto embrionale di campo. C'erano almeno undici teorie dell'elettromagnetismo, tutte insoddisfacenti. Poi, negli anni '60 dell'Ottocento, il fisico scozzese James Clerk Maxwell sviluppò le idee di Faraday traducendole in una struttura matematica che rendeva ragione della profonda e misteriosa relazione tra elettricità, magnetismo e luce. Il risultato fu un insieme di equazioni che descrivevano forze elettriche e forze magnetiche come manifestazioni della medesima entità fisica: il campo elettromagnetico; in tal modo elettricità e magnetismo

venivano unificati in un'unica forza. Maxwell dimostrò inoltre che i campi elettromagnetici potevano propagarsi nello spazio sotto forma di un'onda. La velocità di tale onda era determinata da un numero che compariva nelle sue equazioni e che calcolò in base a dati sperimentali che erano stati misurati qualche anno prima. Con suo grande stupore la velocità così calcolata risultava uguale alla velocità della luce, che a quell'epoca era nota a livello sperimentale con un'incertezza dell'1 per cento. Aveva così scoperto che anche la luce è un'onda elettromagnetica!



Campi di forza. Il campo di forza di un magnete a sbarra messo in evidenza dalla disposizione della limatura di ferro.

Oggi le equazioni che descrivono i campi elettrici e magnetici sono chiamate equazioni di Maxwell. Pochi ne hanno sentito parlare, ma si tratta probabilmente delle equazioni più importanti dal punto di vista commerciale che si conoscano. Non soltanto governano il funzionamento di tutto ciò che va dagli elettrodomestici ai computer, ma descrivono anche onde distinte dalla luce, come le microonde, le onde radio, la luce infrarossa e i raggi X. Tutte queste radiazioni differiscono dalla luce visibile soltanto per un aspetto: la loro lunghezza d'onda. Le onde radio hanno lunghezze d'onda di un metro o più, mentre la luce visibile ha una lunghezza d'onda di qualche decimilionesimo di metro e i raggi X inferiore a un centomilionesimo di metro. Il Sole irraggia a tutte le lunghezze d'onda, ma la sua radiazione ha un massimo di intensità alle lunghezze d'onda che ci sono visibili. Probabilmente non è un caso che le lunghezze d'onda che possiamo vedere a occhio nudo siano quelle a cui il Sole irraggia con maggiore intensità: è verosimile che i nostri occhi si siano evoluti con la capacità di rilevare la radiazione elettromagnetica in quella gamma proprio perché è la gamma presente in misura più abbondante. Se mai entreremo in contatto con esseri di altri pianeti, questi probabilmente avranno la capacità di «vedere» la radiazione alle lunghezze d'onda, quali che siano, che il loro sole emette con maggiore intensità, modulate da fattori quali le proprietà filtranti della polvere e dei gas presenti nell'atmosfera del loro pianeta. Così alieni evolutisi in presenza di raggi X potrebbero far carriera nel campo della sicurezza aeroportuale.



Lunghezza d'onda. Microonde, onde radio, luce infrarossa, raggi X – e i diversi colori della luce visibile – differiscono soltanto per le loro lunghezze d'onda.

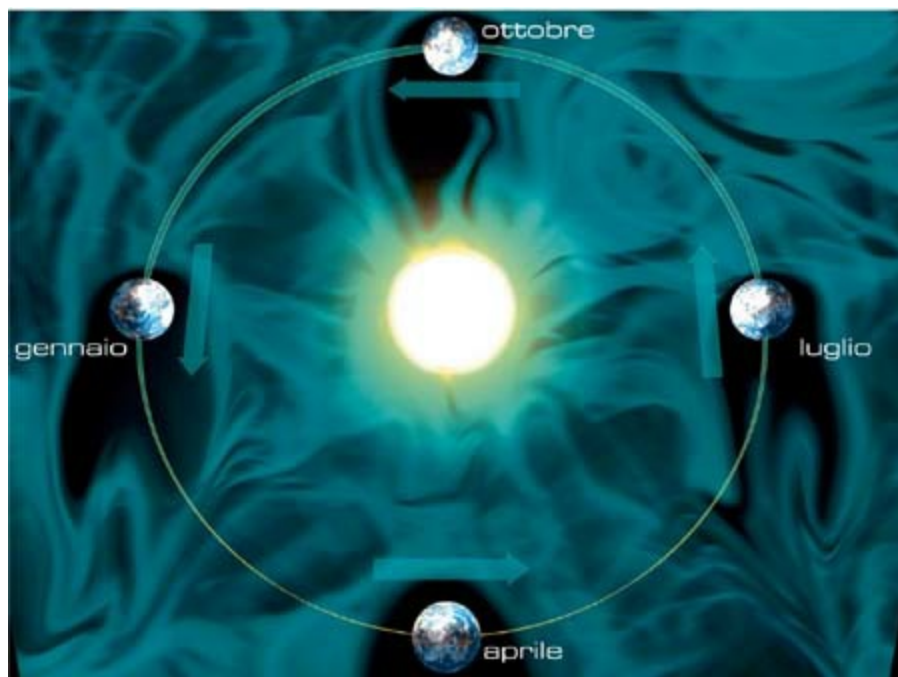
Le equazioni di Maxwell stabiliscono che le onde elettromagnetiche si propagano a una velocità di circa 300.000 chilometri al secondo, ossia a circa 1 miliardo e 80 milioni di chilometri all'ora. Ma parlare di una velocità non ha alcun significato se non si specifica un sistema di riferimento rispetto al quale la velocità viene misurata. Questa è una cosa a cui normalmente non occorre pensare nella vita quotidiana. Quando al volante vediamo un limite di velocità di 130 chilometri all'ora, è sottinteso che la nostra velocità sia misurata rispetto alla strada e non rispetto al buco nero che c'è al centro della Via Lattea. Ma anche nella vita di tutti i giorni ci sono occasioni in cui si deve tener conto dei sistemi di riferimento. Per esempio, se portate una tazza di tè lungo il corridoio di un jet in volo, potreste dire che la vostra velocità è di 3 chilometri all'ora. Chi si trovasse a terra, però, potrebbe dire che vi state muovendo a 920 chilometri all'ora. Perché non pensiate che l'uno o l'altro di questi osservatori abbia più ragione di pretendere che la propria affermazione sia la verità, tenete presente che, siccome la Terra gira intorno al Sole, qualcuno che vi guardasse dalla superficie di quel corpo celeste dissentirebbe da entrambi e direbbe che vi state muovendo a circa 30 chilometri al secondo, senza parlare della sua invidia per la vostra aria condizionata. Tenendo conto di tali divergenze, la domanda che si poneva quando Maxwell sostenne di aver scoperto che la «velocità della luce» emergeva dalle sue equazioni era: rispetto a che cosa è misurata la velocità della luce nelle equazioni di Maxwell?

Non c'è ragione di credere che il parametro di velocità che compare nelle equazioni di Maxwell sia una velocità misurata rispetto alla Terra. Le sue equazioni, dopotutto, si applicano all'intero universo. Una risposta alternativa che fu presa in considerazione per qualche tempo è che le sue equazioni specificassero la velocità della luce rispetto a un mezzo non ancora rivelato che permeerebbe lo spazio, mezzo chiamato etere luminifero o, per brevità, semplicemente etere, che è il nome usato da Aristotele per la sostanza che credeva riempisse tutto l'universo al di fuori della sfera terrestre. Questo ipotetico etere sarebbe il mezzo attraverso il quale le onde elettromagnetiche si propagano, proprio come il suono si propaga nell'aria. Se fosse esistito l'etere, ci sarebbe stato un

criterio assoluto di quiete (cioè la quiete rispetto all'etere) e quindi anche una maniera assoluta di definire il moto. L'etere avrebbe fornito un sistema di riferimento privilegiato esteso in tutto l'universo, rispetto al quale si sarebbe potuta misurare la velocità di qualunque corpo. Perciò l'esistenza dell'etere venne postulata per ragioni teoriche, e ciò indusse alcuni scienziati a cercare un modo per studiarlo, o almeno per confermarne l'esistenza. Uno di questi scienziati era Maxwell stesso.

Se correte incontro a un'onda sonora nell'aria, l'onda vi si avvicina più rapidamente, e se correte in direzione opposta, vi si avvicina più lentamente. Analogamente, se vi fosse un etere, la velocità della luce dovrebbe variare in dipendenza dal vostro moto rispetto a tale mezzo. In effetti, se la luce si comportasse come il suono, proprio come i passeggeri su un jet supersonico non sentono mai alcun suono emesso dalla parte posteriore dell'aereo, così anche i viaggiatori in moto con velocità sufficiente attraverso l'etere potrebbero lasciare indietro un'onda luminosa. Muovendo da queste considerazioni, Maxwell propose un esperimento. Se esiste un etere, la Terra deve muoversi attraverso di esso mentre orbita intorno al Sole. E siccome la Terra in gennaio si sposta in una direzione diversa rispetto, diciamo, ad aprile o a luglio, si dovrebbe riuscire a osservare una minuscola differenza nella velocità della luce in differenti periodi dell'anno, come mostra la figura qui sotto.

Maxwell fu dissuaso dal pubblicare la sua idea sui «Proceedings of the Royal Society» dal direttore della rivista, il quale pensava che l'esperimento non avrebbe funzionato. Ma nel 1879, poco prima di morire all'età di quarantotto anni per un doloroso cancro allo stomaco, Maxwell mandò a un amico una lettera sull'argomento. La lettera fu pubblicata postuma sulla rivista «Nature», dove la lesse, fra gli altri, un fisico americano di nome Albert Michelson. Ispirati dalla congettura di Maxwell, nel 1887 Michelson ed Edward Morley effettuarono un esperimento di grande precisione volto a misurare la velocità con la quale la Terra si muove attraverso l'etere. L'idea dei due fisici americani era di confrontare la velocità della luce in due direzioni diverse, perpendicolari tra loro. Se tale velocità era una costante rispetto all'etere, le misurazioni avrebbero dovuto mettere in evidenza velocità della luce differenti a seconda della direzione del raggio luminoso. Ma Michelson e Morley non osservarono alcuna differenza del genere.



Moto attraverso l'etere. Se fossimo in moto attraverso l'etere, dovremmo essere in grado di rilevare tale moto osservando delle differenze stagionali nella velocità della luce.

Il risultato dell'esperimento di Michelson e Morley è chiaramente in conflitto con il modello in cui le onde elettromagnetiche si propagano attraverso un etere, e avrebbe dovuto portare all'abbandono del modello. Ma lo scopo di Michelson era stato quello di misurare la velocità della Terra rispetto all'etere, non di provare o confutare l'ipotesi dell'etere in sé, e il suo risultato non lo indusse a concludere che l'etere non esisteva. E nessun altro trasse tale conclusione. Anzi, il celebre fisico Sir William Thomson (più tardi Lord Kelvin) aveva affermato ancora nel 1884: «L'etere luminifero ... è l'unica sostanza di cui siamo sicuri in dinamica. Di una cosa siamo certi, ed è la realtà e sostanzialità dell'etere luminifero».

Come è possibile credere all'etere nonostante i risultati dell'esperimento di Michelson-Morley? I fisici, come spesso accade, tentarono di salvare il modello mediante aggiunte artificiose su misura. Alcuni postularono che la Terra trascinasse con sé l'etere, in modo che in realtà non vi fosse moto rispetto a esso. Il fisico olandese Hendrik Antoon Lorentz e il fisico irlandese George Francis FitzGerald suggerirono che in un sistema di riferimento in moto rispetto all'etere, probabilmente a causa di qualche effetto meccanico non ancora noto, gli orologi rallentassero e le distanze si contraessero, in modo che la misura della velocità della luce desse ancora il medesimo risultato. Gli sforzi di salvare il concetto di etere continuarono per circa vent'anni, fino alla pubblicazione di una straordinaria memoria di un giovane e sconosciuto impiegato dell'Ufficio brevetti di Berna, Albert Einstein.

Einstein aveva ventisei anni nel 1905, quando pubblicò il suo articolo *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (*L'elettrodinamica dei corpi in movimento*), in cui formulò la semplice ipotesi che le leggi della fisica, e in particolare la velocità della luce, dovessero apparire identiche a tutti gli osservatori in moto uniforme. Questa idea di fatto richiede di rivoluzionare i nostri concetti di spazio e di tempo. Per renderci conto del perché, immaginiamo due eventi che si verificano nel medesimo punto ma in istanti diversi su un jet di linea. Per un osservatore sull'aereo ci sarà una distanza nulla tra i due eventi. Ma per un secondo osservatore a terra gli eventi saranno separati dalla distanza percorsa dal jet nel tempo trascorso tra i due eventi. Ciò mostra che due osservatori in moto l'uno rispetto all'altro non saranno d'accordo sulla distanza tra due eventi.



Sul jet in volo. Se si fa rimbalzare una palla sul pavimento di un jet, un osservatore a bordo dell'aereo può stabilire che tocca lo stesso punto a ogni rimbalzo, mentre un osservatore a terra misurerà una grande distanza tra i punti di rimbalzo.

Ora supponiamo che due osservatori vedano un impulso di luce che si propaga dalla coda al muso dell'aereo. Come nell'esempio precedente, non saranno d'accordo sulla distanza percorsa dalla luce tra la sua emissione alla coda dell'aereo e la sua ricezione al muso. Poiché la velocità è il rapporto tra distanza percorsa e tempo impiegato, ciò significa che se sono d'accordo sulla velocità alla quale l'impulso si propaga – la velocità della luce – non saranno d'accordo sull'intervallo di tempo che separa l'emissione dalla ricezione.

Quello che c'è di strano in tutto ciò è che, sebbene misurino tempi differenti, i due osservatori stanno guardando il *medesimo processo fisico*. Einstein non tentò di escogitare una spiegazione artificiosa. Ne trasse invece la conclusione logica, anche se sbalorditiva, che la misura del tempo impiegato, come la misura della distanza percorsa, dipende dall'osservatore che compie la misurazione. Tale effetto è una delle chiavi della teoria contenuta nell'articolo di Einstein del 1905, che ha preso il nome di relatività speciale, o ristretta.

Possiamo renderci conto di come questa analisi potrebbe essere applicata ai dispositivi di misura del tempo se consideriamo due osservatori che guardano un orologio. La relatività ristretta afferma che l'orologio marcia più rapidamente secondo un osservatore che è in quiete rispetto a esso. Per gli osservatori che non sono in quiete rispetto all'orologio, questo marcia più lentamente. Se consideriamo l'impulso luminoso che si propaga dalla coda al muso dell'aereo alla stregua del tic-tac di un orologio, vediamo che per un osservatore a terra l'orologio marcia più lentamente perché il raggio di luce deve percorrere una distanza maggiore in quel sistema di riferimento. Ma l'effetto non dipende dal meccanismo dell'orologio; sussiste per tutti i dispositivi di misura del tempo, anche per i nostri orologi biologici.

La memoria di Einstein mostrò che, al pari del concetto di quiete, anche quello di tempo non può essere assoluto, come pensava Newton. In altre parole, non è possibile assegnare a ogni evento un tempo su cui tutti gli osservatori siano d'accordo. Al contrario, ogni osservatore ha proprie misure del tempo, e i tempi misurati da due osservatori in moto relativo l'uno rispetto all'altro non

concorderanno. Le idee di Einstein sono in contrasto con la nostra intuizione perché le loro implicazioni non sono evidenti alle velocità con cui abbiamo normalmente a che fare nella vita quotidiana. Ma sono state ripetutamente confermate dagli esperimenti. Per esempio, immaginiamo un orologio di riferimento in quiete al centro della Terra, un altro orologio sulla superficie del pianeta, e un terzo a bordo di un aereo che vola in direzione della rotazione terrestre o in direzione contraria. Rispetto all'orologio al centro della Terra, quello a bordo di un aereo che vola verso est – nel senso della rotazione terrestre – si muove più rapidamente di quello sulla superficie della Terra, e quindi dovrebbe marciare più lentamente. Analogamente, rispetto all'orologio al centro della Terra, quello a bordo di un aereo che vola verso ovest – in direzione opposta alla rotazione terrestre – si muove più lentamente di quello alla superficie, il che significa che dovrebbe marciare più rapidamente dell'orologio alla superficie. E questo è esattamente ciò che si osservò quando, in un esperimento eseguito nell'ottobre 1971, un orologio atomico estremamente preciso fu portato in volo intorno al mondo. Così potreste allungare la vostra vita volando continuamente intorno al mondo in direzione est, anche se forse vi stufereste di vedere tutti quei film che proiettano sugli aerei di linea. Ma l'effetto è molto piccolo, circa 180 miliardesimi di secondo per ogni giro (ed è anche un po' ridotto dagli effetti della differenza di gravità, ma di questo non è il caso di occuparci qui).



La dilatazione del tempo. Gli orologi in movimento sembrano marciare più lentamente. Poiché ciò vale anche per gli orologi biologici, persone in moto sembreranno invecchiare più lentamente, ma non fatevi illusioni: alle velocità di tutti i giorni, nessun orologio ordinario sarebbe in grado di misurare la differenza.

Grazie alle ricerche di Einstein i fisici si resero conto di come, se si postula che la velocità della luce sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento, dalla teoria dell'elettricità e del magnetismo di Maxwell discenda che il tempo non può essere trattato come entità separata dalle tre dimensioni dello spazio. Tempo e spazio sono invece strettamente intrecciati. È un po' come se si aggiungesse una quarta direzione futuro-passato alle tre consuete destra-sinistra, avanti-indietro e su-giù. I fisici chiamano «spaziotempo» questa fusione di spazio e tempo, e poiché lo spaziotempo comprende una quarta direzione, chiamano quest'ultima quarta dimensione. Nello spaziotempo il tempo non è più separato dalle tre dimensioni spaziali e, per dirla in termini semplici, proprio come la definizione di

destra-sinistra, avanti-indietro o su-giù dipende dall'orientamento dell'osservatore, così anche la direzione del tempo varia a seconda della velocità dell'osservatore. Osservatori in moto con velocità diverse sceglierebbero per il tempo direzioni differenti nello spaziotempo. La teoria della relatività ristretta di Einstein era quindi un nuovo modello, che spazzava via i concetti di tempo assoluto e di quiete assoluta (cioè quiete rispetto all'etere fisso).

Einstein presto comprese che per rendere la gravità compatibile con la relatività era necessario un altro cambiamento. Secondo la teoria della gravità di Newton, in ogni istante dato i corpi si attraggono reciprocamente con una forza che dipende dalla distanza tra loro in quell'istante. Ma la teoria della relatività aveva abolito il concetto di tempo assoluto, e quindi non c'era modo di definire quando la distanza tra le masse dovesse essere misurata. Perciò la teoria newtoniana della gravitazione non era coerente con la relatività ristretta e andava modificata. Il contrasto poteva sembrare una semplice difficoltà tecnica, forse addirittura un particolare che poteva in qualche modo essere aggirato senza cambiare molto la teoria. Come si vide poi, nulla avrebbe potuto essere più lontano dalla verità.

Negli undici anni seguenti Einstein elaborò una nuova teoria della gravità, che chiamò relatività generale. Il concetto di gravità nella relatività generale è del tutto diverso da quello di Newton. Si basa invece sull'idea rivoluzionaria che lo spaziotempo non sia piatto, come si era ammesso in precedenza, ma sia curvo e deformato dalla massa e dall'energia presenti in esso.

Un buon modo per immaginarsi la curvatura è pensare alla superficie della Terra. Sebbene questa sia soltanto bidimensionale (poiché ci sono solo due direzioni in cui muoversi, diciamo nord-sud ed est-ovest), ce ne serviremo come esempio perché uno spazio curvo bidimensionale è più facile da immaginare di uno spazio curvo quadridimensionale. La geometria degli spazi curvi come la superficie terrestre non è la geometria euclidea che ci è familiare. Per esempio, sulla superficie della Terra, la distanza minima tra due punti – che è un segmento di retta nella geometria euclidea – è il cammino che congiunge i due punti lungo un cerchio massimo. (Un cerchio massimo è un cerchio sulla superficie della Terra il cui centro coincide con il centro del pianeta. L'equatore è un esempio di cerchio massimo, e lo stesso vale per qualunque cerchio ottenuto ruotando l'equatore intorno a un qualsiasi diametro.)

Immaginiamo, per esempio, di voler andare da New York a Madrid, due città che sono all'incirca alla stessa latitudine. Se la Terra fosse piatta, si seguirebbe la via più breve procedendo dritti verso est. Così facendo arriveremmo a Madrid dopo aver percorso 5965 chilometri. Invece, a causa della curvatura della Terra, c'è una rotta che su una carta piana sembra curva e quindi più lunga, ma che in realtà è più breve. Potremmo arrivare a destinazione in 5800 chilometri seguendo la rotta del cerchio massimo, che significa dirigersi inizialmente verso nordest, virando poi gradualmente verso est, e infine verso sudest. La differenza di lunghezza tra le due rotte è dovuta alla curvatura della superficie terrestre, ed è un segno caratteristico della sua geometria non euclidea. Le linee aeree lo sanno, e fanno in modo che i piloti seguano rotte di cerchio massimo ogniqualvolta ciò sia possibile.



Geodetiche. Il percorso più breve tra due punti sulla superficie della Terra sembra curvo se viene tracciato su una carta piana: una cosa da tenere presente nel caso si sia sottoposti a un controllo del tasso alcolico.

Secondo le leggi del moto di Newton, corpi come le palle di cannone, i croissant e i pianeti si muovono in linea retta a meno che su di essi agisca una forza, quale la gravità. Ma la gravità, nella teoria di Einstein, non è una forza come le altre; è invece una conseguenza del fatto che la massa distorce lo spaziotempo, generando una curvatura. Nella relatività generale, i corpi si muovono lungo le geodetiche, che sono quanto c'è di più simile a linee rette in uno spazio curvo. Le rette sono geodetiche sul piano, e i cerchi massimi sono geodetiche sulla superficie della Terra. In assenza di materia, le geodetiche nello spaziotempo quadridimensionale sono l'equivalente delle rette nello spazio tridimensionale. Ma quando è presente materia che distorce lo spaziotempo, le traiettorie dei corpi nel corrispondente spazio tridimensionale si incurvano in un modo che nella teoria newtoniana era spiegato mediante l'attrazione della gravità. Quando lo spaziotempo non è piatto, le traiettorie dei corpi risultano incurvate, dando l'impressione che su di essi agisca una forza.

La teoria della relatività generale di Einstein si riduce alla relatività ristretta quando la gravità è assente, e nell'ambiente a bassa gravità del sistema solare fa quasi le stesse predizioni della teoria di Newton, ma non esattamente le stesse. In realtà, se nei sistemi di navigazione satellitari GPS non si tenesse conto della relatività generale, nelle posizioni globali si accumulerebbero errori a un tasso di circa dieci chilometri al giorno! Ma la reale importanza della relatività generale non sta tanto nella sua applicazione a congegni che ci guidano verso nuovi ristoranti, quanto piuttosto nel fatto che costituisce un modello assai differente dell'universo, che predice nuovi effetti come le onde gravitazionali e i buchi neri. E così la relatività generale ha trasformato la fisica in geometria. La tecnologia moderna è abbastanza precisa da consentirci di effettuare numerose verifiche di grande accuratezza della relatività generale, che le ha superate tutte.

Pur avendo entrambe rivoluzionato la fisica, la teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell e la teoria della gravità di Einstein – la relatività generale – sono, come la fisica newtoniana, teorie classiche. Sono cioè modelli in cui l'universo ha un'unica storia. Come si è visto nel capitolo precedente, ai livelli atomico e subatomico questi modelli non sono in accordo con le osservazioni. Si deve invece fare uso delle teorie quantistiche in cui l'universo può avere ogni possibile storia, ciascuna con la propria «intensità» o ampiezza di probabilità. Per quanto riguarda i calcoli pratici relativi alla realtà quotidiana possiamo continuare a servirci delle teorie classiche, ma se vogliamo comprendere il comportamento degli atomi e delle molecole, abbiamo bisogno di una versione quantistica della teoria dell'elettromagnetismo di Maxwell; e se vogliamo comprendere l'universo delle origini, quando tutta la materia e l'energia del cosmo erano compresse in un piccolo volume,

dobbiamo disporre di una versione quantistica della teoria della relatività generale. Abbiamo bisogno di tali teorie anche perché, se l'obiettivo è quello di comprendere la natura a livello fondamentale, non sarebbe coerente che alcune delle leggi fossero quantistiche e altre classiche. Dobbiamo perciò trovare versioni quantistiche di tutte le leggi di natura. Teorie di questo tipo sono chiamate teorie quantistiche dei campi.

Tutte le forze di natura note rientrano in quattro tipi fondamentali:

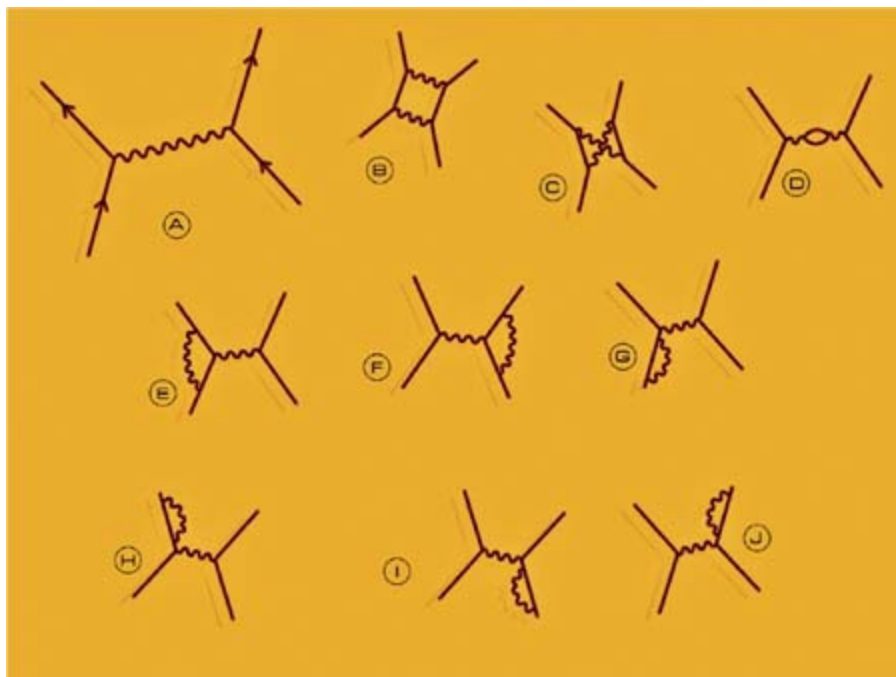
1. *La gravità.* È la più debole delle quattro, ma è una forza a lungo raggio d'azione e agisce in senso attrattivo su ogni entità dell'universo. Ciò significa che per corpi grandi le forze gravitazionali si sommano e possono dominare tutte le altre forze.
2. *L'elettromagnetismo.* È anch'esso una forza a lungo raggio d'azione ed è molto più intenso della gravità, ma agisce soltanto su particelle dotate di carica elettrica; la forza è repulsiva tra cariche del medesimo segno e attrattiva tra cariche di segno opposto. Ciò significa che le forze elettriche agenti tra corpi grandi si elidono reciprocamente, ma sulla scala degli atomi e delle molecole dominano. Le forze elettromagnetiche sono responsabili di tutta la chimica e la biologia.
3. *La forza nucleare debole.* È all'origine della radioattività e svolge un ruolo essenziale nella formazione degli elementi nelle stelle e nell'universo primordiale. Ma nella vita quotidiana non veniamo mai a contatto con questa forza.
4. *La forza nucleare forte.* Questa forza tiene insieme i protoni e i neutroni all'interno del nucleo atomico. Tiene insieme anche i singoli protoni e neutroni, il che è necessario perché queste particelle sono a loro volta fatte di particelle ancora più piccole, i quark, cui abbiamo fatto cenno nel III capitolo. La forza forte è la fonte dell'energia solare e dell'energia nucleare, ma, come accade per la forza debole, non entriamo in contatto diretto con essa.

La prima forza per la quale si riuscì a formulare una descrizione quantistica fu l'elettromagnetismo. La teoria quantistica dell'elettromagnetismo, chiamata elettrodinamica quantistica, o in breve QED (Quantum ElectroDynamics), fu elaborata negli anni '40 da Richard Feynman e altri, ed è divenuta un modello per tutte le teorie quantistiche dei campi. Come si è detto, secondo le teorie classiche, le forze sono trasmesse da campi. Ma, nelle teorie quantistiche, i campi di forza sono concepiti come formati da varie particelle elementari chiamate bosoni: questi sono particelle portatrici di forza, che volano avanti e indietro tra le particelle materiali trasmettendo le forze. Le particelle di materia sono invece chiamate fermioni. Elettroni e quark sono esempi di fermioni. Il fotone, o particella di luce, è un esempio di bosone: è il bosone che trasmette la forza elettromagnetica. Ciò che accade è che una particella materiale, come un elettrone, emette un bosone, o quanto di forza, e rincula in direzione opposta, più o meno come un cannone rincula dopo aver sparato un proiettile. Il bosone poi collide con un'altra particella materiale e viene assorbito, alterando il moto di tale particella. Secondo la QED, tutte le interazioni tra particelle cariche – quelle cioè che sono soggette alla forza elettromagnetica – sono descritte in termini di scambio di fotoni.

Le predizioni della QED sono state verificate e si è trovato che concordano in modo molto preciso con i risultati sperimentali. Ma eseguire i calcoli matematici richiesti dalla QED può essere difficile. Il problema, come vedremo più avanti, è che quando al quadro dello scambio di particelle delineato sopra si impone l'ulteriore condizione quantistica che si tenga conto di tutte le storie mediante le

quali l'interazione può verificarsi – per esempio, di tutti i modi in cui i bosoni possono essere scambiati –, la matematica diventa complicata. Fortunatamente, oltre ad aver elaborato il concetto di storie alternative – il modo di intendere le teorie quantistiche descritto nell'ultimo capitolo –, Feynman escogitò anche un metodo grafico chiaro per tener conto delle differenti storie, un metodo che oggi viene applicato non soltanto alla QED ma a tutte le teorie quantistiche dei campi.

Il metodo grafico di Feynman fornisce un modo per visualizzare ciascun termine della somma sulle storie. Le immagini che si ottengono, dette diagrammi di Feynman, sono uno degli strumenti più importanti della fisica moderna. Nella QED la somma su tutte le storie possibili può essere rappresentata come una somma su diagrammi di Feynman del tipo di quelli mostrati qui sotto, che rappresentano alcuni dei modi in cui due elettroni possono diffondere l'uno sull'altro mediante la forza elettromagnetica. In questi diagrammi le linee dritte rappresentano gli elettroni e quelle ondulate i fotoni. Si intende che il tempo scorre dal basso verso l'alto, e i punti in cui le linee si congiungono corrispondono all'emissione o all'assorbimento di fotoni da parte di un elettrone. Il diagramma (A) rappresenta due elettroni che si avvicinano, si scambiano un fotone, e poi proseguono per la loro strada. Questo è il modo più semplice in cui due elettroni possono interagire mediante la forza elettromagnetica, ma è necessario considerare tutte le storie possibili. Perciò bisogna includere anche diagrammi come (B). Anche (B) mostra due linee in ingresso, gli elettroni che si avvicinano, e due linee in uscita, gli elettroni diffusi, ma in questo caso gli elettroni si scambiano due fotoni prima di allontanarsi. I diagrammi riportati qui sono soltanto alcune delle possibilità; in effetti ce n'è un numero infinito, di cui bisogna tener conto a livello matematico.



Diagrammi di Feynman. Questi diagrammi si riferiscono a un processo in cui due elettroni diffondono l'uno sull'altro.

I diagrammi di Feynman non sono soltanto un metodo chiaro per rappresentare e classificare i modi in cui le interazioni possono svolgersi. Per essi valgono delle regole che consentono di dedurre, dalle linee e dai vertici che vi compaiono, un'espressione matematica. La probabilità, per esempio, che gli elettroni entranti, con una data quantità di moto iniziale, alla fine si allontanino con una specifica quantità di moto finale si ottiene poi sommando i contributi di ciascun diagramma di

Feynman. Ciò può richiedere non poco lavoro perché, come si è detto, ce n'è un numero infinito. Inoltre, sebbene agli elettroni entranti e uscenti siano assegnate un'energia e una quantità di moto definite, le particelle negli anelli chiusi all'interno del diagramma possono avere energia e quantità di moto qualsiasi. Questo è importante perché nell'applicare il metodo di Feynman si deve sommare non soltanto su tutti i diagrammi ma anche su tutti quei valori dell'energia e della quantità di moto.

I diagrammi di Feynman furono di enorme aiuto ai fisici nel visualizzare i processi descritti dalla QED e nel calcolarne le probabilità. Ma non erano un rimedio per un grave problema di cui la teoria soffriva: quando si sommano i contributi del numero infinito di storie differenti, si ottiene un risultato infinito. (Se i termini successivi di una somma infinita decrescono abbastanza rapidamente, è possibile che la somma sia finita, ma purtroppo ciò non accade in questo caso.) In particolare, quando si sommano i diagrammi di Feynman, il risultato sembra implicare che l'elettrone abbia una massa e una carica infinite. Ciò è assurdo, perché carica e massa possono essere misurate e sono finite. Per trattare questi infiniti fu messo a punto un procedimento chiamato rinormalizzazione.

Il procedimento di rinormalizzazione comporta di sommare grandezze che sono per definizione infinite e negative in modo che, con un'accurata contabilità matematica, i valori negativi infiniti e i valori positivi infiniti nella somma si elidano quasi completamente, lasciando un piccolo residuo, il valore finito osservato per la massa e la carica. Questi artifici potrebbero sembrare quel genere di cose che vi procurerebbero una bocciatura a un esame di matematica, ed effettivamente la rinormalizzazione è, proprio come sembra, matematicamente dubbia. Una conseguenza è che i valori che si ottengono con questo metodo per la massa e la carica dell'elettrone possono essere qualunque numero finito. Il vantaggio è che i fisici possono scegliere gli infiniti negativi in modo da ottenere il valore giusto, l'inconveniente è che proprio per questo massa e carica dell'elettrone non possono essere predette dalla teoria. Ma una volta che si siano fissate in questo modo la massa e la carica dell'elettrone, ci si può servire della QED per fare molte altre predizioni precise, che sono sempre in strettissimo accordo con l'osservazione, e perciò la rinormalizzazione è uno degli ingredienti essenziali della QED. Uno dei primi trionfi della teoria, per esempio, fu la predizione corretta del cosiddetto spostamento di Lamb, una piccola variazione dell'energia di uno degli stati dell'atomo di idrogeno scoperta nel 1947.

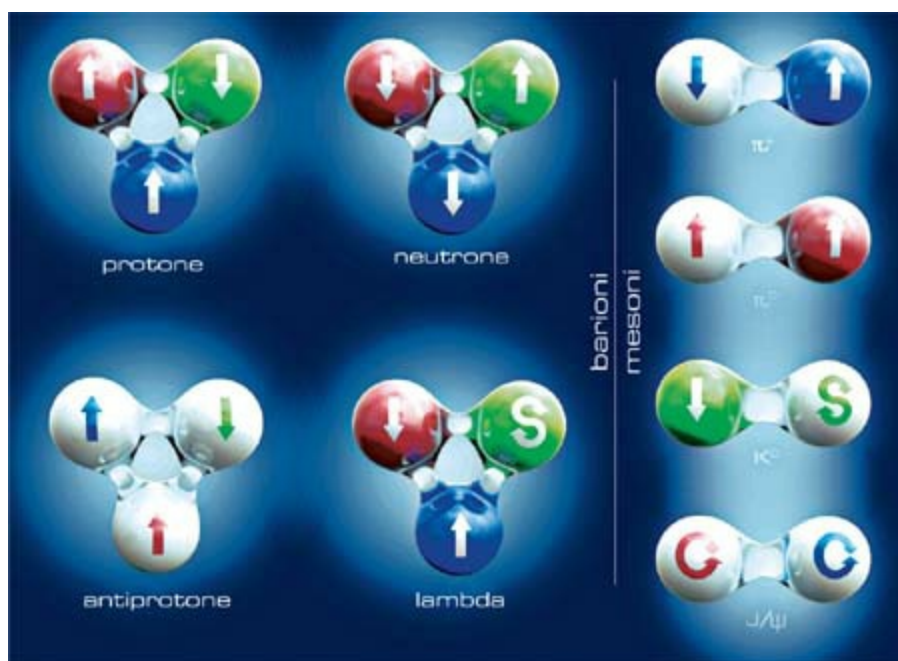


Diagrammi di Feynman. Richard Feynman guidava un famoso furgone istoriato con i suoi diagrammi. Questa rappresentazione artistica aveva proprio lo scopo di far conoscere i diagrammi discussi sopra. Pur essendo Feynman morto nel 1988, il furgone esiste ancora, ed è conservato presso il Caltech in California.

Il successo della rinormalizzazione nel caso della QED incoraggiò i tentativi di elaborare teorie quantistiche dei campi capaci di descrivere le altre tre forze fondamentali. Ma la suddivisione delle forze di natura in quattro tipologie è probabilmente fittizia e conseguenza dell'insufficiente comprensione che ne abbiamo. Perciò i fisici si sono messi alla ricerca di una teoria del tutto in grado di unificare le quattro forze in un'unica legge che sia compatibile con la teoria quantistica. Tale risultato costituirebbe il santo graal della fisica.

Un indizio a conferma che l'unificazione è l'impostazione corretta venne dalla teoria della forza debole. La teoria quantistica del campo che descrive la forza debole in quanto tale non può essere rinormalizzata; presenta cioè infiniti che non possono essere eliminati sottraendo un numero finito di grandezze quali massa e carica. Ma nel 1967 Abdus Salam e Steven Weinberg proposero, l'uno indipendentemente dall'altro, una teoria in cui l'elettromagnetismo veniva unificato con la forza debole, e scoprirono che l'unificazione poneva rimedio al flagello degli infiniti. La forza unificata è detta forza elettrodebole. La sua teoria poteva essere rinormalizzata, e prediceva l'esistenza di tre nuove particelle chiamate W^+ , W^- e Z^0 . Indizi della Z^0 furono scoperti al CERN di Ginevra nel 1973. Salam e Weinberg ricevettero il premio Nobel nel 1979, sebbene le particelle W e Z non siano state osservate direttamente fino al 1983.

La forza forte può essere rinormalizzata in quanto tale in una teoria chiamata cromodinamica quantistica, o QCD (Quantum ChromoDynamics). Secondo la QCD, il protone, il neutrone e molte altre particelle materiali elementari sono fatti di quark, i quali hanno una singolare proprietà che i fisici hanno scelto di chiamare colore (da cui il termine «cromodinamica», sebbene i colori dei quark siano semplicemente delle utili etichette, senza alcuna connessione con i colori visibili). I quark esistono in tre cosiddetti colori, rosso, verde e blu. Inoltre, ogni quark ha un'antiparticella associata, e i colori di queste antiparticelle sono chiamati antirosso, antiverde e antiblu. L'idea è che soltanto combinazioni complessivamente prive di colore possano esistere come particelle libere. Ci sono due modi per ottenere tali combinazioni neutre di quark. Un colore e il relativo anticolore si elidono, quindi un quark e un antiquark formano una coppia incolore, una particella instabile detta mesone. Anche quando si mescolano tutti e tre i colori (o gli anticolori) il risultato è incolore. Tre quark, uno per ciascun colore, formano particelle stabili chiamate barioni, di cui protoni e neutroni sono esempi (e tre antiquark formano le antiparticelle dei barioni). Protoni e neutroni sono i barioni che costituiscono il nucleo degli atomi e sono la base di tutta la materia ordinaria dell'universo.



Barioni e mesoni. Si ritiene che barioni e mesoni siano fatti di quark tenuti insieme dalla forza forte. Quando queste particelle entrano in collisione tra loro, possono scambiarsi dei quark, ma i singoli quark non possono essere osservati.

La QCD ha inoltre una proprietà chiamata libertà asintotica, cui abbiamo fatto cenno, senza nominarla, nel III capitolo. Libertà asintotica significa che le interazioni forti tra quark sono piccole quando i quark sono vicini tra loro ma aumentano se questi ultimi sono più lontani, un po' come se fossero connessi da degli elastici. Tale proprietà spiega perché quark isolati non si osservano in natura e non siamo stati in grado di produrle in laboratorio. Tuttavia, anche se non possiamo osservare singoli quark, accettiamo il modello perché riesce a spiegare in modo del tutto soddisfacente il comportamento dei protoni, dei neutroni e di altre particelle materiali.

Dopo aver unificato le forze deboli ed elettromagnetiche, negli anni '70 del secolo scorso i fisici si misero alla ricerca di un modo per far rientrare nella teoria elettrodebole la forza forte. C'è un certo numero di cosiddette teorie di grande unificazione, o GUT (Grand Unified Theories), che appunto unificano le interazioni forti con la forza elettrodebole, ma esse per lo più predicono che i protoni, la sostanza di cui siamo fatti, dovrebbero decadere, in media, dopo circa 10^{32} anni. Si tratta di una vita media estremamente lunga, dato che l'universo ha soltanto 10^{10} anni circa. Ma nella fisica quantistica, quando si dice che la vita media di una particella è di 10^{32} anni, non si intende che la maggior parte delle particelle viva approssimativamente 10^{32} anni, qualcuna un po' di più e qualcuna un po' di meno. Si intende invece che ogni anno la particella ha una probabilità su 10^{32} di decadere. Di conseguenza, se si guarda un serbatoio contenente 10^{32} protoni soltanto per un anno, si dovrebbe vedere qualcuno dei protoni decadere. Costruire un simile serbatoio non è troppo difficile, dal momento che 10^{32} protoni sono contenuti in non più di un migliaio di tonnellate d'acqua. Gli scienziati hanno effettuato esperimenti di questo tipo, ma rivelare i decadimenti e distinguerli da altri eventi causati dai raggi cosmici che ci piovono addosso di continuo non è cosa facile. Per ridurre al minimo il rumore, gli esperimenti vengono condotti in profondità sottoterra, in luoghi come la miniera Mozumi della Compagnia mineraria di Kamioka in Giappone, che si trova 1000 metri sotto una montagna, e pertanto è in parte schermata dai raggi cosmici. In seguito alle osservazioni effettuate nel 2009, i ricercatori hanno concluso che, se anche i protoni decadono, la loro vita media è superiore a

circa 10^{34} anni, il che non rappresenta una buona notizia per le teorie di grande unificazione.

Poiché le GUT non trovavano riscontro nelle osservazioni, la maggior parte dei fisici ha adottato una teoria ad hoc chiamata modello standard, che comprende la teoria unitaria delle forze elettrodeboli e la QCD come teoria delle interazioni forti. Ma nel modello standard, le forze elettrodeboli e forti agiscono in modo indipendente e non sono realmente unificate. Il modello ha grande successo ed è in accordo con tutte le osservazioni disponibili, ma è insoddisfacente a livello fondamentale perché, oltre a non unificare le forze elettrodeboli e forti, non include la gravità.



«Temo che incorniciarla *non* la renda una teoria unitaria.»

Fondere la forza forte con le forze elettromagnetiche e deboli può essersi rivelato difficile, ma i problemi che si sono incontrati non sono niente in confronto al problema di amalgamare la gravità con le altre tre interazioni, o anche solo di formulare una teoria quantistica della gravità considerata a sé. La ragione per cui è risultato così difficile creare una teoria quantistica della gravità ha a che fare con il principio di indeterminazione di Heisenberg, che abbiamo discusso nel IV capitolo. Non è ovvio, ma si può mostrare che, con riferimento a tale principio, il valore di un campo e la sua velocità di variazione svolgono il medesimo ruolo della posizione e della velocità di una particella. Vale a dire che, quanto maggiore è la precisione con cui l'uno è determinato, tanto minore può essere quella con cui è determinata l'altra. Ciò ha l'importante conseguenza che non esiste nulla di simile allo spazio vuoto. Questo perché spazio vuoto significa che il valore di un campo è esattamente zero e anche la velocità di variazione del campo è esattamente zero (altrimenti lo spazio non rimarrebbe vuoto). Poiché il principio di indeterminazione non consente che siano esattamente definiti i valori sia del campo che della sua velocità di variazione, lo spazio non è mai vuoto. Può avere uno stato di energia minima, chiamato «vuoto», ma tale stato è soggetto a quelle che sono chiamate fluttuazioni quantistiche, o fluttuazioni del vuoto, in cui particelle e campi si creano e si distruggono senza sosta.

Si possono concepire le fluttuazioni del vuoto come coppie di particelle che a un certo istante compaiono simultaneamente, si allontanano e poi si riavvicinano e si annichilano reciprocamente. In termini di diagrammi di Feynman, tali eventi corrispondono ad anelli chiusi. Queste particelle sono chiamate particelle virtuali. A differenza delle particelle reali, quelle virtuali non si possono osservare in modo diretto con un rivelatore di particelle. Ma i loro effetti indiretti, come piccole variazioni dell'energia delle orbite elettroniche, possono essere misurati, e risultano in un accordo straordinariamente preciso con le predizioni teoriche. Il problema è che le particelle virtuali hanno energia, e poiché le coppie virtuali sono in numero infinito, dovrebbero avere una quantità infinita di energia. Secondo la relatività generale, ciò significa che dovrebbero incurvare l'universo riducendolo a dimensioni infinitamente piccole, il che ovviamente non avviene!

Il problema degli infiniti è analogo a quello che si incontra nelle teorie delle forze forti, deboli ed elettromagnetiche, salvo che in quei casi la rinormalizzazione elimina gli infiniti. Ma gli anelli chiusi nei diagrammi di Feynman per la gravità producono infiniti che non possono essere rimossi dalla rinormalizzazione perché nella relatività generale non c'è un numero di parametri rinormalizzabili sufficiente per eliminare dalla teoria tutte le grandezze infinite. Si ha quindi una teoria della gravità che predice che certe grandezze, come la curvatura dello spaziotempo, sono infinite, il che non è compatibile con un universo abitabile. Ciò significa che l'unica possibilità per ottenere una teoria ragionevole sarebbe che in qualche modo tutti gli infiniti si elidano senza ricorrere alla rinormalizzazione.

Nel 1976 fu individuata una soluzione per il problema, sotto forma di una teoria che è chiamata supergravità. Il prefisso «super» non fu aggiunto per esprimere l'entusiasmo dei fisici per la possibilità che la teoria funzionasse davvero. Si riferisce invece a un tipo di simmetria che la teoria possiede, e che va sotto il nome di supersimmetria.

In fisica si dice che un sistema possiede una simmetria se le sue proprietà non sono modificate da una certa trasformazione, quale una rotazione nello spazio oppure la conversione nell'immagine speculare. Per esempio, se la si ribalta, una ciambella mantiene esattamente lo stesso aspetto (a meno che non sia ricoperta di cioccolata, nel qual caso è meglio mangiarla senz'altro). La supersimmetria è una simmetria di un genere più sottile, che non può essere associato a una trasformazione nello spazio ordinario. Una delle implicazioni fondamentali della supersimmetria è che le particelle che mediano le forze e le particelle materiali, e quindi forza e materia, sono realmente soltanto due facce della stessa cosa. In termini pratici, ciò significa che ogni particella di materia, come un quark, dovrebbe avere una partner che è una particella mediatrice di forza, e ogni particella mediatrice di forza, come il fotone, dovrebbe avere una partner che è una particella materiale. Quest'idea è potenzialmente in grado di risolvere il problema degli infiniti perché risulta che gli infiniti che derivano dagli anelli chiusi di particelle mediatrici di forza sono positivi, mentre gli infiniti che derivano dagli anelli chiusi di particelle materiali sono negativi, cosicché nella teoria gli infiniti dei due tipi tendono a elidersi. Purtroppo i calcoli necessari per stabilire se nella supergravità sarebbero rimasti degli infiniti non annullati erano talmente lunghi e difficili e talmente esposti agli errori che nessuno se la sentiva di intraprenderli. La maggior parte dei fisici credeva, comunque, che la supergravità fosse probabilmente la risposta giusta al problema dell'unificazione della gravità con le altre forze.

Si potrebbe pensare che la validità della supersimmetria sia qualcosa di facile da verificare: basta esaminare le proprietà delle particelle esistenti e vedere se formano delle coppie. In realtà non si è osservata nessuna di queste particelle partner. Ma vari calcoli eseguiti dai fisici indicano che le

particelle partner corrispondenti a quelle che si osservano dovrebbero avere masse almeno mille volte maggiori di quella del protone. Si tratta di valori troppo grandi perché particelle simili potessero essere viste in qualsiasi esperimento effettuato finora, ma si spera che alla fine se ne possano creare nel Large Hadron Collider di Ginevra.

La supersimmetria è stata la chiave per la formulazione della supergravità, ma il concetto di supergravità aveva in effetti avuto origine anni prima tra i fisici che studiavano una teoria ancora allo stato embrionale, detta teoria delle corde (o delle stringhe). Secondo la teoria delle corde, le particelle non sono punti, ma configurazioni di vibrazione che hanno lunghezza ma non larghezza né spessore, come pezzi di corda infinitamente sottile. Anche le teorie delle corde portano a degli infiniti, ma si ritiene che nella versione corretta questi si elideranno completamente. Le teorie hanno anche un'altra caratteristica insolita: sono coerenti soltanto se lo spaziotempo ha dieci dimensioni, invece delle quattro consuete. Dieci dimensioni potrebbero sembrare qualcosa di stimolante per gli scienziati, ma sarebbero fonte di non pochi problemi per uno che si fosse dimenticato dove ne aveva parcheggiato l'automobile. A ogni modo, se ci sono queste dimensioni aggiuntive, perché non ce ne accorgiamo? Secondo la teoria delle corde, sono avvolte in uno spazio di dimensioni molto piccole. Per farcene un'idea, immaginiamo un piano bidimensionale. Lo definiamo bidimensionale perché occorrono due numeri (per esempio, una coordinata orizzontale e una verticale) per localizzare un punto qualsiasi su di esso. Un altro spazio bidimensionale è la superficie di una cannuccia da bibita. Per localizzare un punto in tale spazio, si deve sapere dov'è nella direzione della lunghezza della cannuccia, e anche dov'è lungo la sua dimensione circolare. Ma se la cannuccia fosse molto sottile, si avrebbe un'ottima approssimazione della posizione usando soltanto la coordinata nella direzione della lunghezza, e quindi si potrebbe ignorare la dimensione circolare. E se la cannuccia avesse un diametro di un milionesimo di milionesimo di milionesimo di milionesimo di milionesimo di centimetro, non ci si accorgerebbe affatto della dimensione circolare. Questa è l'idea che i teorici delle corde hanno delle dimensioni aggiuntive: sono altamente incurvate, su una scala così piccola che non le possiamo scorgere. Nella teoria delle corde le dimensioni aggiuntive sono avvolte su se stesse in quello che è detto spazio interno, in contrapposizione allo spazio tridimensionale di cui facciamo esperienza nella vita quotidiana. Come vedremo, questi stati interni non sono soltanto dimensioni nascoste sotto il tappeto, ma hanno un importante significato fisico.



Cannucce e linee. Una cannuccia è bidimensionale, ma se il suo diametro è abbastanza piccolo, o se viene vista da lontano, sembra unidimensionale come una linea.

Al di là della questione delle dimensioni, la teoria delle corde soffriva di un'altra difficoltà imbarazzante: sembrava che vi fossero almeno cinque differenti teorie e milioni di modi in cui le dimensioni aggiuntive potevano essere avvolte su se stesse, il che costituiva decisamente un eccesso di possibilità per coloro che sostenevano che la teoria delle corde fosse l'*unica* teoria del tutto. Poi, intorno al 1994, si cominciarono a scoprire delle dualità: emerse cioè che differenti teorie delle corde, e differenti modi di avvolgere le dimensioni aggiuntive su se stesse, sono semplicemente maniere diverse di descrivere i medesimi fenomeni in quattro dimensioni. Inoltre si scoprì che anche la supergravità è connessa alle altre teorie in questo modo. I teorici delle corde oggi sono convinti che le cinque teorie diverse e la supergravità siano soltanto differenti approssimazioni – ciascuna valida in una diversa situazione – a una teoria più fondamentale.

Tale teoria più fondamentale è chiamata, come si è già detto, teoria M. Pare che nessuno sappia che cosa significhi di preciso la «M», ma può darsi che stia per «master» (principale), per «miracolo» o per «mistero». Sembra comunque che sia tutte e tre le cose. I fisici stanno ancora tentando di decifrare la natura di tale teoria, ma la cosa potrebbe anche rivelarsi impossibile. Potrebbe darsi che la tradizionale aspirazione dei fisici a un'unica teoria della natura sia destinata ad andare delusa, e che non esista una formulazione unica. Potrebbe darsi che per descrivere l'universo ci si debba servire di differenti teorie in situazioni diverse. Ciascuna teoria potrebbe avere una propria versione della realtà, ma secondo il realismo dipendente dai modelli ciò è accettabile purché le teorie concordino nelle loro predizioni ogni qualvolta si sovrappongono, cioè ogni qualvolta possono essere applicate simultaneamente.

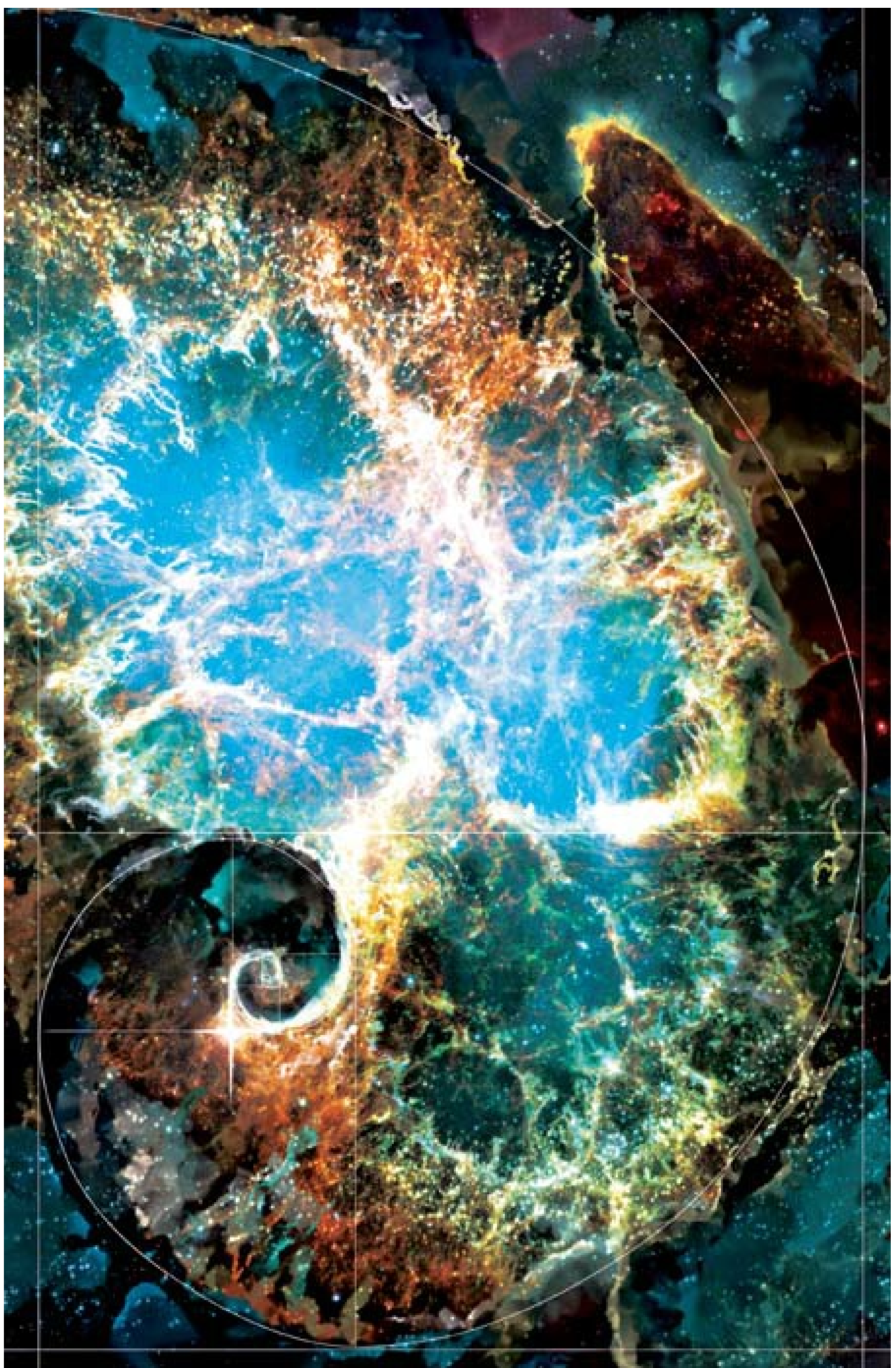
Che la teoria M esista come formulazione unica o soltanto come una rete, di certo ne conosciamo alcune proprietà. In primo luogo, la teoria M ha undici dimensioni spaziotemporali, e non dieci. I teorici delle corde sospettavano da tempo che la predizione delle dieci dimensioni potesse richiedere una correzione, e ricerche recenti hanno messo in evidenza che effettivamente una dimensione era stata trascurata. Inoltre la teoria M può contenere, oltre che corde vibranti, anche particelle puntiformi, membrane bidimensionali, bolle tridimensionali e altri oggetti di cui è più difficile farsi un'idea intuitiva e che si estendono in un numero ancor maggiore di dimensioni spaziali, fino a nove. Questi oggetti sono chiamati *p*-brane (dove *p*, numero delle dimensioni, va da 1 a 9).

E come stanno le cose per quanto riguarda l'enorme numero di modi in cui si possono avvolgere le dimensioni minuscole? Nella teoria M le dimensioni dello spazio interno non possono essere avvolte in un modo qualsiasi. La matematica della teoria pone restrizioni alla maniera in cui ciò può avvenire. La struttura specifica dello spazio interno determina sia i valori delle costanti fisiche, come la carica dell'elettrone, sia la natura delle interazioni tra le particelle elementari. In altre parole, determina le leggi visibili di natura. Diciamo «visibili» intendendo con ciò le leggi che si osservano nel nostro universo: le leggi delle quattro forze e i parametri quali massa e carica che caratterizzano le particelle elementari. Ma le leggi più fondamentali sono quelle della teoria M.

Le leggi della teoria M ammettono quindi *differenti universi*, con leggi visibili diverse, a seconda di come lo spazio interno è avvolto su se stesso. La teoria M contiene soluzioni che danno adito a molti spazi interni diversi, forse non meno di 10^{500} , il che significa che permette 10^{500} universi differenti, ciascuno con proprie leggi. Per farsi un'idea di quanto grande sia tale numero, si può pensare a questo: se un essere fosse in grado di analizzare le leggi previste per ciascuno di quegli universi in un solo millisecondo e avesse iniziato a lavorarci al momento del big bang, adesso ne

avrebbe studiati soltanto 10^{20} . E questo senza fare pause caffè.

Qualche secolo fa Newton mostrò che le equazioni matematiche potevano fornire una descrizione sbalorditivamente precisa del modo in cui i corpi interagiscono, sia sulla Terra sia nei cieli. Gli scienziati furono indotti a credere che si sarebbe potuto determinare il futuro dell'intero universo se soltanto si fosse conosciuta la teoria appropriata e si fosse disposto di una sufficiente potenza di calcolo. Poi vennero l'indeterminazione quantistica, lo spazio curvo, i quark, le corde e le dimensioni aggiuntive, e il risultato finale dei loro sforzi sono 10^{500} universi, ciascuno con leggi differenti, uno solo dei quali corrisponde all'universo che conosciamo. L'originaria speranza dei fisici di formulare un'unica teoria che spiegasse le leggi visibili del nostro universo come unica conseguenza possibile di un certo numero di presupposti deve forse essere abbandonata. Che significa tutto ciò? Se la teoria M ammette 10^{500} insiemi di leggi visibili, come mai siamo finiti proprio in questo universo, con le leggi che sono sotto i nostri occhi? E che si può dire di quegli altri mondi possibili?



Ssecondo il popolo boshongo dell'Africa centrale, al principio c'erano soltanto oscurità, acqua e il grande dio Bumpa. Un giorno Bumpa, in preda al mal di stomaco, vomitò il Sole. Con il tempo il Sole asciugò parte dell'acqua, scoprendo la terraferma. Ma Bumpa stava ancora male e vomitò di nuovo. Così vennero al mondo la Luna, le stelle, e poi alcuni animali: il leopardo, il coccodrillo, la tartaruga, e infine l'uomo. I maya del Messico e dell'America centrale parlano di un'analoga epoca precedente la creazione in cui esistevano solo il mare, il cielo e il Creatore. Nella leggenda maya il Creatore, infelice perché non c'era nessuno che cantasse le sue lodi, creò la Terra, le montagne, gli alberi e la maggior parte degli animali. Ma gli animali non sapevano parlare, e così decise di creare gli uomini. In un primo tempo li fece di fango e terra, ma dicevano soltanto cose senza senso. Li fece scomparire e riprovò, questa volta foggiandoli dal legno. Ma quegli uomini erano ottusi. Allora il Creatore decise di distruggerli, perciò loro si rifugiarono nella foresta, rimanendo menomati durante la fuga in un modo che li modificò leggermente, trasformandoli in quelle che oggi conosciamo come scimmie. Dopo questo fiasco, il Creatore trovò alla fine una formula che funzionava, e fece i primi esseri umani con il grano e il mais. Oggi dal mais estraiamo l'etanolo, ma finora non abbiamo uguagliato l'impresa del Creatore che ne trasse coloro che lo bevono.

Miti della creazione come questi tentano tutti di rispondere alle domande che ci poniamo qui: perché c'è un universo, e perché l'universo è com'è? I nostri tentativi di affrontare tali domande hanno potuto giovare di mezzi conoscitivi che sono continuamente cresciuti nel corso dei secoli, dal tempo degli antichi greci a oggi, e in modo particolarmente significativo durante gli ultimi cento anni. Armati di quanto abbiamo appreso nei capitoli precedenti, ora siamo pronti per proporre una possibile risposta a quegli interrogativi.

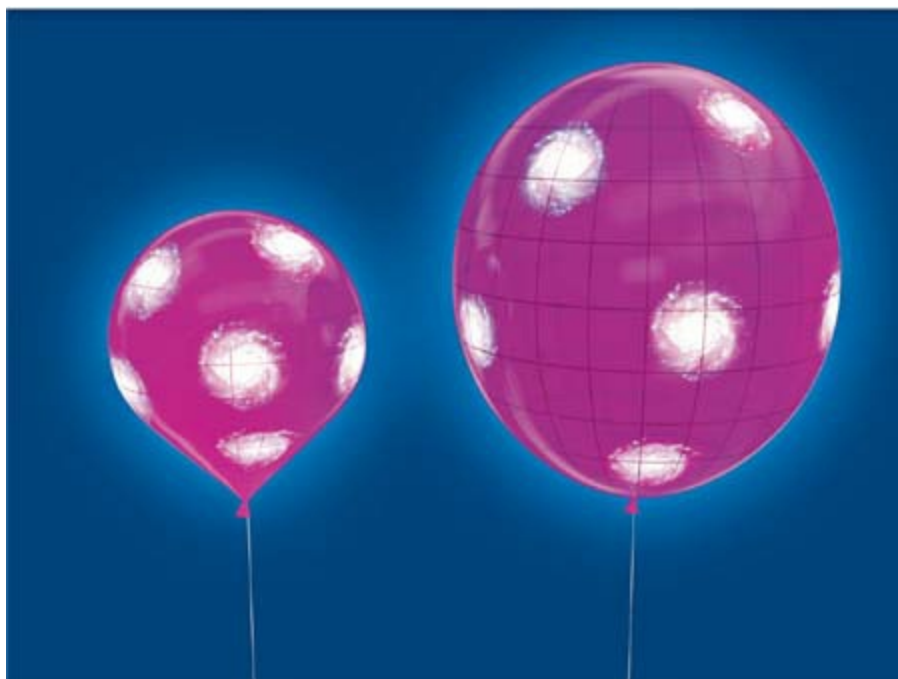
Una cosa che forse è parsa evidente fin dai tempi antichi è che o l'universo è una creazione molto recente oppure gli esseri umani sono esistiti soltanto per una piccola frazione della storia cosmica. Questo perché la specie umana si è sviluppata così rapidamente in fatto di conoscenza e tecnologia che, se fosse stata presente per milioni di anni, oggi avrebbe raggiunto una padronanza dell'universo molto maggiore.

Secondo l'Antico Testamento, Dio creò Adamo ed Eva soltanto sei giorni dopo l'inizio della creazione. Il vescovo Ussher, primate anglicano di tutta l'Irlanda dal 1625 al 1656, collocò l'origine del mondo in modo ancor più preciso, al calar della notte precedente domenica 23 ottobre 4004 a.C. Noi siamo di parere diverso: gli esseri umani sono una creazione recente ma l'universo ha avuto inizio molto tempo prima, all'incirca 13,7 miliardi di anni fa.

La prima vera prova scientifica del fatto che l'universo ha avuto un inizio si presentò negli anni '20. Come si è detto nel III capitolo, a quell'epoca la maggior parte degli scienziati credeva in un

universo statico esistente da sempre. La prova del contrario era di tipo indiretto, basandosi sulle osservazioni compiute da Edwin Hubble con il telescopio da 250 centimetri di diametro di Monte Wilson, sulle alture intorno a Pasadena, in California. Analizzando lo spettro della luce emessa, Hubble stabilì che quasi tutte le galassie si stanno allontanando da noi, e che quanto più sono lontane, tanto più rapidamente recedono. Nel 1929 pubblicò una legge che connetteva la loro velocità di recessione alla loro distanza da noi, e concluse che l'universo è in espansione. Se ciò è vero, deve essere stato più piccolo nel passato. Tornando a ritroso al passato più remoto, tutta la materia e l'energia dell'universo sarebbero state concentrate in una regione minuscola di densità e temperatura inimmaginabili, e se si risale all'indietro a sufficienza, ci sarebbe stato un istante in cui tutto ebbe inizio: l'evento che oggi chiamiamo big bang.

L'idea che l'universo sia in espansione implica qualche sottigliezza. Per esempio, non si deve pensare che l'universo si espanda nel modo in cui, diciamo, potremmo ampliare la nostra casa, abbattendo una parete e costruendo un nuovo bagno dove prima c'era una maestosa quercia. Non è lo spazio che si *estende*, ma è la distanza tra due punti qualsiasi *entro* l'universo che aumenta. Questa idea emerse negli anni '30 in mezzo a molte controversie, ma uno dei modi migliori per visualizzarla è ancora una metafora proposta nel 1931 dall'astronomo dell'Università di Cambridge Arthur Eddington. Eddington immaginava l'universo come la superficie di un palloncino che si dilata, e tutte le galassie come punti su tale superficie. Questa analogia spiega chiaramente perché le galassie lontane recedono più rapidamente di quelle vicine. Se, per esempio, il raggio del palloncino raddoppiasse ogni ora, la distanza tra due galassie qualsiasi sul palloncino raddoppierebbe anch'essa ogni ora. Se a un certo momento due galassie fossero a una distanza di 1 centimetro, un'ora dopo sarebbero distanti 2 centimetri, e apparirebbero muoversi l'una rispetto all'altra alla velocità di 1 centimetro all'ora. Ma se inizialmente fossero a 2 centimetri di distanza, un'ora dopo sarebbero lontane 4 centimetri e sembrerebbero allontanarsi l'una dall'altra a una velocità di 2 centimetri all'ora. E questo è proprio ciò che Hubble aveva scoperto: quanto più lontana è una galassia, tanto più rapidamente si allontana da noi.



Universo a palloncino. Le galassie distanti si allontanano da noi come se il cosmo fosse tutto sulla superficie di un gigantesco

È importante comprendere che l'espansione dello spazio non altera le dimensioni degli oggetti materiali, come galassie, stelle, mele, atomi, o altri corpi tenuti insieme da qualche tipo di forza. Per esempio, se tracciassimo un cerchio sul palloncino intorno a un ammasso di galassie, questo cerchio non si dilaterrebbe con l'espansione del palloncino. Viceversa, poiché le galassie sono legate da forze gravitazionali, il cerchio e le galassie al suo interno manterrebbero le loro dimensioni e la loro configurazione mentre il palloncino si dilata. Ciò è importante perché possiamo rivelare l'espansione soltanto se i nostri strumenti di misura hanno dimensioni fisse. Se ogni cosa fosse libera di espandersi, noi, i nostri metri campione, i nostri laboratori e così via, ci espanderemmo tutti in proporzione e non noteremmo alcuna differenza.

Che l'universo sia in espansione fu una sorpresa per Einstein. Ma la possibilità che le galassie si allontanino l'una dall'altra era stata prospettata qualche anno prima delle scoperte di Hubble in base a considerazioni teoriche derivanti proprio dalle equazioni di Einstein. Nel 1922 il fisico e matematico russo Alexander Friedmann aveva studiato che cosa accadrebbe in un universo modello basato su due ipotesi che semplificavano notevolmente la trattazione matematica: che l'universo appaia identico in ogni direzione, e che appaia tale da ogni punto di osservazione. Noi sappiamo che la prima ipotesi di Friedmann non è esattamente vera: fortunatamente l'universo non è uniforme dovunque! Se guardiamo verso l'alto in una direzione vediamo magari il Sole; in un'altra, la Luna oppure uno stormo di pipistrelli vampiri. Ma l'universo appare approssimativamente identico in ogni direzione se lo si osserva su una scala molto più grande, maggiore anche della distanza tra le galassie. È un po' come guardare una foresta dall'alto. Se si è abbastanza vicini si possono distinguere le singole foglie, o almeno gli alberi, e gli spazi che li separano. Ma se si è così in alto che sporgendo il pollice questo copre un chilometro quadrato di alberi, la foresta apparirà come una distesa uniforme di verde. Diremmo che, su tale scala, la foresta è uniforme.

Basandosi sulle proprie ipotesi Friedmann riuscì a trovare una soluzione delle equazioni di Einstein in cui l'universo si espandeva proprio nel modo che di lì a poco Hubble avrebbe scoperto corrispondere al vero. In particolare, l'universo modello di Friedmann ha inizialmente dimensioni nulle e si espande finché l'attrazione gravitazionale ne rallenta il moto, e alla fine lo fa ricadere su se stesso. (Risulta che vi sono altri due tipi di soluzioni delle equazioni di Einstein che soddisfanno anch'esse le condizioni del modello di Friedmann: una corrisponde a un universo in cui l'espansione continua per sempre, pur rallentando leggermente, e un'un'altra corrisponde a un universo in cui la velocità di espansione diminuisce tendendo a zero, ma senza mai annullarsi del tutto.) Friedmann morì qualche anno dopo aver condotto queste ricerche, e le sue idee rimasero pressoché sconosciute fin dopo la scoperta di Hubble. Ma nel 1927 un professore di fisica e sacerdote cattolico di nome Georges Lemaître propose un'idea simile: se si ripercorre la storia dell'universo procedendo a ritroso nel tempo, esso diventa sempre più piccolo finché si raggiunge un evento di creazione: quello che oggi chiamiamo big bang.

Non a tutti piaceva l'immagine del big bang. In realtà l'espressione stessa «big bang» fu coniata nel 1949 dall'astrofisico di Cambridge Fred Hoyle, il quale credeva a un universo destinato a espandersi per sempre, e intendeva l'espressione in senso derisorio. Le prime osservazioni dirette a sostegno del big bang si ebbero soltanto nel 1965, con la scoperta dell'esistenza di un debole fondo di radiazione a microonde che pervadeva tutto lo spazio. La radiazione cosmica di fondo a

microonde, o RCFM, è analoga a quella presente nel vostro forno a microonde, ma molto meno intensa. La potete osservare voi stessi sintonizzando il vostro televisore su un canale inutilizzato: una piccola percentuale della neve che vedete sullo schermo è prodotta dalla RCFM. La radiazione fu scoperta per caso da due scienziati dei Laboratori Bell, nel tentativo di eliminare questo disturbo dalla loro antenna per microonde. In un primo momento pensarono che il disturbo potesse derivare dalle deiezioni dei piccioni che si appollaiavano sull'antenna, ma poi si capì che il problema aveva un'origine più interessante: la RCFM è radiazione residua dell'universo primordiale estremamente caldo e denso che sarebbe esistito poco dopo il big bang. Con l'espansione poi l'universo si raffreddò finché la radiazione si ridusse al debole residuo che osserviamo oggi. Attualmente queste microonde potrebbero riscaldare il vostro cibo soltanto fino a circa -270 gradi Celsius, 3 gradi sopra lo zero assoluto, e quindi non sarebbero molto utili per fare il popcorn.

Gli astronomi hanno scoperto anche altri indizi in favore dell'universo primordiale minuscolo e caldissimo creato dal big bang. Per esempio, durante il primo minuto o giù di lì, l'universo sarebbe stato più caldo del centro di una stella e l'intero cosmo avrebbe funzionato come un reattore a fusione nucleare. Le reazioni sarebbero cessate quando l'universo si dilatò e raffreddò a sufficienza, ma la teoria predice che questo processo avrebbe dovuto produrre un universo composto prevalentemente di idrogeno, il 23 per cento circa di elio e tracce di litio (tutti gli elementi più pesanti furono sintetizzati più tardi, all'interno delle stelle). Il calcolo è in buon accordo con le quantità di idrogeno, elio e litio che si osservano.

Le misurazioni dell'abbondanza dell'elio e della RCFM fornirono una prova convincente dell'universo primordiale creato dal big bang, ma se è legittimo pensare al big bang come a una valida descrizione dei primordi, è sbagliato prenderla alla lettera, e cioè pensare che la teoria di Einstein fornisca un'immagine vera dell'*origine* dell'universo. Questo perché la relatività generale predice che vi sia un istante nel tempo in corrispondenza del quale temperatura, densità e curvatura dell'universo sono tutte infinite, una situazione che per i matematici costituisce una singolarità. Per un fisico ciò significa che la teoria di Einstein a quel punto cessa di valere e pertanto non può essere usata per predire come l'universo ha avuto inizio, ma soltanto come si è evoluto in seguito. Così, sebbene possiamo servirci delle equazioni della relatività generale e delle nostre osservazioni dei cieli per farci un'idea dell'universo nelle sue primissime fasi di vita, non è corretto estendere la descrizione del big bang fino all'inizio.

Torneremo tra breve alla questione dell'origine dell'universo, ma prima qualche parola sulla fase iniziale dell'espansione. I fisici la chiamano inflazione. A meno che viviate in Zimbabwe, dove l'inflazione monetaria di recente ha superato il 200.000.000 per cento, il termine può non sembrare propriamente esplosivo. Ma anche secondo le stime più caute, durante l'inflazione cosmologica, l'universo si dilatò di un fattore 1.000.000.000.000.000.000.000.000.000 in 0,000 000 000 000 000 000 000 01 secondi. È come se una monetina di 1 centimetro di diametro all'improvviso si dilatasse fino a diventare dieci milioni di volte più grande della Via Lattea. Può sembrare che ciò costituisca una violazione della relatività, la quale stabilisce che nulla può muoversi più rapidamente della luce, ma tale limite di velocità non vale per l'espansione dello spazio stesso.

L'idea che possa essersi verificato un episodio di inflazione fu proposta inizialmente nel 1980, sulla base di considerazioni che vanno al di là della teoria della relatività generale di Einstein e tengono conto anche di alcuni aspetti della teoria quantistica. Dal momento che non disponiamo di

una teoria quantistica completa della gravità, i particolari sono ancora in corso di elaborazione e i fisici non sono sicuri di come si sia svolta di preciso l'inflazione. Ma, secondo la teoria, l'espansione causata dall'inflazione non sarebbe stata *completamente* uniforme, come previsto dal modello tradizionale del big bang. Le irregolarità avrebbero prodotto minuscole variazioni della temperatura della RCFM in differenti direzioni. Queste disomogeneità sono troppo piccole perché potessero essere osservate negli anni '60, ma furono scoperte nel 1992 dal satellite COBE della NASA, e in seguito misurate dal suo successore, il satellite WMAP, lanciato nel 2001. Di conseguenza, oggi siamo convinti che l'inflazione abbia effettivamente avuto luogo.

Paradossalmente, sebbene le minuscole variazioni presenti nella RCFM siano una prova dell'inflazione, una delle ragioni per cui l'inflazione è un concetto importante è la quasi perfetta uniformità della temperatura della RCFM. Se si fa in modo che una parte di un corpo sia più calda delle regioni circostanti e poi si attende, il punto caldo si raffredderà e i suoi dintorni si riscaldano finché la temperatura del corpo risulterà uniforme. Analogamente ci si aspetterebbe che l'universo alla fine abbia una temperatura uniforme. Ma questo processo richiede tempo, e se non ci fosse stata l'inflazione, nella storia dell'universo non ci sarebbe stato tempo sufficiente perché il calore si distribuisse in modo uniforme in regioni separate da grandi distanze, ammettendo che la velocità di trasferimento di calore non possa essere superiore alla velocità della luce. Un periodo di espansione estremamente rapida (molto più rapida della velocità della luce) pone rimedio a questa difficoltà perché ci sarebbe stato tempo sufficiente per il livellamento termico nell'universo primordiale estremamente piccolo prima dell'inflazione.

L'inflazione spiega il «bang», lo scoppio, del big bang, almeno nel senso che l'espansione fu assai più estrema di quella prevista dalla teoria tradizionale del big bang basata sulla relatività generale per l'arco di tempo in cui l'inflazione si verificò. Il problema è che lo stato iniziale dell'universo, perché i nostri modelli teorici dell'inflazione funzionino, doveva essere predisposto in un modo molto specifico e altamente improbabile. Così la teoria tradizionale dell'inflazione risolve un insieme di problemi, ma ne crea un altro: la necessità di uno stato iniziale del tutto speciale. La questione dell'istante zero è eliminata nella teoria della creazione dell'universo che stiamo per presentare.

Dal momento che non possiamo descrivere la creazione servendoci della teoria della relatività generale di Einstein, se vogliamo descrivere l'origine dell'universo, tale teoria deve essere sostituita da una più completa. Ci si aspetterebbe che occorra una teoria più completa anche se la relatività generale non cessasse di valere, perché essa non tiene conto della struttura della materia su piccola scala, che è governata dalla teoria quantistica. Si è detto nel IV capitolo che, alla maggior parte dei fini pratici, la teoria quantistica non ha grande rilievo per lo studio della struttura dell'universo su vasta scala perché si applica alla descrizione della natura su scale microscopiche. Ma, risalendo a sufficienza all'indietro nel tempo, l'universo aveva dimensioni dell'ordine della lunghezza di Planck, pari a un milionesimo di milionesimo di centimetro, e su questa scala si deve per forza tener conto della teoria quantistica. Così, sebbene non disponiamo ancora di una teoria quantistica completa della gravità, sappiamo per certo che l'origine dell'universo fu un evento quantistico. Di conseguenza, proprio come abbiamo combinato la teoria quantistica e la relatività generale – almeno in modo provvisorio – per ricavare la teoria dell'inflazione, se vogliamo risalire ancora più indietro e comprendere l'origine dell'universo, dobbiamo combinare quanto sappiamo della relatività generale con la teoria quantistica.

Per farci un'idea di come vanno le cose, dobbiamo comprendere il principio secondo il quale la gravità deforma lo spazio e il tempo. La deformazione dello spazio è più facile da visualizzare della deformazione del tempo. Immaginiamo che l'universo sia la superficie di un tavolo da biliardo piano. La superficie del tavolo è uno spazio piatto in due dimensioni. Se si fa rotolare una bilia sul tavolo, si muoverà in linea retta. Ma se il tavolo risulta incurvato o presenta delle buche, come nella figura qui sopra, la bilia seguirà una traiettoria curva.

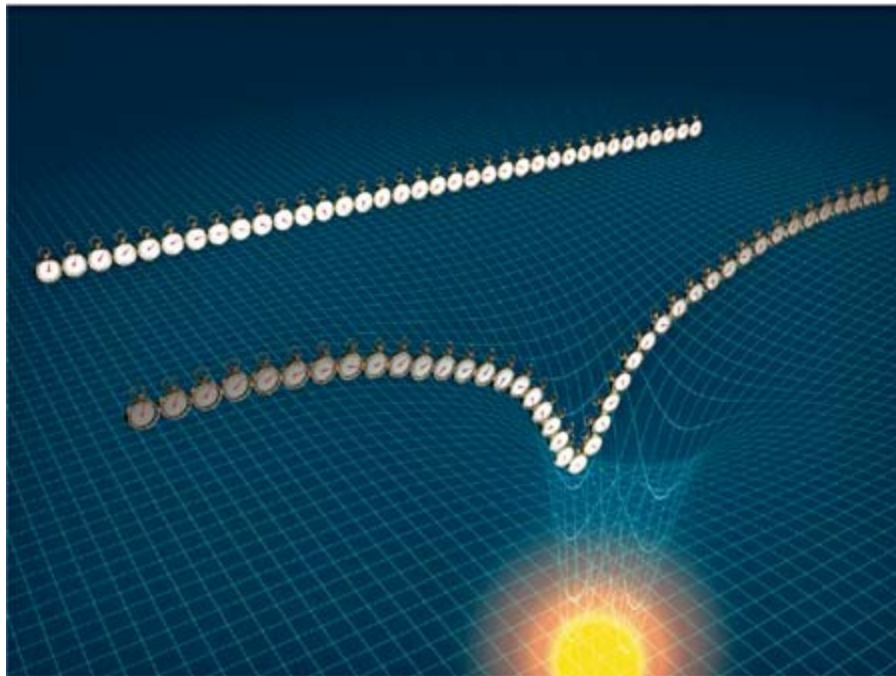


Deformazione dello spazio. Materia ed energia deformano lo spazio, modificando le traiettorie dei corpi.

È facile rendersi conto di come è deformato il tavolo da biliardo in questo esempio, perché la sua superficie è incurvata in una terza dimensione esterna che noi possiamo vedere. Siccome non possiamo uscire dal nostro spaziotempo per vederne la curvatura, la deformazione dello spaziotempo nel nostro universo è più difficile da immaginare. Ma la curvatura può essere rivelata anche se non è possibile porsi all'esterno e osservarla dal punto di vista di uno spazio con più dimensioni. Può essere rivelata dall'interno dello spazio stesso. Immaginiamo una microformica confinata sulla superficie del tavolo. Anche senza la possibilità di allontanarsene, la formica potrebbe scoprirne la curvatura registrando con precisione le distanze. Per esempio, nello spazio piatto la lunghezza di una semicirconferenza è sempre un po' più di tre volte maggiore della lunghezza del suo diametro (il fattore effettivo è π). Ma se la formica tagliasse lungo il cerchio che racchiude la buca visibile nel tavolo, scoprirebbe che la distanza lungo il diametro è maggiore di quanto previsto, maggiore cioè di un terzo della semicirconferenza. Anzi, se la buca fosse abbastanza profonda, la formica scoprirebbe che la distanza lungo la circonferenza è *minore* della distanza lungo il diametro. Lo stesso vale per la curvatura nel nostro universo: essa dilata o comprime la distanza tra i punti dello spazio, modificandone la geometria, ossia la forma, in un modo che è misurabile dall'interno dell'universo. La deformazione del tempo dilata o comprime gli intervalli di tempo in maniera analoga.

Armati di queste idee, torniamo alla questione dell'inizio dell'universo. Possiamo parlare separatamente di spazio e tempo, come abbiamo fatto in questa discussione, in situazioni caratterizzate da velocità basse e forze gravitazionali deboli. In generale, però, tempo e spazio sono

strettamente intrecciati, e quindi la loro dilatazione e compressione implica anche una certa quantità di mescolamento. Il mescolamento è importante nell'universo primordiale ed è la chiave per comprendere l'inizio del tempo.



Deformazione dello spaziotempo. Materia ed energia deformano il tempo facendo sì che la dimensione temporale si «mescoli» con le dimensioni spaziali.

La questione dell'inizio del tempo è un po' simile alla questione dell'orlo del mondo. Quando si pensava che il mondo fosse piatto, poteva accadere di chiedersi se il mare traboccava dall'orlo. La cosa è stata sottoposta a verifica sperimentale: si può girare intorno al mondo senza cadere giù. Il problema di che cosa accada all'orlo del mondo fu risolto quando ci si rese conto che la Terra non era una distesa piatta, ma una superficie curva. Il tempo, però, sembrava analogo a un plastico ferroviario. Se aveva un inizio, avrebbe dovuto esserci qualcuno (cioè, Dio) a mettere in moto i treni. Sebbene la teoria della relatività generale di Einstein unificasse tempo e spazio nello spaziotempo e implicasse una certa mescolanza dei due, il tempo era ancora distinto dallo spazio, e aveva un inizio e una fine, oppure durava per sempre. Ma una volta che si combinino gli effetti della teoria quantistica con la teoria della relatività, la deformazione in casi estremi può verificarsi in misura così elevata che il tempo si comporta come un'altra dimensione dello spazio.

Nell'universo primordiale – quando era così piccolo da essere governato sia dalla relatività generale sia dalla teoria quantistica – c'erano effettivamente quattro dimensioni spaziali e nessuna temporale. Ciò significa che, quando parliamo dell'«inizio» dell'universo, evitiamo la delicata questione che allorché guardiamo a ritroso verso l'universo delle origini, il tempo come noi lo conosciamo non esiste! Dobbiamo accettare il fatto che le nostre consuete idee di spazio e tempo non sono applicabili all'universo delle origini. Ciò va al di là della nostra esperienza, ma non della nostra immaginazione, o della nostra matematica. Se nell'universo delle origini tutte e quattro le dimensioni si comportano come lo spazio, che ne è dell'inizio del tempo?

L'intuizione che il tempo può comportarsi come un'ulteriore direzione spaziale significa che ci si può sbarazzare del problema dell'inizio del tempo come ci siamo sbarazzati del problema dell'orlo

del mondo. Supponiamo che l'inizio dell'universo fosse paragonabile al polo sud della Terra, con i gradi di latitudine che svolgono il ruolo del tempo. Man mano che si procede verso nord, i paralleli (cerchi di latitudine costante), che rappresentano le dimensioni dell'universo, si dilaterebbero. L'universo avrebbe origine come un punto al polo sud, ma il polo sud è del tutto simile a qualsiasi altro punto. Chiedersi che cosa sia accaduto prima dell'inizio dell'universo non avrebbe più alcun senso, perché non c'è nulla a sud del polo sud. In questa descrizione lo spaziotempo non ha un contorno: le medesime leggi di natura valgono al polo sud come negli altri luoghi. In una maniera analoga, quando si combina la teoria della relatività generale con la teoria quantistica, la questione di che cosa sia accaduto prima dell'inizio dell'universo diventa priva di senso. L'idea che le storie debbano essere superfici chiuse prive di contorno è detta condizione di assenza di contorno (o di confine).

Nel corso dei secoli molti, compreso Aristotele, hanno creduto che l'universo dovesse essere sempre esistito per evitare la questione di come abbia avuto avvio. Altri hanno creduto che l'universo ha avuto un inizio, e se ne sono serviti come argomento a favore dell'esistenza di Dio. La comprensione del fatto che il tempo si comporta come lo spazio propone una nuova alternativa. Elimina infatti l'annosa obiezione all'idea che l'universo abbia avuto un inizio, ma significa anche che l'inizio fu governato dalle leggi della scienza e non presuppone un atto di avvio da parte di una qualche divinità.

Se l'origine dell'universo è stata un evento quantistico, dovrebbe essere descritta con precisione dalla somma sulle storie di Feynman. Ma applicare la teoria quantistica all'intero universo – dove gli osservatori sono parte del sistema sotto osservazione – è questione delicata. Nel IV capitolo abbiamo visto che particelle materiali sparate contro una barriera con due fenditure possono produrre figure di interferenza proprio come le onde sull'acqua. Feynman dimostrò che ciò accade perché una particella non ha una storia unica. Vale a dire che, quando si sposta dal punto di partenza A a un punto di arrivo B, non segue una traiettoria definita, ma segue simultaneamente ogni possibile percorso che congiunge A e B. Da questo punto di vista, l'interferenza non è una sorpresa perché, per esempio, la particella può passare da entrambe le fenditure allo stesso tempo e interferire con se stessa. Applicato al moto di una particella, il metodo di Feynman implica che per calcolare la probabilità di un qualsiasi punto di arrivo occorre considerare tutte le possibili storie che potrebbero condurre la particella dal punto di partenza a quel punto di arrivo. Si possono usare i metodi di Feynman anche per calcolare le probabilità quantistiche di osservazioni relative all'universo. Quando tali metodi sono applicati all'universo nel suo insieme, non c'è un punto A, e quindi si sommano tutte le storie che soddisfanno la condizione di assenza di contorno e conducono all'universo che osserviamo oggi.

In questa concezione, l'universo è comparso in modo spontaneo, iniziando in ogni modo possibile. La maggior parte di questi modi corrisponde ad altri universi. Sebbene alcuni di questi universi siano simili al nostro, gran parte di essi sono assai differenti. Non differiscono soltanto nei particolari, del tipo se Elvis sia morto giovane o no, o se le rape siano un dessert o no, ma differiscono perfino nelle loro leggi visibili di natura. In effetti esistono molti universi con molti insiemi differenti di leggi fisiche. C'è chi considera assai misteriosa questa idea, cui a volte ci si riferisce con il termine «multiverso», ma si tratta semplicemente di un altro modo di parlare della somma sulle storie di Feynman.

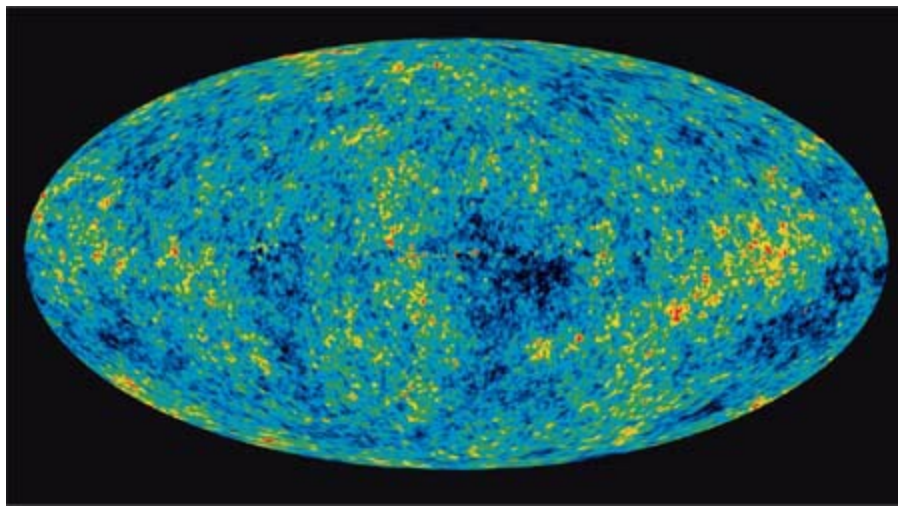
Per farcene un'idea intuitiva, modifichiamo l'analogia del palloncino di Eddington e immaginiamo

l'universo in espansione come la superficie di una bolla. La creazione quantistica spontanea dell'universo è allora in qualche modo analoga alla formazione delle bolle di vapore nell'acqua bollente. Compaiono molte bollicine minuscole, che poi tornano a scomparire. Queste corrispondono a miniuniversi che si espandono ma poi subiscono il collasso mentre ancora hanno dimensioni microscopiche. Rappresentano possibili universi alternativi, ma non sono di grande interesse perché non durano abbastanza a lungo da produrre galassie e stelle, e tanto meno vita intelligente. Alcune delle bollicine, però, diventeranno abbastanza grandi da non rischiare di subire il collasso: continueranno a espandersi a una velocità sempre crescente e formeranno le bolle di vapore che riusciamo a vedere. Queste corrispondono a universi che cominciano espandendosi a un ritmo sempre più elevato: in altre parole, a universi in uno stato di inflazione.

Come abbiamo detto, l'espansione causata dall'inflazione non sarebbe stata del tutto uniforme. Nella somma sulle storie, c'è soltanto una storia completamente uniforme e regolare, e avrà la massima probabilità, ma molte altre storie impercettibilmente irregolari avranno probabilità quasi altrettanto elevate. Questa è la ragione per cui la teoria dell'inflazione predice che l'universo primordiale presenti probabilmente leggere disomogeneità, corrispondenti alle piccole variazioni di intensità osservate nella RCFM. Le irregolarità presenti nell'universo primordiale sono una fortuna per noi. Perché? L'omogeneità è una buona cosa se non vogliamo che la panna si separi dal latte nella nostra tazza, ma un universo omogeneo è un universo noioso. Le irregolarità nell'universo delle origini sono importanti perché, se alcune regioni avessero avuto una densità leggermente maggiore di altre, l'attrazione gravitazionale di questa materia più densa avrebbe rallentato l'espansione di tali regioni rispetto a quella delle regioni circostanti. La forza di gravità aggruma lentamente la materia, e alla fine può causarne il collasso con la conseguente formazione di galassie e stelle, e di qui possono aver origine pianeti e, almeno in un caso, persone. Perciò guardiamo con attenzione la mappa del cielo nella gamma delle microonde. Rappresenta il progetto di tutte le strutture dell'universo. Noi siamo il prodotto delle fluttuazioni quantistiche presenti nell'universo primordiale. Chi fosse religioso potrebbe dire che davvero Dio gioca a dadi.



Il multiverso. Le fluttuazioni quantistiche portano alla creazione di minuscoli universi dal nulla. Alcuni raggiungono una dimensione critica, poi si espandono con una fase di inflazione, formando galassie, stelle e, in almeno un caso, esseri come noi.



La radiazione cosmica di fondo a microonde. Questa immagine del cielo è stata realizzata nel 2010 con i dati registrati dal satellite WMAP nell'arco di sette anni. La mappa rivela le fluttuazioni di temperatura – rappresentate da differenze di colore – risalenti a 13,7 miliardi di anni fa. Le fluttuazioni corrispondono a differenze di temperatura inferiori a un millesimo di grado Celsius, ma furono i semi che si svilupparono fino a diventare galassie. (NASA/WMAP Science Team)

Quest'idea porta a una visione dell'universo che è profondamente diversa dalla concezione tradizionale e ci richiede di adeguare il modo in cui pensiamo alla storia cosmica. Per fare predizioni in cosmologia dobbiamo calcolare le probabilità di differenti stati dell'intero universo al momento attuale. Di norma in fisica si ammette per un sistema un certo stato iniziale e lo si fa evolvere in avanti nel tempo utilizzando le appropriate equazioni matematiche. Dato lo stato di un sistema a un certo istante, si cerca di calcolare la probabilità che il sistema si venga a trovare in un qualche stato diverso in un istante successivo. Il presupposto usuale in cosmologia è che l'universo abbia un'unica storia ben definita e che si possano usare le leggi della fisica per calcolare come questa storia si sviluppa nel tempo. Chiamiamo questo modo di concepire la cosmologia impostazione *bottomup* (dal basso verso l'alto). Ma siccome si deve tener conto della natura quantistica dell'universo, che si esprime nella somma sulle storie di Feynman, si perviene all'ampiezza di probabilità che l'universo si trovi ora in un particolare stato sommando i contributi di tutte le storie che soddisfanno la condizione di assenza di contorno e terminano nello stato in questione. In cosmologia, in altre parole, non si dovrebbe seguire la storia dell'universo dalle origini in poi perché ciò presuppone che vi sia un'unica storia, con un punto di partenza e un'evoluzione ben definiti. Si dovrebbero invece ricostruire le storie con procedimento *top-down*, cioè dall'alto verso il basso, a ritroso dal momento attuale. Alcune storie saranno più probabili di altre, e la somma sarà di norma dominata da un'unica storia che inizia con la creazione dell'universo e culmina nello stato preso in considerazione. Ma ci saranno storie diverse in corrispondenza di differenti stati possibili dell'universo al momento attuale. Ciò conduce a una visione radicalmente innovativa della cosmologia, e della relazione tra causa ed effetto. Le storie che contribuiscono alla somma di Feynman non hanno un'esistenza indipendente, ma dipendono da ciò che si sta misurando. Siamo noi a creare la storia con la nostra osservazione, e non la storia a creare noi.

L'idea che l'universo non abbia un'unica storia indipendente dall'osservatore potrebbe sembrare in conflitto con certi fatti di cui siamo a conoscenza. Potrebbe esserci una storia in cui la Luna è fatta di formaggio Roquefort, mentre noi abbiamo osservato che la Luna non è fatta di formaggio, il che

rappresenta una cattiva notizia per i topi. Perciò le storie in cui la Luna è fatta di formaggio non contribuiscono allo stato attuale del nostro universo, anche se potrebbero contribuire a quello di altri. Potrebbe sembrare fantascienza, ma non lo è.

Un'importante conseguenza dell'impostazione *top-down* è che le leggi visibili di natura dipendono dalla storia dell'universo. Molti scienziati credono che esista una teoria unica che spiega tali leggi oltre alle costanti fisiche di natura, come la massa dell'elettrone o la dimensionalità dello spaziotempo. Ma la cosmologia *top-down* implica che leggi visibili di natura siano differenti per storie diverse.

Consideriamo la dimensionalità visibile dell'universo («visibile» nel senso specificato alla fine del capitolo precedente). Secondo la teoria M, lo spaziotempo ha dieci dimensioni spaziali e una temporale. L'idea è che sette delle dimensioni spaziali siano avvolte su se stesse su una scala così piccola che non le percepiamo, venendo indotti a credere erroneamente che tutto quanto esiste siano le tre rimanenti dimensioni grandi con cui abbiamo familiarità. Una delle principali questioni che rimangono aperte nella teoria M è perché nel nostro universo non vi siano più dimensioni grandi, e perché ve ne siano alcune avvolte su se stesse.

A molti piacerebbe credere che vi sia un qualche meccanismo che fa avvolgere su se stesse spontaneamente tutte le dimensioni spaziali eccetto tre. In alternativa potrebbe darsi che tutte le dimensioni fossero in origine piccole, ma che per qualche ragione tre dimensioni spaziali si siano dilatate e le altre no. Sembra però che non vi sia alcuna ragione di carattere dinamico perché l'universo appaia quadridimensionale. Anzi, la cosmologia *top-down* predice che il numero di dimensioni spaziali grandi non sia determinato da alcun principio fisico. Vi sarà un'ampiezza di probabilità quantistica per ogni numero di dimensioni spaziali grandi da 0 a 10. La somma di Feynman tiene conto di tutte queste possibilità, e di tutte le storie possibili dell'universo, ma l'osservazione che il nostro universo ha tre dimensioni spaziali grandi seleziona la sottoclasse di storie che hanno la proprietà osservata. In altre parole, la probabilità quantistica che l'universo abbia più o meno di tre dimensioni spaziali grandi è ininfluente perché abbiamo già stabilito che siamo in un universo con tre di queste dimensioni. Quindi, purché l'ampiezza di probabilità per tre dimensioni spaziali grandi non sia esattamente nulla, non ha importanza quanto sia piccola rispetto all'ampiezza di probabilità per altri numeri di dimensioni. Sarebbe come chiedersi quale sia l'ampiezza di probabilità che l'attuale papa sia cinese. Sappiamo che è tedesco, anche se la probabilità che sia cinese è più alta perché ci sono più cinesi che tedeschi. Allo stesso modo, sappiamo che il nostro universo presenta tre dimensioni spaziali grandi, e quindi anche se altri numeri di dimensioni spaziali grandi possono avere un'ampiezza di probabilità maggiore, siamo interessati soltanto a storie con tre dimensioni di questo tipo.

E che si può dire delle dimensioni avvolte su se stesse? Si rammenti che nella teoria M la forma precisa delle rimanenti dimensioni nascoste, lo spazio interno, determina sia i valori di grandezze fisiche come la carica dell'elettrone sia la natura delle interazioni tra particelle elementari, cioè delle forze fondamentali. Le cose sarebbero state semplici se la teoria M avesse consentito soltanto una forma per le dimensioni nascoste, o magari un numero limitato di forme, eventualmente suscettibili di essere in qualche maniera scartate tutte all'infuori di una, con la conseguenza di lasciarci un'unica possibilità per le leggi visibili di natura. Invece vi sono ampiezze di probabilità per non meno forse di 10^{500} spazi interni differenti, ciascuno dei quali porta a leggi e valori per le costanti fisiche diversi.

Se si costruisce la storia dell'universo dal basso verso l'alto (*bottom-up*), non c'è alcuna ragione per cui l'universo debba finire con lo spazio interno associato alle interazioni tra particelle che effettivamente si osservano, cioè con il modello standard (delle interazioni tra particelle elementari). Ma nell'impostazione *top-down* si ammette che esistano universi con tutti gli spazi interni possibili. In alcuni universi gli elettroni hanno la massa di palle da golf e la forza di gravità è più intensa di quella magnetica. Nel nostro vige il modello standard, con tutti i suoi parametri. È possibile calcolare l'ampiezza di probabilità per lo spazio interno che porta al modello standard, sulla base della condizione di assenza di contorno. Come accade per la probabilità di esistenza di un universo con tre dimensioni spaziali grandi, non importa quanto piccola sia tale ampiezza rispetto a quella di altre possibilità, perché abbiamo già osservato che il modello standard descrive il nostro universo.

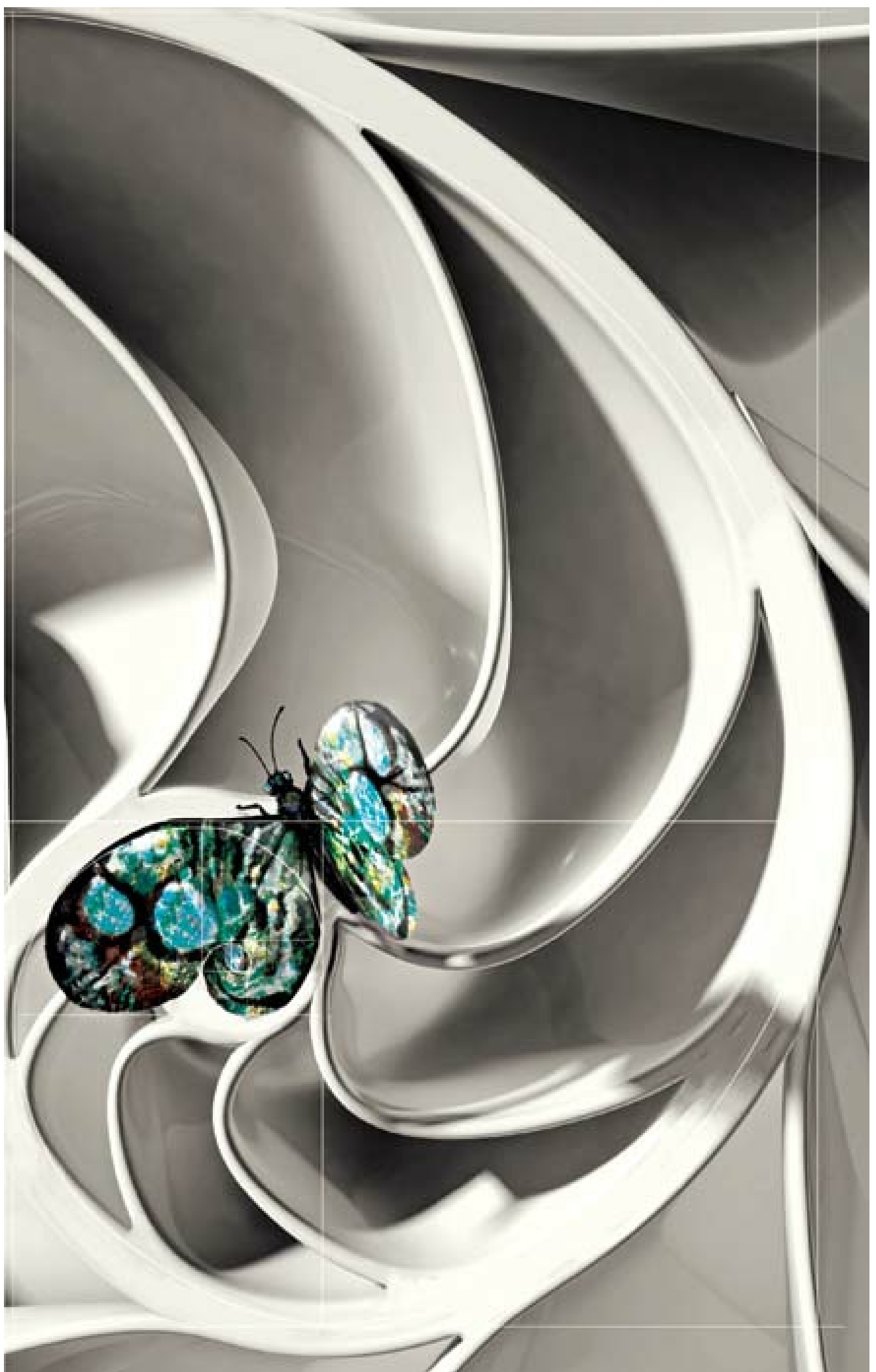
La teoria che stiamo presentando in questo capitolo è verificabile. Negli esempi discussi in precedenza abbiamo sottolineato che le ampiezze relative di probabilità per universi radicalmente differenti tra loro, come quelli con un diverso numero di dimensioni spaziali grandi, non hanno importanza. Le ampiezze relative di probabilità per universi contigui (cioè simili) sono, però, importanti. La condizione di assenza di contorno implica che l'ampiezza di probabilità sia maggiore per storie in cui l'universo è inizialmente del tutto regolare. L'ampiezza è minore per universi più irregolari. Ciò significa che l'universo primordiale sarebbe stato quasi omogeneo, ma con piccole irregolarità. Come si è detto, possiamo osservare tali irregolarità sotto forma di piccole differenze tra le microonde che provengono da diverse direzioni nel cielo. Si è constatato che queste differenze sono in perfetto accordo con le predizioni generali della teoria dell'inflazione; ma sono necessarie misurazioni più precise per distinguere pienamente la teoria *top-down* da altre, e per confermarla o confutarla. Tali misurazioni potranno senz'altro essere effettuate dai satelliti in futuro.

Secoli fa si pensava che la Terra fosse unica, e situata al centro dell'universo. Oggi sappiamo che ci sono centinaia di miliardi di stelle nella nostra galassia, e centinaia di miliardi di galassie, e che una larga percentuale delle stelle è dotata di sistemi planetari. I risultati illustrati in questo capitolo indicano che anche il nostro universo è uno tra molti, e che le sue leggi visibili non sono univocamente determinate. Questo dev'essere deludente per coloro che speravano che una teoria ultima, una teoria del tutto, avrebbe determinato la natura della fisica di tutti i giorni. Invece non possiamo predire caratteristiche discrete come il numero delle dimensioni spaziali grandi o lo spazio interno che determina le grandezze fisiche che si osservano (per esempio, la massa e la carica dell'elettrone e di altre particelle elementari). Ma possiamo usare quei numeri per selezionare le storie che contribuiscono alla somma di Feynman.

Pare che siamo a un punto critico nella storia della scienza, in cui dobbiamo modificare la nostra concezione degli obiettivi della ricerca e di che cosa rende accettabile una teoria fisica. Sembra che le costanti fondamentali e anche la forma delle leggi di natura visibili non siano imposte dalla logica o da un principio fisico. I parametri sono liberi di assumere parecchi valori e le leggi di assumere qualunque forma che porti a una teoria matematica coerente, ed effettivamente assumono valori e forme diverse in differenti universi. Ciò potrà non soddisfare il desiderio umano di essere speciali o di scoprire una bella confezione che contenga tutte le leggi della fisica, ma pare proprio che sia il modo di agire della natura.

Sembra dunque che vi sia un immenso panorama di universi possibili. Come vedremo nel prossimo capitolo, gli universi in cui possono esistere esseri viventi come noi sono rari. Noi viviamo in uno in cui la vita è possibile, ma se l'universo fosse soltanto leggermente differente, esseri come

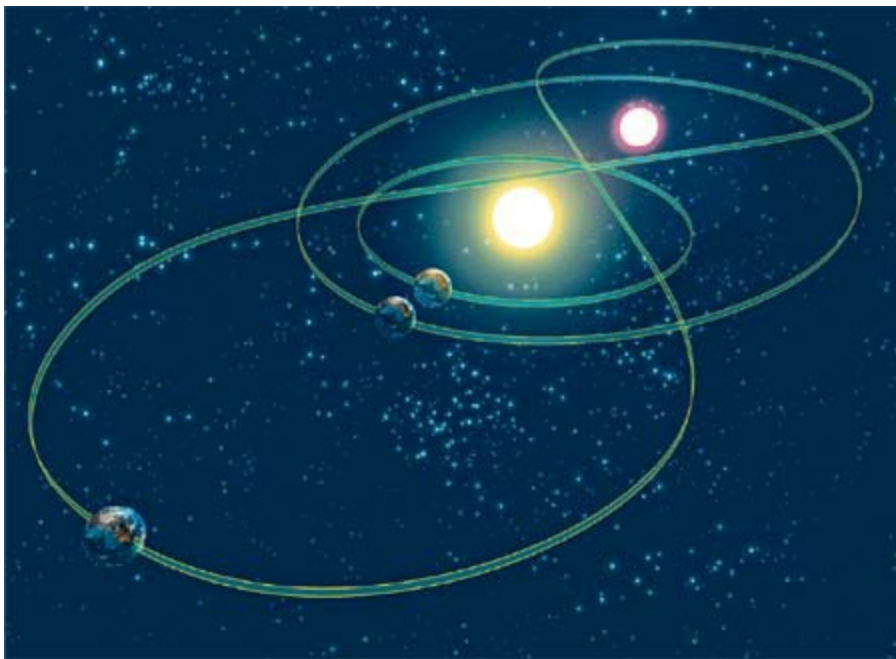
noi non potrebbero esistere. Come dobbiamo interpretare questa regolazione fine? È la prova che l'universo, dopotutto, è stato progettato da un creatore benevolo? Oppure la scienza offre un'altra spiegazione?



Incinesi narrano di un periodo durante la dinastia Xia (c. 2205 - c. 1782 a.C.) in cui il nostro ambiente cosmico si modificò bruscamente. Dieci soli apparvero nel cielo. Gli uomini sulla Terra soffrivano terribilmente per il caldo, e così l'imperatore ordinò a un famoso arciere di abbattere i soli in più. L'arciere fu ricompensato con una pillola che aveva il potere di renderlo immortale, ma sua moglie gliela rubò. Per tale crimine la donna fu esiliata sulla Luna.

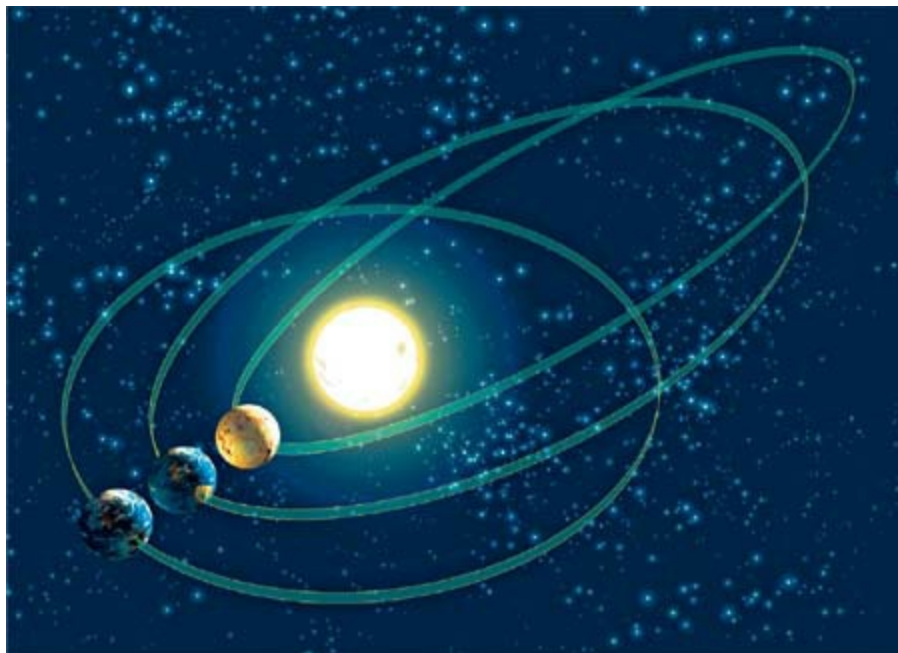
I cinesi avevano ragione a pensare che un sistema solare con dieci soli non sia propizio alla vita umana. Oggi sappiamo che, anche se forse offrirebbe grandi opportunità di abbronzatura, qualsiasi sistema solare con stelle multiple probabilmente non consentirebbe mai alla vita di svilupparsi. Le ragioni non sono proprio così semplici come il caldo torrido immaginato nella leggenda cinese. In effetti un pianeta potrebbe fruire di temperature gradevoli, almeno temporaneamente, pur orbitando intorno a stelle multiple. Ma un riscaldamento uniforme per lunghi periodi di tempo, cosa che sembra necessaria per la vita, sarebbe improbabile. Per capirne la ragione, consideriamo che cosa accade nel tipo più semplice di sistema stellare multiplo, un sistema con due soli, che viene chiamato sistema binario. Circa la metà di tutte le stelle del cielo fanno parte di sistemi di questo genere. Ma anche i semplici sistemi binari possono ospitare soltanto certi tipi di orbite stabili, simili a quelle mostrate nella figura che segue. In ciascuna di queste orbite ci sarebbe con ogni probabilità un periodo in cui il pianeta sarebbe o troppo caldo o troppo freddo per consentire la vita. La situazione è ancora peggiore per ammassi contenenti molte stelle.

Il nostro sistema solare ha altre proprietà «fortunate» senza le quali forme di vita complesse non avrebbero mai potuto evolversi. Per esempio, in base alle leggi di Newton, le orbite planetarie possono essere circonferenze o ellissi (le ellissi sono cerchi schiacciati, più ampi lungo un asse e più stretti lungo l'altro). La misura in cui un'ellisse è schiacciata è descritta da un parametro detto eccentricità, che è un numero compreso tra zero e uno. Un'eccentricità prossima a zero significa che la curva assomiglia a un cerchio, mentre un'eccentricità prossima a uno significa che è molto schiacciata. Keplero era turbato dall'idea che i pianeti non si muovessero su cerchi perfetti, ma l'orbita della Terra ha un'eccentricità soltanto del 2 per cento circa, il che equivale a dire che è quasi circolare. Come è chiaro, questo è un grosso colpo di fortuna.



Orbite binarie. Pianeti in orbita intorno a sistemi stellari binari avranno probabilmente un clima inospitale, in certe stagioni troppo caldo per la vita, in altre troppo freddo.

Gli andamenti climatici stagionali sulla Terra sono determinati principalmente dall'inclinazione del suo asse rispetto al piano dell'orbita terrestre intorno al Sole. Durante l'inverno nell'emisfero settentrionale, per esempio, il polo nord è inclinato dalla parte opposta al Sole. Il fatto che la Terra sia più vicina al Sole in quel periodo – a una distanza di soli 147 milioni di chilometri, a fronte di una distanza di 152 milioni di chilometri all'inizio di luglio – ha sulla temperatura un effetto trascurabile rispetto a quello dell'inclinazione. Ma su pianeti con un'elevata eccentricità orbitale la variazione della distanza dal Sole svolge un ruolo assai più rilevante. Su Mercurio, per esempio, con un'eccentricità del 20 per cento, la temperatura nel punto di massima vicinanza al Sole (perielio) è di oltre 110 gradi maggiore rispetto a quella nel punto di massima distanza dal Sole (afelio). In effetti, se l'eccentricità dell'orbita della Terra fosse prossima a uno, gli oceani bollirebbero quando il pianeta si trova nel punto più vicino al Sole, e congelerebbero quando si trova nel punto più lontano, rendendo non troppo piacevoli sia le vacanze invernali sia quelle estive. Elevate eccentricità orbitali non sono favorevoli alla vita, e quindi siamo fortunati ad abitare su un pianeta per il quale l'eccentricità orbitale è prossima a zero.



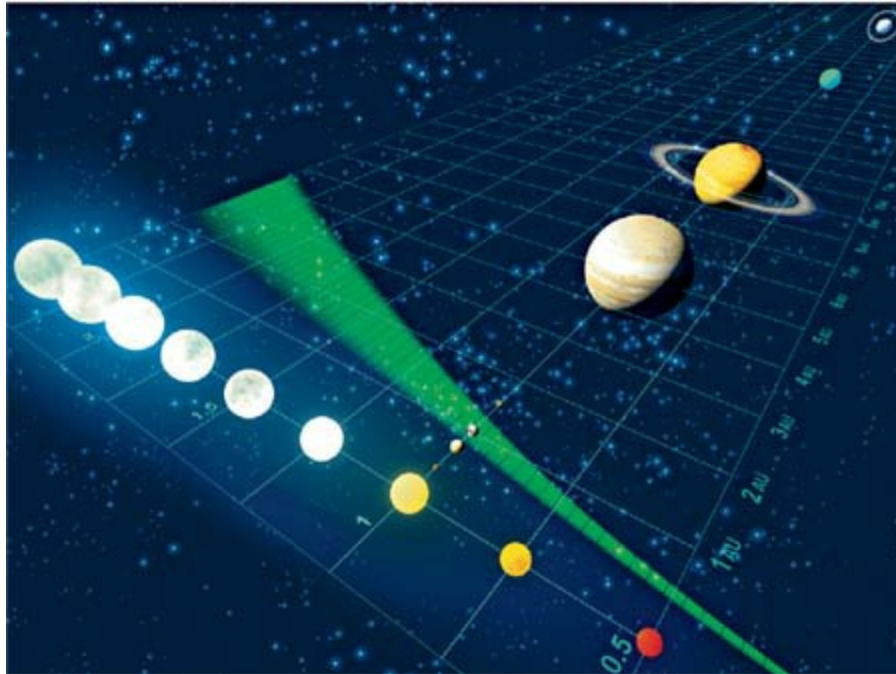
Eccentricità. L'eccentricità è una misura di quanto un'ellisse è vicina a un cerchio. Le orbite circolari sono propizie alla vita, mentre orbite molto allungate causano ingenti fluttuazioni stagionali della temperatura.

Siamo fortunati anche per quanto riguarda il rapporto tra la massa del Sole e la nostra distanza da esso. Questo perché la massa di una stella determina la quantità di energia che emette. Le stelle più grandi hanno una massa circa cento volte maggiore di quella del nostro Sole, mentre le più piccole hanno una massa circa cento volte minore. Eppure, considerando come data la distanza Terra-Sole, se il Sole avesse una massa anche solo del 20 per cento minore o maggiore, la Terra sarebbe più fredda di quanto sia oggi Marte o più calda di quanto sia oggi Venere.

Tradizionalmente gli scienziati, data una qualsiasi stella, definiscono zona abitabile la ristretta regione intorno all'astro in cui le temperature sono tali da rendere possibile l'esistenza di acqua liquida. La zona abitabile viene chiamata a volte «zona di Goldilocks», perché la condizione che esista acqua liquida significa che per l'evoluzione della vita intelligente sono necessarie temperature planetarie che, come quella della minestra nella favoletta di Goldilocks (o Riccioli d'oro), siano «proprio giuste». La zona abitabile nel nostro sistema solare, rappresentata nella figura che segue, è piccolissima. Fortunatamente per quelli di noi che sono forme di vita intelligente, la Terra si è trovata al suo interno!

Newton credeva che il nostro sistema solare stranamente abitabile non «fosse sorto dal caos in forza di semplici leggi di natura». Riteneva invece che l'ordine dell'universo fosse «creato inizialmente da Dio e mantenuto da lui finora nel medesimo stato e condizione». È facile capire perché ci si potesse convincere di ciò. I numerosi eventi improbabili che hanno concorso a rendere possibile la nostra esistenza, e la configurazione adatta all'uomo del nostro mondo, sarebbero davvero enigmatici se il nostro fosse l'unico sistema solare nell'universo. Ma nel 1992 si ebbe la prima osservazione confermata di un pianeta in orbita intorno a una stella diversa dal Sole. Oggi siamo a conoscenza di centinaia di pianeti extrasolari, e pochi dubitano che ne esistano innumerevoli altri tra i molti miliardi di stelle del nostro universo. Ciò rende le coincidenze delle nostre condizioni planetarie – l'unicità del Sole, la fortunata combinazione di distanza Terra-Sole e massa solare – assai meno sorprendenti, e assai meno convincenti come prova del fatto che la Terra sia stata accuratamente progettata proprio per far piacere a noi esseri umani. Esistono pianeti di tutti i

tipi. Alcuni – o almeno uno – sostentano la vita. Ovviamente, quando gli esseri di un pianeta che rende possibile la vita esaminano il mondo intorno a loro, non possono non constatare che il loro ambiente soddisfa le condizioni di cui hanno bisogno per esistere.



La zona di Goldilocks. Se Goldilocks stesse «assaggiando» pianeti, troverebbe adatti alla vita soltanto quelli nella zona verde. La stella gialla rappresenta il nostro Sole. Quelle più bianche sono stelle più grandi e più calde, quelle più rosse sono stelle più piccole e più fredde. Pianeti più vicini della zona verde al loro sole sarebbero troppo caldi per la vita, e pianeti più lontani sarebbero troppo freddi. Le dimensioni della zona ospitale sono minori per le stelle più fredde.

Possiamo tradurre l'ultima affermazione in un principio scientifico: la nostra stessa esistenza impone regole che determinano da dove e in quale momento è possibile che noi osserviamo l'universo. Ossia, il fatto della nostra esistenza limita le caratteristiche del tipo di ambiente in cui ci troviamo. Tale enunciato è chiamato principio antropico debole. (Vedremo tra poco il perché dell'aggettivo «debole».) Un'espressione migliore di «principio antropico» sarebbe stata «principio di selezione», perché l'asserto si riferisce a come la nostra stessa consapevolezza della nostra esistenza impone regole che selezionano, tra tutti i possibili ambienti, soltanto quelli con caratteristiche che consentono la vita.

Sebbene possa aver l'aria di un enunciato filosofico, il principio antropico debole può essere usato per fare predizioni scientifiche. Per esempio, qual è l'età dell'universo? Come vedremo tra breve, perché noi esistiamo l'universo deve contenere elementi quali il carbonio, che vengono prodotti cuocendo elementi più leggeri all'interno delle stelle. Il carbonio deve poi essere sparso nello spazio in un'esplosione di supernova, e alla fine condensare come parte di un pianeta in un sistema solare di nuova generazione. Nel 1961 il fisico Robert Dicke dimostrò che il processo richiede all'incirca 10 miliardi di anni, e quindi la nostra esistenza implica che l'universo deve avere almeno quest'età. D'altra parte, l'universo non può avere molto più di 10 miliardi di anni, perché nel lontano futuro tutto il combustibile delle stelle si sarà esaurito, e noi abbiamo bisogno di stelle calde per il nostro sostentamento. Perciò l'universo deve avere circa 10 miliardi di anni. Questa non è una predizione estremamente precisa, ma è vera: secondo i dati attuali il big bang ebbe

luogo circa 13,7 miliardi di anni fa.

Come nel caso dell'età dell'universo, le predizioni basate sul principio antropico di solito individuano per un dato parametro fisico, più che un valore esatto, un arco di valori. Questo perché la nostra esistenza, pur potendo non richiedere un particolare valore di un parametro fisico, dipende spesso dal fatto che i parametri non varino troppo rispetto al valore che effettivamente osserviamo. Inoltre ci aspettiamo che le condizioni date nel nostro mondo siano tipiche nell'ambito dell'arco antropicamente permesso. Per esempio, se soltanto eccentricità orbitali modeste, diciamo comprese tra 0 e 0,5, consentono la vita, un'eccentricità pari a 0,1 non dovrebbe sorprenderci perché fra tutti i pianeti dell'universo probabilmente una buona percentuale ha orbite con eccentricità così bassa. Ma se risultasse che la Terra percorre una circonferenza quasi perfetta, con eccentricità, per esempio, pari a 0,000 000 000 01, ciò ne farebbe un pianeta davvero molto speciale, e ci spingerebbe a cercare di spiegare perché ci troviamo a vivere in un ambiente così anomalo. Questa idea è detta a volte principio di mediocrità.

Le fortunate coincidenze relative alla forma delle orbite planetarie, alla massa del Sole e così via, sono dette ambientali perché derivano dalla favorevole configurazione dei nostri dintorni e non da una caratteristica fortuita delle leggi fondamentali di natura. Anche l'età dell'universo è un fattore ambientale, perché nella sua storia ci sono un'epoca precedente e una successiva, mentre noi dobbiamo vivere in questa perché è l'unica propizia alla vita. Le coincidenze ambientali si possono comprendere senza difficoltà perché il nostro non è che un habitat cosmico tra i molti che esistono nell'universo, e ovviamente noi non possiamo che vivere in un habitat che sostiene la vita.

Il principio antropico debole non è particolarmente controverso. Ma c'è una forma più forte dell'enunciato che noi sosterremo qui, sebbene sia considerata con disprezzo da parte di alcuni fisici. Il principio antropico forte sostiene che il fatto che noi esistiamo impone dei vincoli non solo sul nostro *ambiente*, ma anche su *forma e contenuto possibili delle leggi di natura*. L'idea si è proposta perché non sono soltanto le caratteristiche peculiari del nostro sistema solare ad apparire stranamente favorevoli all'evoluzione della vita umana, ma anche le caratteristiche del nostro intero universo, e questo è molto più difficile da spiegare.

La storia di come l'universo primordiale fatto di idrogeno, elio e un po' di litio si è evoluto in un universo che ospita almeno un mondo dotato di vita intelligente – il nostro – si articola in molti capitoli. Come si è osservato in precedenza, le forze fondamentali dovevano essere tali che gli elementi più pesanti – specialmente il carbonio – potessero formarsi a partire dagli elementi primordiali, e rimanere stabili almeno per qualche miliardo di anni. Gli elementi pesanti furono sintetizzati nelle fornaci che chiamiamo stelle, e quindi le leggi dovevano in primo luogo consentire a stelle e galassie di formarsi. Queste strutture si svilupparono dai semi costituiti dalle minuscole disomogeneità presenti nell'universo primordiale, che era quasi del tutto uniforme, ma fortunatamente conteneva variazioni di densità di circa 1 parte su 100.000. Tuttavia, l'esistenza di stelle, e l'esistenza al loro interno degli elementi di cui siamo fatti, non è sufficiente. La dinamica delle stelle doveva essere tale che alcune finissero per esplodere e, per di più, esplodere esattamente in un modo che permettesse di distribuire gli elementi più pesanti nello spazio. Inoltre le leggi di natura dovevano fare in modo che quei residui potessero riaggregarsi in una nuova generazione di stelle, questa volta circondate da pianeti che incorporassero gli elementi pesanti di nuova formazione. Proprio come era necessario che sulla Terra dei primordi si verificassero certi eventi per consentire la nostra evoluzione, così anche ogni anello di questa catena era necessario per la nostra esistenza.

Ma nel caso degli eventi che si sono tradotti nell'evoluzione dell'universo, tali sviluppi erano governati dall'equilibrio tra le forze fondamentali di natura, ed era l'interazione tra queste ultime a dover essere «proprio giusta» perché noi potessimo esistere.

Uno dei primi a rendersi conto di come ciò potesse implicare una non trascurabile dose di fortuna fu Fred Hoyle negli anni '50. Hoyle credeva che tutti gli elementi chimici si fossero originariamente formati a partire dall'idrogeno, che considerava la vera sostanza primordiale. L'idrogeno ha il nucleo atomico più semplice, costituito da un unico protone, solo o in combinazione con uno o due neutroni. (Forme differenti di idrogeno, o di qualsiasi nucleo, contenenti lo stesso numero di protoni ma numeri diversi di neutroni, sono dette isotopi.) Oggi sappiamo che elio e litio, atomi i cui nuclei contengono due e tre protoni rispettivamente, furono anch'essi sintetizzati a livello primordiale, in quantità molto minori, quando l'universo aveva un'età di circa 200 secondi. La vita, però, dipende da elementi più complessi. Tra questi, il carbonio è il più importante, essendo la base di tutta la chimica organica.

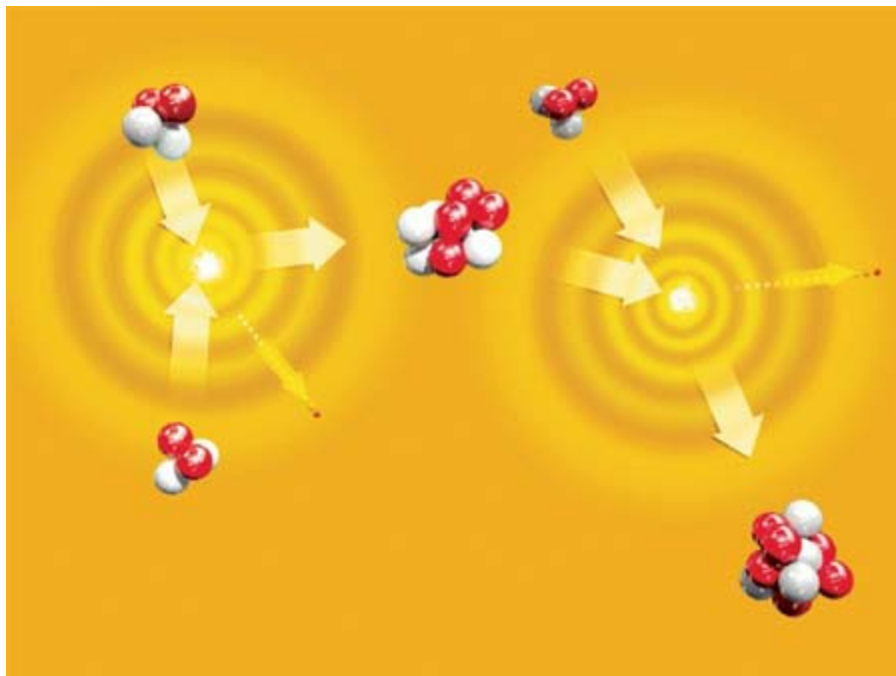
Sebbene si possano immaginare organismi «viventi», come per esempio computer dotati di intelligenza, formati da altri elementi quali il silicio, è dubbio che la vita avrebbe potuto evolversi *spontaneamente* in assenza di carbonio. Le ragioni sono di carattere tecnico ma hanno a che fare con la maniera unica in cui il carbonio si lega agli altri elementi. L'anidride carbonica (o diossido di carbonio), per esempio, è gassosa a temperatura ambiente, e molto utile dal punto di vista biologico. Poiché il silicio è l'elemento direttamente sottostante al carbonio nella tavola periodica, ha proprietà chimiche simili. Tuttavia, l'anidride silicica (o diossido di silicio) sta molto meglio in una collezione di minerali che nei polmoni di un organismo. Eppure forse potrebbero evolversi forme di vita che si pascono di silicio e roteano ritmicamente le loro code in piscine di ammoniaca liquida. Ma anche questo tipo di vita esotica non potrebbe evolversi dai soli elementi primordiali, perché tali elementi possono formare soltanto due composti stabili, l'idruro di litio, che è un solido cristallino incolore, e l'idrogeno gassoso, e nessuno dei due è probabile che si riproduca o anche solo si innamori. Comunque, resta il fatto che *noi* siamo una forma di vita basata sul carbonio, e ciò pone il problema di come si sono formati il carbonio, il cui nucleo contiene sei protoni, e gli altri elementi pesanti presenti nel nostro corpo.

Il primo passo si verifica quando le stelle più vecchie cominciano ad accumulare elio, che si forma quando due nuclei di idrogeno collidono tra loro e si fondono. Tale fusione costituisce il modo in cui le stelle generano l'energia che ci riscalda. Due atomi di elio possono a loro volta entrare in collisione formando berillio, un atomo il cui nucleo contiene quattro protoni. Una volta formatosi, il berillio potrebbe in linea di principio fondersi con un terzo nucleo di elio per produrre carbonio. Ma ciò non accade, perché l'isotopo del berillio che si forma torna a decadere quasi istantaneamente in nuclei di elio.

La situazione cambia quando una stella comincia a esaurire l'idrogeno. Quando ciò accade il nocciolo della stella subisce un collasso che procede finché la sua temperatura centrale sale a circa 100 milioni di kelvin. In tali condizioni i nuclei si scontrano con frequenza tale che alcuni nuclei di berillio collidono con uno di elio prima di avere la possibilità di decadere. A quel punto il berillio può fondersi con l'elio per formare un isotopo del carbonio che è stabile. Ma questo carbonio è ancora ben lontano dal formare aggregati ordinati di composti chimici del tipo di quelli che possono gustare un bicchiere di Bordeaux, far roteare birilli colorati o porre domande sull'universo. Perché esistano esseri come gli umani, il carbonio deve essere trasportato dall'interno della stella in regioni

più accoglienti. Ciò accade, come si è detto, quando la stella, al termine del suo ciclo vitale, esplode come supernova, espellendo carbonio e altri elementi pesanti che più tardi si addensano in un pianeta.

Questo processo di generazione del carbonio è chiamato processo delle tre alfa perché «particella alfa» è un altro nome del nucleo dell'isotopo dell'elio coinvolto, e perché richiede che tre di queste particelle (alla fine) si fondano insieme. La fisica nota prevedeva che il tasso di produzione del carbonio tramite il processo delle tre alfa doveva essere pressoché trascurabile. Muovendo da questa osservazione, nel 1952 Hoyle predisse che la somma delle energie di un nucleo di berillio e di un nucleo di elio doveva essere quasi esattamente pari all'energia di un certo stato quantico dell'isotopo del carbonio generato, una situazione questa chiamata risonanza, che accresce notevolmente la velocità di una reazione nucleare. All'epoca non era noto alcun livello energetico del genere, ma prendendo spunto dall'ipotesi di Hoyle, William Fowler del Caltech se ne mise alla ricerca e lo identificò, fornendo un'importante conferma delle idee di Hoyle sul modo in cui si formano i nuclei complessi.



Il processo delle tre alfa. Il carbonio si forma all'interno delle stelle in seguito alle collisioni di tre nuclei di elio, un evento che sarebbe molto improbabile se non fosse per una particolare proprietà delle leggi della fisica nucleare.

Scrisse Hoyle: «Credo che nessuno scienziato che esaminasse le prove si sottrarrebbe alla conclusione che le leggi della fisica nucleare siano state deliberatamente progettate in vista delle conseguenze che producono all'interno delle stelle». All'epoca nessuno ne sapeva abbastanza di fisica nucleare per comprendere la portata della serendipità insita in queste precise leggi fisiche. Ma in anni recenti, indagando sulla validità del principio antropico forte, i fisici hanno cominciato a chiedersi come sarebbe stato l'universo se le leggi di natura fossero differenti. Oggi possiamo creare modelli su computer che ci dicono come la velocità della reazione delle tre alfa dipende dalle intensità delle forze fondamentali di natura. Calcoli di questo tipo mostrano che una variazione non superiore allo 0,5 per cento nell'intensità della forza nucleare forte, o al 4 per cento nell'intensità della forza elettrica, distruggerebbe o quasi tutto il carbonio o tutto l'ossigeno in ogni stella, e quindi

la possibilità della vita come la conosciamo. Se si cambiano anche di poco le leggi dell'universo in cui viviamo, le condizioni per la nostra esistenza vengono meno!

Analizzando gli universi modello che si generano quando le teorie fisiche vengono modificate in determinati modi, è possibile studiare in maniera metodica l'effetto di cambiamenti nella legge fisica. Emerge che non sono soltanto le intensità dell'interazione nucleare forte e di quella elettromagnetica a essere «fatte su misura» per la nostra esistenza. Gran parte delle costanti fondamentali che compaiono nelle nostre teorie sembrano calibrate con precisione, nel senso che se fossero alterate anche solo in misura modesta, l'universo sarebbe qualitativamente differente, e in molti casi inadatto allo sviluppo della vita. Per esempio, se l'altra forza nucleare, quella debole, fosse molto più debole, nell'universo primordiale tutto l'idrogeno si sarebbe trasformato in elio, e quindi non ci sarebbero stelle normali; se invece fosse molto più intensa, le esplosioni delle supernovae non espellerebbero i loro strati esterni, e quindi non disseminerebbero lo spazio interstellare degli elementi pesanti di cui i pianeti hanno bisogno per favorire la vita. Se i protoni fossero dello 0,2 per cento più pesanti, decadrebbero in neutroni rendendo instabili gli atomi. Se la somma delle masse dei tipi di quark che formano un protone fosse modificata soltanto del 10 per cento, ci sarebbe un numero molto minore dei nuclei atomici stabili dei quali siamo fatti; in effetti la somma delle masse dei quark sembra approssimativamente ottimizzata in vista dell'esistenza del massimo numero di nuclei stabili.

Se si assume che alcune centinaia di milioni di anni in un'orbita stabile siano necessari per l'evoluzione di vita planetaria, anche il numero delle dimensioni dello spazio è determinato dalla nostra esistenza. Questo perché, secondo le leggi della gravità, soltanto in tre dimensioni sono possibili orbite ellittiche stabili. Con altre dimensionalità sono possibili orbite circolari, che però, come Newton temeva, sono instabili. In qualsiasi numero di dimensioni diverso da tre basterebbe una piccola perturbazione, come quelle prodotte dall'attrazione degli altri corpi celesti analoghi, a far uscire un pianeta dalla sua orbita circolare immettendolo in un'orbita a spirale destinata a farlo cadere nel Sole o a farlo allontanare da esso, cosicché noi saremmo condannati a bruciare o a congelare. Inoltre, in più di tre dimensioni la forza gravitazionale agente tra due corpi decrescerebbe più rapidamente di quanto avviene in tre dimensioni. In quest'ultima dimensionalità la forza gravitazionale si riduce a $1/4$ del suo valore se la distanza raddoppia. In quattro dimensioni si ridurrebbe a $1/8$, in cinque dimensioni si ridurrebbe a $1/16$, e così via. Di conseguenza, in più di tre dimensioni il Sole non potrebbe esistere in uno stato stabile in cui la sua pressione interna controbilanci l'attrazione gravitazionale. Si disintegrerebbe oppure subirebbe un collasso trasformandosi in un buco nero, cose che potrebbero entrambe rovinarci la giornata. Sulla scala degli atomi, le forze elettriche si comporterebbero nello stesso modo di quelle gravitazionali. Ciò significa che gli elettroni atomici o si allontanerebbero o cadrebbero a spirale nel nucleo. In nessuno dei due casi sarebbero possibili atomi come li conosciamo.

La comparsa delle complesse strutture capaci di sostenere osservatori intelligenti sembra dipendere da equilibri assai precari. Le leggi di natura formano un sistema calibrato in modo estremamente preciso, e nella legge fisica ben poco può essere modificato senza distruggere la possibilità dell'evoluzione della vita quale la conosciamo. Sembra che, se non fosse per una serie di sbalorditive coincidenze nei minimi particolari della legge fisica, esseri umani e forme di vita analoghe non sarebbero mai apparsi.

Il caso più impressionante di una regolazione fine che si presenta come una coincidenza riguarda la costante cosmologica nelle equazioni della relatività generale di Einstein. Come si è detto, nel

1915, quando formulò la teoria, Einstein credeva che l'universo fosse statico, cioè che non si espandesse né si contraesse. Dal momento che tutta la materia attrae altra materia, introdusse nella teoria una nuova forza di antigravità che contrastasse la tendenza dell'universo a ricadere su se stesso in un collasso gravitazionale. Tale forza, a differenza delle altre, non derivava da alcuna sorgente specifica ma era incorporata nella struttura stessa dello spaziotempo, e la costante cosmologica ne descriveva l'intensità.

Quando si scoprì che l'universo non era statico, Einstein eliminò dalla teoria la costante cosmologica e definì la sua introduzione il più grosso errore della sua vita. Ma nel 1998 osservazioni di supernovae estremamente lontane rivelarono che l'universo si sta espandendo a un ritmo che accelera di continuo, un effetto che non è possibile senza una qualche specie di forza repulsiva che agisca in tutto lo spazio. La costante cosmologica era risorta. Siccome oggi sappiamo che il suo valore non è zero, siamo indotti a chiederci perché ha il valore che ha. I fisici hanno proposto argomentazioni che spiegano come potrebbe derivare da effetti quantomeccanici, ma il valore che calcolano è circa 120 ordini di grandezza (un 1 seguito da 120 zeri!) maggiore del valore effettivo, ottenuto dalle osservazioni delle supernovae. Ciò significa che o il ragionamento cui si è fatto ricorso nel calcolo era sbagliato, oppure esiste qualche altro effetto che miracolosamente controbilancia tutto il valore calcolato meno una sua frazione inimmaginabilmente piccola. L'unica cosa certa è che se il valore della costante cosmologica fosse molto maggiore di quello che è, il nostro universo si sarebbe disperso prima che potessero formarsi le galassie e – ancora una volta – la vita come la conosciamo sarebbe stata impossibile.

Come possiamo interpretare queste coincidenze? La «fortuna» nella forma e natura esatta della legge fisica fondamentale è di un tipo diverso da quella in cui ci imbattiamo nel caso dei fattori ambientali. Non può essere spiegata altrettanto facilmente, e ha implicazioni fisiche e filosofiche assai più profonde. Sembra che il nostro universo e le sue leggi presentino una struttura che è fatta su misura per sostentarci e, se noi dobbiamo esistere, lascia poco spazio a modifiche. Questo non è facile da spiegare, e solleva l'ovvia questione del perché sia così.

A molti piacerebbe che ci servissimo di queste coincidenze come di prove dell'intervento divino. L'idea che l'universo sia stato progettato per accogliere il genere umano compare in teologie e mitologie formulate in ogni epoca, da migliaia di anni fa fino a oggi. Nelle narrazioni storicomitologiche maya del *Popol Vuh* gli dei proclamano: «Non avremo né gloria né onore da tutto ciò che abbiamo creato e modellato finché non esisteranno esseri umani senzienti». Un tipico testo egizio risalente al 2000 a.C. afferma: «Agli uomini, armenti di Dio, si è ben provveduto. Egli [il dio sole] fece la terra e il cielo a loro vantaggio». In Cina il filosofo taoista Lie Yukou (c. 400 a.C.) esprime l'idea per bocca di un personaggio che in un racconto dice: «Il cielo fa crescere i cinque tipi di cereali, e genera le tribù fornite di pinne e di piume, soprattutto per la nostra utilità».

Nell'ambito della cultura occidentale, l'Antico Testamento contiene l'idea del disegno provvidenziale nel suo resoconto della creazione, ma la tradizionale concezione cristiana fu grandemente influenzata anche da Aristotele, il quale credeva «in un mondo naturale intelligente che opera secondo un certo progetto deliberato». Il teologo medievale cristiano Tommaso d'Aquino si servì delle idee di Aristotele sull'ordine esistente in natura per argomentare in favore dell'esistenza di Dio. Nel XVIII secolo un altro teologo cristiano arrivò a sostenere che i conigli hanno la coda bianca per facilitarci nella caccia. Un'illustrazione più moderna del punto di vista cristiano fu proposta qualche anno fa allorché il cardinale Christoph Schönborn, arcivescovo di Vienna, scrisse:

«Oggi, all'inizio del XXI secolo, a confronto con tesi scientifiche come il neodarwinismo e l'ipotesi del multiverso in cosmologia, escogitate per non prendere atto delle prove schiaccianti di finalità e progetto che emergono nella scienza moderna, la Chiesa cattolica si ergerà ancora una volta a difesa della ragione umana proclamando che il progetto immanente nella natura è reale». In cosmologia, la prova schiacciante di finalità e progetto cui si riferiva il cardinale è la regolazione fine della legge fisica che abbiamo appena descritto.

La svolta decisiva nel rifiuto scientifico di un universo antropocentrico fu il modello copernicano del sistema solare, in cui la Terra non occupava più una posizione centrale. Ironia della storia, la concezione del mondo di Copernico era tanto antropomorfa che volle consolarci dichiarando che, a dispetto del suo modello eliocentrico, la Terra è *quasi* al centro dell'universo: «Sebbene [la Terra] non sia al centro del mondo, tuttavia la distanza [da quel centro] è come nulla, in particolare quando venga paragonata a quella delle stelle fisse». Con l'invenzione del telescopio nel XVII secolo, osservazioni come quella che il nostro non è l'unico pianeta attorno a cui orbita una luna avvalorarono il principio che non occupiamo una posizione privilegiata nell'universo. Nei secoli successivi, quanto più si apprendeva dell'universo, tanto più appariva probabile che il nostro fosse soltanto un pianeta qualsiasi. Ma la scoperta abbastanza recente della regolazione estremamente fine di tante leggi di natura potrebbe ricondurre almeno alcuni di noi all'antica idea che questo grande disegno sia opera di un grande architetto. Negli Stati Uniti, poiché la Costituzione proibisce l'insegnamento della religione nelle scuole, ci si riferisce a questo tipo di idea con l'espressione «disegno intelligente», con la tacita ma implicita intesa che l'architetto sia Dio.

Non è questa la risposta della scienza moderna. Abbiamo visto nel V capitolo come il nostro universo sia probabilmente solo uno tra molti altri, ciascuno dei quali è governato da leggi differenti. L'idea del multiverso non è un concetto inventato per rendere conto del miracolo della regolazione fine. È una conseguenza della condizione di assenza di contorno oltre che di molte altre teorie della cosmologia moderna. Ma se è vera, allora il principio antropico forte può essere considerato effettivamente equivalente a quello debole, il che pone la regolazione fine della legge fisica sullo stesso piano dei fattori ambientali, perché significa che il nostro habitat cosmico – attualmente l'intero universo osservabile – è soltanto uno dei molti, proprio come il nostro sistema solare è solo uno dei molti. Ciò vuol dire che, come le coincidenze ambientali del sistema solare furono rese irrilevanti dalla constatazione che esistono miliardi di sistemi analoghi, così le regolazioni fini delle leggi di natura possono essere spiegate dall'esistenza di universi multipli. Molti nel corso dei secoli hanno attribuito a Dio la bellezza e la complessità della natura che ai loro tempi sembravano non avere alcuna spiegazione scientifica. Ma proprio come Darwin e Wallace spiegavano in che modo l'apparentemente miracolosa struttura delle forme viventi potesse comparire senza l'intervento di un essere supremo, così il concetto di multiverso può spiegare la regolazione fine della legge fisica senza bisogno di un creatore benevolo che abbia fatto l'universo a nostro vantaggio.

Einstein una volta chiese al suo assistente Ernst Straus se, a suo parere, Dio avesse avuto qualche scelta quando aveva creato l'universo. Alla fine del XVI secolo Keplero era convinto che Dio avesse creato l'universo in conformità a un principio matematico perfetto. Newton dimostrò che le medesime leggi che valgono nei cieli vigono sulla Terra, e per esprimere tali leggi formulò equazioni matematiche che erano così eleganti da ispirare un fervore quasi religioso in molti scienziati del XVIII secolo, che sembravano decisi a servirsene a loro volta per dimostrare che Dio era un matematico.

Fin dai tempi di Newton, e soprattutto da quelli di Einstein, scopo della fisica è stato trovare principi matematici semplici del tipo immaginato da Keplero, e con essi creare una teoria unitaria del tutto che rendesse conto di ogni particolare della materia e delle forze che si osservano in natura. Tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX Maxwell e Einstein unificarono le teorie dell'elettricità, del magnetismo e della luce. Negli anni '70 fu creato il modello standard, una teoria unica delle forze nucleari forte e debole e della forza elettromagnetica. Poi furono formulate la teoria delle corde e la teoria M nel tentativo di includere anche la forza rimanente, la gravità. Il proposito era di trovare non solo una teoria unica che spiegasse tutte le forze, ma anche una teoria che rendesse conto di tutte le costanti fondamentali di cui abbiamo parlato, dalle intensità delle forze alle masse e alle cariche delle particelle elementari. Per dirla con le parole di Einstein, la speranza era di poter affermare che «la natura è costituita in modo che sia logicamente possibile formulare leggi così fortemente determinate che nell'ambito di tali leggi ricorrano solo costanti razionalmente determinate in modo completo (e quindi, non costanti il cui valore numerico possa essere modificato senza distruggere la teoria)». Difficilmente una teoria unica sarebbe caratterizzata dalla regolazione fine che consente la nostra esistenza. Ma se, alla luce di recenti progressi, interpretiamo il sogno di Einstein come aspirazione a una teoria unica che spieghi questo e altri universi, con il loro intero spettro di leggi differenti, allora la teoria M potrebbe essere quella cercata. Ma la teoria M è unica, ovvero imposta da un qualche principio logico semplice? Siamo in grado di rispondere alla domanda: «*Perché la teoria M?*»?

VIII
IL GRANDE DISEGNO



In questo libro abbiamo descritto come le regolarità osservate nel moto di oggetti astronomici quali il Sole, la Luna e i pianeti abbiano suggerito che tali corpi siano governati da leggi immutabili piuttosto che soggetti ai capricci arbitrari e agli umori mutevoli di dei e demoni. In un primo tempo l'esistenza di leggi simili risultò evidente soltanto nell'ambito dell'astronomia (o dell'astrologia, che era considerata pressoché alla stessa stregua). Il comportamento dei corpi sulla Terra è talmente complicato e soggetto a tanti influssi che le prime civiltà non furono in grado di distinguere schemi o leggi chiaramente identificabili che governassero questi fenomeni. Gradualmente, però, furono scoperte nuove leggi in aree diverse dall'astronomia, e ciò condusse alla concezione del determinismo scientifico, secondo il quale deve esserci un insieme completo di leggi che, dato lo stato dell'universo in un particolare istante, specificherebbe come esso debba evolvere da quell'istante in poi. Queste leggi dovrebbero valere dovunque e in ogni tempo; altrimenti non sarebbero leggi. Non potrebbero esserci eccezioni o miracoli. Dei e demoni non potrebbero intervenire nell'andamento dell'universo.

All'epoca in cui il determinismo scientifico fu inizialmente proposto, le leggi del moto di Newton e la sua legge di gravitazione erano le uniche note. Abbiamo visto come tali leggi furono estese da Einstein nella teoria della relatività generale, e come si scoprì che altre leggi governano altri aspetti dell'universo.

Le leggi di natura ci dicono *come* si comporta l'universo, ma non rispondono ai *perché* di cui abbiamo parlato all'inizio di questo libro:

Perché c'è qualcosa invece di nulla?

Perché esistiamo?

Perché questo particolare insieme di leggi e non qualche altro?

Alcuni sosterrrebbero che la risposta a tali interrogativi è che esiste un Dio il quale ha scelto di creare l'universo in questo modo. È ragionevole chiedersi chi o che cosa abbia creato l'universo, ma se la risposta è Dio, la questione è stata semplicemente spostata un passo più in là, e diventa quella di chi ha creato Dio. Nella concezione religiosa si ammette che esista un'entità che non richiede un creatore, e tale entità viene chiamata Dio. Questa è nota come argomentazione della causa prima in favore dell'esistenza di Dio. Noi sosteniamo invece che è possibile rispondere a quelle domande rimanendo esclusivamente nell'ambito della scienza, e senza invocare alcun essere divino.

Secondo la concezione del realismo dipendente dai modelli introdotta nel III capitolo, il nostro cervello interpreta i segnali provenienti dagli organi sensoriali costruendo un modello del mondo

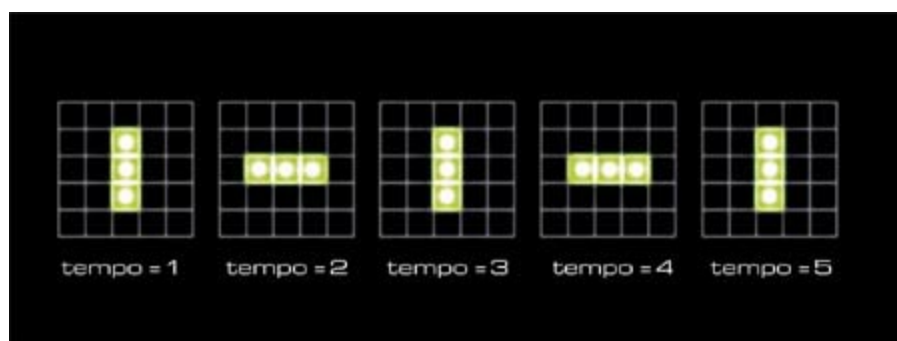
esterno. Ci formiamo così concetti mentali della nostra casa, degli alberi, delle altre persone, dell'elettricità che fluisce dalle prese nelle pareti, degli atomi, delle molecole e di altri universi. Questi concetti mentali sono l'unica realtà che possiamo conoscere. Non esiste nessuna verifica di realtà indipendente dai modelli. Ne consegue che un modello ben costruito crea una propria realtà. Un esempio che può aiutarci a riflettere sulle questioni della realtà e della creazione è il Gioco della vita, inventato nel 1970 da un giovane matematico di Cambridge di nome John Conway.

La parola «gioco» nel nome del Gioco della vita è fuorviante. Non ci sono vincitori né perdenti; anzi non ci sono neppure giocatori. Il Gioco della vita non è propriamente un gioco, ma un insieme di leggi che governano un universo bidimensionale. Si tratta di un universo deterministico: una volta che si sia predisposta una configurazione di partenza, ossia una condizione iniziale, le leggi determinano ciò che accade nel futuro.

Il mondo immaginato da Conway è una griglia quadrata, simile a una scacchiera, ma estesa all'infinito in tutte le direzioni. Ogni casella può ospitare una cellula che può trovarsi in uno dei due stati: viva (stato rappresentato in verde nelle figure delle pagine seguenti) oppure morta (stato rappresentato in nero). Ciascuna cellula ha otto vicini: le cellule sopra, sotto, a destra e a sinistra, e quelle contigue in diagonale. Il tempo in questo mondo non è continuo ma procede a passi discreti. Data una qualsiasi configurazione di cellule vive e morte, il numero dei vicini vivi determina ciò che accade poi in conformità alle seguenti leggi:

1. Una cellula viva con due o tre vicini vivi sopravvive (sopravvivenza).
2. Una cellula morta con esattamente tre vicini vivi diventa una cellula viva (nascita).
3. In tutti gli altri casi una cellula muore o rimane morta. Nel caso che una cellula viva abbia zero o un vicino vivi si dice che muore di isolamento; se ha più di tre vicini vivi, si dice che muore per sovraffollamento.

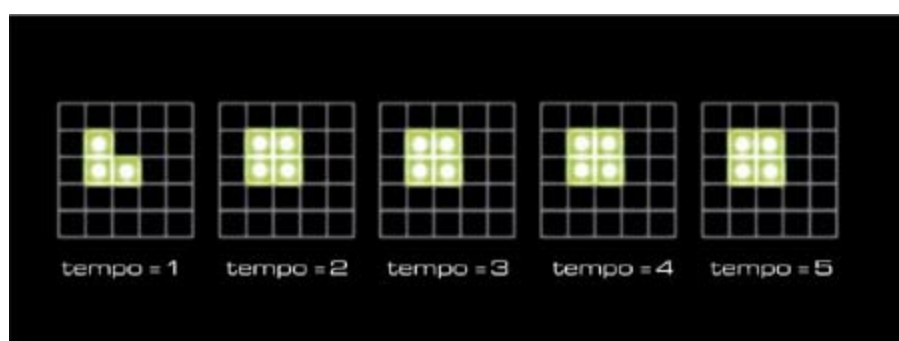
Tutto qui: data una qualsiasi condizione iniziale, queste leggi determinano una generazione dopo l'altra. Una cellula viva isolata o due cellule vive adiacenti muoiono alla generazione successiva perché non hanno vicini sufficienti. Tre cellule vive lungo una diagonale vivono un po' più a lungo. Dopo il primo intervallo di tempo le cellule alle estremità muoiono, e rimane viva solo quella intermedia, che muore alla generazione seguente. Qualunque linea diagonale di cellule «evapora» in questa stessa maniera. Se invece tre cellule vive sono disposte orizzontalmente su una riga, di nuovo la cellula centrale ha due vicini e sopravvive mentre le due all'estremità muoiono, ma in questo caso le cellule immediatamente sopra e sotto quella centrale sperimentano una nascita. Perciò la riga si trasforma in una colonna. Analogamente, alla generazione successiva la colonna si ritrasforma in una riga, e così via. Configurazioni oscillanti di questo tipo sono dette lampeggiatori.



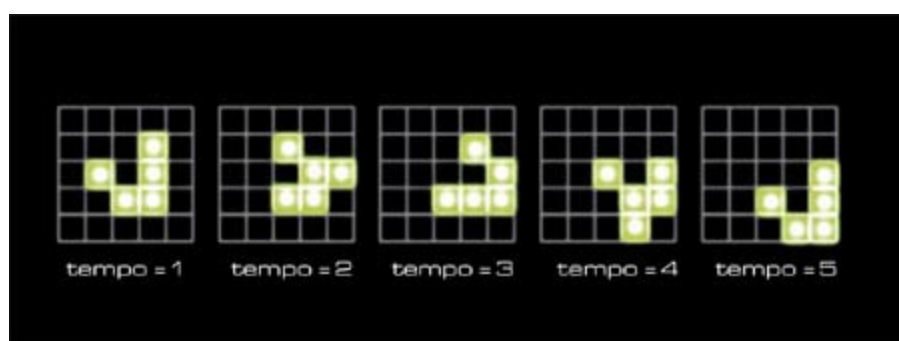
Lampeggiatori. Nel Gioco della vita i lampeggiatori sono un semplice tipo di oggetti composti.

Se tre cellule vive sono disposte a forma di L, si manifesta un nuovo comportamento. Nella generazione seguente la cellula tra i due rami della L passerà alla vita, producendo un blocco 2×2 . Il blocco appartiene a una classe di configurazioni chiamate vita immobile perché passano inalterate da una generazione all'altra. Esistono molti tipi di configurazioni che si modificano nelle prime generazioni ma ben presto si trasformano in vita immobile, o muoiono, o ritornano alla loro forma originaria e poi ripetono il processo.

Vi sono anche configurazioni chiamate alianti, che evolvono in altre forme e, dopo qualche generazione, tornano alla forma iniziale, ma in una posizione dislocata di una casella lungo la diagonale. Se le si osserva mentre si evolvono nel tempo, sembrano avanzare lentamente lungo la griglia. Quando gli alianti collidono tra loro, possono manifestarsi comportamenti curiosi, che dipendono dalla forma di ciascuno di essi al momento della collisione.



Evoluzione verso una vita immobile. Alcuni oggetti composti nel Gioco della vita evolvono in una forma che, in base alle regole, non cambia mai più.

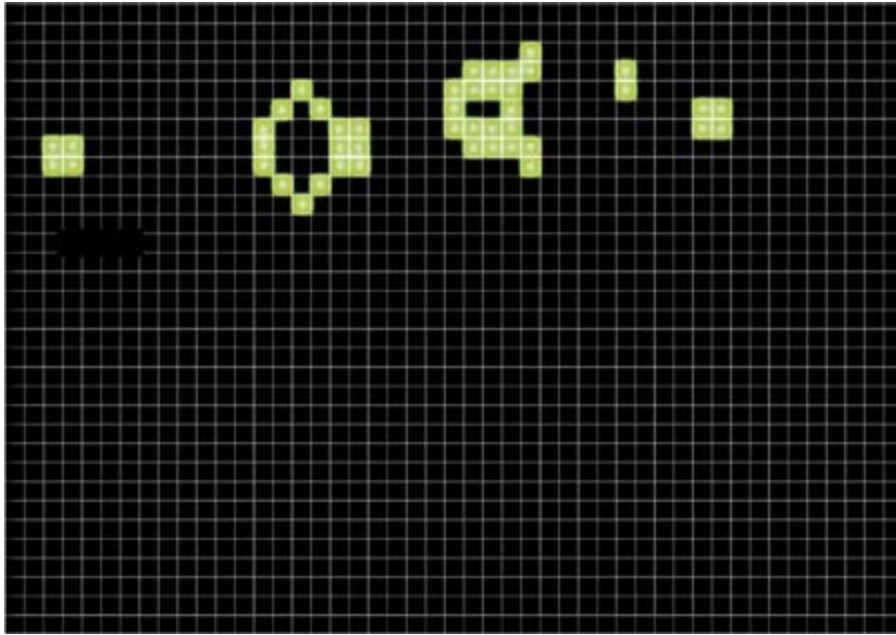


Alianti. Gli alianti evolvono in forme intermedie, poi tornano alla forma originaria spostati di una casella lungo la diagonale.

A rendere interessante questo universo è il fatto che sebbene la sua «fisica» fondamentale sia semplice, la sua «chimica» può essere complicata. Vale a dire che in esso esistono oggetti composti su differenti scale. Sulla scala più piccola la fisica fondamentale ci dice che esistono soltanto cellule vive e cellule morte. Su una scala più ampia ci sono alianti, lampeggiatori e blocchi con vita immobile. Su una scala ancora maggiore ci sono oggetti ancora più complessi, come i cannoni di alianti: configurazioni stazionarie che danno periodicamente origine a nuovi alianti i quali si allontanano dal nido e scorrono lungo la diagonale.

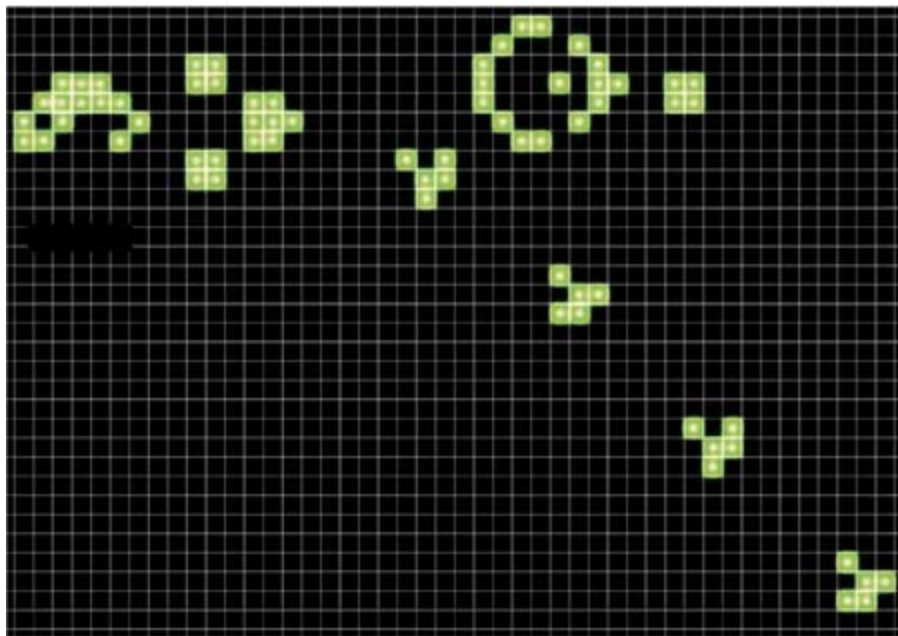
Osservando per qualche tempo l'universo del Gioco della vita su una qualsiasi particolare scala,

si potrebbero dedurre leggi che governano gli oggetti su quella scala. Per esempio, sulla scala degli oggetti aventi dimensioni di poche caselle si potrebbero avere leggi come «i blocchi non si muovono mai», «gli alianti si muovono in diagonale», e varie altre relative a ciò che accade quando gli oggetti entrano in collisione. Si potrebbe creare un'intera fisica su qualunque livello di oggetti composti. Le leggi implicherebbero entità e concetti che non trovano posto nelle leggi originarie. Per esempio, nelle leggi iniziali non compaiono concetti come «collidere» o «muoversi»: esse descrivono semplicemente la vita e la morte delle singole cellule stazionarie. Come nel nostro universo, anche nel Gioco della vita la nostra realtà dipende dal modello che impieghiamo.



Configurazione iniziale del cannone di alianti. Il cannone di alianti è all'incirca dieci volte più grande di un aliante.

Conway e i suoi allievi avevano inventato questo mondo perché volevano sapere se un universo con leggi fondamentali così semplici come quelle che avevano definito poteva contenere oggetti abbastanza complessi da replicarsi. Nel mondo del Gioco della vita esistono oggetti composti che, dopo aver semplicemente seguito le leggi di quel mondo per alcune generazioni, ne producono altri dello stesso tipo? Conway e i suoi allievi non soltanto riuscirono a dimostrare che ciò è possibile, ma mostrarono anche che oggetti simili sarebbero, in un certo senso, intelligenti! Che vogliamo dire con questo? Per la precisione, dimostrarono che le enormi conglomerazioni di cellule che si autoreplicano sono «macchine di Turing universali». Ai nostri fini, ciò significa che per qualunque calcolo che un computer possa in linea di principio eseguire nel nostro mondo fisico, la macchina, se le venisse fornito l'input appropriato – cioè, fornito l'appropriato ambiente del mondo del Gioco della vita – alcune generazioni dopo sarebbe in uno stato da cui si potrebbe ricavare un risultato che corrisponderebbe al risultato di quel calcolo effettuato dal computer.



Il cannone di alianti dopo 116 generazioni. Il cannone di alianti cambia forma, emette un aliante, poi torna alla forma e alla posizione iniziali, ripetendo il processo all'infinito.

Per farci un'idea di come la cosa funzioni, consideriamo quello che accade quando degli alianti vengono sparati contro un semplice blocco 2×2 di cellule vive. Se gli alianti si avvicinano esattamente nel modo appropriato, il blocco, che era stazionario, si muoverà verso la sorgente degli alianti o in direzione opposta. In questo modo il blocco può simulare una memoria di computer. In effetti, tutte le funzioni fondamentali di un moderno computer, come le porte AND e OR, possono essere generate mediante alianti. In questa maniera, proprio come si impiegano segnali elettrici in un computer fisico, si possono usare flussi di alianti per inviare ed elaborare informazione.

Nel Gioco della vita, come nel nostro mondo, le strutture che si autoriproducono sono oggetti complessi. Una stima basata su ricerche precedenti del matematico John von Neumann colloca le dimensioni minime di una struttura che si autoreplica nel Gioco della vita intorno a dieci trilioni di cellule, approssimativamente il numero di molecole contenute in una singola cellula umana.

Si possono definire gli esseri viventi come sistemi complessi di dimensioni limitate che sono stabili e si riproducono. Gli oggetti descritti sopra soddisfano la condizione dell'autoriproduzione ma verosimilmente non sono stabili: una piccola perturbazione proveniente dall'esterno con ogni probabilità distruggerebbe il delicato meccanismo. Tuttavia è facile intuire che leggi leggermente più complicate darebbero luogo a sistemi complessi con tutti gli attributi della vita. Immaginiamo un'entità di questo genere, un oggetto esistente in un mondo alla Conway. Un oggetto simile reagirebbe agli stimoli ambientali, e quindi sembrerebbe prendere decisioni. Questa vita sarebbe consapevole di sé? Sarebbe autocosciente? Si tratta di una questione altamente controversa. Alcuni sostengono che l'autocoscienza sia una caratteristica esclusiva degli esseri umani, che conferisce loro il libero arbitrio, la capacità di scegliere tra differenti linee d'azione.

Come si può stabilire se un essere è dotato di libero arbitrio? Se si incontra un alieno, come si può dire se è soltanto un robot oppure ha una mente propria? Il comportamento di un robot sarebbe completamente determinato, a differenza di quello di un essere dotato di libero arbitrio. Quindi in linea di principio si potrebbe riconoscere un robot in quanto essere le cui azioni si possono predire. Ma, come si detto nel II capitolo, la cosa può rivelarsi di una difficoltà insormontabile se l'essere è

grande e complesso. Non siamo in grado di risolvere esattamente le equazioni anche solo per tre o più particelle che interagiscono tra loro! Siccome un alieno delle dimensioni di un uomo conterrebbe all'incirca mille trilioni di trilioni di particelle anche se fosse un robot, sarebbe impossibile risolvere le equazioni e predire quello che farà. Dovremmo perciò dire che qualunque essere complesso è dotato di libero arbitrio, non in quanto caratteristica fondamentale, ma in quanto criterio di una teoria efficace, e questa sarebbe un'ammissione della nostra incapacità di fare i calcoli che ci consentirebbero di predirne le azioni.

L'esempio del Gioco della vita di Conway dimostra che anche un semplicissimo insieme di leggi può produrre caratteristiche complesse simili a quelle della vita intelligente. Devono esserci molti insiemi di leggi con questa proprietà. Che cosa differenzia le leggi fondamentali (in quanto distinte dalle leggi visibili) che governano il nostro universo? Come nell'universo di Conway, le leggi del nostro universo determinano l'evoluzione del sistema, dato il suo stato in un qualsiasi istante. Nel mondo di Conway noi siamo i creatori perché scegliamo lo stato iniziale dell'universo specificando gli oggetti e le loro posizioni all'inizio del gioco.

In un universo fisico, agli oggetti come gli alianti del Gioco della vita corrispondono i corpi materiali isolati. In qualunque insieme di leggi che descriva un mondo continuo come il nostro comparirà un concetto di energia, in quanto grandezza che si conserva, cioè che non varia nel tempo. L'energia dello spazio vuoto sarà una costante, indipendentemente dal tempo che dalla posizione. Si può defalcare questa energia costante del vuoto misurando l'energia di un qualsiasi volume di spazio rispetto a quella dello stesso volume di spazio vuoto, e così si può anche porre la costante uguale a zero. Un requisito necessario di qualsiasi legge di natura è che deve imporre che l'energia di un corpo isolato circondato dallo spazio vuoto sia positiva, il che significa che si deve compiere lavoro per mettere insieme il corpo. Questo perché, se un corpo isolato avesse energia negativa, potrebbe essere creato in uno stato di moto tale che la sua energia negativa sia esattamente controbilanciata dall'energia positiva dovuta al suo moto. Se fosse così, non ci sarebbe nessuna ragione per cui i corpi non possano comparire in qualsiasi luogo e dappertutto. Lo spazio vuoto sarebbe pertanto instabile. Ma se ci vuole energia per creare un corpo isolato, l'instabilità non può verificarsi, perché, come si è detto, l'energia dell'universo deve rimanere costante. Questo è ciò che occorre per rendere l'universo localmente stabile, per fare in modo che le cose non compaiano dovunque semplicemente dal nulla.

Se l'energia totale dell'universo deve rimanere sempre uguale a zero, e occorre energia per creare un corpo, come può un intero universo venire creato dal nulla? Questa è la ragione per cui deve esserci una legge come quella di gravità. Poiché la gravità è attrattiva, l'energia gravitazionale è negativa: si deve compiere lavoro per separare un sistema gravitazionalmente legato, come quello formato dalla Terra e dalla Luna. Questa energia negativa può bilanciare l'energia positiva necessaria per creare la materia, ma non è proprio così semplice. L'energia gravitazionale negativa della Terra, per esempio, è meno di un milionesimo dell'energia positiva delle particelle materiali di cui essa è fatta. Un corpo come una stella avrà più energia gravitazionale negativa, e quanto più piccola è la stella (quanto più vicine sono tra loro le sue diverse parti), tanto maggiore sarà l'energia gravitazionale negativa. Ma prima che possa diventare maggiore dell'energia positiva della materia, la stella subirà il collasso in un buco nero, e i buchi neri hanno energia positiva. Questa è la ragione per cui lo spazio vuoto è stabile. Corpi come le stelle o i buchi neri non possono emergere d'improvviso dal nulla. Ma un intero universo può farlo.

Siccome plasma lo spazio e il tempo, la gravità consente che lo spaziotempo sia localmente stabile ma globalmente instabile. Sulla scala dell'intero universo, l'energia positiva della materia *può* essere controbilanciata dall'energia gravitazionale negativa, e quindi non ci sono restrizioni alla creazione di interi universi. Dal momento che c'è una legge come quella di gravità, l'universo può crearsi dal nulla nel modo descritto nel VI capitolo, e lo fa. La creazione spontanea è la ragione per cui c'è qualcosa invece di nulla, per cui esiste l'universo, per cui esistiamo noi. Non è necessario appellarsi a Dio per accendere la miccia e mettere in moto l'universo.

Perché le leggi fondamentali sono come le abbiamo descritte? La teoria ultima deve essere coerente e deve predire risultati finiti per le grandezze che possiamo misurare. Abbiamo visto che deve esserci una legge come quella della gravità, e nel V capitolo abbiamo sottolineato che la teoria della gravità, per predire grandezze finite, deve essere caratterizzata da quella che è chiamata supersimmetria tra le forze di natura e la materia su cui queste agiscono. La teoria M è la più generale teoria supersimmetrica della gravità. Per queste ragioni la teoria M è l'*unica* candidata al ruolo di teoria completa dell'universo. Se è finita – e questo deve ancora essere dimostrato – sarà un modello di un universo che crea se stesso. Noi dobbiamo essere parte di questo universo, perché non ci sono altri modelli coerenti.

La teoria M è la teoria unitaria che Einstein sperava di scoprire. Il fatto che noi esseri umani – che siamo a nostra volta semplici insiemi di particelle fondamentali – siamo riusciti ad arrivare così vicino alla comprensione delle leggi che governano noi e il nostro universo costituisce un grande trionfo. Ma forse il vero miracolo è che astratte considerazioni logiche conducano a una teoria unica che predice e descrive un universo immenso pieno della meravigliosa varietà che vediamo. Se la teoria sarà confermata dall'osservazione, rappresenterà la splendida conclusione di una ricerca iniziata più di tremila anni fa. Avremo svelato il grande disegno.

ampiezza di probabilità In una teoria quantistica, un numero complesso il quadrato del cui valore assoluto fornisce una probabilità.

antimateria Ogni particella di materia ha una corrispondente antiparticella. Se si incontrano, si annichilano reciprocamente, lasciando come residuo energia pura.

atomo L'unità fondamentale della materia ordinaria: è formato da un nucleo composto di protoni e neutroni, circondato da elettroni che gli orbitano intorno.

barione Tipo di particella materiale, cui appartengono il protone o il neutrone, composta da tre quark.

big bang L'inizio denso e caldissimo dell'universo. La teoria del big bang postula che circa 13,7 miliardi di anni fa la parte dell'universo che possiamo vedere attualmente avesse un diametro di qualche millimetro soltanto. Oggi l'universo è enormemente più grande e più freddo, ma possiamo osservare le tracce di quel periodo primordiale nella radiazione cosmica di fondo a microonde che permea tutto lo spazio.

bosone Particella elementare che trasmette la forza.

bottom-up, impostazione In cosmologia, un'impostazione che si basa sul presupposto che vi sia un'unica storia dell'universo, con un punto di partenza ben definito, e che lo stato attuale dell'universo sia frutto di un'evoluzione a partire da quell'inizio.

buco nero Una regione dello spaziotempo che, a causa della sua immensa forza gravitazionale, è isolata dal resto dell'universo.

contorno, condizione di assenza di Il requisito che le storie dell'universo siano superfici chiuse prive di contorno.

costante cosmologica Un parametro che nelle equazioni di Einstein conferisce allo spaziotempo una tendenza intrinseca a espandersi.

elettrone Particella elementare materiale che ha carica negativa ed è responsabile delle proprietà chimiche degli elementi.

fase Una posizione nel ciclo di un'onda.

fermione Particella elementare materiale.

fisica classica Qualunque teoria fisica in cui si assume che l'universo ha un'unica storia ben definita.

forza elettromagnetica La seconda in ordine di intensità decrescente tra le quattro forze fondamentali. Agisce tra le particelle dotate di carica elettrica.

forza nucleare debole Una delle quattro forze fondamentali. La forza debole è responsabile della radioattività e svolge un ruolo essenziale nella formazione degli elementi all'interno delle stelle e nell'universo primordiale.

forza nucleare forte La più intensa delle quattro forze fondamentali. Trattiene protoni e neutroni

all'interno del nucleo degli atomi. Tiene insieme anche i singoli protoni e neutroni, il che è necessario perché questi sono fatti di particelle ancora più minute, i quark.

fotone Bosone che trasporta la forza elettromagnetica. Particella quantistica di luce.

galassia Un vasto sistema di stelle, materia interstellare e materia oscura che è tenuto insieme dalla gravità.

gravità La più debole delle quattro forze fondamentali. È il mezzo mediante il quale i corpi dotati di massa si attirano reciprocamente.

leggi visibili Le leggi di natura che si osservano nel nostro universo – le leggi delle quattro forze, e i parametri quali massa e carica che caratterizzano le particelle elementari – in contrapposizione alle leggi più fondamentali della teoria M che ammettono differenti universi dotati di leggi diverse.

libertà asintotica Una proprietà dell'interazione forte che fa sì che essa diventi più debole alle brevi distanze. Per questo, sebbene siano confinati nei nuclei dalla forza forte, i quark possono muoversi al loro interno quasi come se non avvertissero alcuna forza.

mesone Particella materiale composta da un quark e un antiquark.

multiverso Un insieme di universi.

neutrino Particella elementare estremamente leggera che risente soltanto della forza nucleare debole e della gravità.

neutrone Barione elettricamente neutro che con il protone forma i nuclei degli atomi.

principio antropico L'idea che si possano trarre conclusioni in merito alle leggi visibili della fisica sulla base del fatto che noi esistiamo.

principio di indeterminazione di Heisenberg Una legge della teoria quantistica che afferma che certe coppie di grandezze fisiche non possono essere note simultaneamente con precisione arbitraria.

protone Barione con carica positiva che con il neutrone forma i nuclei degli atomi.

quark Particella elementare materiale con carica elettrica frazionaria che è soggetta alla forza forte. Protone e neutrone sono entrambi composti da tre quark.

rinormalizzazione Tecnica matematica che si propone di dare un significato agli infiniti che compaiono nelle teorie quantistiche.

singularità Un punto dello spaziotempo in cui una grandezza fisica diventa infinita.

spaziotempo Uno spazio matematico i cui punti devono essere individuati da coordinate sia spaziali che temporali.

storie alternative Una formulazione della teoria quantistica in cui la probabilità di una qualsiasi osservazione è ricavata da tutte le possibili storie che avrebbero potuto portare a quell'osservazione.

supergravità Una teoria della gravità che è dotata di un tipo di simmetria chiamato supersimmetria.

supersimmetria Un sottile tipo di simmetria che non può essere associato con una trasformazione dello spazio ordinario. Una delle importanti implicazioni della supersimmetria è che particelle portatrici della forza e particelle di materia, e quindi forza e materia, sono realmente soltanto due facce della medesima cosa.

teoria delle corde (o delle stringhe) Teoria fisica in cui le particelle sono descritte come configurazioni di vibrazione dotate di lunghezza ma non di spessore o larghezza, simili a pezzi di corda infinitamente sottili.

teoria M Teoria fondamentale della fisica che è candidata al ruolo di teoria del tutto.

teoria quantistica Teoria in cui i corpi non hanno una storia unica ben definita.

top-down, impostazione L'impostazione della cosmologia in cui si ricostruiscono le storie dell'universo «dall'alto verso il basso», cioè a ritroso nel tempo dal momento attuale.

L'universo risponde a un progetto, e così anche un libro. Ma, a differenza dell'universo, un libro non compare spontaneamente dal nulla. Un libro presuppone un creatore, e tale ruolo non ricade esclusivamente sulle spalle dei suoi autori. Perciò vorremmo anzitutto dare atto della loro pazienza quasi infinita alle nostre curatrici, Beth Rashbaum e Ann Harris, e ringraziarle. Sono state nostre studentesse quando avevamo bisogno di studentesse e nostre insegnanti quando avevamo bisogno di insegnanti, ci hanno stimolato quando avevamo bisogno di stimoli. Si sono prese cura del manoscritto, e l'hanno fatto di buon grado, senza sosta, che la discussione vertesse sulla posizione di una virgola o sull'impossibilità di immergere assisimmetricamente una superficie a curvatura negativa in uno spazio piatto. Vorremmo ringraziare anche Mark Hillery, che ha cortesemente letto gran parte del manoscritto e fornito consigli preziosi; Carole Lowenstein, che tanto ha contribuito alla veste grafica; David Stevenson, che ha condotto in porto la copertina; e Loren Noveck, la cui attenzione ai particolari ci ha salvato da alcuni refusi che non avremmo voluto vedere consegnati alla stampa. A Peter Bollinger esprimiamo profonda gratitudine per le sue illustrazioni che accostano l'arte alla scienza, e per la cura con cui si è accertato dell'esattezza di ogni particolare. E a Sidney Harris, un caloroso grazie per le splendide vignette e per la grande sensibilità alle questioni che affrontano gli scienziati: in un altro universo avresti potuto essere un fisico. Siamo grati anche ai nostri agenti, Al Zuckermann e Susan Ginsburg, per il loro sostegno e incoraggiamento. Se ci sono due messaggi che ci hanno fatto pervenire regolarmente, questi sono stati: «È proprio ora di finire il libro» e «Non vi preoccupate di quando finirete, ce la farete prima o poi». Sono stati così saggi da sapere quando dire una cosa e quando l'altra. E infine il nostro grazie all'assistente personale di Stephen, Judith Croasdell; al suo aiutante per il computer, Sam Blackburn; e a Joan Godwin. Il loro è stato non solo un sostegno morale, ma anche un aiuto pratico e tecnico, senza il quale non avremmo potuto scrivere questo libro. Per di più, sapevano sempre dove trovare i migliori pub.